



Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi energetico-economica di un impianto
di essiccazione di cereali

Relatore: Ch.mo Prof. Renato Lazzarin

Correlatore: Prof. Marco Noro

Laureanda: Alice Doni

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

INDICE

SOMMARIO	1
RINGRAZIAMENTI.....	3
INTRODUZIONE	5
CAPITOLO 1	
Il fenomeno dell'autoriscaldamento	7
1.1. L'autoriscaldamento dei cereali.....	7
1.1.1. Introduzione	7
1.1.2. Descrizione del fenomeno	8
1.1.3. L'influenza del fenomeno sui diversi cereali.....	8
1.2. La prevenzione dell'autoriscaldamento	9
CAPITOLO 2	
L'aerazione del cereale insilato	11
2.1. L'impianto di ventilazione	12
2.2. Teorie per aerare i cereali	13
2.2.1. Lo studio sul frumento di Legendre.....	13
2.2.1.1. Esempi di lettura del grafico.....	14
2.2.2. Lo studio sull'aerazione di Theimer	14
2.2.2.1. Esempi di lettura della tabella	16
2.2.2.2. Regole basilari per ottenere una buona aerazione.....	17
2.3. Dinamica dell'aria di raffreddamento.....	18
2.4. Un utile esperimento di aerazione.....	19
CAPITOLO 3	
La conservazione del cereale mediante insilamento.....	23
3.1. La raccolta del mais	23
3.2. L'insilamento.....	23
3.2.1. Descrizione	23
3.2.1.1. Prima fase: la respirazione.....	24
3.2.1.2. Seconda fase: l'acidificazione	24
3.2.2. Le perdite di insilamento.....	25
3.2.2.1. Le perdite di percolazione.....	25
3.2.2.2. Le perdite di fermentazione.....	26
3.2.2.3. Le perdite di superficie	26
3.2.3. La conservazione della granella di mais con acido propionico.....	26
3.2.4. I sili.....	27
3.2.4.1. I sili verticali	27
3.2.4.2. I sili orizzontali	28

CAPITOLO 4

La conservazione mediante essiccazione	31
4.1. Introduzione all'essiccazione dei cereali	31
4.2. Dinamica dell'essiccazione	31
4.3. Principi che regolano l'essiccazione dei cereali.....	35

CAPITOLO 5

Gli impianti di essiccazione	39
5.1. Il gruppo aerotermico	39
5.1.1. Riscaldamento diretto	39
5.1.2. Riscaldamento indiretto	40
5.1.3. Combustibili usati	41
5.1.4. Sistema di circolazione dell'aria calda	41
5.1.5. Dimensionamento del gruppo aerotermico	42
5.2. Il corpo essiccante	43
5.2.1. Gli essiccatoi statici-discontinui	44
5.2.1.1. Ventilazione ascensionale.....	44
5.2.1.2. Ventilazione radiale	46
5.2.2. Gli essiccatoi continui	47
5.2.2.1. Gli essiccatoi a colonna.....	48
5.2.2.2. Gli essiccatoi a tappeto	52
5.2.2.3. Gli essiccatoi a piani orizzontali ribaltabili	53
5.3. Attrezzature complementari	55
5.4. L'importanza del raffreddamento.....	57
5.5. La tecnica della dryeration	58
5.6. Regolazioni, manutenzione e sicurezza	59
5.6.1. Regolazioni.....	59
5.6.1.1. Regolazione della temperatura dell'aria calda	59
5.6.1.2. Regolazione dell'estrazione del cereale.....	59
5.6.1.3. Regolazione del caricamento del contenitore	60
5.6.2. Manutenzione.....	60
5.6.3. Sicurezza	60
5.6.3.1. Esplosioni ed incendi.....	60
5.6.3.2. I pericoli dei parassiti e della fumigazione.....	62
5.6.3.3. Alcune regole.....	63
5.6.3.4. Mezzi per spegnere gli incendi.....	63
5.6.3.5. Altri pericoli	64

CAPITOLO 6

I parametri funzionali dell'essiccazione.....	65
6.1. Quantità di acqua da evaporare.....	65
6.2. Capacità di evaporazione dell'acqua.....	68
6.3. Volume specifico di ventilazione	71
6.4. Capacità di evaporazione dell'essiccatoio.....	72
6.5. Tempo di essiccazione	73
6.6. Potenzialità giornaliera dell'impianto.....	74
6.7. Temperatura dell'aria calda.....	74
6.8. Consumo orario e specifico di combustibile	75
6.9. Consumo termico specifico e rendimento termico totale	76
6.10. Consumo specifico di energia elettrica.....	78

CAPITOLO 7

Conteggio delle perdite di peso nell'essiccazione del cereale	79
7.1. La perdita di peso	80
7.2. Tenore in umidità dopo l'essiccazione.....	82
7.3. Tenore in umidità prima dell'essiccazione.....	82

CAPITOLO 8

Il costo di essiccazione.....	85
8.1. Formulazione del costo.....	85
8.2. Costi fissi	86
8.2.1. Ammortamento.....	86
8.2.2. Interesse	86
8.2.3. Assicurazione e tasse.....	87
8.3. Costi variabili	87
8.3.1. Azionamento	87
8.3.2. Manutenzione e riparazione	88
8.3.3. Manodopera.....	88
8.4. Analisi del costo.....	88

CAPITOLO 9

Il caso studio:	91
DONI SILVANO srl.....	91
Commercio cereali e prodotti per l'agricoltura.....	91
9.1. La situazione attuale dell'azienda	91
9.2. Motivazioni sviluppo impianto di essiccazione.....	93
9.3. Il layout aziendale	95
9.4. I prodotti.....	96

9.5. Consumi energetici	98
9.6. Il percorso del prodotto agricolo	102
9.7. L'impianto di essiccazione	104
9.7.1. Il layout dell'impianto	104
9.7.2. I fornitori	105
9.7.3. Motivazioni scelta dell'impianto.....	105
9.7.4. Il flusso del materiale nell'impianto	106
9.7.5. Introduzione all'impianto di essiccazione	109
9.7.6. Descrizione impianto di essiccazione	111
9.7.6.1. La torre di essiccazione.....	111
9.7.6.2. I sili di stoccaggio	125
9.7.6.3. Le apparecchiature complementari	131
9.7.6.4. Consumi	136
9.7.6.5. Isolamento	138
9.7.6.6. Possibili interventi migliorativi.....	138
CAPITOLO 10	
Interventi per il risparmio energetico ed economico.....	141
10.1. Introduzione	141
10.2. Installazione di uno scambiatore di calore.....	141
10.2.1. Introduzione.....	141
10.2.2. Gli scambiatori aria-aria.....	143
10.2.3. Recuperatore a piastre a flussi incrociati	144
10.2.4. Scambiatore rotativo entalpico.....	144
10.2.5. Parametri di processo.....	145
10.2.6. Analisi dell'intervento	146
10.2.6.1. Depolveratore a maniche autopulenti.....	147
10.2.6.2. Funzionamento del depolveratore.....	148
10.2.6.3. Dimensionamento dell'impianto di depolverazione	149
10.2.6.4. Costi.....	150
10.2.6.5. Problematiche dell'intervento	152
10.2.6.6. Il risparmio dato dalla prima alternativa.....	153
10.3. Intervento di cogenerazione	155
10.3.1. La cogenerazione	155
10.3.2. Incentivi e benefici per la cogenerazione ad alto rendimento	156
10.3.2.1. Titoli di efficienza energetica (TEE).....	157
10.3.2.2. Ritiro dedicato.....	158
10.3.2.3. Cogenerazione da fonti rinnovabili	159

10.3.2.4. Tariffa Onnicomprensiva	159
10.3.2.5. Certificati Verdi (CV)	161
10.3.3. Introduzione all'intervento.....	162
10.3.4. Descrizione dell'impianto di termofiocatura.....	164
10.3.4.1. Introduzione alla processo di termofiocatura	164
10.3.4.2. L'impianto dell'azienda Doni Silvano.....	166
10.3.4.3. I prodotti	168
10.3.4.4. Consumi	169
10.3.5. Introduzione all'analisi	172
10.3.6. La spremitura meccanica a freddo.....	173
10.3.7. L'olio vegetale	174
10.3.7.1. Prima alternativa: acquisto dell'olio di colza	175
10.3.7.2. Seconda alternativa: produzione dell'olio di soia	177
10.3.7.3. Confronto tra le due alternative	182
10.3.8. I tre scenari	184
10.3.9. La valutazione tecnico-economica.....	186
10.3.9.1. Scenario 1: Cogeneratore a motore a gas naturale in autoconsumo	187
10.3.9.2. Scenario 2: Cogeneratore a motore ad olio di soia in autoconsumo e vendita di Certificati Verdi	199
10.3.9.3. Scenario 3: Cogeneratore a motore ad olio di soia in Tariffa onnicomprensiva	213
10.3.9.4. Confronto tra gli scenari	218
10.3.10. Conclusioni.....	221
BIBLIOGRAFIA	223

SOMMARIO

Il tema di questo elaborato è l'essiccazione dei cereali e dei semi oleaginosi quali la soia. Il processo di essiccazione nasce per rispondere alle esigenze di conservazione di questa tipologia di prodotti, caratterizzati da una serie di problematiche legate alle loro caratteristiche chimico-fisiche.

La prima parte di questo lavoro verte sulla presentazione dei fenomeni che governano la conservazione dei cereali e delle soluzioni costruttive e di processo per l'ottenimento delle condizioni ottimali di mantenimento nel tempo dei prodotti.

Inquadrato il contesto in cui si colloca il tema discusso, inizia lo studio del processo di essiccazione. La trattazione teorica lascia spazio all'analisi di un caso studio, l'impianto di essiccazione dell'azienda Doni Silvano di Dolo (Ve). Alla prima parte descrittiva ne sussegue una seconda di tipo analitico sulle richieste elettriche e termiche dell'impianto di processo.

Valutata quindi la situazione attuale dal punto di vista tecnologico ed energetico, vengono discussi due possibili interventi migliorativi, l'inserimento di uno scambiatore di calore a valle della torre di essiccazione e l'installazione di un cogeneratore a motore. In merito a quest'ultimo, viene presentato il secondo impianto dell'azienda, un impianto di termofiocatura, che genera la domanda termica e vengono realizzati due confronti energetico-economici con l'obiettivo di trovare la soluzione economicamente più vantaggiosa. Un primo confronto tra la fornitura esterna e l'autoproduzione di olio vegetale e un secondo tra tre possibili scenari: un cogeneratore a gas naturale, un cogeneratore ad olio di soia con vendita di Certificati Verdi e un cogeneratore ad olio di soia con vendita di energia elettrica con Tariffa onnicomprensiva.

RINGRAZIAMENTI

Con la conclusione di questo percorso di studi coronato da questo elaborato, colgo l'occasione per ringraziare chi, in questi anni e in questo ultimo periodo, mi è stato vicino e ha dato un contributo più o meno grande ma comunque prezioso al raggiungimento di quello che ritengo uno dei traguardi più importanti della vita.

Innanzitutto voglio ringraziare il mio relatore Renato Lazzarin per aver accolto la mia proposta di tesi e per avermi seguito nella sua elaborazione e il mio correlatore Marco Noro per avermi guidato passo passo in questo lavoro con pazienza e dedizione.

Un grande grazie a mio cugino Fabio che mi ha permesso di avere una visione più pragmatica di quanto stessi studiando e per l'immensa disponibilità donatami.

E poi ovviamente la mia famiglia, mio padre, mia madre, mia sorella e mia nonna che tutti i giorni immancabilmente mi sono stati vicini ricordandomi che quello che stavo facendo era un arricchimento di me stessa e che dopo ogni fatica c'è una soddisfazione.

Voglio ringraziare poi Fabio, sempre pronto ad ascoltarmi e a sostenermi in modo costruttivo.

Infine un ringraziamento particolare a chi, con me, ha trascorso tante ore della sua giornata in questo dipartimento, ovvero i miei carissimi compagni di università, Barbara, Lara, Denis, Gian, Matteo, Nicolò e Pier. Ragazzi vi ringrazio perché avete reso questi anni un piacevole viaggio che porterò sempre nel cuore. Vorrei dedicare due parole ad ognuno di voi, perché tutti voi con i vostri pregi e difetti, siete stati la mia seconda famiglia in questi anni.

INTRODUZIONE

Il lavoro che verrà illustrato in questo elaborato ha come primo obiettivo quello di trattare in maniera approfondita il tema dell'essiccazione dei cereali e dei semi oleaginosi in termini di problematiche relative, dinamica di processo e soluzioni costruttive. La teoria è affiancata dallo studio di un impianto esistente di proprietà dell'azienda Doni Silvano di Dolo (Ve).

L'impresa, oltre alla vendita di prodotti per l'agricoltura, possiede due impianti di processo, un impianto di essiccazione di cereali e soia e un secondo di termofiocatura.

Il secondo importante obiettivo del lavoro è l'individuazione di possibili interventi migliorativi realizzabili ed economicamente vantaggiosi nell'azienda presa in esame. L'osservazione dell'attuale situazione ha permesso di constatare che alcune azioni migliorative sono ancora possibili.

In breve, il lavoro si è prima di tutto concentrato sulla presentazione dei fenomeni chimico-fisici legati alla conservazione dei cereali e ai due interventi necessari per un mantenimento ottimale nel tempo dei prodotti ovvero aerazione del materiale insilato o stoccato ed essiccazione dello stesso.

Si è quindi focalizzato lo studio su questo secondo argomento sia dal punto di vista impiantistico che tecnologico soffermandosi sulla valutazione dei parametri di processo.

Presentato in maniera ampia il contesto in cui si colloca l'impianto dell'azienda Doni Silvano si è presa in esame la situazione attuale, dal layout alle richieste energetiche dell'impianto.

Infine si sono valutati due interventi per il risparmio energetico: l'introduzione di uno scambiatore di calore a valle della torre di essiccazione e l'installazione di un cogeneratore a motore. Per entrambi sono state confrontate diverse soluzioni applicative dal punto di vista energetico ed economico.

Ognuno dei passi qui accennati trova ampio sviluppo nei capitoli del lavoro.

Il primo presenta il fenomeno dell'autoriscaldamento derivante dall'intensa respirazione del prodotto stoccato, l'influenza di questo fenomeno fisico sulle diverse tipologie di cereali e la prevenzione necessaria.

Fondamentale per un ottimo mantenimento dei cereali è l'aerazione, ovvero la ventilazione con aria a temperatura ambiente. Tale argomento trova sviluppo nel secondo capitolo nel quale sono presenti teorie, studi ed esperimenti sull'argomento.

Il terzo capitolo parla dell'insilamento, delle fasi chimico-fisiche subite dal prodotto immagazzinato che comportano una perdita quantitativa di materiale e dei tipi di sili, verticali ed orizzontali.

Il quarto capitolo introduce l'essiccazione dei cereali, la dinamica del processo e i principi che la regolano.

Gli impianti di essiccazione vengono descritti nel capitolo cinque. Dopo aver delineato i diversi componenti, viene presentata una possibile classificazione degli impianti. Infine viene messa in evidenza l'importanza della manutenzione e della sicurezza in questi impianti di processo che possono essere soggetti ad esplosioni ed incendi.

I capitoli sei, sette ed otto forniscono gli strumenti di valutazione del processo di essiccazione. Il primo elenca e descrive ciascun parametro funzionale, per esempio il tempo di essiccazione o il consumo orario di combustibile. Il secondo presenta una metodologia di calcolo delle perdite di peso del cereale dovute all'essiccazione del prodotto. Infine nel capitolo otto viene considerato il costo di essiccazione e viene data una formulazione e un'analisi dello stesso.

Nel capitolo nove trova spazio lo studio del caso trattato ovvero l'impianto di essiccazione dell'azienda Doni Silvano. Esso si sviluppa in tre parti, una prima descrittiva della situazione attuale dell'impresa (storia, layout, prodotti e consumi energetici), una seconda sempre descrittiva dell'impianto di essiccazione (layout, componenti e funzionamento) e una terza di tipo analitico sulle richieste elettriche e termiche dell'impianto.

Valutata la situazione attuale dal punto di vista tecnologico ed energetico, vengono infine discussi, nel capitolo dieci, due possibili interventi migliorativi, l'inserimento di uno scambiatore di calore a valle della torre di essiccazione e l'installazione di un cogeneratore a motore in azienda. In merito al secondo intervento viene presentato l'impianto di termofiocatura che genera la domanda termica e vengono realizzati due confronti energetico-economici con l'obiettivo di trovare la soluzione economicamente più vantaggiosa. Un primo confronto tra la fornitura esterna e l'autoproduzione di olio vegetale e un secondo tra tre possibili scenari: un cogeneratore a gas naturale, un cogeneratore ad olio di soia con vendita di Certificati Verdi e un cogeneratore ad olio di soia con vendita di energia elettrica con Tariffa onnicomprensiva. L'analisi dei due possibili interventi ha permesso di dichiarare la non economicità del primo e l'importante vantaggio economico del secondo. Tale vantaggio è conseguibile con tutte e tre le soluzioni presentate ma maggiore con la seconda, ovvero l'installazione di un cogeneratore ad olio di soia, prodotto dalla stessa Doni Silvano mediante spremitura meccanica a freddo, con vendita di Certificati Verdi.

CAPITOLO 1

Il fenomeno dell'auto riscaldamento

La conservazione dei cereali è un tema ampio e articolato, caratterizzato da una serie di problematiche. Per un ottimo mantenimento nel tempo di questo tipo di prodotti, in condizioni adatte al loro specifico fine, è necessario conoscerne le caratteristiche chimico-fisiche. Solo attraverso la comprensione di queste peculiarità è possibile mettere in atto quegli interventi fondamentali per l'adeguata conservazione.

L'apparente semplicità degli impianti di stoccaggio ed essiccazione cela le teorie, gli esperimenti e i risultati ottenuti dagli innumerevoli studi tenuti sul tema.



Figura 1: Diverse tipologie di cereali

La Germania della prima metà del 1900 ha visto il proliferare di pubblicazioni sull'argomento, soprattutto sulla rivista scientifica Die Muhle, di studiosi quali il professor Mohs con le sue indagini sperimentali sulla conservazione dei cereali o il professor Prandtl che per primo formulò i concetti relativi al comportamento

aerodinamico delle correnti d'aria all'interno dei sili. Questo capitolo prende in esame la problematica principale che interessa i cereali ovvero il fenomeno dell'auto riscaldamento. Esso è la chiave di lettura dei temi che saranno trattati successivamente in questo elaborato.

1.1. L'auto riscaldamento dei cereali

1.1.1. Introduzione

Nell'immagazzinamento eseguito senza rispettare opportune regole si verifica un aumento di temperatura provocato dall'intensa respirazione del cereale, favorita dall'attività di parassiti come punteruoli, acari e microrganismi.

L'auto riscaldamento dipende dall'intensa respirazione che si verifica quando si immagazzina cereale con elevato tenore d'umidità¹, ammassandolo in uno spessore

¹ Umidità del cereale: si intende il rapporto tra la massa d'acqua contenuta nella cariosside (frutto secco che, anche giunto a completa maturazione, non si apre spontaneamente per far uscire il seme, tipico della famiglia delle Graminee. È chiamato nel linguaggio comune "chicco" e "granella" nel linguaggio tecnico-pratico) e la massa totale, acqua più sostanza secca, espressa in percentuale.

troppo elevato. Questo fenomeno rappresenta il pericolo più frequente con effetti sullo stato e sull'idoneità del cereale, che può essere ostacolato con opportuni interventi.

1.1.2. Descrizione del fenomeno

Il chicco di cereale è un essere vivente che ha bisogno di respirare. Il deperimento può aver luogo per soffocamento nella propria anidride carbonica di respirazione, se non ha la possibilità di sprigionarsi e di venire eliminata mediante travaso e ventilazione. Mancando però la respirazione il cereale muore diventando preda di funghi, muffe e batteri che possono così penetrare più facilmente nelle cellule.

Indipendentemente dalla perdita di materiale che ovviamente si verificherebbe in questi casi, il cereale diverrebbe inadatto per l'alimentazione dell'uomo e del bestiame.

Quando il cereale entra in fase d'intensa respirazione, viene emesso del calore che deve poter essere ceduto all'esterno per non contribuire all'incremento della temperatura.

La respirazione in condizioni ottimali, stimolata dall'umidità, permette la crescita del germoglio. A temperatura favorevole alla germogliazione può prodursi respirazione rinforzata, e sempre alla temperatura va attribuito l'accrescimento della respirazione che provoca la formazione di acqua intramolecolare, per cui le condizioni di vita del cereale si presentano sotto un aspetto più favorevole.

Se il prodotto però non fosse sottoposto a sorveglianza si verificherebbe che la respirazione, la temperatura e l'umidità, quest'ultima in gran parte combinata di nuovo nel processo di germogliazione, continuerebbero a salire, così come l'anidride carbonica, ed il germoglio si risveglierebbe a vita; i batteri, i funghi ed i fermenti avrebbero una rigogliosa pullulazione e le sostanze nutritive, in seguito alla dissociazione, sarebbero più facilmente accessibili a punteruoli, acari e tignole.

In conseguenza dell'attività dei microbi e degli insetti la temperatura aumenterebbe ulteriormente; gradatamente si produrrebbe penuria di ossigeno ed il frutto cerealicolo finirebbe col perire soffocato nella propria atmosfera di anidride carbonica prodotta dalla sua respirazione.

1.1.3. L'influenza del fenomeno sui diversi cereali

Nel deposito si riconosce l'auroriscaldamento dal forte innalzamento della temperatura e dalla presenza di odore di stantio. Inoltre, in seguito a tale fenomeno, i chicchi assumono una colorazione brunastra più o meno intensa.

Non si verificano effetti di ripercussione qualora l'auroriscaldamento non raggiunga valori troppo elevati o non abbia tempo di influire troppo a lungo sul cereale.

Non si possono fornire dati precisi in merito a tali effetti perché i differenti cereali o tipi di una medesima varietà presentano una diversa capacità di resistenza all'influenza dell'authoriscaldamento; lo stesso dicasi per condizioni di suolo, crescita e raccolto.

L'influenza dell'authoriscaldamento sul mais rispetto agli altri cereali è inferiore per il fatto che eventuali modificazioni non comportano gravi conseguenze per i suoi scopi d'impiego, come invece accade per la segale e per il frumento.

In seguito all'authoriscaldamento una percentuale di chicchi, come poc'anzi accennato, assume colorazione bruna e presenta odore di bruciatura come fosse tostata.

Simili partite di cereale mostrano nella loro lavorazione, a seconda dell'intensità del danneggiamento, divergenze rispetto ad un prodotto sano.

Si possono però avere danneggiamenti dovuti all'authoriscaldamento senza per questo constatare la presenza di chicchi "bruciati".

1.2. La prevenzione dell'authoriscaldamento

Il cereale sano può essere immagazzinato e conservato per due o tre anni in condizioni corrispondenti alla tecnica di conservazione, senza subire perdite rilevanti nelle sue proprietà tecnico-panificabili. I cereali conservati per periodi più lunghi, 10-20 anni, sono adatti all'alimentazione dell'uomo, nella maggioranza dei casi, ripristinando il potere di panificazione col ricorso a mezzi semplici, quale l'aggiunta di malto, farina germinata ed altro.

Quando si presuppone un lungo immagazzinamento si dovrebbero trattare soltanto cereali sani, puliti e asciutti. Proprio quest'ultima caratteristica è necessaria sia per il cereale che per il deposito per evitare l'authoriscaldamento.

Nel caso di raccolto umido è indicata l'essiccazione artificiale. Il cereale secco può ritardare la moltiplicazione dei microrganismi dannosi e può essere conservato fino al momento del suo impiego, ma si trova sempre esposto ad un pericolo latente. I microrganismi che non periscono, in seguito a casi imprevisi possono moltiplicarsi enormemente, com'è loro consuetudine, e rendere inutilizzabile il cereale con la decomposizione batterica, con l'insudiciamento e con l'authoriscaldamento.

Inoltre si possono produrre i medesimi danneggiamenti dell'authoriscaldamento a partire da determinate temperature.

Allo scopo di poter conservare asciutto un cereale sufficientemente secco, anche nel deposito si deve provvedere ad un'adatta ventilazione del prodotto immagazzinato.

Con una temperatura dell'aria inferiore a quella del cereale si può ventilare in qualsiasi momento. Se la ventilazione viene invece eseguita con aria più calda occorre tener presente che la stessa, a contatto del cereale, si raffredda e di conseguenza possiede

un minor potere di ritenzione d'acqua ovvero è più facilmente saturata da essa e può cederne, ha luogo la formazione di rugiada.

L'umidità relativa² dell'aria non deve trovarsi, dopo avvenuto il suo raffreddamento sul cereale, al di sopra del 75%, perché già all'80% si può produrre la formazione di rugiada. Se si ventila con aria più calda del cereale è quindi indispensabile misurare, con l'ausilio di un igrometro, l'umidità relativa dell'aria in modo da verificare che sia sufficientemente bassa.

Si può constatare, come risulta da diverse indagini, che un cereale sano, non infestato da coleotteri e con tenore di umidità del 14%, può venire immagazzinato, senza preoccupazioni, ad una temperatura intorno ai 15 °C; se il cereale è infestato da parassiti la temperatura non deve sorpassare i 10 °C.

² Umidità relativa dell'aria: si intende la percentuale di acqua, sotto forma di vapore, presente nell'aria rispetto alla quantità massima contenibile a quella temperatura. Si parla di aria prevalentemente secca quando l'umidità relativa è bassa e di aria umida nel caso opposto. L'aria è poi satura quando tale umidità raggiunge il 100%, mentre il contenuto di vapore superiore a quello corrispondente alla saturazione (aria sovrasatura) si condensa precipitando sotto forma di bollicine d'acqua (caso della nebbia). L'umidità assoluta rappresenta invece la quantità d'acqua effettivamente presente in un chilogrammo di aria secca e viene espressa in g/kg di aria secca.

CAPITOLO 2

L'aerazione del cereale insilato

Nel capitolo 1 si è presentata la problematica più importante nella conservazione dei cereali e si è messo in evidenza come delle regole basilari di stoccaggio e ventilazione del prodotto siano fondamentali per la sua conservazione per lunghi periodi di tempo in condizioni ottimali.

A questo punto è necessario soffermarsi sul processo di aerazione, sulle modalità, sui parametri e sulle teorie che sono state formulate in merito.

Il silo ben ventilato ha la possibilità di essiccare il cereale anche contenente il 18,5% d'umidità, portandolo a tenore normale impiegando unicamente aria atmosferica come pure è possibile un efficace raffreddamento del prodotto.

Per essiccare s'impiega l'aria calda delle ore pomeridiane, per raffreddare l'aria fresca delle ore del tramonto. Il silo con ventilazione offre la garanzia di una conservazione assolutamente sana al di là delle condizioni del cereale raccolto. Infatti i processi enzimatici e le influenze parassitarie possono sopprimersi razionalmente con questa soluzione impiantistica, il parassita più dannoso, il punteruolo, non soggiorna nel cereale meccanicamente ventilato e la formazione di muffa non è realizzabile.

Il cereale, elemento igroscopico, assorbe l'umidità dell'aria quindi la ventilazione deve essere eseguita, come accennato nel capitolo precedente, in modo che nell'intera colonna cerealicola l'aria non abbia un'umidità relativa superiore al 75-80% in modo da evitare il passaggio di vapore acqueo tra aria e cereale. Inoltre quanto più elevata è l'umidità del cereale tanto più frequente dovrà essere l'aerazione del prodotto.



Figura 2: Foto dei due silo di stoccaggio dell'azienda del caso studio

2.1. L'impianto di ventilazione

Nella maggioranza dei casi si assiste alla separazione dell'impianto di ventilazione dal corpo del silo. La motivazione risiede in ragioni tecniche ma ciò ha un ulteriore vantaggio, ovvero permette di inserire l'impianto anche in sili esistenti.

I requisiti ai quali devono rispondere gli impianti di ventilazione in genere sono i seguenti:

- 1) la quantità d'aria da somministrare al cereale deve essere regolabile, in relazione alle condizioni atmosferiche;
- 2) l'aria deve poter essere riscaldata affinché la ventilazione possa, all'occorrenza, venire effettuata anche se le condizioni atmosferiche non sono favorevoli;
- 3) l'aria fresca da somministrare deve essere prelevata all'aperto;
- 4) l'aria esausta deve essere espulsa dal magazzino.

Il funzionamento dell'impianto è semplice; con piccole quantità d'aria fresca e per tempi brevi di esercizio (poche ore) si raggiunge:

- 1) un lento e graduale raffreddamento e una regolare essiccazione della massa cerealicola;
- 2) un allontanamento dei parassiti nocivi dei cereali e dell'odore di muffa;
- 3) con l'introduzione dell'ossigeno, un miglioramento dell'energia di germinazione;
- 4) una riduzione al minimo dei periodi di circolazione del cereale;
- 5) una costante conservazione fresca durante i mesi caldi perché la corrente d'aria viene insufflata durante le notti fresche.

Per ottenere il funzionamento regolare dell'impianto occorre tener conto della temperatura e della differenza d'umidità fra l'aria esterna e quella del cereale immagazzinato.

Impiegando aria si ottiene contemporaneamente un'azione essiccante perché la stessa, nel passare attraverso gli strati cerealicoli, si riscalda acquistando un potere maggiore d'assorbimento d'acqua. Sono sufficienti 2-3 ore d'esercizio per abbassare la temperatura di 3-4 °C.

Più indicato è limitare la durata della ventilazione ad un'ora al massimo mettendo sovente l'impianto in funzione infatti raffreddamento ed essiccazione sono migliori in tal caso piuttosto che in un funzionamento ininterrotto per molte ore.

Quando si costruisce un magazzino per la conservazione dei cereali, tutti i problemi relativi all'aerazione devono essere esaminati a fondo dal costruttore prima di eseguire il progetto, avendo cura di orientarsi sulle condizioni climatiche locali, e non attendere di risolverli in seguito, accingendosi a studiare l'impianto di ventilazione ultimata la costruzione.

Non si deve inoltre trascurare di evitare vicinanze sgradevoli che possono ammorbidare l'aria con polvere, umidità o cattivi odori che possono danneggiare il cereale.

2.2. Teorie per aerare i cereali

2.2.1. Lo studio sul frumento di Legendre

Il problema dello scambio di umidità tra il frumento e l'aria ambiente è stato oggetto di un interessante studio da parte di Legendre del 1936. Nel grafico da lui compilato le linee orizzontali corrispondono alle temperature dell'aria esterna (ordinate), le linee curve oblique alle temperature del frumento nel silo e le linee verticali al grado di umidità dell'aria esterna (ascisse).

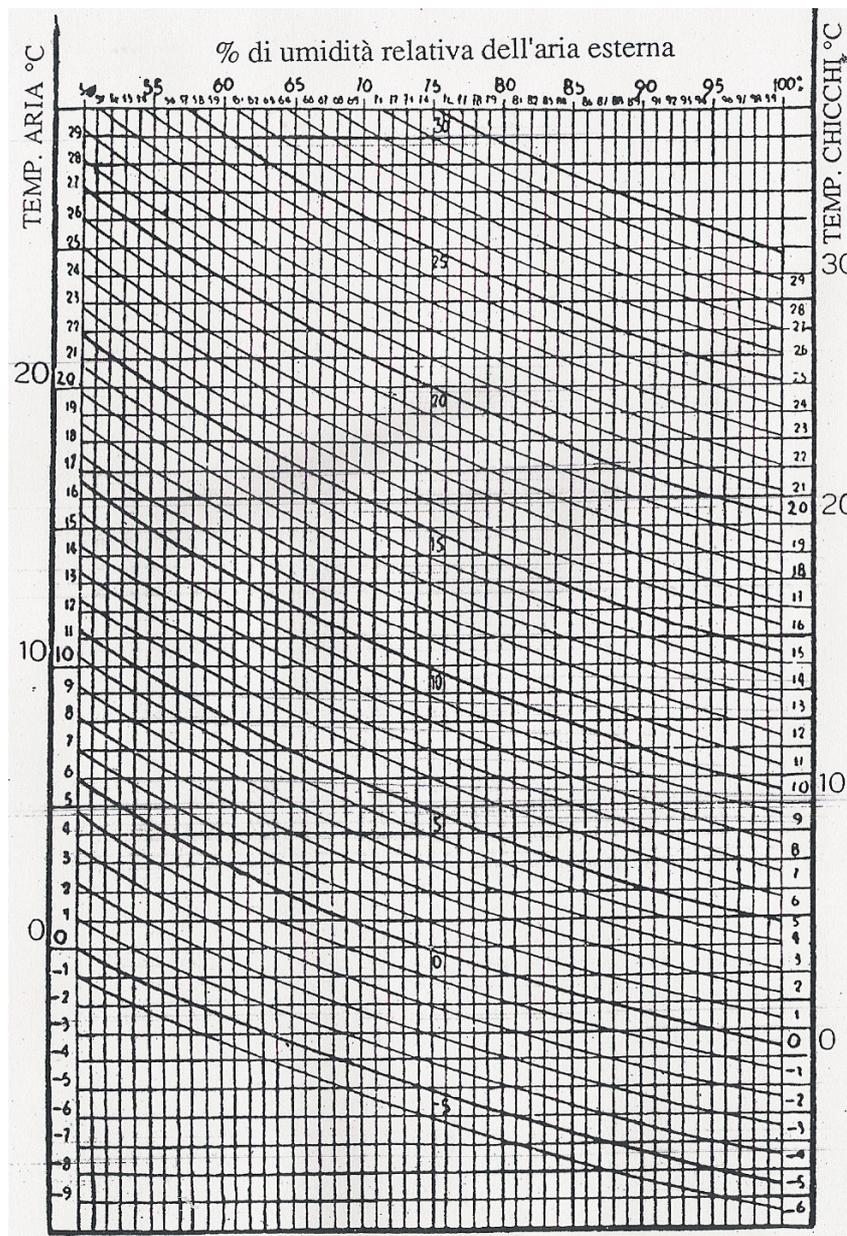


Figura 3: Grafico di Legendre: scambio di umidità tra il frumento e l'aria ambiente

Se la linea obliqua, corrispondente alla temperatura del grano, è interamente al di sopra della linea orizzontale corrispondente alla temperatura dell'aria esterna, si può arieggiare il cereale qualunque sia il grado di umidità.

Se la linea obliqua è interamente al di sotto della linea orizzontale, non si può arieggiare qualunque sia il grado di umidità.

Se le due linee si intersecano, si può arieggiare a gradi di umidità inferiore a quello del punto di incontro, ma non si può fare a gradi superiori.

2.2.1.1. Esempi di lettura del grafico

Primo esempio: aria esterna a 10 °C, frumento nel silo a 15 °C.

Si segue la linea orizzontale di 10 °C dell'aria, si cerca la linea obliqua di 15 °C del frumento: essendo quest'ultima al di sopra, si può arieggiare qualunque sia il grado di umidità dell'aria.

Secondo esempio: aria esterna a 15 °C, frumento nel silo a 18 °C.

Le due linee del diagramma si intersecano con la linea verticale 89. Non si deve arieggiare, nel caso in cui l'aria esterna abbia meno dell'89% di umidità.

Terzo esempio: aria esterna a 20 °C, frumento che comincia a ris caldarsi a 18 °C.

Le due linee si intersecano con la linea verticale 66. Si può arieggiare solo con aria esterna con umidità relativa inferiore al 66% ma, considerando che in climi come quello della pianura Padana tali condizioni termoigrometriche diurne sono tutt'altro che frequenti, di fatto non si deve arieggiare. Bisogna aspettare, per esempio, la notte seguente, se l'aria è più fresca.

2.2.2. Lo studio sull'aerazione di Theimer

L'ing.O.F.Theimer nel 1936 ha svolto un profondo studio sull'aerazione naturale dei cereali: il cereale conservato per lungo tempo in magazzino o in sili deve essere osservato e controllato nel tempo.

Secondo tale studio vi sono tre criteri che servono come indicatori guida per l'operatore:

- 1) umidità del 16% del cereale;
- 2) temperatura di 20 °C del cereale;
- 3) umidità relativa dell'80% dell'aria a contatto con il cereale.

Questi sono i tre valori indice per una corretta conservazione, se ci si allontana da essi occorre riportare il cereale alla normalità con la ventilazione.

Se l'umidità scende sotto il 16% e la temperatura sotto i 20°C si riduce rapidamente l'intensità di respirazione del cereale ed inizia il suo degrado (necessità di respirare per la sopravvivenza come visto nel capitolo 1).

Se la temperatura supera i 20 °C occorre ventilare con aria fredda fino a quando il cereale viene portato alla temperatura dell'aria esterna per evitare le conseguenze dell'autoriscaldamento.

A partire da un'umidità relativa dell'aria dell'80% cominciano a svilupparsi le muffe e i batteri e il cereale prende odore di muffa. Con l'apporto di aria esterna, il più possibile fredda e secca, si può rendere il cereale di nuovo conservabile e sano.

I valori base per una ventilazione esente da pericoli si ricavano dalla tabella di figura 4. Se si ventila con aria esterna naturale si tracciano le oscillazioni della temperatura e dell'umidità relativa. Come basi di sicurezza si deve fissare un limite massimo sul 75% per l'umidità relativa dell'aria a contatto con la massa cerealicola come più volte sottolineato.

Se, in base all'igrometro, l'aria esterna presenta un'umidità relativa superiore a quanto consente la tabella, si deve interrompere la ventilazione.

Per determinare il valore critico dell'umidità dell'aria esterna, accanto alla temperatura del cereale è importante la differenza di temperatura fra l'aria fresca e quella del cereale.

Se questa differenza è +/- 0 °C, cioè se sono uguali le due temperature, allora l'aria fresca deve avere il 75% di umidità relativa per tutte le temperature del cereale, come indicato nella parte centrale della tabella.

Se l'aria esterna è più fredda del cereale (parte sinistra della tabella), l'umidità relativa può essere superiore al 75%, perché l'aria a contatto col cereale si riscalda diventando "più secca". Partendo dalla differenza di freddo di +5°C, si può ventilare con aria saturata al 100%.

Nel caso contrario, quando l'aria esterna è più calda del cereale (parte destra della tabella) occorrono maggiori precauzioni: l'aria si raffredda a contatto col cereale, diventa "più umida", togliendo acqua alla massa insilata.

Differenza temperatura tra l'aria fresca (dell'esterno) ed il cereale in °C.																					
TEMPERATURA DEL CEREALE IN °C	Aria esterna più fredda del cereale					Aria esterna più calda del cereale															
	-5° e oltre	-4°	-3°	-2°	-1°	+1°	+2°	+3°	+4°	+5°	+6°	+7°	+8°	+9°	+10°	+11°	+12°	+13°	+14°	+15°	
	Valori massimi umidità relativa dell'aria dell'esterno, in percentuale																				
-10	-	-	98,2	89,7	82,0	75,0	68,9	62,8	57,6	52,8	48,5	44,5	40,8	37,5	34,5	31,7	29,5	27,4	25,5	23,8	22,2
-9	-	-	98,0	89,6	81,9	75,0	68,8	62,9	57,6	52,9	48,6	44,6	40,9	37,6	34,6	32,2	30,0	27,9	26,0	24,2	22,6
-8	-	-	97,8	89,5	81,9	75,0	68,8	63,0	57,8	53,1	48,7	44,7	41,0	37,8	34,9	32,7	30,5	28,4	26,5	24,7	23,0
-7	-	-	97,7	89,4	81,8	75,0	68,8	63,1	57,9	53,2	48,8	44,9	41,3	38,3	35,7	33,2	31,0	28,8	27,0	25,1	23,4
-6	-	-	97,6	89,3	81,8	75,0	68,8	63,2	58,0	53,3	48,9	45,1	41,8	39,0	36,2	33,8	31,5	29,4	27,4	25,5	23,9
-5	-	-	97,5	89,2	81,7	75,0	68,8	63,2	58,0	53,4	49,0	45,5	42,4	39,5	36,8	34,3	32,0	29,8	27,8	26,0	24,3
-4	-	-	97,2	89,1	81,7	75,0	68,9	63,3	58,1	53,5	49,7	46,3	43,0	40,1	37,4	34,9	32,5	30,3	28,4	26,5	24,7
-3	-	-	97,1	89,1	81,7	75,0	68,9	63,3	58,3	54,1	50,4	46,8	43,7	40,7	38,0	35,4	33,0	30,8	28,8	26,9	25,2
-2	-	-	97,0	89,0	81,6	75,0	68,9	63,4	58,9	54,9	51,0	47,6	44,3	41,4	38,6	36,0	33,6	31,4	29,3	27,4	25,6
-1	-	-	96,8	88,9	81,6	75,0	69,0	64,1	59,7	55,5	51,8	48,2	45,0	41,9	39,1	36,6	34,1	31,9	29,8	27,9	26,1
± 0	-	-	96,5	88,6	81,5	75,0	69,5	64,8	60,3	56,3	52,4	48,9	45,6	42,5	39,7	37,1	34,6	32,4	30,3	28,4	26,6
+1	-	-	95,4	87,7	80,8	75,0	69,7	64,9	60,5	56,5	52,6	49,0	45,8	42,8	39,9	37,3	34,9	32,7	30,6	28,6	26,8
+2	-	-	94,2	86,7	80,7	75,0	69,8	65,0	60,6	56,6	52,7	49,2	46,0	42,9	40,0	37,5	35,1	32,8	30,8	28,8	27,0
+3	-	-	93,3	86,6	80,6	75,0	69,9	65,1	60,8	56,7	52,8	49,4	46,1	43,1	40,3	37,7	35,3	33,0	31,0	29,0	27,2
+4	-	100,0	92,9	86,5	80,5	75,0	69,9	65,2	60,8	56,7	53,0	49,5	46,3	43,2	40,5	37,9	35,4	33,2	31,1	29,1	27,3
+5	-	99,6	92,8	86,4	80,5	75,0	69,9	65,2	60,8	56,8	53,1	49,6	46,4	43,4	40,6	38,1	35,6	33,3	31,3	29,3	27,5
+6	-	99,5	92,7	86,3	80,4	75,0	69,9	65,3	60,9	56,9	53,2	49,7	46,5	43,5	40,8	38,2	35,7	33,5	31,5	29,5	27,7
+7	-	99,4	92,6	86,2	80,4	75,0	70,0	65,4	61,1	57,0	53,4	50,0	46,7	43,8	41,0	38,4	36,0	33,7	31,7	29,7	27,9
+8	-	99,2	92,5	86,1	80,3	75,0	70,0	65,5	61,1	57,2	53,5	50,1	46,9	43,9	41,1	38,6	36,2	33,9	31,9	29,9	28,1
+9	-	98,9	92,3	86,0	80,3	75,0	70,0	65,5	61,2	57,3	53,6	50,2	47,0	44,0	41,3	38,7	36,3	34,1	32,0	30,1	28,3
+10	-	98,8	92,1	86,0	80,3	75,0	70,1	65,6	61,3	57,4	53,7	50,3	47,1	44,2	41,5	38,9	36,5	34,3	32,2	30,3	28,4

Differenza temperatura tra l'aria fresca (dell'esterno) ed il cereale in °C.																					
TEMPERATURA DEL CEREALE IN °C	Aria esterna più fredda del cereale					Aria esterna più calda del cereale															
	-5° e oltre	-4°	-3°	-2°	-1°	+1°	+2°	+3°	+4°	+5°	+6°	+7°	+8°	+9°	+10°	+11°	+12°	+13°	+14°	+15°	
	Valori massimi umidità relativa dell'aria dell'esterno, in percentuale																				
+11	-	98,6	92,0	86,0	80,3	75,0	70,1	65,6	61,4	57,5	53,8	50,5	47,3	44,4	41,7	39,1	36,7	34,7	32,4	30,5	28,6
+12	-	98,3	91,9	85,9	80,2	75,0	70,1	65,7	61,5	57,6	53,9	50,6	47,5	44,5	41,8	39,2	36,9	34,8	32,6	30,6	28,8
+13	-	98,2	91,8	85,7	80,2	75,0	70,2	65,7	61,6	57,7	54,0	50,7	47,6	44,7	41,9	39,4	37,1	35,0	32,7	30,8	29,0
+14	-	98,0	91,5	85,6	80,1	75,0	70,2	65,8	61,6	57,8	54,2	50,9	47,7	44,8	42,1	39,6	37,2	35,1	32,9	31,0	29,1
+15	-	97,8	91,4	85,6	80,1	75,0	70,2	65,8	61,7	57,9	54,3	51,0	47,9	45,0	42,3	39,7	37,3	35,3	33,1	31,1	29,3
+16	-	97,7	91,3	85,5	80,0	75,0	70,2	65,9	61,8	58,0	54,4	51,1	48,0	45,1	42,4	39,9	37,5	35,5	33,2	31,3	29,5
+17	-	97,6	91,2	85,5	80,0	75,0	70,3	65,9	61,9	58,1	54,5	51,3	48,2	45,3	42,6	40,1	37,7	35,6	33,4	31,5	29,7
+18	-	97,3	91,1	85,4	80,0	75,0	70,3	66,0	62,0	58,2	54,7	51,4	48,3	45,4	42,8	40,2	37,8	35,8	33,5	31,6	29,8
+19	-	97,1	91,0	85,3	79,9	75,0	70,3	66,0	62,0	58,3	54,8	51,5	48,4	45,5	42,9	40,3	38,0	35,9	33,7	31,8	29,9
+20	-	97,0	90,9	85,2	79,9	75,0	70,4	66,1	62,1	58,4	54,9	51,6	48,5	45,7	43,0	40,5	38,1	36,0	33,9	31,9	30,0
+21	-	96,8	90,8	85,2	79,9	75,0	70,4	66,1	62,2	58,4	54,9	51,7	48,7	45,8	43,1	40,6	38,3	36,1	34,0	32,0	30,2
+22	-	96,7	90,7	85,1	79,9	75,0	70,4	66,2	62,2	58,5	55,0	51,8	48,8	45,9	43,3	40,8	38,4	36,2	34,1	32,2	30,4
+23	-	96,5	90,6	85,0	79,8	75,0	70,4	66,2	62,3	58,6	55,1	51,9	48,9	46,0	43,4	40,9	38,5	36,3	34,3	32,3	30,5
+24	-	96,4	90,5	84,9	79,8	75,0	70,5	66,3	62,4	58,7	55,2	52,0	49,0	46,2	43,5	41,0	38,6	36,5	34,4	32,4	30,6
+25	-	96,3	90,4	84,9	79,8	75,0	70,5	66,3	62,4	58,8	55,3	52,1	49,1	46,3	43,6	41,1	38,8	36,6	34,5	32,6	30,8
+26	-	96,1	90,3	84,8	79,7	75,0	70,6	66,4	62,5	58,9	55,4	52,2	49,2	46,4	43,7	41,3	38,9	36,7	34,7	32,7	30,9
+27	-	96,0	90,2	84,7	79,7	75,0	70,6	66,4	62,5	58,9	55,5	52,3	49,3	46,5	43,9	41,4	39,0	36,8	34,8	32,8	31,0
+28	-	95,8	90,1	84,6	79,7	75,0	70,6	66,5	62,6	59,0	55,6	52,4	49,4	46,6	44,0	41,5	39,1	37,0	34,9	32,9	31,1
+29	-	95,7	90,0	84,6	79,6	75,0	70,6	66,5	62,7	59,1	55,7	52,5	49,5	46,7	44,1	41,6	39,3	37,1	35,0	33,0	31,2
+30	-	95,5	89,9	84,6	79,6	75,0	70,6	66,6	62,7	59,1	55,7	52,6	49,6	46,8	44,2	41,7	39,4	37,2	35,1	33,1	31,3

Figura 4: Tabella redatta dall'ing.Theimer: umidità relativa dell'aria esterna adatta alla ventilazione in funzione della temperatura del cereale e della differenza di temperatura tra l'aria fresca ed il cereale

2.2.2.1. Esempi di lettura della tabella

Primo esempio: rapporto di magazzinaggio in autunno

La temperatura dell'aria esterna è +10 °C, quella del cereale + 15°C, quindi la differenza di temperatura è -5 °C. Nel punto d'intersezione della linea 15 con la fenditura -5 °C vi è un trattino; si può senz'altro ventilare con quest'aria esterna, qualunque sia l'umidità relativa della stessa.

Secondo esempio: rapporto di magazzinaggio in autunno inoltrato

La temperatura dell'aria esterna è +10 °C, quella del cereale +12 °C, quindi la differenza di temperatura è di -2 °C. Nel punto d'intersezione della linea 12 con la fenditura -2 °C v'è il numero 85,9; l'aria esterna deve essere satura dell'86% per poter ventilare senza danni.

Terzo esempio: rapporto di magazzinaggio in inverno

La temperatura dell'aria esterna è 0 °C, quella del cereale +8 °C, quindi la differenza di temperatura è di -8 °C. La fenditura verticale per -8 °C non è compresa nella tabella, perché a partire da -5 °C si può ventilare con aria in qualsiasi condizione (non sono state inserite le intersezioni relative a questi casi favorevoli).

Quarto esempio: rapporto di magazzinaggio in primavera

La temperatura dell'aria esterna è +20 °C, quella del cereale +8 °C, quindi la differenza di temperatura è di +12 °C. Il punto di intersezione della linea 8 con la fenditura +12 °C dà 33,9; in questo caso l'aria esterna dovrebbe essere molto secca per poter effettuare la ventilazione.

Quinto esempio: rapporto di magazzinaggio in estate

La temperatura dell'aria esterna è +25 °C con umidità relativa pari al 64%, data dall'igrometro, e la temperatura del cereale è +20 °C. Nel punto di intersezione 20 con la fenditura -5 °C v'è il numero 54,9. Siccome l'aria esistente ha umidità relativa pari al 64% non si deve effettuare la ventilazione.

2.2.2.2. Regole basilari per ottenere una buona aerazione

L'aria fresca esterna deve avere un'umidità relativa al massimo del 75% dopo che ha assorbito la temperatura del cereale. Si ha così la certezza che il cereale aerato rimane sano senza produrre funghi né spore. Se l'aria fresca esterna è più fredda di 5°C rispetto al cereale si può aerare anche con aria satura al 100%.

Se il punto della riga orizzontale in tabella (temperatura del cereale) cade con la colonna verticale (differenza della temperatura tra l'aria esterna e il cereale) in un

punto d'incontro in campo libero da numeri significa che si può ventilare con qualsiasi aria perfino con umidità del 100%.

Gli strumenti necessari per il rilevamento dei dati per interpretare la tabella sono:

- termometro per la misura della temperatura dell'aria esterna;
- misuratore di umidità dell'aria fresca esterna;
- termometro per la misura della temperatura del cereale;
- termometro per rilevare la temperatura dell'aria di alimentazione;
- misuratore per controllare l'umidità dell'aria di alimentazione.

2.3. Dinamica dell'aria di raffreddamento

La questione riguardante la distribuzione della corrente d'aria all'interno del silo è stata presa in considerazione da diversi studiosi e risolta affermando che in un'insufflazione unilaterale la velocità dell'aria è massima nell'immediata prossimità dei tubi di pressione e dei rispettivi diffusori-aspiratori, mentre va decrescendo verso il lato di uscita.

L'ing. Eug. Freitzenschaft pubblicava sulla rivista scientifica tedesca Die Muhle nel 1938 una relazione sull'energia di ventilazione dei cereali che raccoglieva le seguenti considerazioni:

- a) più grandi sono le quantità d'aria che vengono condotte attraverso una determinata sezione di una colonna di cereale, tanto più alti sono la resistenza e il fabbisogno di forza per la ventilazione;
- b) il consumo di energia aumenta con l'aumentare dell'altezza della colonna di cereale; per questo motivo è importante conoscere la grandezza della resistenza, per poter determinare in anticipo le quantità d'aria in rapporto al fabbisogno di energia. Ciò è fondamentale indifferentemente che si tratti di ventilazione verticale od orizzontale del cereale;
- c) il fabbisogno di energia per la ventilazione verticale dove l'aria viene compressa e spinta dal basso verso l'alto attraverso la colonna di cereale, in conseguenza delle maggiori resistenze, è più grande rispetto alla ventilazione verticale a scompartimenti ed ai processi di ventilazione orizzontale nei quali l'aria deve seguire percorsi brevi. Nella ventilazione verticale le resistenze, a parità di sezione trasversale e di quantità d'aria, crescono con l'altezza. Il fabbisogno di energia per la ventilazione quindi sarebbe più contenuto scegliendo piccole altezze ma gli imprenditori non si fanno influenzare dalla ventilazione nella valutazione

- delle altezze, tanto più che fra i vari sistemi di aerazione si ha la possibilità di scegliere quello che meglio si adatta alle proprie condizioni;
- d) le resistenze ed il consumo di energia in questi impianti dipendono però non solo dalla quantità di aria che si vuol far passare attraverso una determinata sezione, ma anche dalla sua velocità.

La via più favorevole per introdurre aria è in orizzontale, in modo trasversale rispetto all'altezza dello strato di cereale però la soluzione verticale viene adottata in maniera più diffusa per la semplicità di realizzazione e per l'opportunità di venire messa in atto senza difficoltà negli impianti esistenti.

Negli anni sono stati poi sviluppati diversi sistemi di ventilazione, ognuno con la propria peculiarità, come per esempio il sistema "Hering" denominato anche "sistema a ventilazione alternata" che prevede il passaggio di correnti d'aria alternativamente da destra a sinistra, diagonalmente in modo alternato, oppure il sistema "Baumgartner" dove l'aerazione si effettua per soffiamento d'aria in direzione orizzontale attraverso un tubo ascendente con aperture a varie altezze.

Al di là della tipologia di sistema è però importante che venga aspirata aria fresca dall'esterno del fabbricato e non polverosa e calda dagli ambienti interni e che durante la ventilazione i tubi per l'entrata del cereale, posti superiormente al deposito, siano chiusi per far sì che l'aria in uscita dal silo attraverso il boccaporto superiore non venga a contatto col prodotto.

2.4. Un utile esperimento di aerazione

L'esperimento condotto dall'ingegnere di Monaco di Baviera J.Rank nel 1939, in un silo durante il periodo invernale, aveva lo scopo di constatare il tempo necessario per portare a bassa temperatura il cereale immagazzinato. Il silo preso in considerazione era provvisto di dispositivi per la ventilazione trasversale e di termometri a distanza, con i quali si aveva la possibilità di sorvegliare la temperatura del cereale stoccato a tre livelli di altezza.

Il compito dell'esperimento era quello di ventilare ininterrottamente per 24 ore con aria fresca il cereale immagazzinato, fortemente autoriscaldato, e rilevare ad ogni ora la temperatura dell'aria esterna e del prodotto.

L'aria esterna impiegata nella ventilazione era, in seguito al grande freddo, priva di vapore acqueo mentre nel silo, all'inizio dell'esperimento, i termometri indicavano al di sopra della tramoggia d'uscita del cereale 20 °C e nelle tre posizioni superiori del silo 19 °C.

La tabella seguente mette in evidenza i valori letti nelle 24 ore nel tratto verticale circoscritto della colonna di cereale.

Tempo ore	Tempera- tura esterna °C	Temperature del cereale °C		
		In alto	In mezzo	In basso
6	-5	19	19	20
7	-5	19	19	20
8	-6	18,1/2	19	20
9	-6	18,1/2	19	20
10	-3	18,1/2	19	20
11	-3	18,1/2	19	20
12	-2	18,1/2	19	20
13	-	-	-	-
14	-1	18	19	20
15	-2	17	17,1/2	18
16	-2	16	16,1/2	17
17	-3	15	15	16
18	-4	11	12	13
19	-4,1/2	10,1/2	11,1/2	12
20	-5	9	10	10,1/2
21	-6	7	8	9
22	-6,1/2	6	7	8
23	-7	4	5	6
24	-7,1/2	3	4	5
1	-7	2	3	4
2	-7	1	1,1/2	2,1/2
3	-7	0	1	2
4	-7	-	-	1
5	-7	-	-	-

Figura 5: Temperature rilevate esternamente e nel silo nel periodo di analisi

Osservando questi valori si era constatato quanto segue. L'aria fredda introdotta in pressione, che a mezzogiorno si riscaldava fino a raggiungere $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, doveva in un primo tempo raffreddare i canali ed i pozzi attraverso i quali passava, così pure la metà della colonna cerealicola rivolta verso la parte di entrata, asportando calore dall'edificio e dal cereale. Verso le 14 la corrente d'aria fredda arrivava a metà dell'asse della colonna di cereale avvicinandosi ai termometri ed il freddo cominciava ad esercitare la sua influenza anche sulla seconda metà della colonna cerealicola. In queste condizioni verso sera l'aria esterna, sempre più fredda, intensificava la sua azione.

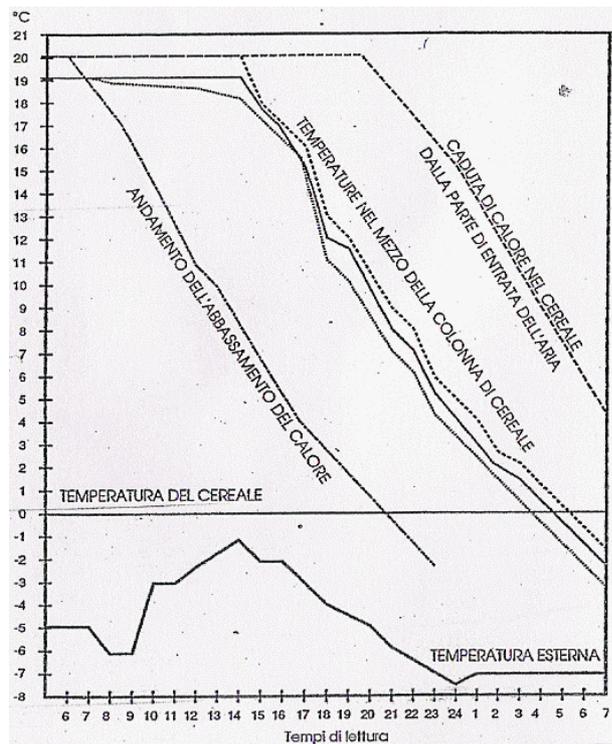


Figura 6: Rappresentazione grafica della caduta di temperatura

Il grafico di figura 6 illustra la caduta regolare di temperatura nell'asse della colonna di cereale da 18-19 °C a 0 °C.

Considerando che l'area di azione dell'esperimento aveva una capacità di 70 tonnellate di cereale e ponendo il calore specifico per il cereale uguale a 0,5 kcal/(kg K), si era trovato che l'abbassamento del calore di un grado Celsius nel contenuto cerealicolo d'esame era di $1 \times 70.000 \times 0,5 = 35.000$ kcal e l'abbassamento di 20°C quindi $20 \times 35.000 = 700.000$ kcal.

Nel corso di 24 ore erano state eliminate 700.000 kcal dal contenuto cerealicolo della zona esaminata.

Finito l'esperimento si era inoltre constatata una diminuzione del contenuto di materiale pari a 300 kg, vale a dire 0,4% di calo.

L'esperimento ha quindi dimostrato che dopo l'essiccazione è possibile estrarre ancora dell'acqua dal cereale mediante ventilazione.

CAPITOLO 3

La conservazione del cereale mediante insilamento

In questo capitolo saranno descritte le cause che hanno portato allo sviluppo di strutture di diversa natura per lo stoccaggio del cereale e la loro importanza.

Si farà riferimento principalmente al mais in quanto è il prodotto trattato in maggior misura dall'impianto del caso studio di questo elaborato.

Nell'insilamento del mais, come per gli altri cereali, c'è l'esigenza di mantenere il prodotto per il minor tempo possibile a contatto con l'aria, in modo da ridurre al minimo le perdite di respirazione, particolarmente elevate in ambienti ricchi di ossigeno, ed evitare nel contempo che eventuali piogge bagnino il prodotto nella fase di carico.

Oltre alla tempestività di carico sono fondamentali altri due aspetti, un'adeguata compressione del cumulo e un'efficace copertura dello stesso.

3.1. La raccolta del mais

La superficie di mais coltivata in Italia non è molto variata negli ultimi anni, stabilizzandosi attorno al milione di ettari.

La mietitrebbiatrice consente la raccolta della granella a maturazione cornea, la quale, secondo l'impiego o la destinazione, può essere conservata:

- all'umidità di raccolta (in sili a torre a chiusura ermetica o in contenitori di plastica sottovuoto, oppure mediante trattamento con acido propionico in normale cumulo al coperto), nel caso venga utilizzata nell'ambito dell'azienda per uso zootecnico;
- come granella secca (in magazzini o sili, previa essiccazione) se destinata alla commercializzazione.

L'epoca ottimale della raccolta meccanica del mais corrisponde ad un contenuto di umidità della granella del 24-25%.

3.2. L'insilamento

3.2.1. Descrizione

L'insilamento del mais e dei foraggi in genere è un sistema di conservazione che si basa sull'acidificazione naturale della massa fino a livelli in cui si verificano le condizioni ideali di inibizione di ogni attività batterica ed enzimatica.

I fenomeni che intervengono nel processo di insilamento possono essere ricondotti, in ordine cronologico, a due fasi principali: respirazione ed acidificazione.

3.2.1.1. Prima fase: la respirazione

La respirazione non è altro che una lenta combustione che avviene a spese degli zuccheri con formazione di CO₂ e di H₂O ed emissione di calore. Quanto più elevata è la quantità di aria contenuta nella massa, tanto maggiore è la quantità di zuccheri “bruciati” e tanto più la massa si riscalda, in funzione anche delle variazioni della temperatura e della pressione dell’ambiente esterno. Inoltre, quanto più questi scambi sono intensi e prolungati, tanto più si riducono le riserve di zuccheri del foraggio e tanto più si predispongono la massa alle fermentazioni nocive.

La presenza di CO₂, prodotta durante la respirazione, rallenta però il processo stesso fino ad arrestarlo a livelli di CO₂ del 12% circa nell’ambiente di conservazione.

3.2.1.2. Seconda fase: l’acidificazione

Con la riduzione dell’ossigeno presente nella massa insilata le cellule del foraggio sono soggette a processi autolitici³ e, contemporaneamente, si verifica la scomparsa dei microrganismi aerobi e l’attivazione delle forme anaerobiche, cioè dei batteri coli, lattici, butirrici, proteolitici.

I batteri coli (aerobi facoltativi) sono i primi ad entrare in attività quando sono in atto i processi respiratori. Sono i batteri meno pericolosi in quanto vengono inattivati attorno a pH 4,5 e a temperature superiori ai 30 °C.

I batteri lattici (aerobi facoltativi ed anaerobi) costituiscono il gruppo più importante dei microrganismi della fermentazione. Nella loro attività attaccano i carboidrati a temperature ottimali di 30-35 °C con produzione di acido lattico e conseguente aumento dell’acidità della massa fino a portarla a valori del pH di 3,8-4,2.

A questo livello di acidità tutti i processi fermentativi ed enzimatici, compresa la stessa attività dei batteri lattici, sono praticamente bloccati.

In altre parole, se la fermentazione lattica si svolge regolarmente e raggiunge entità di acido lattico del 5-8% sulla sostanza secca si viene a creare una specie di sterilizzazione della massa che consente una conservazione pressoché illimitata del foraggio.

I batteri butirrici e proteolitici sono gli agenti principali delle fermentazioni indesiderate: la fermentazione butirrica trasforma, infatti, i carboidrati in acido butirrico ed acetico, impartendo all’insilato odore sgradevole e scarsa appetibilità e può anche attaccare l’acido lattico prodottosi nell’insilato e le stesse proteine. I batteri proteolitici, invece, attaccano principalmente le proteine trasformandole in ammoniaca ed ammine.

³ Processi autolitici: processi biologici attraverso i quali le cellule si autodistruggono a causa di certi enzimi.

Entrambi questi gruppi di microrganismi vengono inibiti nel loro sviluppo e nella loro attività a livelli di pH inferiori a 4,5-4,6 e temperature inferiori a 40 °C. La loro pericolosità è dunque strettamente dipendente dalla percentuale di carboidrati e proteine presenti, risultando massima per quelle colture povere di carboidrati e ricche di proteine, quali le leguminose.

Le proteine ed i loro prodotti di degradazione agiscono, infatti, come sostanze neutralizzanti l'acido lattico, per cui, tanto più il foraggio è ricco di sostanze azotate, tanto più elevato dovrà essere il contenuto di zuccheri e la produzione di acido lattico per ottenere lo stesso livello di acidità nella massa.

Per le graminacee in genere, secondo la maggior parte degli autori, al fine di garantire un sufficiente grado di stabilità dell'insilato, il contenuto di zuccheri solubili non deve essere inferiore al 2%.

In definitiva, per garantire una buona riuscita dell'insilamento, occorre ridurre al minimo il processo di respirazione e favorire la fermentazione lattica. Per raggiungere questi obiettivi le precauzioni che si devono osservare sono:

- 1) trinciatura corta del foraggio;
- 2) insilamento effettuato con tempestività;
- 3) buona compressione della massa;
- 4) copertura a tenuta d'aria.

3.2.2. Le perdite di insilamento

Le perdite di conservazione in sili sono dovute a processi fisici, chimici, microbiologici ed enzimatici che interessano i diversi componenti del mais ed in particolare gli zuccheri. Nella massa del prodotto insilato si determinano perdite che possono essere ricondotte a:

- a) perdite di percolazione;
- b) perdite di fermentazione;
- c) perdite di superficie.

3.2.2.1. Le perdite di percolazione

Le perdite di percolazione, dovute alla fuoriuscita di acque di vegetazione dalla massa, sono tanto più sensibili quanto maggiore è l'umidità del mais e quanto maggiore è l'altezza del silo.

Le perdite di percolazione, indotte dall'azione meccanica di compattazione della massa, interessano essenzialmente le proteine, le ceneri, gli estrattivi inazotati. Oltre alla perdita di elementi nutritivi, la percolazione risulta dannosa anche per l'effetto indiretto che si determina con l'accentuazione del processo di respirazione dovuto alla

depressione che, con la percolazione del liquido, si instaura nel mais e richiama aria all'interno della massa.

In linea di massima, per mais con sostanza secca superiore al 30%, tali perdite sono però generalmente trascurabili.

3.2.2.2. Le perdite di fermentazione

Con tale termine vengono comprese sia le perdite di respirazione, sia le perdite della vera e propria fermentazione, data l'impossibilità di separare i due fenomeni: esse rappresentano la categoria predominante delle perdite totali di insilamento e la loro entità è strettamente correlata con il contenuto di sostanza secca e con la corretta esecuzione del silo.

3.2.2.3. Le perdite di superficie

Vanno attribuite a questa categoria le perdite di prodotto che si determinano in prossimità delle superfici esterne del silo per azione di muffe e microrganismi, agenti di un vero e proprio processo di putrefazione che rende inutilizzabile parte del materiale.

L'entità di tali perdite varia ovviamente con il tipo di silo, le sue dimensioni, l'entità percentuale della superficie coperta, il grado di compressione ed il tipo di copertura. In linea di massima i valori più bassi di tali perdite si registrano nei sili di tipo verticale "a tenuta", mentre risultano massime per i sili orizzontali privi di pareti di contenimento nei quali aumenta considerevolmente la superficie interessata dai fenomeni degenerativi.

Alle perdite di superficie vere e proprie vanno ancora aggiunte: le perdite per ammuffimento in vicinanza delle pareti, dovute a mancata compressione del foraggio; le perdite causate dalla penetrazione di acqua piovana per rottura del telo di copertura e per una sua non corretta sistemazione; e altre tipologie secondarie di perdite.

3.2.3. La conservazione della granella di mais con acido propionico

Per ridurre le perdite di insilamento si può ricorrere all'impiego di prodotti chimici, che possono essere distinti in: antifermentativi, acidificanti e stimolatori della fermentazione lattica. Tra questi agenti si trova l'acido propionico, utilizzato nelle aziende di piccole e medie dimensioni nella conservazione del mais in granella all'umidità di raccolta.

La stimolazione della fermentazione lattica attraverso sostanze come quella appena presentata, rappresenta uno dei mezzi più efficienti per migliorare la qualità dell'insilato e ridurre al minimo il livello delle perdite. Questo obiettivo può essere raggiunto con l'aggiunta di sostanze zuccherine (zucchero, melasso, farine di cereali), oppure con l'aggiunta di sostanze alcaline o alcalinizzanti (carbonato di calcio, ammoniaca, urea).

Con questo sistema, oltre che ridurre le perdite di insilamento, si provvede nello stesso tempo ad integrare il prodotto migliorandone la composizione.

Nell'azienda cerealicola-zootecnica di non grandi dimensioni la conservazione della granella di mais all'umidità di raccolta mediante insilamento in cumulo, previo trattamento con acido propionico, è stata adottata con qualche successo negli anni '70 ma non ha avuto grande diffusione. È comunque attuabile con una certa facilità in virtù della presenza sul mercato di apposite attrezzature per il trattamento delle cariossidi.

I risultati del trattamento sono condizionati peraltro da una corretta scelta della dose d'impiego della sostanza.

Altrettanto importante per la riuscita della fermentazione è la copertura del cumulo e il suo isolamento dalla pavimentazione onde evitare fenomeni di condensazione dell'umidità che potrebbero indurre l'insorgere di processi fermentativi.

3.2.4. I sili

I sili impiegati nella conservazione del mais possono essere sia di tipo verticale che di tipo orizzontale. In particolare il silo verticale è molto usato per la conservazione della granella secca.

3.2.4.1. I sili verticali

Vengono chiamati sili verticali o a torre quei sili la cui forma presenta sviluppata in altezza la massima dimensione.

Nei sili verticali il problema della meccanizzazione delle operazioni di carico e scarico assume un'importanza crescente all'aumentare delle dimensioni del silo. Nel caso di insilamento di granella di cereali in sili di grandi dimensioni molto valido si dimostra l'elevatore a tazze⁴ che permette il carico senza impiego di manodopera.

Per il mais raccolto in granella e sottoposto ad essiccazione vanno ricordati i sili in lamiera ondulata d'acciaio, generalmente destinati alla conservazione dei cereali essiccati, date le caratteristiche di sili "non a tenuta".

In questa tipologia, per evitare l'ingresso di aria nella struttura al momento dello scarico, in conseguenza della depressione che si viene a creare all'interno e a seguito anche delle differenze di temperature tra l'ambiente esterno ed interno, sono previsti

⁴ Elevatore a tazze: sistema di sopraelevazione nato nel XVIII. Una descrizione, redatta in "L'industria dei Molini da Grano" del 1925, afferma: "Gli elevatori a tazze si compongono di una cinghia o nastro continuo, cui sono fissati ad intervalli costanti secchielli o tazze in lamiera di ferro stagnato o zincato; il nastro è avvolto su due tamburi d'estremità, dei quali quello superiore viene azionato da un contralbero per mezzo di ingranaggi conici o cilindrici, o vite senza fine."

appositi sistemi di compensazione (valvole di pressione). Essi sono sistemi molto importanti nelle strutture in acciaio in quanto la trasmissione di calore tra i due mezzi è rilevante.

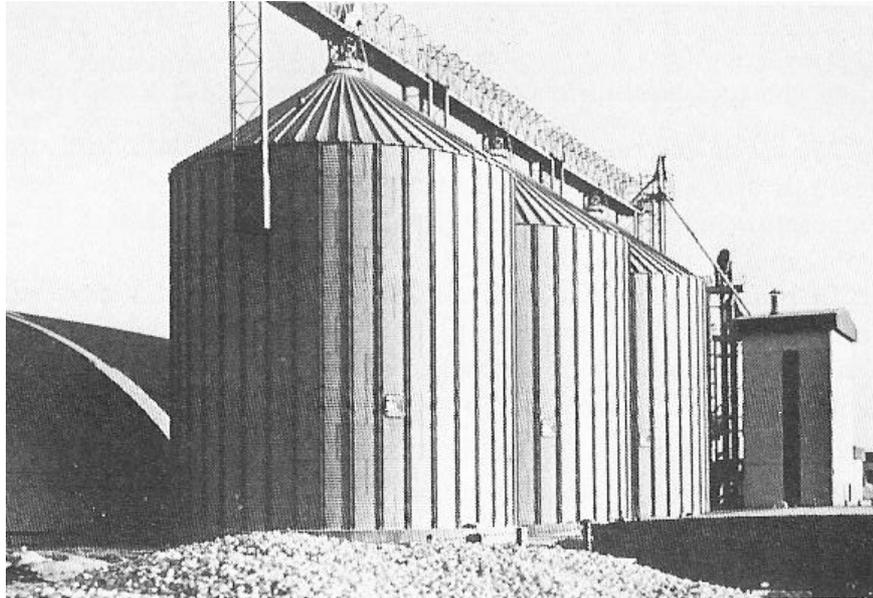


Figura 7: Sili verticali in lamiera ondulata d'acciaio

3.2.4.2. I sili orizzontali

Vengono così indicati tutti i sili che presentano la massima dimensione sul piano orizzontale. Sono normalmente distinti in:

- a) sili a fossa: completamente o parzialmente interrati;
- b) sili a platea: con pavimentazione a livello campagna senza pareti;
- c) sili a trincea: dotati di pareti.

I dettagli costruttivi di quest'ultimo tipo di sili sono numerosissimi. L'orientamento attuale è per le pareti in cemento, costruite con gettata diretta sul posto o con manufatti prefabbricati. In linea generale si può ritenere che nei sili a trincea sia necessario l'impiego del cemento armato; nel caso in cui si preveda l'impiego di terrapieni potrà essere invece sufficiente l'impiego di lastre prefabbricate di cemento non armato.

Nell'azienda del caso studio sono presenti, allo scopo di contenere il materiale in attesa dell'essiccazione, proprio questa tipologia di sili orizzontali.

Generalmente si adotta una pavimentazione a livello di campagna in calcestruzzo (armato per le grandi larghezze) su un sottofondo di ghiaia di 20-25 cm. Non esistono grossi problemi relativi al calcolo delle pendenze per l'allontanamento delle acque per i sili di altezze non superiori ai 3 m: in questo caso, infatti, la presenza di acque di vegetazione è assai limitato. Con sili di maggiore altezza, per i quali le acque di percolazione risultano più consistenti, soprattutto con mais raccolto eccessivamente

umido, è consigliabile adottare una pendenza longitudinale variabile dal 2 al 5% a seconda della lunghezza del silo.

Meno importante risulta invece la realizzazione di pendenze trasversali nella pavimentazione (verso le pareti o verso il centro) inefficaci nella maggior parte dei casi. Interessante è oggi la possibilità di ricorrere all'impiego di silo prefabbricati, i quali presentano notevoli vantaggi rispetto alle costruzioni fisse. Prevedono la possibilità di rapida installazione, di rimozione e montaggio senza licenza edilizia, e costi assai competitivi rispetto alle strutture realizzate in opera.

Sul mercato italiano sono oggi disponibili silo prefabbricati in cemento armato. È proprio a questa categoria che appartengono i silo presenti nell'azienda Doni Silvano.

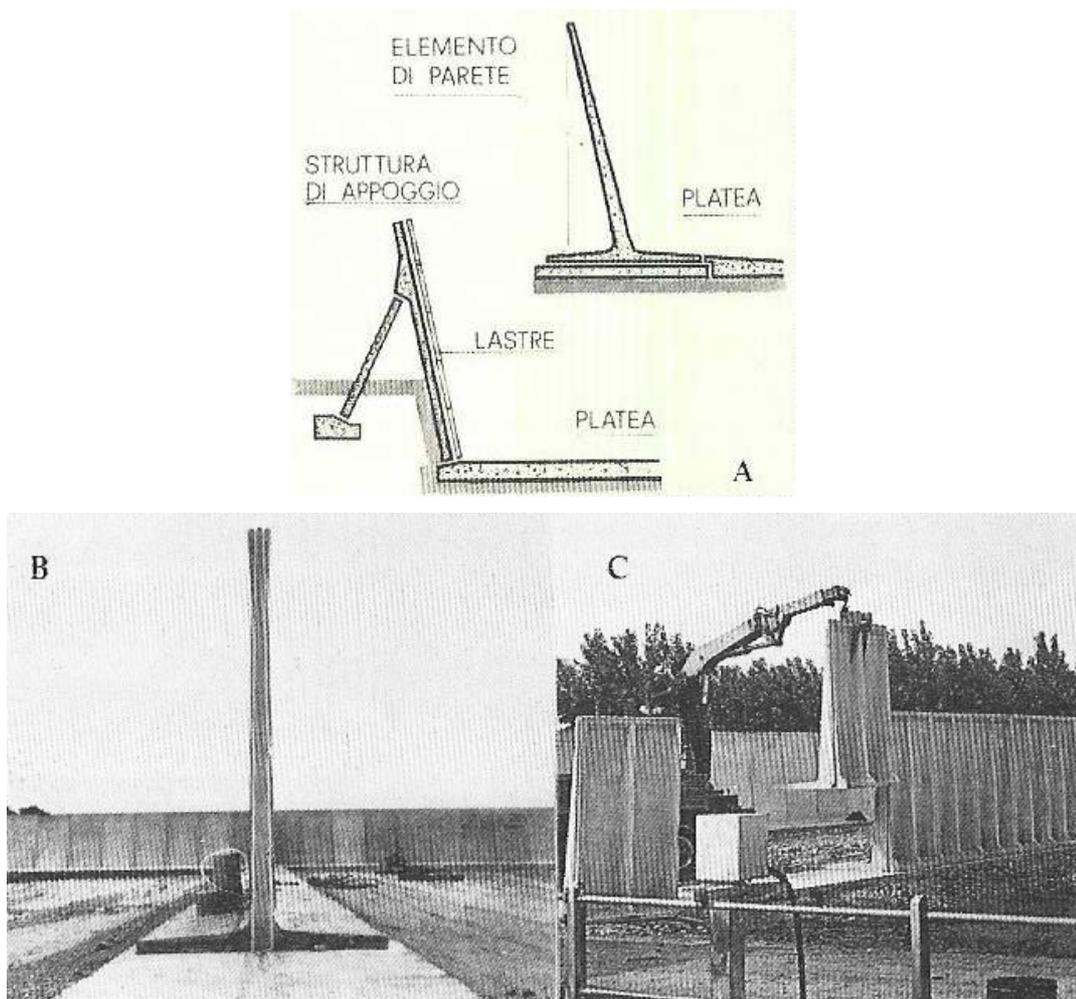


Figura 8: Struttura e montaggio dei silo orizzontali

CAPITOLO 4

La conservazione mediante essiccazione

4.1. Introduzione all'essiccazione dei cereali

L'essiccazione rappresenta il processo di asportazione dai prodotti agricoli del contenuto d'acqua in eccesso, la cui presenza favorisce l'insorgere di fenomeni fermentativi e degenerativi che impediscono la conservabilità nel tempo dei prodotti e a volte ne compromettono ogni possibilità di utilizzazione alimentare.

Nel caso dei cereali, e del mais in particolare, l'umidità all'atto della raccolta può variare da un minimo del 17-18% ad un massimo del 33-35% a seconda delle condizioni climatiche e dello stadio di maturazione del prodotto. L'acqua in eccesso deve essere rapidamente allontanata portando la granella al limite di sicurezza fissato al 13-15%. Per il mais l'umidità commerciale di riferimento, cioè a livello di contratto, è fissata nel nostro Paese al 15%, in realtà però viene richiesto un prodotto al 13% per maggiori garanzie di conservabilità, specie da parte dei mangimifici. Tale valore consente di minimizzare le perdite quantitative e qualitative, difendendo durante il periodo di stoccaggio le cariossidi dagli attacchi di microrganismi e impedendo degradazioni nei loro componenti chimici.

4.2. Dinamica dell'essiccazione

Per alcuni prodotti, quali il mais, il processo di essiccazione è artificiale e non naturale in quanto la radiazione solare nel periodo di maturazione e di raccolta non è sufficiente a far evaporare l'eccesso d'acqua, come avviene invece generalmente per i cereali estivi. Tale effetto radiante si traduce infatti in un riscaldamento dell'aria ambiente e quindi in una riduzione della sua umidità relativa che equivale a un aumento del proprio potere evaporante, ovvero l'aria è in grado di asportare facilmente l'acqua contenuta nelle cariossidi umide trasformandola in vapore. Il grado di sfruttamento del potere evaporante poi è in relazione alle condizioni di umidità del prodotto, per cui esso è nullo quando vi è equilibrio igroscopico tra l'aria ambiente e la granella sulla pianta, e non si ha quindi passaggio di acqua sotto forma di vapore dal cereale all'aria. Di qui la necessità dell'essiccazione artificiale che è in grado di realizzare lo squilibrio di tale rapporto, rendendo cioè la tensione del vapore della cariosside in corrispondenza della sua superficie esterna maggiore della tensione del vapore contenuto nell'aria con conseguente passaggio di acqua dalla cariosside all'aria.

Alla base della tecnica dell'essiccazione sta lo sfruttamento degli equilibri igroscopici tra l'umidità relativa dell'aria fatta circolare forzatamente attraverso la granella e l'umidità del prodotto.

Nel sistema "prodotto-aria" si possono verificare due casi di equilibrio:

- 1) una piccola quantità di aria si trova in presenza di una grande massa di prodotto: è il caso dell'aria che occupa gli spazi vuoti o che attraversa lentamente una grande quantità di prodotto, essa assume una temperatura uguale a quella del prodotto e una umidità relativa in equilibrio con quella del prodotto stesso;
- 2) una piccola quantità di prodotto è in contatto con una grande massa di aria: è il caso della ventilazione forzata, essa assume una temperatura uguale a quella dell'aria e la sua umidità sarà in equilibrio con l'umidità relativa dell'aria.

In pratica, se indichiamo con P_m la tensione del vapore alla superficie del prodotto da essiccare e con P_a la tensione del vapore dell'aria, si ha evaporazione, cioè passaggio di vapore acqueo dal prodotto all'aria, quando:

$$P_m > P_a$$

Per i cereali si possono quindi stabilire delle curve di equilibrio igroscopico, il cui andamento dipende soprattutto dall'umidità relativa dell'aria e dalla quantità di acqua contenuta nel prodotto, ma anche dalla temperatura dell'aria stessa e dalla composizione chimica del cereale. Questi diagrammi, ricavati sperimentalmente, per i diversi cereali danno in funzione delle caratteristiche termodinamiche dell'aria (temperatura e umidità relativa) l'umidità di equilibrio della granella in modo da potere valutare la possibilità di essiccazione con o senza riscaldamento artificiale dell'aria.

Ecco alcuni esempi di diagrammi igroscopici relativi al mais. Rappresentano le curve di equilibrio igroscopico aria-granella di mais al variare dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria e dell'umidità della granella.

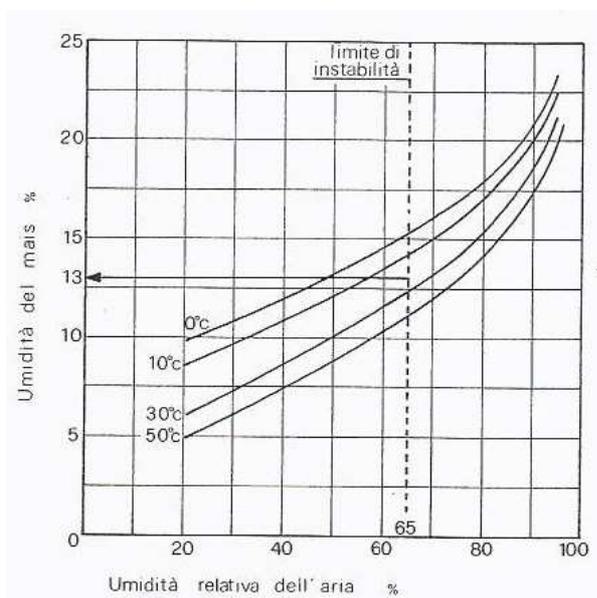


Figura 9A: Esempio di curva di equilibrio

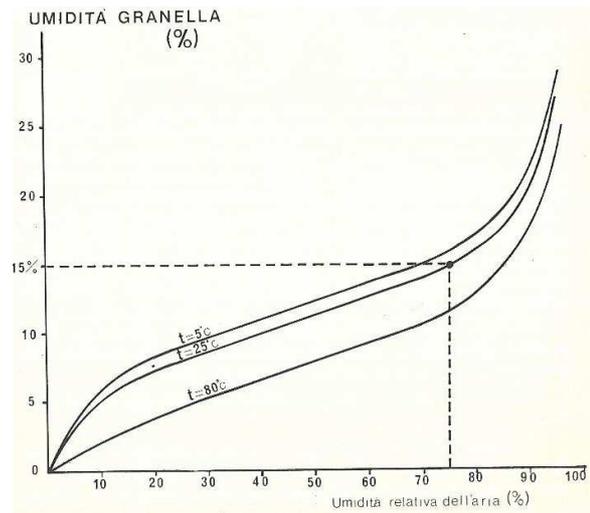


Figura 9B: Esempio di curva di equilibrio

Nel grafico di figura 9A, ad esempio, con aria a 20 °C ed umidità relativa del 65% (valore al di sotto del quale non si sviluppano microrganismi e viene bloccata l'attività degli enzimi) la granella di mais è in equilibrio igroscopico con il 13% di umidità: cioè con tale tipo di aria si sarebbe in grado con una semplice ventilazione della massa di arrivare alle condizioni di conservazione della suddetta granella.

Dalle stesse curve emerge poi che, a parità di umidità relativa dell'aria, l'umidità di equilibrio del mais aumenta al diminuire della temperatura; così con aria ambiente sempre al 65% di umidità, si può conservare il prodotto al 15,5% di umidità quando l'aria ha una temperatura di circa 0 °C. In altre parole, con il raffreddamento si possono conservare cereali ad umidità elevata senza che si presentino fenomeni di degradazione della loro sostanza.

È d'altra parte evidente che, non essendo facilmente realizzabili le condizioni fisiche dell'aria del citato esempio nella stagione di raccolta del mais (settembre-ottobre), si deve necessariamente ricorrere ad un opportuno impianto di riscaldamento dell'aria, realizzando così la vera e propria essiccazione.

La ventilazione con aria ambiente potrebbe tutt'al più essere di ausilio per la conservazione della granella nelle fasi di stoccaggio in attesa dell'essiccazione.

In proposito si è visto che è possibile conservare senza fenomeni di fermentazione la granella di mais allo stato umido per 8-10 giorni mediante ventilazione con aria ambiente insufflando un volume specifico dell'aria dell'ordine di 50-60 m³/(h•m³) di granella. È chiaro, però, che in queste condizioni si ha un elevato calo di peso nel prodotto per esaltate attività di respirazione delle cariossidi. L'attività di respirazione, peraltro, continua anche dopo l'essiccazione per cui, nonostante ogni precauzione, il peso di un cereale immagazzinato si riduce del 3-5% all'anno.

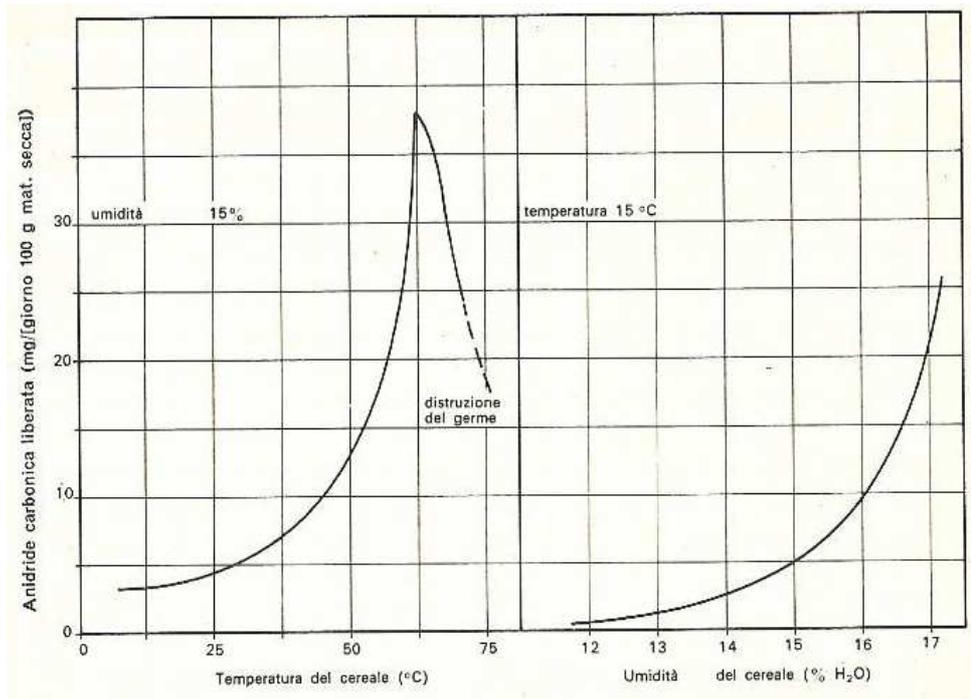


Figura 10: Peso di anidride carbonica liberato ogni giorno da 100 g di materia secca, in funzione della temperatura e dell'umidità del cereale

Nel grafico di figura 10 si sono visualizzate le interconnessioni tra l'umidità del cereale a fine essiccazione, la temperatura della massa e la produzione di CO₂, direttamente correlata quest'ultima con i processi di respirazione.

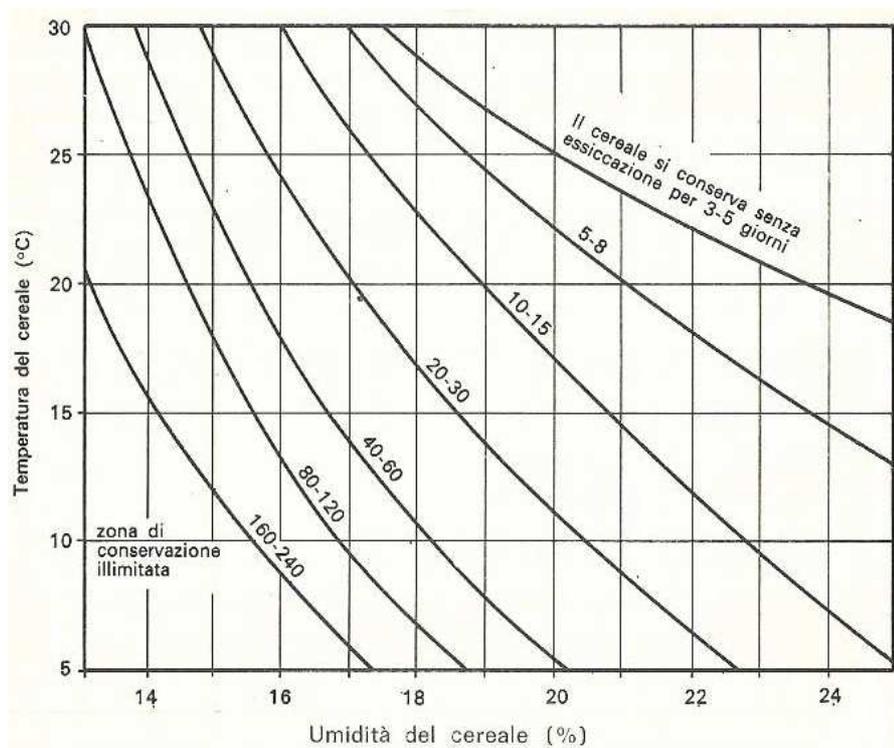


Figura 11: Influenza della temperatura e dell'umidità sul tempo di conservazione della granella

Nel grafico di figura 11 viene invece riportato l'andamento della "conservabilità" della granella in relazione alla sua umidità ed alla sua temperatura di stoccaggio. Da esso emergono chiaramente i limiti cui bisogna spingere l'essiccazione del cereale per ottenere una buona conservazione, a seconda delle temperature di stoccaggio: per le condizioni ambientali del Veneto la conservazione del mais a tempo illimitato può avvenire solo per granella essiccata ad una umidità dell'ordine del 14-15%.

4.3. Principi che regolano l'essiccazione dei cereali

Il processo di essiccazione dei prodotti agricoli è assai complesso, anche se per semplicità possiamo schematizzarlo in tre fasi:

- 1) diffusione dell'acqua dall'interno della cariosside verso la parete esterna;
- 2) asportazione di quest'acqua da parte dell'aria che circonda le cariossidi (questa fase può essere considerata come una semplice evaporazione);
- 3) evacuazione dell'aria saturata verso l'esterno della massa.

Il cereale umido introdotto nell'impianto di essiccazione ha un grado di umidità quasi uniformemente ripartito all'interno della cariosside.

La minima evaporazione dell'acqua di superficie provoca uno squilibrio tra il grado di umidità della parete esterna e quello della parete interna.

L'acqua che si trova nell'interno comincia pertanto ad avanzare verso l'esterno, cercando di ristabilire un nuovo equilibrio di umidità.

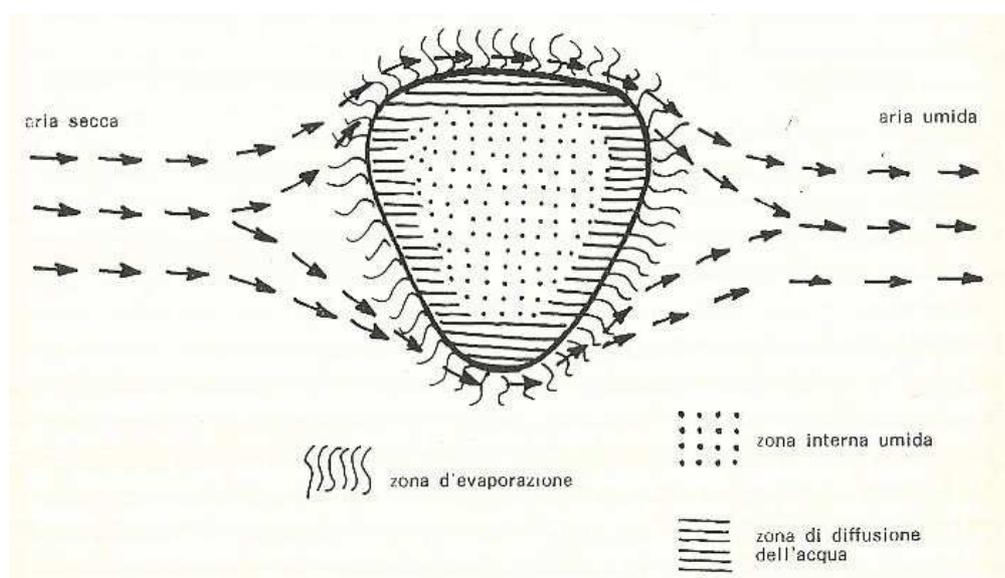


Figura 12: Schema del processo di essiccazione della cariosside di mais

L'evaporazione dell'acqua avviene facendo attraversare la massa da una corrente d'aria calda sfruttando la porosità del prodotto che può arrivare al 40%.

Essa provvede nella prima fase del processo all'asportazione dell'*acqua di imbibizione* (per il mais è la percentuale al di sopra del 27%), ovvero quella presente nelle cavità o sulla superficie del prodotto e proveniente dall'esterno sotto forma di pioggia, rugiada, nebbia. Successivamente il flusso termico va a interessare l'*acqua capillare*, detta anche *acqua di vegetazione libera*, (per il mais è compresa tra i valori del 13 e il 27%), così definita in quanto è strettamente legata, senza farne parte, alle sostanze costitutive dei grani da un'interazione molecolare di carattere fisico-chimico e localizzata all'interno del seme nei macro e micro-capillari (i micro-capillari si riempiono non solo al contatto diretto della granella con il liquido ma anche assorbendo il vapore acqueo dell'aria).

Nell'essiccazione non viene però interessata la terza forma d'acqua, quella di *costituzione* o *cellulare* (per il mais al di sotto del 13%), assorbita sulla superficie esterna delle cellule ed entrata per osmosi nel plasma cellulare. Essendo combinata con le sostanze costitutive delle cariossidi, la sua eliminazione a temperature notevolmente superiori porterebbe alla decomposizione della sostanza organica stessa.

L'acqua di imbibizione e l'acqua capillare sono facilmente eliminate, in quanto si muovono principalmente in forma liquida lungo i capillari; l'acqua cellulare, invece, è più difficile da asportare poiché, prima di poter avanzare verso la superficie esterna delle cariossidi, deve attraversare la parete della cellula. Quest'ultima interessa però meno il processo di essiccazione in quanto, come affermato in precedenza, rimane in parte nella granella come umidità residua.

Inoltre l'evaporazione dell'acqua, procedendo dagli strati interni a quelli esterni delle cariossidi, si presenta in condizioni sempre più difficili con conseguente ulteriore aumento del tempo di essiccazione e minore sfruttamento del potere evaporante dell'aria calda.

Com'è noto, l'aria è un eccellente supporto del vapore acqueo e la quantità d'acqua che può essere contenuta nell'aria dipende dalla sua temperatura e pressione. Poiché nell'essiccazione si lavora a pressione atmosferica, il potere assorbente dell'aria dipende solamente dalla sua temperatura.

Dall'andamento delle curve dell'equilibrio igroscopico cereale-aria appare evidente che, per asportare rapidamente l'acqua in eccesso dalla granella, il procedimento più sicuro è quello di insufflare nella massa del prodotto dell'aria riscaldata.

Naturalmente, se l'aria non viene tolta dalla massa da essiccare nella misura con cui essa si satura, l'essiccazione si arresta, dato che non sarà possibile evaporare nuova acqua.

Nel processo di essiccazione risulta pertanto della massima importanza:

- a) scegliere la temperatura di essiccazione tenendo conto, da una parte, della temperatura massima che il prodotto può sopportare senza che si alterino i suoi costituenti nutritivi o germinativi; dall'altra, della temperatura che consente la velocità massima di diffusione dell'acqua all'interno del prodotto;
- b) determinare il volume specifico dell'aria da insufflare, espresso in m^3/h di aria per m^3 di granella, che consente di stabilire l'equilibrio fra la velocità di diffusione dell'acqua all'interno del prodotto e la sua velocità di evaporazione, cosicché l'aria possa abbandonare la massa da essiccare sempre completamente satura d'acqua.

Come già accennato, con l'aumentare della temperatura di essiccazione si ha una maggiore capacità di evaporazione, cui corrisponde, all'inizio, una maggiore velocità di diffusione dell'acqua nelle cariossidi, che si va riducendo man mano che la temperatura aumenta.

Il campo di variabilità delle temperature di essiccazione varia notevolmente a seconda del tipo di impianto e della destinazione futura del cereale:

- per il mais da seme queste temperature non dovrebbero superare i $50\text{ }^\circ\text{C}$;
- per il mais da industria non dovrebbero superare gli $80\text{ }^\circ\text{C}$;
- per il mais da impiegare nell'alimentazione zootecnica si possono superare anche i $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Per ottenere un buon rendimento nel processo di essiccazione è necessario che il volume specifico dell'aria, nei limiti delle temperature ammesse, sia tale da consentire un equilibrio fra velocità di evaporazione e velocità di diffusione dell'acqua dall'interno verso la superficie esterna delle cariossidi. Poiché l'evaporazione dell'acqua diventa sempre più difficile man mano che si procede dalle zone più esterne a quelle interne delle cariossidi, è evidente che, a parità di volume specifico e temperatura dell'aria, la capacità di evaporazione diminuisce con il procedere dell'essiccazione, con conseguente aumento del consumo termico specifico.

Così pure, a parità di temperatura dell'aria di ventilazione, la capacità di evaporazione aumenta con l'aumentare del volume specifico dell'aria; in questo caso però il rendimento dell'impianto diminuisce per le maggiori perdite per insaturazione dell'aria all'uscita dell'impianto.

L'influenza dell'aumento del volume specifico dell'aria sulla capacità di essiccazione si nota dunque molto di più all'inizio del processo di essiccazione che non verso la fine.

Per migliorare l'andamento dell'essiccazione, a volte è opportuno procedere con il "rinvenimento" del prodotto, cioè intercalando nel processo di essiccazione fasi di non ventilazione, oppure effettuando la ventilazione con impulsi intermittenti di aria riscaldata e aria a temperatura ambiente.

CAPITOLO 5

Gli impianti di essiccazione

Gli essiccatoi per cereali si compongono essenzialmente di un gruppo aerotermico per la formazione del flusso d'aria calda, di un corpo essiccante per la realizzazione dell'evaporazione dell'acqua in eccesso, e di attrezzature complementari per l'accumulo, la pulitura, la pesatura e la movimentazione del prodotto, oltre ai dispositivi di comando e di regolazione dell'intero impianto.

5.1. Il gruppo aerotermico

Il gruppo aerotermico comprende la sorgente di calore (bruciatore e forno) e la sorgente d'aria in pressione (ventilatore).

Il bruciatore è generalmente del tipo a due stadi, nel senso che la seconda fiamma viene accesa con l'intervento di un opportuno termostato allorquando la prima è insufficiente a mantenere la temperatura dell'aria calda all'entrata nell'essiccatoio al livello prestabilito. Il forno deve sopportare temperature dell'ordine dei 1000 °C ed è dimensionato sulla base di 1 m³ per 837.000 kJ/h (= 200.000 kcal/h) di potenza termica, è talora rivestito all'interno di materiale refrattario e impiega acciai inossidabili nel caso di utilizzo di combustibili contenenti zolfo.

A seconda di come avviene il riscaldamento dell'aria si distingue in gruppo a riscaldamento diretto e indiretto.

5.1.1. Riscaldamento diretto

Nei gruppi aerotermici a riscaldamento diretto, o a fuoco diretto, i gas della combustione, opportunamente miscelati con l'aria ambiente per ridurre la temperatura, vengono aspirati dal ventilatore e introdotti all'interno della massa di granella da essiccare.

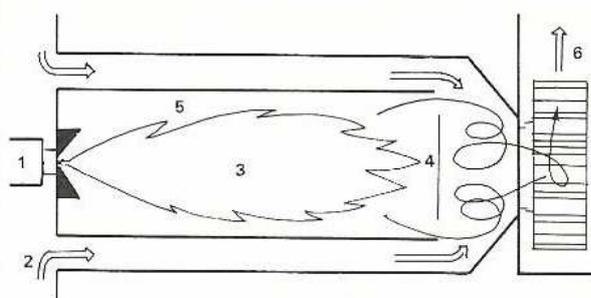


Figura 13: Schema di un generatore d'aria calda a fuoco diretto

Le indicazioni segnalano: 1, bruciatore; 2, ingresso aria ambiente; 3, fiamma; 4, prodotti della combustione miscelati con l'aria ambiente; 5, camera di combustione; 6, ventilatore centrifugo.

In questo caso è della massima importanza disporre di bruciatori ben regolati e in grado di garantire la perfetta combustione del combustibile, che deve essere solamente gas liquido o gasolio con una bassa percentuale di zolfo, inferiore all'1%.

Con queste precauzioni, per gli impianti di essiccazione del mais, è senz'altro consigliabile il riscaldamento dell'aria a fuoco diretto, che non provoca pericoli di inquinamento della granella e consente al gruppo aerotermico un rendimento molto elevato ($\eta_f = 0,95-0,98$), essendo le perdite di calore limitate al solo irraggiamento attraverso le pareti del forno, del ventilatore e dei condotti.

5.1.2. Riscaldamento indiretto

Nei gruppi aerotermici a riscaldamento indiretto invece l'aria ambiente, anziché essere miscelata con i prodotti della combustione, viene fatta passare attraverso uno scambiatore di calore a fascio di tubi all'interno dei quali circolano i fumi. La superficie di scambio viene dimensionata sulla base di 1 m^2 per 42.000 kJ/h ($= 10.000 \text{ kcal/h}$) e la sua presenza richiede notevoli costi di manutenzione in modo da limitare le perdite di calore.

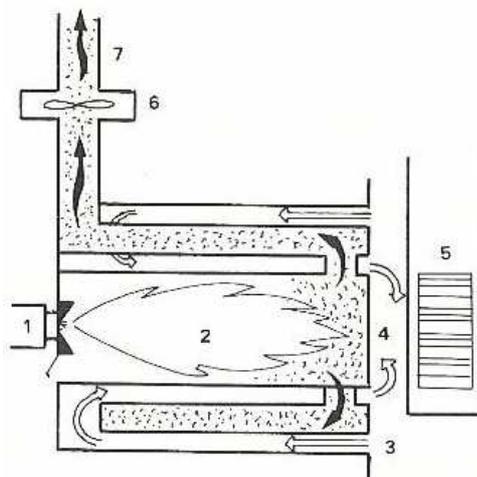


Figura 14: Schema di un generatore d'aria calda a fuoco indiretto con un percorso di andata e ritorno dell'aria all'interno dello scambiatore di calore

Le indicazioni segnalano: 1, bruciatore; 2, fiamma; 3, entrata aria ambiente, 4, uscita aria calda; 5, ventilatore centrifugo; 6, ventilatore assiale di estrazione dei fumi; 7, camino.

In questo caso il rendimento del gruppo è sensibilmente inferiore rispetto al fuoco diretto ($\eta_f = 0,85-0,90$), a causa delle perdite di calore dovute ai gas che fuoriescono

dal camino del forno. Il riscaldamento indiretto comporta, pertanto, una maggiore spesa di esercizio rispetto a quello a fuoco diretto.

I due tipi di riscaldamento a confronto

Il riscaldamento diretto risulta più economico sia nell'installazione (10-15% in meno sul costo del corpo essiccante) che nel funzionamento per il rendimento termico più elevato (0,95-0,98 contro 0,85-0,90 dello scambiatore); richiede, tuttavia, maggiore cura per garantire una perfetta combustione, anche sotto l'aspetto della salubrità dell'ambiente. Ovviamente il suo impiego non sarebbe certamente consigliabile nel caso di prodotto destinato all'alimentazione umana, in quanto si verificherebbero delle alterazioni nelle proprietà organolettiche.

5.1.3. Combustibili usati

Come combustibili vengono generalmente impiegati il gasolio e l'olio combustibile; quest'ultimo è disponibile ad un prezzo inferiore, presenta tuttavia una minore regolarità di funzionamento con depositi e incrostazioni di residui incombusti.

Nel riscaldamento indiretto si fa di solito ricorso all'olio combustibile, il che consente una economia che compensa il minore rendimento rispetto al fuoco diretto. In alcuni impianti, poi, viene impiegato gas liquido (butano) e in fase gassosa (butano, propano o gas naturale) che è caratterizzato, oltre che da una semplificazione dell'apparato di combustione, dall'assenza di incombusti solidi; per tale motivo è particolarmente indicato nel riscaldamento diretto, anche se per il deposito sono necessari grossi serbatoi in pressione.

Anche gli impianti di essiccazione sono stati oggetto in questi ultimi tempi di prove in ordine alla possibilità di impiego di combustibili alternativi meno costosi, in considerazione soprattutto del fatto che la fase di essiccazione in termini energetici incide con circa il 60% nella produzione del mais.

5.1.4. Sistema di circolazione dell'aria calda

Oltre alla usuale realizzazione con fluido in pressione a mezzo ventilatore centrifugo localizzato a valle del forno, esiste la possibilità negli impianti a colonna ermeticamente chiusi, della soluzione in depressione con ventilatore centrifugo o assiale installato in corrispondenza dell'uscita dell'aria umida, ovvero alla sommità anziché alla base della colonna.

5.1.5. Dimensionamento del gruppo aerotermico

Nel dimensionamento del gruppo termico va ricordato che il calore specifico dell'aria ⁵ può essere definito dalla relazione di Mollier:

$$Cs = (0,24 + 0,46X0) \cdot \gamma_a \quad [\text{kcal/m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}]$$

Dove:

X0 = umidità assoluta dell'aria ambiente;

γ_a = densità dell'aria alla temperatura ambiente.

Il calore specifico dell'aria, in via approssimativa e per le condizioni ambientali normali delle zone climatiche italiane, si può considerare pari a $Cs = 0,3 \text{ kcal}/(\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C})$. Ne consegue che la potenzialità termica oraria del bruciatore dovrà risultare:

$$Wh = (0,3 \cdot \Delta t \cdot V) / \eta_f \quad [\text{kcal/h}]$$

Dove:

$\Delta t = t_1 - t_0$ = gradiente termico del riscaldamento;

V = portata del ventilatore alla temperatura ambiente, in m^3/h ;

η_f = rendimento del bruciatore.

Nella maggior parte degli impianti di essiccazione dei cereali si utilizzano ventilatori di tipo centrifugo data la necessità di disporre di elevate pressioni di esercizio.

La potenza assorbita per la ventilazione può essere calcolata con la relazione:

$$E = (V \cdot H) / (3600 \cdot 102 \cdot \eta) \quad [\text{kW}]$$

Dove:

V = portata del ventilatore, in m^3/h ;

H = pressione totale d'esercizio in mm di colonna d'acqua;

η = rendimento meccanico del ventilatore (0,4-0,6).

Per una razionale scelta ed impiego dei ventilatori è dunque della massima importanza conoscere le loro curve caratteristiche, che forniscono le variazioni di pressione, potenza e rendimento al variare della portata.

⁵ Calore specifico dell'aria: le kcal necessarie per far aumentare di 1°C la temperatura di un m^3 d'aria.

5.2. Il corpo essiccante

Il corpo essiccante, o contenitore, rappresenta la parte più importante dell'impianto. Le diverse soluzioni adottate che caratterizzano il tipo di essiccatoio vengono classificate basandosi su diversi elementi:

- a) in relazione ai punti di carico o di scarico del contenitore si possono avere impianti:
 - *continui*: quando il cereale fluisce con continuità o con periodicità a brevi intervalli di tempo;
 - *discontinui*: quando il contenitore viene svuotato alla fine dell'essiccazione e nuovamente riempito di prodotto verde, in tal caso si verifica una vera interruzione nelle fasi di carico del verde e di scarico della granella secca.
- b) in riferimento alle modalità di avanzamento del prodotto nel corpo essiccante si hanno impianti a:
 - *grana statica*: quando la massa della granella introdotta non è soggetta dall'inizio alla fine dell'essiccazione ad alcun movimento;
 - *grana continua*: quando la granella procede con continuità nel contenitore;
 - *grana discontinua*: quando vi sono interruzioni nel flusso del prodotto all'interno del corpo essiccante.
- c) in ordine ai mezzi di svuotamento del contenitore si possono avere essiccatoi:
 - *a gravità*: quando il cereale scende spontaneamente lungo le diverse sezioni del contenitore;
 - *meccanici*: quando il prodotto viene fatto avanzare con sistemi meccanici;
 - *misti*: nel caso di combinazione dei precedenti sistemi di movimento.
- d) in relazione infine al processo di essiccazione si hanno essiccatoi:
 - *con rinvenimento del prodotto*: quando il cereale viene fatto sostare in sili in attesa della diffusione dell'acqua, per poi riprendere nuovamente il processo di evaporazione;
 - *senza rinvenimento*: nel caso opposto.

Ulteriori classificazioni, basate però su elementi meno importanti, sono possibili. Per esempio quelle relative al tipo di installazione (fissa o mobile), al tipo di combustibile usato, al sistema di riscaldamento dell'aria, al gruppo aerotermico se di tipo fisso o mobile, quest'ultimo per l'impiego su più contenitori.

Si considerano ora i vari tipi di corpi essiccanti partendo dalla loro forma e inserendoli nelle classificazioni sopra presentate.

5.2.1. Gli essiccatoi statici-discontinui

Sono così definiti in quanto la granella non è soggetta ad alcun movimento durante il processo di essiccazione. Tale processo è realizzato mediante ventilazione con aria calda, per una durata variabile dalle 20 alle 30 ore, a seconda delle caratteristiche funzionali e dell'umidità della granella da essiccare, e successivamente di aria ambiente fino al raffreddamento della granella stessa.

Gli essiccatoi statici possono essere di due tipi:

- a ventilazione ascensionale;
- a ventilazione radiale.

5.2.1.1. Ventilazione ascensionale

Nei tradizionali essiccatoi statici a ventilazione ascensionale la ventilazione avviene attraverso un fondo in grigliato metallico sul quale viene distribuita la granella in strati di 50-60 cm.

Questo tipo di impianti ha conosciuto un momento di grande diffusione negli anni '60, quando il basso costo di investimento e la facilità di esecuzione li rendeva estremamente interessanti presso le piccole aziende agricole.

Le difficoltà di movimentazione del prodotto e il tipo di essiccazione non perfettamente omogeneo, con differenze abbastanza sensibili tra la granella essiccata a contatto del fondo metallico e quella dello strato superiore, hanno portato via via ad un loro abbandono. Da prove condotte, il consumo termico specifico (W_s) può risultare, per normali condizioni di essiccazione, pari a 800-1.000 kcal/kg di acqua evaporata con rendimenti termici dell'ordine dello 0,66-0,56.

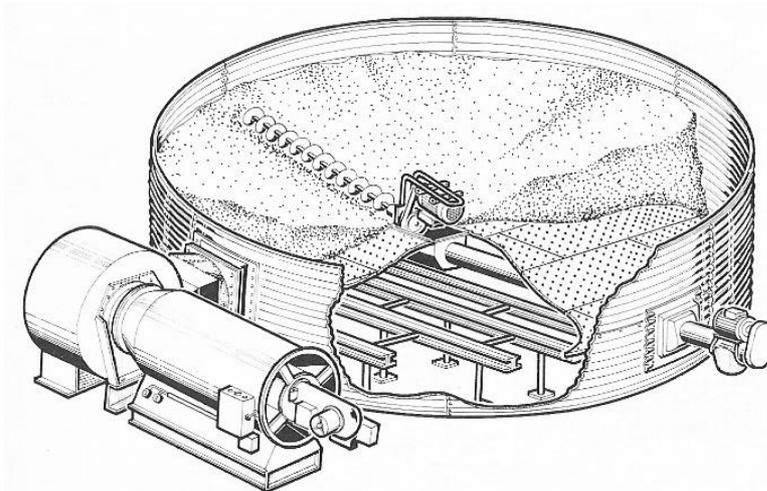


Figura 15: Impianto di essiccazione statico cilindrico a ventilazione ascensionale

La figura 15 illustra la tipologia più semplice di contenitore statico, quello caratterizzato da un cilindro metallico aperto superiormente con diametro dell'ordine di 5-8 m. Il cereale si dispone sul tappeto di lamiera forata, attraversato dal basso dalla corrente d'aria calda, con uno spessore dell'ordine del metro.

Il funzionamento che ne deriva è in questo caso discontinuo e a grana discontinua, in quanto dopo il caricamento del prodotto l'essiccazione procede staticamente fino allo scarico del cereale secco.

Le relative capacità produttive sono piuttosto limitate (200-700 quintali di mais nelle 24 ore) e l'impiego è perciò orientato verso le piccole aziende. Soluzioni ancor più economiche possono prevedere inoltre l'utilizzazione come contenitore di locali preesistenti con pareti in muratura.

Oltre che per questa categoria di essiccatoi, la ventilazione ascensionale viene sfruttata anche negli essiccatoi statici "in cumulo spesso". Questi impianti sono caratterizzati, a differenza dei primi, dalla possibilità di effettuare il carico nella cella di essiccazione con strati di cereale fino a 4 metri di altezza, in quanto nel corpo essiccante esiste l'opportunità di un rimescolamento del prodotto per mezzo di coclee⁶ verticali.

Con l'introduzione della tecnica di essiccazione "in cumulo spesso" si è avuta una sensibile evoluzione nell'essiccazione statica, che ha permesso di ovviare in parte ai problemi ad essa riconducibili quali: gli elevati tempi di essiccazione, la non completa omogeneità dell'umidità finale della granella nei diversi strati del cumulo, i fenomeni di condensazione del vapore acqueo in corrispondenza delle pareti del contenitore.

Questa tecnica ha visto poi il suo perfezionamento con l'introduzione di dispositivi cocleari di rimescolamento verticale della massa del cereale e l'applicazione di tubazioni perimetrali di ventilazione sulle pareti dell'essiccatoio. Con questo sistema di essiccazione denominato anche "in bin drying" è stato possibile adottare temperature

⁶ Coclea: non si conosce macchina più antica della Coclea di Archimede, così chiamata dal nome del grande studioso che si presume ne sia stato l'inventore; in realtà sembra che fosse già usata nell'antico Egitto per prosciugare i campi dalle inondazioni del Nilo. In origine era un tubo avvolto a spirale su un cilindro, inclinato sull'orizzontale, messo in moto rotatorio intorno al suo asse da una manovella. L'estremità del tubo è immersa nell'acqua; ruotando il cilindro, l'estremità descrive una circonferenza in un piano normale all'asse del cilindro e ad ogni giro l'estremità esce dall'acqua per poi tuffarsi di nuovo. Quando esce, la parte inferiore del tubo contiene una certa quantità d'acqua che si trova isolata dal serbatoio e che, durante la rotazione, progredisce nel tubo verso l'alto. Ad oggi il principio di funzionamento è il medesimo ma la tecnologia è diversa. La coclea può essere di diverse tipologie e dimensioni, viene utilizzata per il trasporto continuo di prodotti sfusi e può lavorare in taluni casi in verticale.

di esercizio notevolmente più elevate rispetto ai tradizionali impianti di tipo statico passando dai 50 °C ai 70-80 °C, a vantaggio della capacità oraria di essiccazione.

Dai primi dispositivi di rimescolamento ad una o due coclee si è oggi arrivati alle quattro coclee, capaci di realizzare il pressoché totale rimescolamento della massa in tempi assai più contenuti rispetto ai precedenti sistemi; a vantaggio ovviamente della qualità di essiccazione.

Le esigenze delle aziende cerealicole di medie dimensioni sono state soddisfatte raggiungendo una produttività giornaliera di 400-600 quintali. Queste aziende possono trovare in questo sistema una soluzione assai interessante, con fasi di carico dell'impianto limitate a poche ore nel ciclo di essiccazione e minori necessità di controlli rispetto agli essiccatoi continui.

L'impianto può essere sfruttato sia per ottenere elevate potenzialità giornaliere di essiccazione (400-600 q di secco nelle 24 ore, per contenitori di diametro normale, pari a 7 metri circa), lavorando ovviamente a temperature dell'aria di 70-80 °C, sia per avere medie potenzialità di lavoro, adottando in questo caso temperature dell'aria più basse (50-60 °C), che fanno migliorare i rendimenti termici dell'essiccatoio.

5.2.1.2. Ventilazione radiale

Alla categoria degli essiccatoi statici a ventilazione radiale appartengono essenzialmente due tipi di impianti: gli essiccatoi a cella cilindrica e i cosiddetti essiccatoi ad impulsi.

Sono impianti nei quali il cereale viene collocato in una zona anulare disposta attorno alla zona di ventilazione in uno strato massimo di circa 80 cm.

Operano generalmente a temperature di esercizio dell'ordine di 55-60 °C, che consentono di potenziare la capacità operativa dell'impianto e, nel contempo, garantire un'essiccazione più omogenea nei diversi strati del prodotto con disuniformità non superiore al 2-3% rispetto all'umidità media della massa.

Gli impianti cilindrici ad asse orizzontale o "ad impulsi" sono costituiti da una doppia parete esterna in rete metallica per il contenimento del cereale (spessore dello strato sui 30 cm) e un canale centrale per l'aria calda. Il funzionamento è discontinuo in quanto il contenitore viene riempito dall'alto, tramite una tramoggia, di prodotto verde che rimane statico durante l'essiccazione per poi uscire dal basso per gravità alla fine del processo.

Oltre alla tramoggia e al sottostante contenitore, l'impianto nella sua forma più completa prevede, sempre in linea verticale, una cella di raffreddamento e una tramoggia di scarico.

Il suddetto impianto è caratterizzato da un funzionamento completamente automatico che prevede brevissimi tempi di essiccazione con aria calda alternati ad altrettanti con aria ambiente insufflata da uno o più ventilatori assiali (aria calda ed aria ambiente insufflata in cicli di 15 secondi, di cui 4-8 secondi con aria calda, 7-11 secondi con aria ambiente).

Con tale principio di essiccazione si tende a provocare una rapida asportazione dell'acqua dei cereali migliorando gli equilibri che sussistono tra la velocità di diffusione dell'acqua nella granella e la velocità di evaporazione.

Si tratta quindi di un essiccatoio discontinuo, a grana discontinua, con flusso a gravità, chiamato anche a impulsi per la rapida intermittenza delle correnti d'aria calda e fredda, la prima in particolare ottenibile con l'impiego di GPL o metano.

Nel caso di impianti di grosse potenzialità (fino a 7.000 quintali al giorno), il numero di contenitori disposti uno sotto l'altro può arrivare a quattro; in tal caso l'essiccazione si sviluppa a intervalli nei vari contenitori, mentre il raffreddamento avviene sempre nella relativa cella.

Da esperienze condotte su essiccatoi a celle verticali dall'Istituto di meccanica agraria dell'Università di Padova il consumo termico specifico (Ws) può risultare, in condizioni atmosferiche favorevoli, di 1.000-1.100 kcal/kg di acqua evaporata, per toccare valori di 1.150-1.200 kcal/kg in condizioni meno favorevoli, con rendimenti rispettivamente dell'ordine dello 0,55 e 0,50.

Alla categoria degli essiccatoi statici a ventilazione radiale possono essere ricondotti anche gli essiccatoi cilindrici con corpo essiccante a forma troncoconica, per lo più di tipo carrellato, caratterizzati da una movimentazione della granella durante l'essiccazione. Negli impianti in questione, infatti, il cereale durante l'essiccazione compie un percorso discensionale all'interno della sezione anulare di essiccazione e viene riportato alla sommità con coclea. A fine essiccazione, prima dello scarico, il cereale viene infine raffreddato.

Tra gli impianti carrellati vanno annoverati anche quelli con cella di essiccazione a colonna, che possono anche funzionare come essiccatoi continui.

5.2.2. Gli essiccatoi continui

Si definiscono essiccatoi continui quegli impianti nei quali il processo di essiccazione della granella procede ininterrottamente, con introduzione del prodotto umido da una estremità dell'essiccatoio e fuoriuscita del secco dall'altra estremità.

La granella in questo tipo di essiccatoio può muoversi o con spostamenti verticali, la cui velocità verso il basso è regolata sulla base dell'umidità della granella, oppure con spostamenti orizzontali per mezzo di trasportatori meccanici.

Nel primo caso si parla di corpi essiccanti del tipo “a colonna”, dove il prodotto, disposto in strati dello spessore di 20-25 cm, scende per gravità.

Nel secondo caso il corpo essiccante è definito “a tappeto”; si tratta di impianti a piano orizzontale di essiccazione in lamiera forata sul quale viene distribuito meccanicamente uno strato di 15-20 cm di granella, che viene rimescolato e fatto avanzare verso lo scarico posteriore ad opera di agitatori a palette.

5.2.2.1. Gli essiccatoi a colonna

Tra le soluzioni costruttive adottate per gli essiccatoi a colonna vanno annoverati i seguenti tipi di impianti:

- a) *essiccatoio a colonna semplice*, nel quale il cereale scende per sola gravità senza essere soggetto a deviazione nel suo flusso. È 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 da essiccare in strati di circa 60 cm, quest'ultimo viene attraversato dalla corrente d'aria calda che esce quindi umida dalle pareti esterne della colonna. Il cereale scende lentamente per gravità con velocità regolabile e una volta giunto alla base della colonna viene convogliato tramite elevatore, che lo invia nuovamente alla sommità della colonna per riprendere il ciclo. Quando infine raggiunge l'umidità di conservazione viene definitivamente scaricato e inviato al magazzino.

Tale soluzione inquadra l'essiccatoio nei tipi discontinui, a grana continua, con flusso a gravità. L'impianto, assai semplice, presenta però alcune carenze soprattutto in relazione alla qualità dell'essiccazione, con bruciature consistenti sulla granella che scorre lungo la parete di entrata dell'aria calda;

- b) *essiccatoi a zig-zag*, così denominati per il particolare movimento a zig-zag che assume la granella nella fase di discesa lungo la colonna, tale movimento determina un continuo rimescolamento del prodotto e rende più uniforme l'evaporazione dell'acqua della massa.

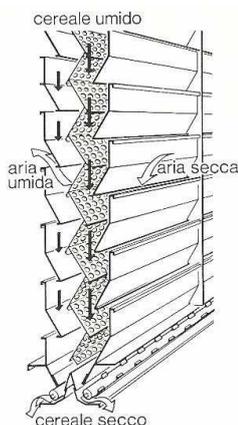


Figura 16: Particolare di una colonna verticale a zig-zag

Il numero di celle è in genere di 4 ma varia in funzione della produttività giornaliera del contenitore e l'essiccazione si completa in una sola discesa. L'essiccatoio a zig-zag viene inquadrato quindi nei tipi continui, a grana continua, con flusso a gravità.

- c) *essiccatoi a losanga (o a nido d'ape)*, nei quali la granella assume un movimento anche in questo caso a zig-zag, ma passando attraverso una serie sfalsata di canali orizzontali entro i quali viene insufflata l'aria calda.

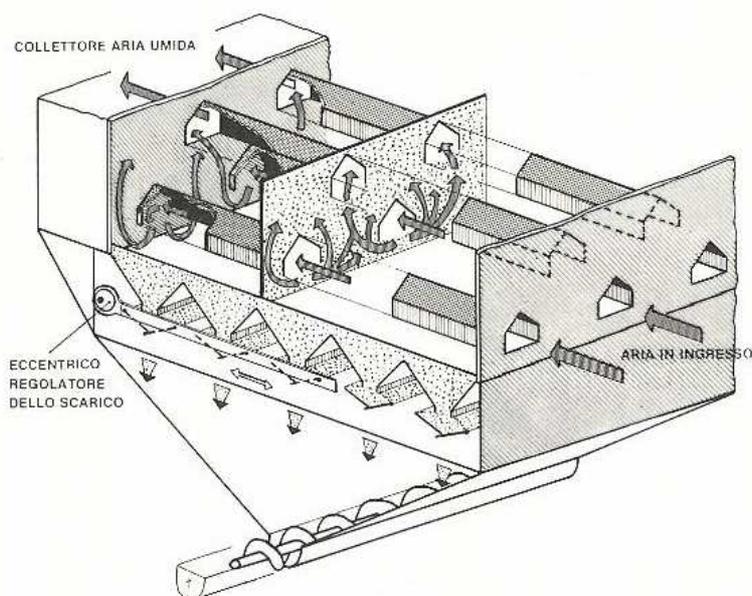


Figura 17: Schema della distribuzione dell'aria in una colonna "a losanga". L'aria calda entra da un lato della colonna (destra) per uscire dal lato opposto; dato però che il canale è chiuso su tale estremità (sinistra) essa è costretta a uscire attraverso i fori della canalizzazione per entrare nel sovrastante/sottostante canale che presenta invece l'apertura sul lato di sinistra. Con il suddetto passaggio l'aria attraversa la massa di cereale asportando parte della sua umidità in eccesso. È pure visibile nella zona inferiore il sistema di estrazione del prodotto con spostamento delle chiusure dei diversi punti di scarico tramite asta mossa da un opportuno eccentrico comandato da un dispositivo automatico

Tali impianti, che sono fra i più diffusi nel campo delle medie e specialmente alte potenzialità, sono di solito provvisti di recupero nella forma più spinta e quindi si presentano completamente chiusi all'esterno da pareti metalliche in modo da assicurare un ambiente privo di polvere. In taluni casi poi, la graduazione dell'essiccazione, anziché a livelli diversi di temperatura, può avvenire parzializzando in modo crescente la portata d'aria calda con l'abbassarsi della posizione del canale. Come pure può essere prevista una zona di preessiccazione utilizzando allo scopo l'aria di recupero della cella più bassa.

- d) *contenitori cilindrici*, nome che deriva dalla forma della colonna, realizzata con pareti di lamiera forata. Il prodotto si trova nella zona anulare periferica

(spessore dello strato sui 50 cm) e viene attraversato radialmente dal flusso termico che proviene da un condotto cilindrico centrale. Il prelevamento del prodotto avviene a mezzo coclea orizzontale, che lo invia all'elevatore, il quale può essere esterno al contenitore oppure assiale all'interno della canalizzazione dell'aria calda.

Il funzionamento è con ricircolo del cereale, quindi discontinuo, a grana continua e a gravità. Sono generalmente impianti di medio-bassa potenzialità e molto spesso mobili su carrello a ruote gommate trainato da trattore.

Per gli essiccatoi a colonna si deve ricordare infine la possibilità dell'installazione di tipo modulare, ovvero alla disposizione in parallelo di più unità analoghe anziché alla costruzione di un unico contenitore simile ma di dimensioni maggiorate per aumentare a capacità produttiva dell'impianto.

In alcune versioni poi uno stesso essiccatoio a colonna può funzionare in modi diversi: a ciclo continuo, a ricircolo (nel qual caso se è previsto il raffreddamento, esso viene attivato nell'ultima discesa mentre, in mancanza dello specifico ventilatore, l'abbassamento della temperatura della granella viene ottenuto dallo stesso gruppo soffiante dell'aria calda dopo aver spento il bruciatore), e anche statico.

5.2.2.1.1. Il recupero d'aria

Negli essiccatoi con spostamento verticale della granella generalmente si hanno in successione, dall'alto verso il basso della colonna, la zona di caricamento della granella, la zona di preessiccazione, la zona di essiccazione, la zona di omogeneizzazione e la zona di raffreddamento con aria ambiente, insufflata da ventilatore indipendente. Il raffreddamento finale viene imposto per impedire una rapida e sensibile perdita di peso per effetto dell'anidride carbonica che si libererebbe a quella temperatura, oltre che per evitare la condensazione di acqua che si avrebbe nei punti più freddi dei sili (pareti e sommità) con innesco di conseguenti fenomeni fermentativi.

In alcuni impianti le diverse zone possono trovarsi non nella stessa colonna, ma in colonne contigue; in questo caso il prodotto viene convogliato da una colonna all'altra tramite trasportatori a tazze o coclee.

A seconda che l'aria calda a contatto con la granella venga direttamente espulsa o recuperata, abbiamo essiccatoi "*senza recupero d'aria*" ed essiccatoi "*con recupero d'aria*". Questi ultimi sono impianti tesi al raggiungimento di elevati rendimenti termici sfruttando al massimo il potere evaporante dell'aria calda nonché il recupero del calore assorbito dall'aria di raffreddamento. L'aria che fuoriesce dalla zona di

omogeneizzazione non completamente satura (alla temperatura di 40-45 °C e all'umidità del 50-55%) viene recuperata ed introdotta nella zona di preessiccazione da dove fuoriesce completamente satura. Viene inoltre recuperato il calore assorbito dall'aria nella zona di raffreddamento.

L'aria in uscita dalla zona di alta temperatura, essendosi praticamente saturata, viene evacuata dalla colonna mentre le altre vengono recuperate (in modi diversi a seconda delle soluzioni adottate dalle case costruttrici) miscelandosi con l'aria ambiente all'interno del forno: in tali impianti a recupero cioè, il riscaldamento non affinisce esclusivamente all'aria esterna ma anche a una parte di aria precedentemente riscaldata che dispone di un contenuto termico che non deve essere disperso. Con tale procedimento si realizza, oltre a un consistente risparmio termico, una graduale e uniforme essiccazione della cariosside e un miglioramento notevole della qualità del prodotto essiccato. Si potrebbero inoltre accettare, senza pericoli di alterazioni organolettiche, temperature dell'aria calda anche di 100-110 °C, dato che la granella viene a contatto con le temperature più elevate progressivamente, man mano che procede nella fase di essiccazione.

5.2.2.1.2. Parametri funzionali

La velocità di essiccazione, cioè del flusso del prodotto all'interno delle colonne di essiccazione, viene determinata da un sistema di controllo a regolazione automatica dei dispositivi di scarico della cella, che possono essere a coclea, a saracinesca a moto alternativo oppure a tramoggia con scarico intermittente.

La funzionalità degli essiccatoi continui dipende soprattutto dai volumi specifici d'aria utilizzati, parametro questo che condiziona sia la durata dell'essiccazione, sia il rendimento termico dell'impianto: con volumi specifici di ventilazione variabili da 2.000 a 4.000 m³/h per m³ di granella si ha una essiccazione lenta (8-10 ore) con buoni rendimenti termici; con volumi specifici di ventilazione variabili da 4.000 a 6.000 m³/h per m³ di granella il tempo di essiccazione diminuisce sensibilmente (3-8 ore) con un rendimento termico abbastanza accettabile; oltre 6.000 m³/h per m³ di granella l'essiccazione diventa rapida (2 ore circa), ma i rendimenti termici risultano molto bassi, a causa delle perdite riconducibili essenzialmente all'insaturazione dell'aria in uscita dall'impianto.

Assai indicativi, a conferma di quanto sopra, sono i risultati delle prove effettuate presso l'Istituto di meccanica agraria dell'Università di Padova su due impianti di essiccazione, uno con corpo essiccante a losanga e a recupero d'aria ed uno a colonna semplice. Su questi impianti si è operato con una temperatura di essiccazione di 80 °C, in condizioni ambientali normali (temperatura media dell'aria 18 °C, umidità

relativa media 85%) e su mais con il 28% di umidità. I risultati, riportati nella tabella di figura 18 mettono chiaramente in evidenza i migliori rendimenti termici ottenibili con l'essiccatoio a recupero d'aria ed inoltre permettono di individuare nel volume specifico di 5.000 m³/h per m³ di granella le migliori prestazioni in relazione sia alla capacità di essiccazione che al rendimento termico.

Tipi di impianto (temperatura di essiccazione 80 °C)	Acqua evaporata (q) (g/m ³ aria)	Consumo termico specifico (Ws) (Kcal/kg H ₂ O)	Rendimento dell'impianto (η t)
A) Essiccatoio a losanga con recupero d'aria e volume specifico d'aria di:			
— 2500 m ³ /h · m ³	16-17	1190-1120	0,5-0,53
— 5000 »	14-15	1360-1270	0,43-0,46
— 7500 »	12-13	1390-1470	0,37-0,40
B) Essiccatoio a colonna semplice senza il recupero dell'aria e volume specifico d'aria di:			
— 2500 m ³ /h · m ³	14,5-15,5	1320-1230	0,45-0,48
— 5000 »	12,5-13,5	1530-1420	0,39-0,42
— 7500 »	10,5-11,5	1820-1660	0,32-0,35

Figura 18: Rendimenti termici di essiccatoi con e senza recupero dell'aria (sintesi dei risultati di alcune prove effettuate dall'Istituto di meccanica agraria dell'Università di Padova)

5.2.2.2. Gli essiccatoi a tappeto

Questo tipo di corpo essiccante è completamente diverso da quello a colonna, è costituito da due piani fissi orizzontali sovrapposti in lamiera sui quali viene distribuito il cereale.

Il movimento del prodotto sul piano superiore avviene con un trasportatore a catena con spranghe trasversali con funzionamento intermittente sincronizzato con il gruppo alimentatore, che è rappresentato da una tramoggia posta ad un'estremità del piano.

All'estremità opposta il cereale cade sul piano sottostante ed è fatto avanzare con un continuo rimescolamento da una coppia di agitatori a palette rotanti, ciascuno dei quali opera su metà lunghezza del piano, sempre in sincronismo con l'apparato di alimentazione; prima dell'uscita poi, la granella subisce un raffreddamento essendo investita dal basso da un'opportuna corrente d'aria. L'essiccazione si realizza sul piano inferiore dove lo strato di prodotto (sui 30-35 cm) viene attraversato dal basso dalla corrente d'aria calda, che passa poi attraverso lo strato (sui 15 cm) del piano superiore ivi determinando una preessiccazione del cereale.

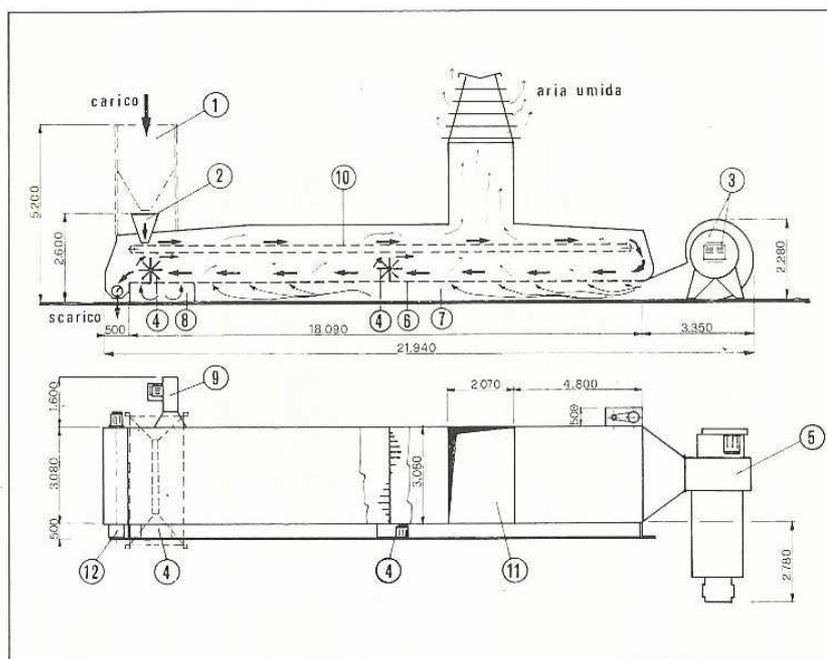


Figura 19: Schema di essiccatore a doppio tappeto

Le indicazioni segnalano: 1, tramoggia supplementare; 2, tramoggia di carico; 3, gruppo aerotermico; 4, agitatore; 5, ventilatore di aria calda; 6, piano di essiccazione; 7, canalizzazione dell'aria calda; 8, camera di raffreddamento; 9, ventilatore dell'aria di raffreddamento; 10, tappeto mobile di riscaldamento e preessiccazione; 11, camino di uscita dell'aria umida; 12, coclea di scarico. Le dimensioni indicate sono espresse in millimetri.

Si tratta quindi di un impianto continuo a grana continua, con movimento meccanico del cereale, senza rinvenimento del prodotto, con potenzialità variabile da circa 500 a 3.000 quintali di mais umido nelle 24 ore; esso è caratterizzato anche da una polivalenza di impiego per la possibilità di operare, previa sostituzione del solo apparato di alimentazione, sui foraggi qualificandosi in tal caso come disidratatore a bassa temperatura.

5.2.2.3. Gli essiccatoi a piani orizzontali ribaltabili

Tra i sistemi continui di tipo orizzontale troviamo anche gli essiccatoi a piani orizzontali ribaltabili. Tali impianti sono costituiti da una serie di piani orizzontali sovrapposti, composti da un insieme di telaini ribaltabili in rete metallica. Il prodotto scende da un piano a quello sottostante in tempi prefissati in funzione dell'umidità del prodotto, mediante un dispositivo automatico che ne comanda il ribaltamento procedendo dal piano più basso di scarico a quello più alto di caricamento.

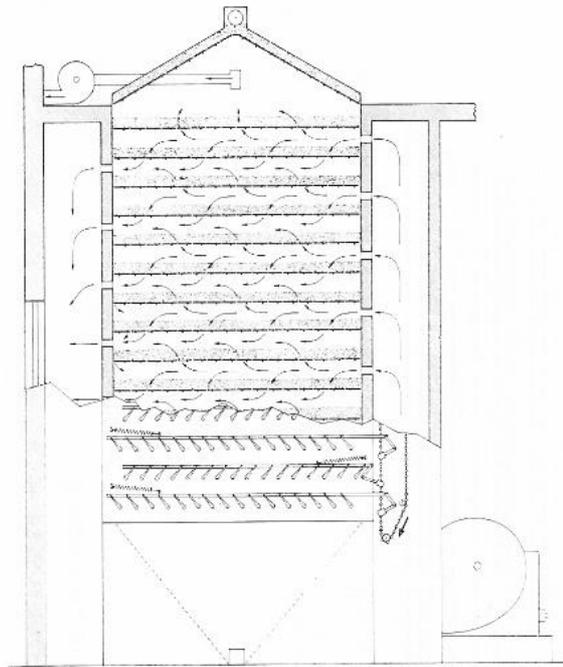


Figura 20: Sezione di un contenitore a piani orizzontali ribaltabili: l'aria calda entra dal lato destro ed esce dalla parte opposta dopo aver attraversato i piani del cereale. Sulla destra è visibile la catena per il ribaltamento dei piani.

L'aria calda sale da un condotto verticale adiacente ai piani, che presenta delle aperture poste in corrispondenza del vano creato tra due piani successivi e in numero eguale alla metà dei piani. Dalla parte opposta invece un secondo camino richiama l'aria umida che si scarica attraverso altrettante finestre sfalsate rispetto alle precedenti, l'aria calda è così costretta ad attraversare gli strati di prodotto (spessore dell'ordine di 13-14 cm) posti sui piani. Generalmente l'impianto è a due colonne di piani disposte in serie per cui all'uscita dalla prima serie il cereale può andare a dei sili di rinvenimento, per poi riprendere la discesa sull'altra colonna.

Tale essiccatoio rientra quindi nei tipi continui, a grana discontinua, con sistema misto di movimento del prodotto e con o senza rinvenimento, a seconda se siano inclusi o meno relativi sili di riposo.

Esso è poi quasi esclusivamente indicato per l'essiccazione del riso potendo lavorare nelle 24 ore sui 700-900 quintali di prodotto verde con una spesa energetica dell'ordine di 4.500 kJ (= 1.075 kcal) per chilogrammo di acqua, corrispondenti a un rendimento termico del 55%.

5.3. Attrezzature complementari

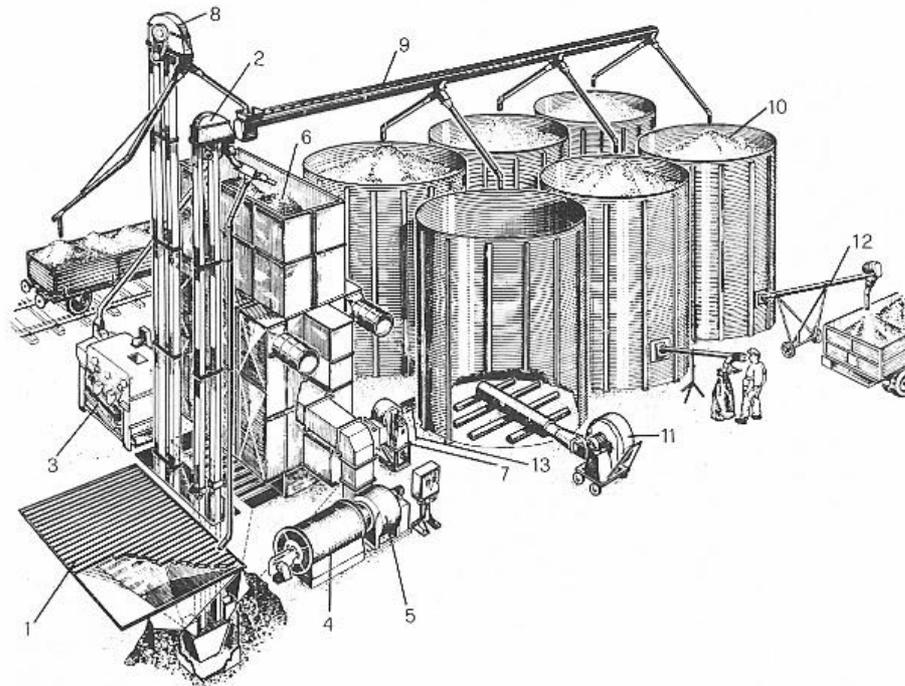


Figura 21: Vista assonometria di un impianto di essiccazione

Le indicazioni segnalano: 1, tramoggia di ricezione; 2, elevatore del verde; 3, pulitore del verde; 4, forno; 5, ventilatore dell'aria calda; 6, essiccatoio a colonna a zig-zag; 7, ventilatore di raffreddamento; 8, elevatore del secco; 9, trasportatore di carico dei sili del secco; 10, silo; 11, ventilatore carrellato; 12, coclea di scarico mobile dei sili; 13, trasportatore di scarico dei sili.

Le attrezzature complementari, di cui deve essere dotato un impianto per garantire continuità di funzionamento, possono essere così schematizzate (figura 21):

- *tramoggia di ricezione*, per gli essiccatoi di una certa potenzialità, che provvede al caricamento meccanico dei contenitori, o dei sili di deposito per quelli che ne sono dotati, di prodotto appena mietitrebbiato. Essa è realizzata con pareti di calcestruzzo armato lisce inclinate verso il centro nella parte più bassa in modo da assicurare il costante riempimento del trasportatore longitudinale, che provvede all'invio del materiale all'elevatore. Superiormente poi, cioè a livello terra, la tramoggia è chiusa da una robusta griglia di acciaio (larghezza 3-4 m) per consentire il passaggio dei mezzi di trasporto in modo da scaricare il prodotto sull'intera sua lunghezza (5-20 m). La capacità, tenendo presente che si può accumulare prodotto anche al di sopra del grigliato, è anche in relazione all'esistenza o meno di sili di accumulo del verde, generalmente previsti per le

potenzialità medio-alte; essa è di solito dell'ordine dei 300-800 quintali di materiale;

- *pulitori del prodotto*, per l'eliminazione delle diverse impurità verdi e secche, e in alcuni casi semiseccche se inseriti in un punto intermedio del ciclo di essiccazione: di qui la presenza al massimo di tre unità indipendenti di diversa tipologia (rotativi, alternativi, a ciclone). In particolare l'asportazione delle impurità verdi consente una riduzione dei tempi e dei costi di essiccazione, in relazione anche ai possibili intasamenti dell'impianto con relativi pericoli di incendio;
- *sili di deposito del verde*, con funzioni di polmone per il diverso ritmo di lavoro della mietitrebbiatrice e dell'impianto; a questi vanno aggiunti quelli di rinvenimento del prodotto nei casi in cui sono previsti. La capacità, che deve tener conto anche del ritmo di lavoro dell'impianto (su tutte o meno le 24 ore della giornata), può andare dalla metà all'intera potenzialità giornaliera dell'essiccatoio;
- *sili di stoccaggio*, adibiti all'accumulo del prodotto essiccato che può anche essere contenuto in ampi locali con funzioni di magazzino. Come quelli del verde, essi sono in genere di forma cilindrica con pareti ondulate in lamiera zincata, provvisti in particolare di sistema di ventilazione e di scarico automatico. Sono collegati all'essiccatoio con un trasportatore aereo per il carico dall'alto, mentre il prodotto scaricato con trasportatore a fossa viene inviato al successivo elevatore per il carico sugli automezzi. Ai fini di una economia di installazione, essi sono in genere disposti in serie e a coppie in modo da richiedere un'unica unità di carico e di scarico sistemata tra i due corpi. Circa poi la capacità, che singolarmente può variare da alcune centinaia (100-200) ad alcune decine di migliaia di quintali (anche 30.000), essa è da ricondurre sia alla potenzialità dell'impianto che ai tipi e alla quantità dei diversi cereali che l'impianto deve trattare.

A queste attrezzature vanno aggiunti inoltre: i sistemi meccanici di *movimentazione* del prodotto (trasportatori a catena o a coclea ed elevatori a tazze), la *pesatura* automatica per gli impianti di una certa potenzialità prima del magazzinaggio, i dispositivi di *controllo* della combustione, il complesso, infine, della strumentazione per la misura in particolare delle condizioni fisiche dell'aria (temperatura e umidità prima e dopo l'attraversamento della massa e dell'umidità del cereale allo scarico).

Quest'ultima determinazione ha consentito la completa automazione di quasi tutti gli impianti di essiccazione, riducendo così il lavoro dell'operatore a una semplice mansione di comando e di controllo.

Al riguardo, negli impianti di media-alta potenzialità in sostituzione del normale quadro elettrico, è previsto il raggruppamento dei diversi interruttori di comando in un *quadro sinottico* (figura 22) provvisto delle tecnologie elettroniche più sofisticate, dove viene visualizzato il diagramma di lavorazione dell'intero impianto con lampade spia di inserimento o meno dei diversi elementi, e di allarme in caso di disfunzione. Il conduttore, quindi, non solo è in grado di conoscere immediatamente i dispositivi in funzione e quelli momentaneamente fermi, ma anche e soprattutto di essere informato di un improvviso arresto, per esempio, di un trasportatore per sovraccarico di prodotto.

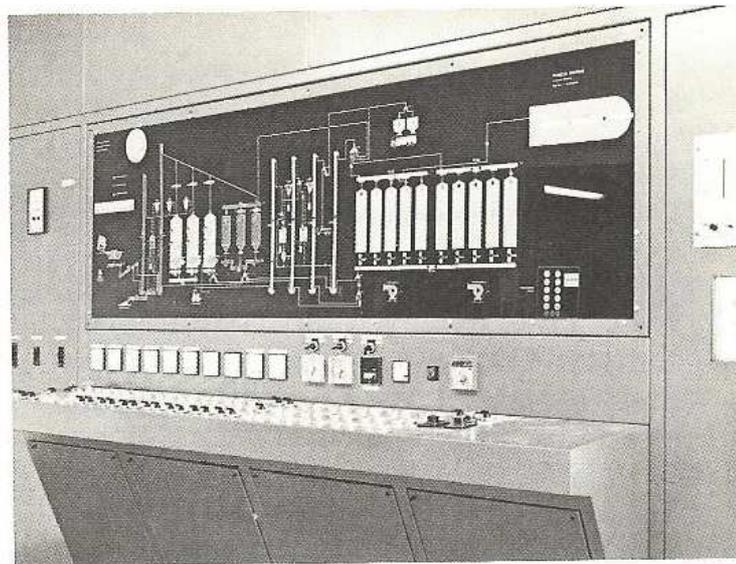


Figura 22: Quadro sinottico di comando e controllo di un impianto di essiccazione: sono visibili gli elementi costitutivi dell'impianto oltre al percorso seguito dal cereale

Si deve ricordare infine che negli impianti a colonna (a zig-zag o a losanga) vengono sempre più impiegati sistemi di depolverizzazione dell'aria umida in uscita dall'essiccatoio. Tale recupero delle polveri può avvenire a secco a mezzo filtri telati, oppure a umido mediante passaggio dell'aria attraverso un film d'acqua realizzato con un sistema a gocciolatoio. In quest'ultimo caso il livello di filtrazione risulta più spinto fino ad arrivare a valori di 3-5 milligrammi di polvere per metro cubo di aria.

5.4. L'importanza del raffreddamento

Nell'essiccazione dei cereali la fase del raffreddamento costituisce un momento fondamentale per la riuscita del processo, in ordine soprattutto alla futura conservabilità del prodotto, come è individuabile nel grafico di figura 11.

Le modalità ed i tempi di esecuzione sono strettamente correlati con le temperature impiegate per l'essiccazione, come si può anche rilevare dal grafico di figura 23. Ciò è in relazione alla diversa capacità termica della granella di mais alle differenti

temperature di essiccazione e, più precisamente, alle differenti quantità di calorie immagazzinate dal cereale.

Per il mais la capacità termica può essere indicata in 0,46-0,47 kcal/(kg °C).

Secondo il tipo di essiccatoio, le modalità di esecuzione del raffreddamento sono fondamentalmente diverse, passando dagli impianti continui, ove tale fase viene realizzata in una zona della colonna, a quelli discontinui nei quali il processo avviene a fine essiccazione utilizzando lo stesso ventilatore impiegato precedentemente per insufflare l'aria calda. In alcuni impianti, poi, il raffreddamento è realizzato in una cella diversa da quella di essiccazione secondo la tecnica della "dryeration".

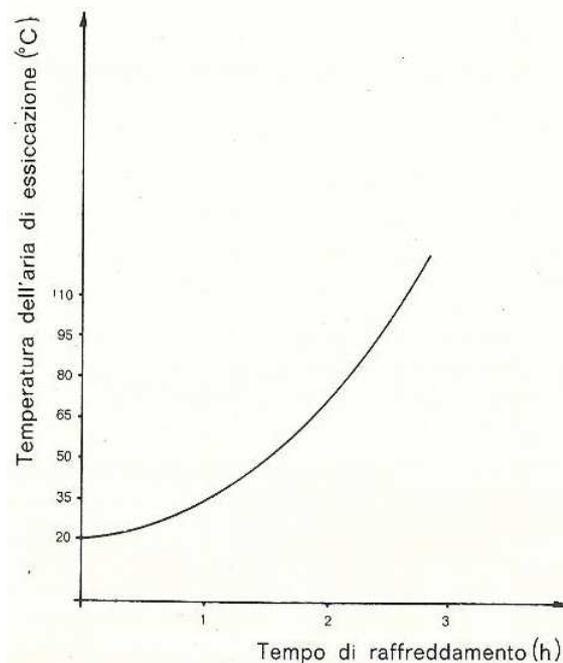


Figura 23: Variazione del tempo di raffreddamento in funzione della temperatura dell'aria di essiccazione in un impianto continuo

5.5. La tecnica della dryeration

Con il termine "dryeration" si definisce il modo di operare che prevede di effettuare il completamento dell'essiccazione del cereale in un secondo impianto che può essere la stessa cella di stoccaggio o altre celle appositamente allestite.

In pratica, il mais viene evacuato dal corpo essiccante ancora caldo e con un'umidità residua dell'ordine del 16-18% e lasciato "riposare" senza ventilazione per un periodo di 8-12 ore in una apposita cella. In questo periodo si favorisce la migrazione dell'umidità dall'interno della cariosside verso l'esterno sfruttando la temperatura della massa del cereale all'atto della fuoriuscita dell'essiccatoio (fenomeno del rinvenimento). In un secondo momento si opera la ventilazione del cereale con l'allontanamento dell'umidità in eccesso. Tale ventilazione viene effettuata con aria

ambiente “lenta” con portate specifiche dell’ordine di 20-50 m³/h d’aria per m³ di granella e per un periodo di tempo pressoché pari a quello del rinvenimento. In tale modo è dimostrato che si è in grado di portare il cereale all’umidità del 14-15%, garantendo cioè l’asportazione di 2-2,5 punti di umidità.

La tecnica della dryeration appare dunque assai interessante, se si considera che essa consente di aumentare la capacità operativa dell’essiccatoio fino al 30-50%, senza provocare perdite di sostanza secca nella fase del rinvenimento, come è stato dimostrato da sperimentatori americani, anche in considerazione della dimostrata possibilità di aumentare la temperatura del cereale in uscita dalla colonna a 60 °C circa, temperatura ottimale per il successivo processo di rinvenimento. Tale tecnica garantisce inoltre una riduzione della spesa energetica dell’ordine del 20%.

5.6. Regolazioni, manutenzione e sicurezza

5.6.1. Regolazioni

5.6.1.1. Regolazione della temperatura dell’aria calda

La regolazione della temperatura dell’aria calda è un intervento importante perché a tale parametro è legata la qualità dell’essiccazione del cereale. Per esempio, in certe giornate autunnali particolarmente calde non si riesce a mantenere con una sola fiamma la temperatura al livello dei valori di sicurezza ed è quindi necessario intervenire.

Le azioni possibili sono le seguenti:

- 1) inserimento o meno del secondo stadio del bruciatore pilotato da un opportuno termostato collocato nel condotto di immissione prima dell’attraversamento della massa;
- 2) sostituzione degli ugelli con elementi di diverso diametro che agiscano quindi sulla portata del combustibile;
- 3) azione con le apposite serrande di parzializzazione della corrente dell’aria ambiente aspirata dal ventilatore attraverso il forno o direttamente dall’esterno; con il medesimo sistema, che può essere reso automatico da opportune sonde, si può differenziare la temperatura delle diverse celle di essiccazione negli impianti a recupero di calore.

5.6.1.2. Regolazione dell’estrazione del cereale

Un ulteriore elemento soggetto ad una particolare attenzione è rappresentato dal dispositivo di estrazione del cereale dal contenitore allorquando esso ha raggiunto i valori di umidità per una buona conservazione. Esso può essere comandato da un temporizzatore preregolato dall’operatore che a intervalli prestabiliti apre per un certo

tempo le bocchette di scarico. L'operazione poi può essere completamente automatizzata da particolari sensori installati sul circuito dell'aria in uscita dal prodotto nell'ultimo stadio di essiccazione.

5.6.1.3. Regolazione del caricamento del contenitore

Oggetto di regolazione automatica è infine il caricamento del contenitore, in particolare dei tipi a colonna, mediante l'applicazione di appositi indicatori di livello, in genere del tipo a membrana. L'indicatore di massima ha la funzione di interrompere l'alimentazione quando la tramoggia superiore è piena, mentre quello di minima ha il compito di evidenziarne lo svuotamento mediante la relativa spia situata sul quadro, collegato con un opportuno allarme sonoro.

5.6.2. Manutenzione

Specie negli impianti destinati all'essiccazione del mais, è molto importante intervenire con periodicità nella manutenzione indipendentemente dalla presenza o meno di pulitori del verde. Si devono infatti evitare intasamenti, in particolar modo nei contenitori a colonna, dovuti alla presenza di brattee, di frammenti di tutolo e di stocco, e di corpi estranei che possono arrestare la discesa della granella con relativo pericolo di surriscaldamento.

La formazione inoltre di accumuli di pula o di piccole particelle di prodotto può ingenerare al contatto dell'aria a elevata temperatura principi di incendio. Di qui la necessità di ispezionare facilmente il contenitore con la pulizia di tutte le sue parti, oltre alla disponibilità di una adeguata strumentazione per segnalare eventuali aumenti localizzati di temperatura in modo da poter intervenire con tempestività.

Viene poi da sé che tale manutenzione deve essere completata da un intervento più generalizzato a fine campagna di raccolta sia sul gruppo aerotermico (in particolare sul bruciatore), che sul sistema di movimentazione (specialmente sull'eliminazione di incrostazioni all'interno degli elevatori), oltre a una lubrificazione e a un ingrassaggio delle parti in movimento preceduta da una pulitura a fondo dell'intero impianto.

5.6.3. Sicurezza

5.6.3.1. Esplosioni ed incendi

Da molte decine di anni il fenomeno degli incendi e delle esplosioni nei molini e sili per cereali è motivo d'intenso studio e ricerche per individuarne le cause e dettare norme di sicurezza da applicare sia agli impianti nuovi che a quelli già esistenti. Uno studio del ricercatore tedesco Deutsche Muller-Zeitung del 1977, basato sull'osservazione di 267 casi di esplosioni, ha permesso di giungere ai risultati sintetizzati nei seguenti grafici:

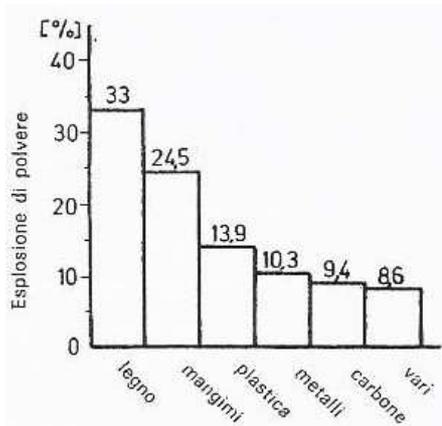


Figura 24: Incidenza percentuale di 267 esplosioni in rapporto ai diversi tipi di polvere

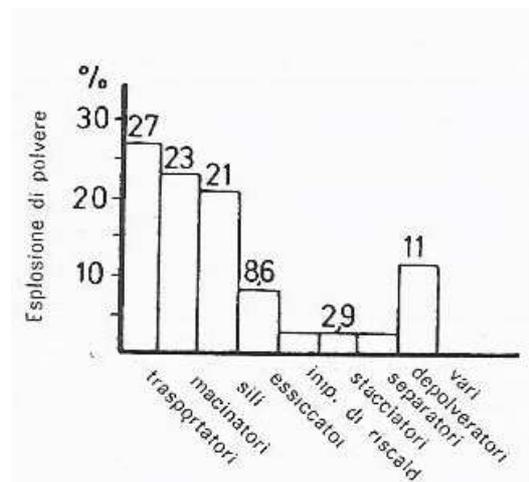


Figura 25: Percentuale di esplosione all'interno dei gruppi di polveri dei mangimi e prodotti alimentari (24,3%) in rapporto ai punti negli impianti considerati

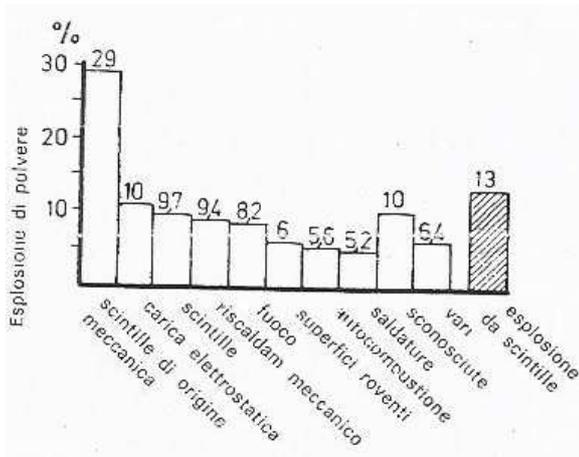


Figura 26: Incidenza percentuale di 267 esplosioni in rapporto a quali fonti di innesco sono state determinate

Il primo istogramma, quello di figura 24, mette in evidenza la ripartizione degli eventi esplosivi in rapporto ai diversi tipi di polvere. Il 24,5% dei 267 casi è provocato da polvere di mangimi e prodotti alimentari. Si è quindi esplosa tale dato in rapporto ai diversi punti presenti negli impianti di macinazione ed essiccazione.

La maggior frequenza delle esplosioni si è verificata nei sili per cereali, a causa di scariche elettrostatiche scaturite con maggior frequenza da polveri vaganti in prossimità di trasportatori. Tale considerazione emerge dalla lettura del secondo grafico, quello di figura 25.

Infine, il terzo istogramma di figura 26, approfondisce le cause delle esplosioni, le fonti di innesco delle stesse.

Il 13% relativo all'esplosione da scintille può trovare la seguente spiegazione. In tutti i prodotti provenienti dai campi la presenza di polvere è inevitabile. La movimentazione dei cereali produce una polvere pericolosa, causata dallo sfregamento dei chicchi tra loro, che stacca particelle piccolissime di epidermide caricandole di energia (nuvole di polvere cariche di elettricità statica di polarità contrarie) che, in determinate condizioni, a contatto con l'ossigeno dell'aria, possono incendiarsi sotto l'effetto di improvvise scintille scaturite dalla polvere stessa.

La concentrazione minima è quella dove vi è già abbastanza polvere per propagare la fiamma. Il limite esplosivo maggiore esiste quando la completa combustione di una parte della polvere, in tutto l'ossigeno disponibile, non fornisce abbastanza calore per aumentare la temperatura di tutta la nuvola di polvere fino a raggiungere il calore necessario per provocare lo scoppio.

L'unità di misura utilizzata per l'energia elettrica della scintilla per l'accensione delle nuvole di polvere è il Joule. La piccolezza della quantità di energia necessaria alle scintille statiche per incendiare le nuvole di polvere, 0,04 J, mostra l'importanza di un'adeguata base per prevenire la formazione di scariche elettriche. È così basso il livello di energia necessaria che, se si raggiunge la temperatura di esplosione, sarà raro che non vi sia sufficiente energia perché il processo di combustione continui.

5.6.3.2. I pericoli dei parassiti e della fumigazione⁷

Le larve degli insetti che si trovano all'interno dei chicchi sono fonti di polvere, la cui metà è costituita da granuli di amido e frammenti di cereali aventi la stessa capacità di esplosione della polvere di cereali, con le medesime dimensioni granulometriche delle

⁷ Fumigazione: metodo di disinfestazione da parassiti, insetti e germi attraverso immissione di gas specifici nell'ambiente interessato. I fumiganti sono velenosi e si usano in quei locali che si possono chiudere ermeticamente come magazzini o mulini.

particelle. Gli insetti dei cereali provocano pure polvere mentre si alimentano forando i chicchi, e quando i loro corpi si disintegrano.

Anche la fumigazione dei cereali con miscela composta da 80% di bisolfuro di carbonio e 20% di tetracloruro di carbonio è pericolosa se non si rispettano le prescrizioni dettate per i pesticidi. Le norme prescrivono trattamenti con temperature superiori ai 15 °C, ed il cereale non deve venire rimosso per 3-7 giorni dopo la fumigazione, permettendo ai due insetticidi di raggiungere l'equilibrio senza il quale potrebbero promuovere pericoli d'incendio o di esplosione.

La pratica ha dimostrato che nel cereale dopo 4-32 ore dalla fumigazione le concentrazioni di bisolfuro di carbonio nell'aria erano superiori, e quelle del tetracloruro di carbonio, risultavano doppie, rispetto alle quantità stabilite dal Dipartimento del Lavoro degli Stati Uniti, riferito ai pericoli per la salute umana.

5.6.3.3. Alcune regole

L'impiego delle lampade a mano nei sili è molto pericoloso e ciò è messo in evidenza da una serie di incendi avvenuti nei decenni passati.

In tali ambienti devono essere installati impianti di illuminazione fissi, superprotetti, a chiusura stagna, che rispondano alle disposizioni emanate dalle competenti autorità, per avere la certezza che non si verifichino esplosioni di polveri nei sili.

Buona regola è poi l'applicazione di porte divisorie e a prova di fuoco, di porte d'uscita di sicurezza e di estintori fissi collocati nei punti più accessibili in prossimità delle scale.

5.6.3.4. Mezzi per spegnere gli incendi

L'acqua è adatta per spegnere gli incendi comuni: carta, legno, cellulosa, materie tessili, carbone, cereali, gomme, etc.

La schiuma va bene contro incendi di liquidi e sostanze infiammabili: nafta, petrolio, benzina, oli, lacche, vernici, etc.

Le polveri ignifughe sono utili contro prodotti infiammabili e apparecchiature elettriche.

I gas inerti (anidride carbonica CO_2 , tetracloruro di carbonio CCl_4 , bromuro di metile CH_3Br , il cloro metano CH_3BrCr) servono praticamente contro gli incendi di qualsiasi natura.

I gas inerti presentano i seguenti vantaggi:

- 1) agiscono su tre dimensioni (volume) anziché su due (superficie); non occorre lanciare il gas d'estinzione sulle materie incendiate, è sufficiente immerterlo nell'ambiente, anche a basse proporzioni, per sopprimere il fuoco rendendo incomburente l'atmosfera;

- 2) non bagnano, non sporcano, non corrodono, non alterano i prodotti sani coi quali vengono a contatto;
- 3) sono dielettrici, possono essere impiegati contro apparecchiature elettriche sotto tensione;
- 4) hanno grande potere d'estinzione dovuto al favorevole rapporto d'espansione (volume allo stato gassoso rispetto allo stato liquido: anidride carbonica 1/500, bromuro di metile 1/230, tetracloruro di carbonio 1/113);
- 5) elevato calore specifico e di vaporizzazione;
- 6) azione estintrice per soffocamento e raffreddamento.

L'esperienza ha dimostrato che i gas ignifughi non sono invece convenienti nei seguenti casi: se impiegati in ambienti chiusi, in atmosfera in stato di riposo o agitati da correnti ventose, agli inizi di incendio o quando ha assunto vaste proporzioni anche di calore; se l'estinzione avviene per saturazione d'ambiente o getto diretto di gas inerte al centro del focolaio e con l'azione prevalentemente di refrigerazione; se la manovra si effettua a distanza mediante impianto fisso o con apparecchi a mano; se il gas d'estinzione od i derivati dalla sua decomposizione a contatto col fuoco possono venire aspirati dagli operatori.

Altri elementi che non favoriscono l'adozione degli apparecchi con gas inerte: la tossicità dei gas, la disagiata manovra degli apparecchi, l'elevata pressione all'interno delle bombole (36 atm a 0 °C, 52 a 15 °C, 95 a 30 °C, 180 a 50 °C), le fughe di gas che le svuotano, per cui occorrono periodiche ricariche, la difficoltà di ricarica.

L'anidride carbonica (che è inodore, insapore, incolore) è oggi diffusa negli estintori portatili d'incendi, non è tossica ma rende l'aria irrespirabile; immessa al 19% in ambiente chiuso asfissia le persone, fatto che non avviene col tetracloruro di carbonio o bromuro di metile, pure velenosi ma non mortali.

5.6.3.5. Altri pericoli

Oltre ai pericoli di incendio ed esplosioni, che purtroppo non sono rari in questi impianti, si deve pure aggiungere, oltre ad una naturale prudenza da parte dell'operatore nella conduzione dell'impianto, il rigoroso rispetto delle norme antinfortunistiche nella costruzione delle scale, dei ballatoi e delle passerelle che nei grossi essiccatoi industriali possono arrivare ad altezze di 10-20 metri.

Fondamentale è pure, non solo la protezione dei motori elettrici con l'applicazione di relais termici, ma anche una corretta taratura degli stessi in modo da farli intervenire nel momento più opportuno per impedire la bruciatura degli avvolgimenti con il conseguente arresto del motoriduttore e quindi dell'intero impianto, nel caso in cui l'attrezzatura da esso mossa si trovi disposta in serie.

CAPITOLO 6

I parametri funzionali dell'essiccazione

I parametri funzionali che intervengono in un processo di essiccazione e che qualificano le prestazioni dell'impianto incidendo sul risultato tecnico ed economico, sono:

- a) QUANTITA' DI ACQUA DA EVAPORARE (Q_{pu}) espressa in kg di acqua per quintale di prodotto umido [$\text{kgH}_2\text{O}/\text{q}$];
- b) CAPACITA' DI EVAPORAZIONE DELL'ACQUA (q) espressa in grammi di H_2O asportati per m^3 d'aria insufflata [$\text{g H}_2\text{O}/\text{m}^3$];
- c) VOLUME SPECIFICO DELL'ARIA (V_s) espresso in m^3/h di aria per m^3 di granello [$(\text{m}^3/\text{h}) / \text{m}^3$];
- d) CAPACITA' DI EVAPORAZIONE DELL'ESSICCATOIO (Q_a) espressa in kg di acqua evaporata per ora [$\text{kgH}_2\text{O}/\text{h}$];
- e) TEMPO DI ESSICCAZIONE espresso in ore (h);
- f) POTENZIALITA' GIORNALIERA DELL'IMPIANTO espressa in quintali di materiale trattato nelle 24 ore;
- g) TEMPERATURA DELL'ARIA CALDA;
- h) CONSUMO ORARIO E SPECIFICO DI COMBUSTIBILE
- i) CONSUMO TERMICO SPECIFICO (W_s) espresso in kcal per kg di acqua evaporata [$\text{kcal}/\text{kgH}_2\text{O}$] e RENDIMENTO TERMICO TOTALE;
- j) CONSUMO SPECIFICO DI ENERGIA ELETTRICA (C_e) espresso in kWh per quintale di prodotto secco [kWh/q].

6.1. Quantità di acqua da evaporare

È un elemento esclusivamente legato al prodotto che incide pesantemente sul costo di essiccazione in quanto influisce sia sul consumo di combustibile che sulla durata dell'operazione: di qui il riferimento del costo del prodotto ai punti di umidità da asportare per arrivare al limite di conservazione.

La quantità d'acqua Q_{pu} da evaporare da un quintale di cereale che presenta un'umidità iniziale $U_i(\%)$ e che deve essere portato ad un'umidità finale $U_f(\%)$, si calcola con la formula:

$$Q_{pu} = [(U_i - U_f) / (100 - U_f)] \cdot 100 \quad [\text{kgH}_2\text{O}/\text{q}]$$

Per cui, ad esempio, da $P_u = 50$ quintali di prodotto verde raccolto al 28% di umidità ed essiccato al 14%, l'asportazione di acqua risulta:

$$Q_v = Q_p \cdot P_u = [(28 - 14) / (100 - 14)] \cdot 100 \cdot 50 = 16,28 \text{ [kgH}_2\text{O]} \cdot 50 \text{ [q]} = 814 \text{ kgH}_2\text{O}$$

Potrebbe ugualmente interessare la quantità d'acqua evaporata da un quintale di prodotto secco all'umidità U_f data dalla formula:

$$Q_{pe} = [(U_i - U_f) / (100 - U_i)] \cdot 100 \text{ [kgH}_2\text{O/q]}$$

Per cui, per i medesimi valori di umidità dell'esempio precedente, da $P_e = 50$ quintali di prodotto secco si è avuta un'asportazione di:

$$Q_v = Q_{pe} \cdot P_e = [(28 - 14) / (100 - 28)] \cdot 100 \cdot 50 = 19,44 \text{ [kgH}_2\text{O/q]} \cdot 50 \text{ [q]} = 972 \text{ kgH}_2\text{O}$$

cioè una maggiore massa di acqua in quanto ai 50 quintali di secco corrispondono ben 60 quintali di cereale umido sulla base della formula:

$$P_u = [(100 - U_f) / (100 - U_i)] \cdot P_e \quad \text{[q]}$$

e della formula :

$$P_e = [(100 - U_i) / (100 - U_f)] \cdot P_u \quad \text{[q]}$$

quest'ultima quando si vuole conoscere la massa di prodotto secco P_e da una quantità P_u di cereale umido immesso nell'essiccatoio.

Nella tabella di figura 27 in funzione dell'umidità del prodotto umido e di quella di conservazione (14%), viene riportata la massa di acqua da asportare Q_{pu} per quintale di granella umida, oltre a quella asportata Q_{pe} per quintale di granella secca. In particolare la quantità Q_{pu} , essendo riferita a 100 kg di prodotto, può definirsi anche come perdita percentuale di peso della granella umida. Essa poi è visualizzata nel diagramma di figura 28.

Umidità della granella (%)	Quantità di acqua da evaporare per quintale di granella umida Q_{pu} (kg/dt)	Quantità di acqua evaporata per quintale di granella secca Q_{pe} (kg/dt)
35	24,419	32,308
34	23,256	30,303
33	22,093	28,358
32	20,930	26,471
31	19,767	24,638
30	18,605	22,857
29	17,442	21,127
28	16,279	19,444
27	15,116	17,808
26	13,953	16,216
25	12,791	14,667
24	11,628	13,158
23	10,465	11,688
22	9,302	10,256
21	8,140	8,861
20	6,977	7,500
19	5,814	6,173
18	4,651	4,878

Figura 27: Quantità di acqua da evaporare dalla granella per portarla dall'umidità di raccolta a quella di conservazione (14%)

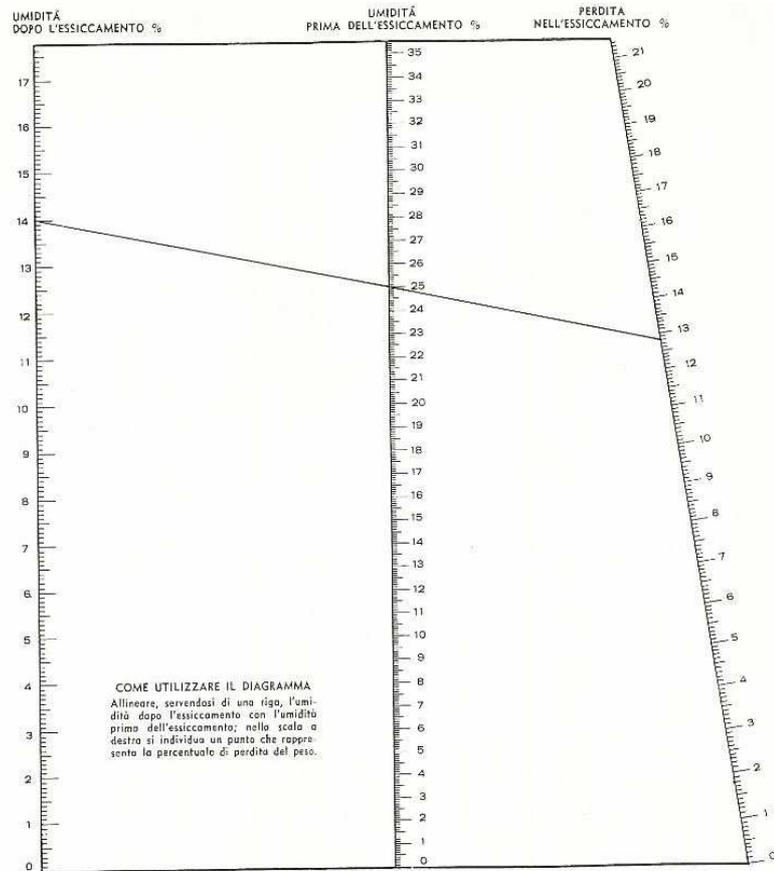


Figura 28: Determinazione della perdita percentuale in peso del cereale per effetto dell'essiccazione.

6.2. Capacità di evaporazione dell'acqua

La capacità di evaporazione dell'acqua (q), espressa in grammi di H_2O asportati per m^3 d'aria insufflata, dipende dalle modificazioni fisiche che l'aria subisce attraversando il prodotto ed in particolare dalla sua temperatura di riscaldamento ed umidità relativa. La sua determinazione avviene graficamente sul diagramma di Mollier (o dell'aria umida), (figura 27), sulla base della formula:

$$q = (X_2 - X_1) \cdot \gamma_a \quad [\text{gH}_2\text{O}/\text{m}^3 \text{ d'aria}]$$

dove:

X_2 e X_1 = umidità specifica dell'aria rispettivamente all'entrata e all'uscita dalla massa del prodotto, espresse in grammi di acqua presente in un chilogrammo di aria secca ($\text{gH}_2\text{O}/\text{kg}$ di aria secca);

γ_a = massa volumica dell'aria secca contenuta in un metro cubo di aria alla temperatura e umidità relativa ambiente (kg/m^3).

Temperatura (°C)	Umidità relativa %					
	0 aria secca	20	40	60	80	100 aria satura
-10	1,342	1,342	1,341	1,340	1,340	1,339
-5	1,317	1,316	1,315	1,314	1,313	1,312
0	1,293	1,291	1,290	1,288	1,287	1,285
5	1,270	1,268	1,265	1,263	1,261	1,259
10	1,247	1,244	1,241	1,238	1,235	1,232
15	1,226	1,222	1,217	1,213	1,209	1,205
20	1,205	1,199	1,194	1,188	1,183	1,177
25	1,183	1,177	1,170	1,162	1,155	1,148
30	1,165	1,155	1,145	1,136	1,126	1,116
35	1,146	1,133	1,121	1,108	1,095	1,082
40	1,128	1,111	1,095	1,079	1,062	1,046
45	1,110	1,089	1,068	1,047	1,026	1,005
50	1,093	1,066	1,040	1,013	0,986	0,960
55	1,076	1,043	1,009	0,976	0,942	0,909
60	1,060	1,019	0,977	0,936	0,894	0,853
65	1,044	0,993	0,942	0,890	0,839	0,788
70	1,029	0,966	0,903	0,840	0,777	0,714
75	1,014	0,937	0,860	0,783	0,706	0,629
80	1,000	0,907	0,813	0,720	0,626	0,533
85	0,986	0,873	0,761	0,648	0,536	0,423
90	0,973	0,838	0,704	0,569	0,435	0,300
95	0,959	0,799	0,639	0,479	0,319	0,159

Figura 29: Massa volumica dell'aria secca (kg/m^3) contenuta in 1 m^3 d'aria alla pressione di 1,013 mbar (760 mm Hg) nelle diverse condizioni di temperatura e di umidità relativa

I valori dell'umidità specifica dell'aria possono essere dedotti, come accennato, dal diagramma di Mollier sia per l'aria all'entrata (X1), sia per quella all'uscita dalle celle di essiccazione (X2), conoscendo la temperatura e l'umidità relativa dell'aria.

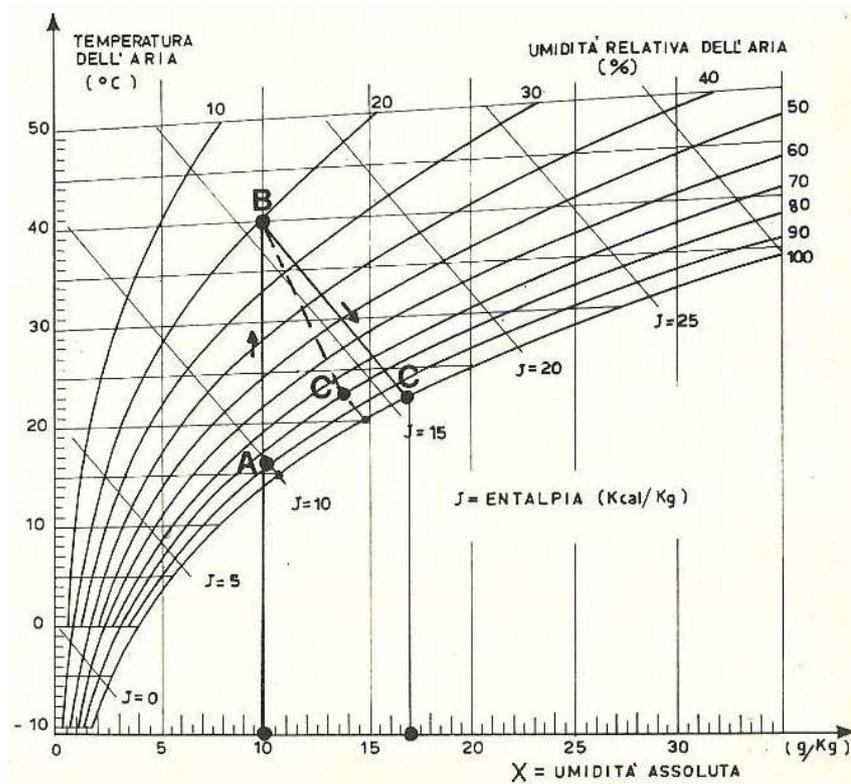


Figura 30: Esempio dell'uso del diagramma di Mollier: A) condizioni iniziali dell'aria ambiente; B) condizioni dell'aria dopo il riscaldamento; C) condizioni dell'aria dopo il passaggio attraverso il prodotto nel caso teorico di assenza di perdite di calore (trasformazione isoentalpica) e di completa saturazione dell'aria; C') condizioni reali dell'aria dopo l'attraversamento della massa

Nel grafico di figura 30 viene riportato un esempio dell'impiego del diagramma di Mollier, tenendo conto che in questo diagramma in ascisse è riportata l'umidità specifica dell'aria (X) e in ordinate la sua temperatura in gradi Celsius, mentre le linee concave esprimono l'umidità relativa (ϕ) e le linee oblique l'entalpia (J), cioè le kcal contenute per kg di aria secca.

Nel caso preso in esame, fissate le caratteristiche dell'aria ambiente in 17 °C e 80% di umidità relativa (punto A) (cui corrisponde un'umidità pari a 10 g d'acqua/kg d'aria e un'entalpia di 10 kcal/kg d'aria secca), si è ipotizzato di riscaldare l'aria a 40 °C. Nell'innalzamento termico (punto B) l'umidità specifica rimane ovviamente costante; l'umidità relativa scende al 20% circa; l'entalpia passa a 16 kcal/kg d'aria secca. Pensando, in via teorica, che il processo di essiccazione avvenga senza perdite di calore (processo isoentalpico), con aria che esca satura di acqua dall'impianto

(all'umidità relativa del 100%), si avrà aria in uscita con una temperatura di circa 23 °C (punto C) e con una umidità assoluta di 17 g H₂O/kg di aria secca.

La differenza tra l'umidità (X₂) dell'aria in uscita e l'umidità (X₁) dell'aria in entrata essendo pari a

$$X_2 - X_1 = 7 \quad [\text{g H}_2\text{O/kg di aria secca}]$$

ed essendo $\gamma_a = 1,199$ la massa volumica dell'aria ambiente, la capacità di evaporazione dell'aria risulterà pari a

$$q = 7 \cdot 1,199 = 8,39 \quad [\text{g H}_2\text{O/m}^3 \text{ d'aria}]$$

Nella realtà però il processo non avviene senza perdite di calorie; queste si verificano sia nella fase di riscaldamento del prodotto, sia a livello delle celle di essiccazione, ed inoltre l'aria che esce difficilmente raggiunge la saturazione.

Inoltre non risultando l'aria in uscita dal contenitore completamente satura ($\phi=100\%$), si ottiene il punto C' (e quindi $X_{C'} = 13,5$) cui corrisponde

$$X_2 - X_1 = 3,5 \quad [\text{g H}_2\text{O/kg di aria secca}]$$

Ciò comporta una riduzione di circa il 50% della capacità evaporante dell'aria calda.

Più elevata è la differenza di umidità, maggiore è la quantità d'acqua evaporata dalla granella; sulla dinamica di tale processo incide particolarmente il sistema di rimescolamento del prodotto e il tipo di percorso della corrente termica in seno alla massa.

Un aumento poi della temperatura dell'aria calda, limitatamente ai livelli ammissibili e a parità delle precedenti condizioni, porta ad un incremento della capacità assorbente dell'aria per effetto della diminuzione della sua umidità relativa (cioè il punto B dell'esempio di figura 30 si sposta in verticale verso l'alto). Nello stesso senso agisce una diminuzione sia della temperatura che della umidità relativa dell'aria ambiente, come è facile osservare sempre sul diagramma di Mollier di figura 30 (cioè il punto A si sposta in basso verso sinistra).

Nel caso del mais per il quale la temperatura della corrente può arrivare anche a 130-140 °C e le difficoltà di asportazione dell'acqua sono contenute, il potere assorbente dell'aria è notevolmente più elevato rispetto ad altri cereali riducendo così i tempi di essiccazione (esempio: data una differenza $X_2 - X_1$ pari a 3,5 g H₂O/kg di aria secca

per il riso, il mais ha un valore fino a 6-7 volte maggiore per essiccatoi continui a recupero di calore e a 9-10 volte per essiccatoi a tappeto).

In via alternativa, per i diversi tipi di essiccatoi si possono considerare le seguenti capacità di evaporazione nel caso del mais:

- essiccatoi statici: $q = 6-8 \text{ g H}_2\text{O/m}^3 \text{ d'aria}$;
- essiccatoi discontinui: $q = 9-11 \text{ g H}_2\text{O/m}^3 \text{ d'aria}$;
- essiccatoi continui: $q = 12-15 \text{ g H}_2\text{O/m}^3 \text{ d'aria}$.

6.3. Volume specifico di ventilazione

La conoscenza del volume specifico di ventilazione per l'impianto in questione è di fondamentale importanza, in quanto da esso dipende la durata dell'essiccazione, in relazione naturalmente alla temperatura dell'aria ed all'umidità iniziale della granella.

Tale parametro è quindi correlato con il tempo di essiccazione, con la quantità d'acqua da evaporare e con la capacità di evaporazione dell'aria secondo la seguente relazione:

$$V = Q_v / (T \cdot q) \quad [(\text{m}^3/\text{h}) / \text{m}^3 \text{ di granella}]$$

Dove:

T = tempo di essiccazione in ore;

Q_v = quantità di acqua da evaporare o evaporata in $\text{kgH}_2\text{O/m}^3$ di granella;

q = capacità di evaporazione dell'aria in $\text{kgH}_2\text{O/m}^3$ di aria insufflata.

La quantità di acqua da evaporare o evaporata (Q_v) dipende poi dall'umidità iniziale (U_i) della granella e viene calcolata con le seguenti relazioni:

$$Q_v = Q_{pu} \cdot P_f$$

$$Q_v = Q_{pe} \cdot P_e$$

Dove:

$$Q_{pu} = [(U_i - U_f) / (100 - U_f)] \cdot 100 \quad [\text{kgH}_2\text{O}/q]$$

è la quantità di acqua da evaporare per quintale di prodotto umido;

$$Q_{pe} = [(U_i - U_f) / (100 - U_i)] \cdot 100 \quad [\text{kgH}_2\text{O}/q]$$

è la quantità di acqua evaporata per quintale di prodotto secco ottenuto;

P_u = peso specifico della granella all'umidità iniziale, in q/m^3 ;

P_e = peso specifico della granella all'umidità finale, in q/m^3 .

Il P_u e il P_e si determinano sulla base del peso specifico della sostanza secca P_s che normalmente si aggira sui 700-750 kg/m^3 con le seguenti relazioni:

$$P_u = [P_s / (100 - U_i)] \cdot 100$$

$$P_e = [P_s / (100 - U_f)] \cdot 100$$

Per quanto riguarda invece la capacità di evaporazione dell'acqua (q), espressa in grammi di H_2O asportati per m^3 d'aria insufflata, si ricorda essere definita come segue a partire dal diagramma di Mollier:

$$q = (X_2 - X_1) \cdot \gamma_a \quad [g \text{ H}_2\text{O}/m^3 \text{ d'aria}]$$

dove:

X_2 e X_1 = umidità dell'aria rispettivamente all'entrata e all'uscita dalla massa del prodotto, espresse in grammi di acqua presente in un chilogrammo di aria secca ($g \text{ H}_2\text{O}/kg$ di aria secca);

γ_a = massa volumica dell'aria secca contenuta in un metro cubo di aria alla temperatura e umidità relativa ambiente (kg/m^3).

6.4. Capacità di evaporazione dell'essiccatoio

È uno degli indici di efficienza degli impianti espresso in chilogrammi di acqua evaporata in un'ora (kgH_2O/h), ovvero in punti percentuali di umidità⁸ eliminati (punti/h). A parità di condizioni fisiche dell'aria ambiente e dell'aria calda, di capacità del contenitore e di portata del ventilatore, il suo valore dipende dal grado di sfruttamento del potere assorbente del flusso termico. Quest'ultimo parametro poi, come si è già detto parlando della dinamica dell'essiccazione, è direttamente collegato all'umidità relativa dell'aria dopo l'attraversamento dello strato di prodotto.

La capacità di evaporazione dell'impianto di essiccazione risulta definita dalla relazione:

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

⁸ Punto percentuale di umidità: corrisponde a 1,1628 kg di acqua, come si può ricavare dalla tabella di figura 27 dove ad esempio, l'acqua da evaporare per passare dal 35% al 14% è 24,419 kg: di qui $24,419/21 = 1,1628 \text{ kg}_H\text{2O}/\text{punto}$.

Dove si è indicato con:

V = la portata del ventilatore⁹, in m^3/h ;

q = la capacità di evaporazione dell'aria, in $g H_2O/m^3$ d'aria.

Tenendo presente che per uno stesso impianto Q_a varia in relazione al tipo di cereale (ad esempio sarà più bassa nel riso rispetto al mais per le maggiori difficoltà del primo ad eliminare la propria acqua in eccesso), la capacità di evaporazione può andare da qualche centinaio a qualche migliaio di chilogrammi di acqua evaporati in un'ora.

La conoscenza della capacità di evaporazione dell'impianto di essiccazione (Q_a) è molto importante per calcolare la quantità di prodotto essiccabile (in peso umido P_u , o in peso secco P_e) in funzione dell'umidità iniziale e finale della granella.

Si ha infatti:

$$P_u = Q_a / Q_{pu} \quad [q/h \text{ di prodotto umido}]$$

$$P_e = Q_a / Q_{pe} \quad [q/h \text{ di prodotto secco}]$$

Dove:

Q_{pu} = acqua da evaporare per quintale di peso umido;

Q_{pe} = acqua da evaporare per quintale di peso secco.

Appare evidente che la capacità di essiccazione di un impianto è condizionata sia dalla quantità di acqua che occorre asportare dalla granella, sia dalla capacità di evaporazione dell'aria insufflata, sia dalla portata del ventilatore.

6.5. Tempo di essiccazione

Il tempo di essiccazione è relativo, oltre alla capacità di evaporazione dell'impianto, al tipo e all'umidità iniziale del prodotto, tenendo allo scopo presente che l'evaporazione dell'acqua non è lineare, bensì rapida alle umidità elevate e piuttosto lenta in prossimità dei limiti di conservazione.

⁹ Portata del ventilatore: la portata e quindi il tipo di ventilatore, viene definita sulla base delle dimensioni della colonna, cioè della sua capacità di contenimento di granella secca, nel rispetto dello sfruttamento massimo del suo potere evaporante. Numericamente la portata specifica V_s si può fissare sui 200-280 m^3/h per quintale di granella secca contenibile nella colonna. Essa può anche essere raddoppiata per ridurre il tempo di essiccazione, tutto ciò ovviamente a scapito del rendimento termico dell'essiccatoio.

Dipende inoltre in misura notevole dalle condizioni dell'aria ambiente tanto che in situazioni estreme (settembre caldo e ventilato rispetto a novembre freddo e nebbioso) esso può essere dimezzato, risparmiando nel contempo nel consumo di combustibile. Volendo riportare qualche valore numerico riferito alla granella di mais, per gli essiccatoi statici il tempo di essiccazione può variare da un minimo di 5-6 ore a un massimo di 16-18 ore. Nei contenitori a colonna cilindrica a ricircolo poi, si è sulle 3-5 ore mentre in quelli continui si può scendere anche a 2-4 ore.

6.6. Potenzialità giornaliera dell'impianto

È un elemento riportato nelle caratteristiche funzionali di un essiccatoio, viene espresso in quintali (o tonnellate) di prodotto verde (o secco) trattato nelle 24 ore in funzione dell'umidità di raccolta. In genere ci si riferisce al 28-30% e oltre per quanto riguarda il mais, e quindi potenzialità superiori quando si essicca prodotto più secco. Dipende, oltre dalle caratteristiche costruttive dell'impianto, dal tempo di essiccazione e quindi in particolare dall'umidità iniziale del prodotto e dalle condizioni ambientali; può variare da qualche centinaio a qualche migliaio di quintali al giorno, in alcuni casi anche decine di migliaia quando sono presenti più contenitori in parallelo.

6.7. Temperatura dell'aria calda

Il suo livello massimo, oltre che dalla tipologia dell'impianto, dipende sostanzialmente da due fattori, ovvero dal tipo e dal tenore iniziale di umidità del prodotto e dalla sua destinazione.

La temperatura sopportabile dal cereale diminuisce infatti all'aumentare del suo contenuto di umidità, in quanto una troppo rapida evaporazione dell'acqua superficiale può provocare delle ripercussioni negative sul chicco e quindi sulle sue successive lavorazioni.

Se il prodotto è a uso alimentare, nel caso del mais ad esempio, la temperatura dell'aria non deve di solito superare 55-60 °C in condizioni di umidità di raccolta del 28-30%, per poi salire gradualmente fino a 80-100 °C al diminuire dell'umidità. Negli impianti a recupero poi, dove l'essiccazione procede gradualmente, si possono avere le temperature più elevate nella parte centrale della colonna, in alcuni essiccatoi inoltre, come quelli a doppio tappeto, si può arrivare anche a 130-140 °C. In tal modo viene eliminato il pericolo di alterazioni chimiche che può provocare un abbassamento del livello nutritivo del cereale.

Nel caso invece del mais da seme, il livello è di 30 °C se il prodotto è abbastanza umido mentre può raggiungere i 50 °C in prossimità dell'umidità di conservazione, se vengono superati tali limiti può sopraggiungere la morte delle cariossidi.

6.8. Consumo orario e specifico di combustibile

Sono due indici relativi rispettivamente alla potenzialità dell'impianto e al suo livello funzionale.

Per uno stesso essiccatoio sono entrambi notevolmente influenzati dalle condizioni dell'aria comburente (se la temperatura è bassa e l'umidità relativa è elevata, maggiore è la spesa termica per arrivare alla temperatura di essiccazione), mentre sul secondo incide in modo determinante il tenore iniziale di umidità del prodotto.

In termini numerici il **consumo orario di combustibile** (gasolio) può variare 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).

A livello di caratteristica dell'impianto, viene data però la potenza termica installata sulla base dei kJ/h (kcal/h) sviluppabili dal bruciatore; essa si ottiene semplicemente moltiplicando i suddetti kg/h per il potere calorifico inferiore del combustibile¹⁰ (sui 43.000 kJ/kg = 10.250 kcal/m³ per il gasolio) ovvero, per i tipi statici ad esempio, sui 430.000-645.000 kJ/h (= 102.500-154.000 kcal/h).

Circa poi il **consumo specifico di combustibile**, esso varia generalmente da 1,1 a 1,8 kg di gasolio per quintale di granella di mais secco; in alcuni impianti mobili tale parametro può arrivare anche al valore di 2,5.

La notevole ampiezza del campo di valori è facilmente giustificabile se si pensa che da prove eseguite su mais in uno stesso impianto, è risultato un consumo di circa 1,1 e 1,8 kg per quintale di secco rispettivamente per granella al 22 e al 27% di umidità.

Relativamente infine all'impiego di altri combustibili, i suddetti valori vanno leggermente modificati in relazione al diverso potere calorifico rispetto al gasolio:

- per l'olio combustibile: circa 40.000 kJ/kg (= 9.500 kcal/kg);
- per il propano e butano: circa 46.000 kJ/kg (= 11.000 kcal/kg);
- per il metano: circa 36.500 kJ/kg (= 8.700 kcal/kg).

Per cui per esempio a 2 kg di gasolio per quintale di secco corrispondono:

$$(2 \cdot 43.000)/36.500 = 2,36 \text{ m}^3 \text{ di metano}$$

¹⁰ Potere calorifico inferiore del combustibile: quantità di calore sviluppata dalla combustione di un chilogrammo di combustibile. Si ricorda che 1 kcal = 4,187 kJ.

6.9. Consumo termico specifico e rendimento termico totale

Sono i parametri che qualificano il funzionamento di un essiccatoio. Essi dipendono dalle condizioni dell'aria ambiente (il primo è minore con aria più calda e con umidità relativa più bassa), dal grado di saturazione dell'aria all'uscita del contenitore e dall'umidità del prodotto umido. Con riferimento a quest'ultima poi, si avrà una spesa termica in aumento con il diminuire del tenore di umidità del prodotto verde, date le maggiori difficoltà di estrazione dell'acqua alle basse umidità.

Il consumo termico specifico¹¹(Ws) definisce il rendimento dell'impianto e quindi il costo dell'essiccazione. Si calcola con la relazione:

$$Ws = Wh / Qa \quad [\text{kJ/kgH}_2\text{O evaporata o kcal/kgH}_2\text{O evaporata}]$$

Dove:

Qa = acqua evaporata, in kg/h;

Wh = Ch • Hi (kJ/h o kcal/h) = quantità oraria di calore sviluppata dalla combustione di Ch chilogrammi all'ora di combustibile avente potere calorifico inferiore Hi calorie orarie sviluppate nella combustione.

Con il suddetto consumo si ricava poi il **rendimento termico totale** dell'essiccatoio:

$$\eta_t = We / Ws$$

Dove:

We = valore teorico di vaporizzazione di un chilogrammo di acqua, in kcal/kgH₂O. Esso è di difficile determinazione, essendo il processo di evaporazione un fenomeno che avviene a temperature variabili durante l'intervallo di essiccazione. In via alternativa può essere calcolato con la formula di Mollier:

$$We = 595 + 0,46 (t_2 - t_0) \quad [\text{kcal/kgH}_2\text{O}]$$

dove il primo addendo, 595, rappresenta il calore di vaporizzazione dell'acqua, mentre il secondo quello di riscaldamento della stessa dalla temperatura ambiente t₀, supposto che la granella umida si trovi a questa temperatura all'atto dell'introduzione nell'essiccatoio, alla temperatura t₂ dell'aria umida all'uscita dalla colonna.

Numericamente: We = 2512 – 2553 kJ/kgH₂O (= 600 – 610 kcal/kgH₂O).

¹¹ Consumo termico specifico: le calorie spese per evaporare un chilogrammo di acqua.

Il rendimento è quindi il rapporto, in percento, tra la quantità di calore necessaria per evaporare un chilogrammo di acqua allo stato libero ($2.500 \text{ kJ} = 600 \text{ kcal}$) e quella effettivamente spesa nell'essiccazione attraverso il riscaldamento dell'aria con il combustibile.

Se ad esempio tale quantità è di 5.000 kJ ($= 1.200 \text{ Kcal}$ circa), il rendimento termico dell'impianto risulta del 50%, ciò significa che solo metà delle calorie fornite nella combustione per il riscaldamento dell'aria sono state utilizzate per l'evaporazione dell'acqua dalla granella, il rimanente è andato perduto in diverse forme nell'impianto di essiccazione.

Tale rendimento è ovviamente più basso in corrispondenza di un prodotto meno umido da essiccare poiché viene soprattutto asportata l'acqua di vegetazione libera che, oltre a essere più difficilmente eliminabile, si presenta distribuita uniformemente all'interno delle cariossidi, anziché essere superficiale come quella di imbibizione.

Per il mais il rendimento si aggira intorno ai valori del 60-65% (consumo termico specifico nell'ordine di circa $4.190\text{--}3.850 \text{ kJ/kgH}_2\text{O} = 1.000\text{--}920 \text{ kcal/kgH}_2\text{O}$), per raggiungere poi negli impianti a recupero il 70-75% circa, ovvero spendendo come minimo circa 3.350 kJ ($= 800 \text{ kcal}$) per evaporare un chilogrammo di acqua.

Per rendersi infine conto del fatto che solo una parte del calore W_s sviluppato dalla combustione viene effettivamente utilizzato nella evaporazione dell'acqua secondo i suddetti valori del rendimento totale dell'impianto, bisogna osservare il diagramma di flusso di figura 31 dove sono visualizzate le diverse perdite di calore all'interno dell'essiccatoio.

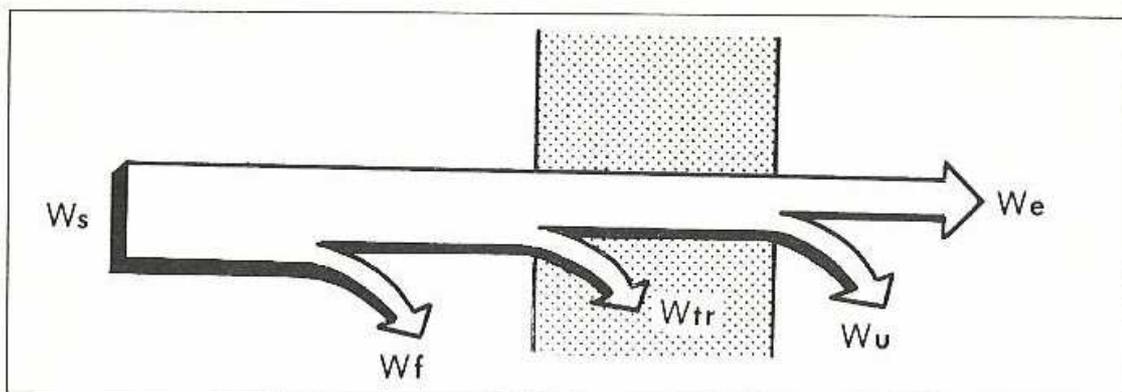


Figura 31: Ripartizione della quantità totale W_s di calore nella fase di essiccazione, calore effettivamente speso nell'evaporazione di un chilogrammo di acqua; W_f , perdite del forno per imperfetta combustione e trasmissione all'esterno del generatore e dei condotti della ventilazione (circa 5-10% del totale); W_{tr} , perdite di trasmissione attraverso le pareti del contenitore e per il riscaldamento della granella (5-20% del totale); W_u , perdite dall'essiccatoio come calore sensibile contenuto nell'aria umida (15-25% del totale); W_e , quantità di calore necessaria per far evaporare un chilogrammo di acqua allo stato libero

Le calorie effettivamente spese per evaporare un chilogrammo di acqua (W_s) comprendono, oltre alle calorie teoriche di vaporizzazione (W_e), anche: il calore disperso attraverso le pareti del generatore di aria calda e dei condotti di ventilazione (W_f); il calore disperso nelle celle di essiccazione e impiegato per il riscaldamento della granella (W_{tr}); il calore perso per incompleta saturazione dell'aria all'uscita dell'essiccatoio (W_u).

La conoscenza del consumo termico specifico (W_s) consente di individuare non solo il rendimento dell'impianto, ma anche di determinare il **consumo specifico di combustibile** (C_c), espresso normalmente in chilogrammi di gasolio per quintale di prodotto secco. Tale indice varia naturalmente con la quantità di acqua che occorre asportare e con il rendimento dell'impianto di essiccazione. Si calcola con la relazione:

$$C_c = W_s \cdot (Q_{pe} / H_i) \text{ [kg di gasolio/ q di prodotto secco]}$$

Dove:

W_s = consumo termico specifico, in kcal/kgH₂O;

Q_{pe} = acqua evaporata per quintale di prodotto secco, in kg/q;

H_i = potere calorifico inferiore del combustibile, in kcal/kg di combustibile.

6.10. Consumo specifico di energia elettrica

Il consumo di energia elettrica (C_e), per l'azionamento del ventilatore, del bruciatore e degli apparati di trasporto e pulizia della granella dipende dalla potenza installata, dalla quantità di acqua da asportare e dalla capacità di evaporazione dell'impianto. Si può quindi individuare il consumo specifico di energia elettrica secondo la relazione:

$$C_e = E \cdot (Q_{pe} / Q_a) \text{ [kWh/q di prodotto secco]}$$

Dove:

E = potenza impegnata, in kW;

Q_{pe} = acqua evaporata per quintale di prodotto secco, in kg/q;

Q_a = acqua evaporata dall'impianto, in kg/h.

Per i cereali si può assumere un valore compreso tra 0,8-0,9 (nei grandi impianti per mais) e 2,5 kWh per quintale di prodotto secco.

Generalmente le schede tecniche degli impianti riportano la potenza installata per il funzionamento del solo essiccatoio; essa dipende ovviamente dal tipo e soprattutto dalle dimensioni del contenitore potendo variare da 5-6 fino a 90-100 kW.

CAPITOLO 7

Conteggio delle perdite di peso nell'essiccazione del cereale

Nel conservare il cereale mediante essiccazione si verifica una perdita di peso perché parte dell'acqua contenuta viene eliminata, mentre la sostanza secca rimane invariata. Se il cereale venisse commercializzato in base alla sostanza secca, come sarebbe da preferire, non servirebbe conoscere la perdita di peso causata dall'evaporazione dell'acqua, si avrebbe un peso commerciale perfetto e le partite di cereale verrebbero vendute ed immagazzinate con minor umidità.

Dato che non è usanza agire in tale modo già negli anni '30 si è cominciata a conteggiare la perdita di peso che causa l'essiccazione, così da non riscontrare differenze nelle consegne. Nel conteggiarla non si considera però la diminuzione di peso dovuta allo sviluppo di polvere.

Sarebbe sbagliato calcolare il peso detraendo da ogni 100 unità tante unità quante rappresentano la differenza fra il tenore in acqua prima e dopo l'essiccazione. Adottando questa procedura si calcolerebbe un peso più grande del cereale dopo aver subito il processo essiccativo.

Nel procedere al conteggio della perdita per essiccazione occorre tener presente che nulla viene modificato nella sostanza secca originaria, è variabile solo il valore dell'umidità esistente. In altre parole, nell'essiccazione il peso globale diminuisce e la sostanza secca rimane inalterata nella sua originaria quantità.

Decisivo per il calcolo è che il prodotto non essiccato abbia maggior peso dell'essiccato.

Se si converte la percentuale di umidità in peso d'acqua, applicando la nota proporzione:

$$100 : \text{percentuale d'umidità} = \text{peso del cereale} : \text{peso dell'acqua}$$

e ponendo a base del conteggio il prodotto non essiccato, si troverà il peso dell'acqua. Se si applicano questi concetti al quesito riguardante la perdita per essiccazione, risulta che durante il procedimento si estrae una maggior quantità d'acqua della differenza fra le percentuali di umidità del prodotto non essiccato ed essiccato. Se è stata eliminata una maggiore quantità d'acqua di quella supposta, anche la perdita di peso verificatasi deve essere più grande di quella data dalla semplice differenza.

Il calcolo della perdita di essiccazione, o del minor peso del cereale in seguito all'essiccazione, deve tener conto di queste considerazioni.

Per i conteggi sono state sviluppate parecchie formule come quelle di E.A.Schmidt nel 1940. Per semplificare la rappresentazione, i valori sono stati sostituiti da lettere; per il conteggio è indifferente quale unità di peso si ponga a base del calcolo, ma la misura scelta deve essere applicata per tutti i valori in modo univoco.

G1 = PESO DEL PRODOTTO IN ORIGINE

G2 = PESO DEL PRODOTTO ESSICCATO

F1 = TENORE IN UMIDITA' DEL PRODOTTO IN ORIGINE IN %

F2 = TENORE IN UMIDITA' DEL PRODOTTO ESSICCATO IN %

V = PERDITA DI PESO

%V = PERDITA DI PESO IN %

T = SOSTANZA SECCA

7.1. La perdita di peso

La domanda, concernente quale perdita di peso si ottiene dall'essiccazione ha importanza se questa viene eseguita da terzi; l'ordinante deve sapere quale perdita di peso riconoscere all'esecutore, senza subire danno, e l'esecutore deve giustificarsi.

Ciò che è noto ad entrambi è il peso del prodotto immesso all'essiccazione.

L'incognita cercata è l'ammissibile perdita di peso V, o %V, ed il peso permesso-consentito del prodotto essiccato. L'espressione "permesso-consentito" si riferisce alla perdita dovuta alla sottrazione d'acqua, esclusa la perdita per spolverio.

Dopo l'essiccazione, mediante pesatura si determina la perdita effettiva di peso in confronto al peso iniziale del cereale; i valori verranno confrontati con quelli calcolati. Entro certi limiti concorderanno, conteggiando anche le perdite da spolveramento.

Col calcolo si può constatare di quante unità di peso può diminuire il prodotto per arrivare al desiderato tenore in acqua, ad esempio 13,5%.

Si può conteggiare anche in percentuali. F1 e F2 sono numeri percentuali, riferiti a 100 parti del prodotto non essiccato ed essiccato. Per calcolare con questi numeri percentuali il peso dell'acqua contenuta nell'intero prodotto, bisogna dividere i valori per 100 e moltiplicarli per l'intero peso del prodotto.

In tal modo si ha:

1) per prodotto non essiccato un peso d'acqua di: $(F1 \cdot G1)/100$

2) per prodotto essiccato un peso d'acqua di: $(F2 \cdot G2)/100$

Di conseguenza la sostanza secca T è:

$$1) \text{ per il prodotto non essiccato: } G1 - [(F1 \cdot G1)/100]$$

$$2) \text{ per il prodotto essiccato: } G2 - [(F2 \cdot G2)/100]$$

Dato che la sostanza secca rimane inalterata con l'essiccazione, si ha pure:

$$T = G1 - [(F1 \cdot G1)/100] = G2 - [(F2 \cdot G2)/100]$$

Applicando le regole algebriche, questa equazione può venire trasformata come segue:

$$G2 \cdot [1 - (F2/100)] = G1 \cdot [1 - (F1/100)]$$

$$\begin{aligned} G2 &= G1 \cdot [1 - (F1/100)] / [1 - (F2/100)] = G1 \cdot [1 - (F1/100)] / [100 - (F2/100)] = \\ &= G1 \cdot (100 - F1) / (100 - F2) \end{aligned}$$

Il peso cercato del prodotto essiccato è dato da $V = G1 - G2$. La perdita di peso viene successivamente conteggiata in perdita di peso in %, oppure calcolata in modo immediato senza ricorrere alla determinazione di $G2$.

$$V = G1 - G2 = G1 - [G1 \cdot (100 - F1)/(100 - F2)] = G1 \cdot [1 - [(100 - F1)/(100 - F2)]]$$

$$V = G1 \cdot [(100 - F2) - (100 - F1)] / (100 - F2) = V \cdot [(G1 \cdot (F1 - F2)) / (100 - F2)]$$

$$\%V = [100 \cdot G1 \cdot (F1 - F2)] / [G1 \cdot (100 - F2)] = [100 \cdot (F1 - F2)] / (100 - F2)$$

ESEMPIO: 150 t di frumento arrivano nell'essiccatoio con tenore in acqua del 18,5 %. Quale sarà la perdita di peso, dipendente puramente dall'eliminazione d'acqua, che si verifica per effetto dell'essiccazione? Qual è il peso del prodotto essiccato? A quanto ammonta in percentuale la perdita?

$$G2 = G1 \cdot (100 - F1) / (100 - F2) = 150 \cdot (100 - 18,5) / (100 - 13,5) = 141,4 \text{ t}$$

$$V = G1 \cdot (F1 - F2) / (100 - F2) = 150 \cdot (18,5 - 13,5) / (100 - 13,5) = 8,6 \text{ t}$$

A titolo di controllo dell'esatto conteggio si può procedere al calcolo di V in base alla formula:

$$V = G1 - G2 = 150 - 141,4 = 8,6 \text{ t}$$

$$\%V = [100 \cdot (F1 - F2)] / (100 - F2) = [100 \cdot (18,5 - 13,5)] / (100 - 13,5) = 5,78$$

7.2. Tenore in umidità dopo l'essiccazione

Il calcolo del tenore in umidità di un prodotto essiccato ha importanza secondaria e viene eseguito solo per avere un orientamento per l'immagazzinamento senza danni. Per svolgere il conteggio occorre prima controllare il peso del prodotto essiccato.

La formula per calcolare F2 può derivarsi dall'equazione:

$$G2 = [G1 \times (100 - F1)] / (100 - F2)$$

$$G2 \cdot (100 - F2) = G1 \cdot (100 - F1)$$

$$100 - F2 = [G1 \cdot (100 - F1)] / G2$$

$$F2 = 100 - [G1 \cdot (100 - F1)] / G2$$

Nella pratica si avranno raramente valori perfettamente concordati fra il tenore in acqua calcolato ed il tenore in acqua constatabile in azienda.

Dipende dal fatto che tale determinazione gode di un limite di tolleranza, fino allo 0,2% assoluto, e che l'umidità può raggiungere grandezze molto differenti.

Anche un diligente prelevamento dei campioni non esclude completamente la ripercussione sul risultato.

ESEMPIO: 150 t di frumento arrivano all'essiccazione con un tenore in acqua del 18,5%. Il prodotto essiccato pesa 141,4 t.

Quale tenore in acqua possiede il prodotto essiccato?

$$F2 = 100 - [G1 \cdot (100 - F1)] / G2 = 100 - [150 \cdot (100 - 18,5)] / 141,4$$

$$F2 = 100 - 86,5 = 13,5\%$$

7.3. Tenore in umidità prima dell'essiccazione

Generalmente non viene valutato il tenore in acqua del prodotto umido dopo l'essiccazione, se si decide di valutarlo è per sincerarsi posteriormente della reale necessità del processo.

Il calcolo è possibile, ma si preferisce determinare tale tenore prima, per scegliere la migliore condizione di essiccazione. Inoltre è importante sotto un altro aspetto. Si è infatti dimostrato che l'umidità prima del processo si può impiegare per controllare il risultato globale dell'essiccazione.

In determinati casi si ha la spiegazione di perdite di essiccazione che sembrano troppo alte o basse, mentre il tenore in umidità del prodotto essiccato si trova entro il giusto margine.

La formula per calcolare F1 può essere derivata dall'equazione:

$$G2 = [G1 \cdot (100 - F1)] / (100 - F2)$$

$$G2 \cdot (100 - F2) = G1 \cdot (100 - F1)$$

$$100 - F1 = [G2 \cdot (100 - F2)] / G1$$

$$F1 = 100 - [G2 \cdot (100 - F2)] / G1$$

ESEMPIO:

$$F1 = 100 - [G2 \cdot (100 - F2)] / G1 = 100 - [141,4 \cdot (100 - 13,5)] / 150$$

$$F1 = 100 - 81,5 = 18,5\%$$

CAPITOLO 8

Il costo di essiccazione

8.1. Formulazione del costo

Data l'importanza della conoscenza del costo di utilizzazione di un impianto aziendale per una razionale ed economica gestione dell'impresa, ci si sofferma in questo capitolo all'analisi dei vari elementi che concorrono alla definizione dell'incidenza economica dell'essiccazione soprattutto al fine di evidenziarne la convenienza o meno dell'acquisto in proprio dell'impianto.

Gli elementi di costo si possono ricondurre a:

- *costi fissi o costanti* (K_f), espressi in euro all'anno che, essendo indipendenti dall'impiego, presentano un'incidenza oraria variabile con il numero delle ore di lavoro all'anno (costo fisso orario);
- *costi variabili o proporzionali* (K_v), espressi in euro per ora di lavoro, per cui la loro incidenza oraria è costante (costo variabile orario), mentre quella annua aumenta proporzionalmente, o quasi, con l'utilizzazione dell'impianto.

Indicando con H il numero di ore lavorative medie per anno, il costo totale annuo (K_t) sarà quindi dato da:

$$K_t = K_f + K_v \cdot H \quad [\text{Euro/anno}]$$

Mentre il costo orario (K_h) sarà espresso dalla relazione:

$$K_h = (K_f/H) + K_v \quad [\text{Euro/h}]$$

Il suddetto costo unitario può anche essere riferito al quintale di prodotto essiccato. Esprimendo con Q_m la quantità di prodotto lavorato in un anno in quintali, tale costo si calcola con la formula:

$$K_h = (K_f/Q_m) + [(H/Q_m) \cdot K_v] \quad [\text{Euro/quintale}]$$

La tabella di figura 32 schematizza attraverso i simboli prescelti le diverse componenti dei due tipi di costo:

Costi fissi (Kf)	Simbolo	Costi variabili (Kv)	Simbolo
Ammortamento	Qa	Azionamento	Caz
Interesse	Qi	Manutenzione e riparazioni	Cmr
Ricovero, assicurazione e tasse	Qar	Materiale di consumo	Cms
		Manodopera	Cma

Figura 32: Costi fissi e variabili nella gestione di un impianto di essiccazione

8.2. Costi fissi

8.2.1. Ammortamento

L'ammortamento annuo, definito anche e più correttamente come quota di reintegra, ovvero quella quota parte del prezzo di acquisto derivante dalla sua suddivisione nel numero di anni di impiego, serve alla conservazione del capitale impegnato per l'acquisto dell'impianto (essiccatoio più sili e opere murarie), esprime cioè la perdita di valore annuo del capitale (Qa).

Occorre tenere presente i seguenti concetti:

- la vita utile (Vu), ovvero il numero massimo di ore di funzionamento di un impianto, è molto variabile (circa 5.000-10.000);
- l'obsolescenza tecnica (Ot), cioè il numero di anni oltre i quali l'impianto diventa tecnicamente superato ed economicamente non più conveniente, è di circa 10 anni;
- la vita media annua (Va), cioè il numero ottimale di ore d'impiego annuo dell'impianto (Vu/Ot), dovrebbe essere dell'ordine delle 600-900 ore all'anno. Per questo motivo si tende a concentrare gli impianti in grandi strutture (cooperative o commerciali) in grado di garantire una elevata utilizzazione.

L'ammortamento annuo viene quindi di solito considerato di tipo lineare, cioè costante per ciascun anno, sulla base della seguente semplice formula:

$$Qa = (Vi - Vf) / n \quad [\text{Euro/anno}]$$

Dove Vi è il valore iniziale dell'impianto e Vf il valore finale, o meglio, il valore dell'impianto all'anno n (valore di recupero) che si può stimare sull'ordine del 10% di Vi mentre n è il numero di anni di impiego dell'impianto.

8.2.2. Interesse

Tale quota (Qi) rappresenta il costo del denaro investito nell'acquisto dell'impianto. Si suppone poi di valutare il capitale C sul quale calcolare l'interesse annuo come media

tra il valore iniziale e quello finale dell'impianto stesso, come risulta dalla seguente espressione:

$$C = (V_i + V_f) / 2$$

Indicando poi con i il saggio di interesse, la corrispondente quota annua Q_i sarà data da:

$$Q_i = i \cdot [(V_i + V_f)/2]$$

Considerata poi l'attuale situazione inflazionistica, che porta ad alti e instabili livelli di tassi d'interesse, si può fare riferimento al tasso medio ottenibile dai normali depositi bancari o al tasso applicato nel credito agevolato (mutui).

8.2.3. Assicurazione e tasse

Tale quota rappresenta la somma annua che copre i rischi e gli oneri di tipo fiscale legati all'impiego dell'impianto. Con una sufficiente approssimazione, tali voci possono essere conglobate in un'unica valutazione (Q_{ra}) ed espresse come percentuale della quota di ammortamento, cioè:

$$Q_{ra} = (0,15 \div 0,30) \cdot Q_a \quad [\text{Euro/anno}]$$

8.3. Costi variabili

Ad eccezione della manutenzione, per la quale una certa spesa viene comunque a gravare anche se l'impianto (solo essiccatoio in questo caso) non viene impiegato, gli altri costi variabili sono in relazione alle effettive ore di lavoro e si esprimono in euro all'ora.

8.3.1. Azionamento

Tale voce (C_{az}) rappresenta il costo orario che si deve sostenere per il funzionamento dell'impianto.

La spesa è rappresentata dai consumi orari di combustibile, lubrificante e di forza motrice moltiplicati per i rispettivi prezzi unitari. Tenuto conto del rendimento termico, si può indicativamente prevedere, come si è visto, un consumo medio di combustibile pari a 1,1-2,5 kg di gasolio per quintale di prodotto secco e un consumo di energia elettrica variabile da 0,8-0,9 a 2,5 kWh per quintale di prodotto secco a seconda dei diversi tipi di impianto e di prodotto da essiccare.

8.3.2. Manutenzione e riparazione

Tale quota (C_{mr}) rappresenta l'onere sostenuto per tenere in efficienza l'impianto. Le spese per riparazioni sono essenzialmente in funzione delle ore di effettivo impiego, mentre quelle di manutenzione ordinaria hanno una componente fissa e una componente legata alle ore di lavoro (H).

Manutenzione e riparazione, comunque, possono essere calcolate congiuntamente ed espresse, con buona approssimazione, in percentuale sul prezzo d'acquisto dell'impianto: tale incidenza annua varia indicativamente tra lo 0,5 e l'1% del valore nuovo. Per ottenere poi il costo orario bisognerà naturalmente dividere tale importo per le ore di effettiva utilizzazione annua (H).

8.3.3. Manodopera

Il costo orario della manodopera (C_{ma}) è rappresentato dalla somma della paga oraria del numero (i) di operatori ($\sum C_{ma_i}$), al lordo dei contributi previdenziali e amministrativi.

Il calcolo di tale voce si rende necessario specie quando occorre scegliere fra impianti che, per il loro funzionamento, richiedono un diverso numero di addetti.

8.4. Analisi del costo

Le componenti fisse e variabili (annue le prime e orarie le seconde) del costo di esercizio di un impianto di essiccazione di cui nei paragrafi precedenti si sono analizzate le incidenze delle diverse voci, si possono esprimere in funzione dell'utilizzazione annua dell'impianto con gli andamenti delle figure 33 e 34.

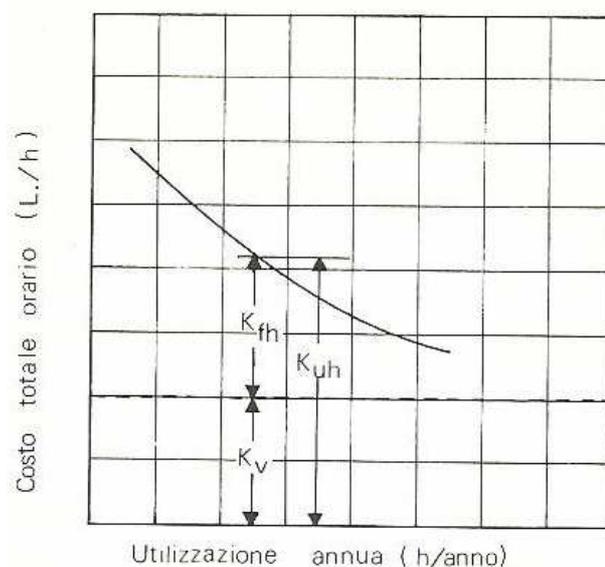


Figura 33: Andamento del costo fisso orario (K_{fh}), del costo variabile orario (K_v) e del costo totale orario (K_{uh}) in funzione delle ore di utilizzazione annue

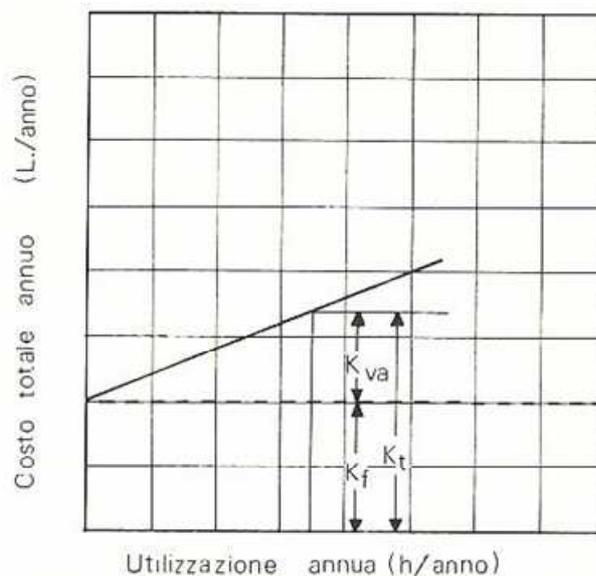


Figura 34: Andamento del costo fisso annuo (Kf), del costo variabile annuo (Kva) e del costo totale annuo (Kt) in funzione delle ore di utilizzazione annue

Dall'osservazione dei due grafici si ricavano le seguenti indicazioni fondamentali:

- il *costo totale annuo*, risultando costante la componente fissa, aumenta linearmente con l'utilizzazione annua dell'impianto;
- il *costo totale orario*, essendo costante la componente variabile e variabile la componente fissa, diminuisce con l'utilizzazione in quanto si riduce l'incidenza dei costi fissi;
- un essiccatoio con elevata capacità di lavoro, se poco utilizzato, comporta un costo orario elevato per la forte incidenza dei costi fissi.

Il costo totale orario, nota la massa di prodotto lavorato, può poi essere facilmente trasformato in *costo totale unitario*, cioè riferito al quintale di cereale essiccato.

Inoltre, circa la scelta da parte dell'azienda tra l'acquisto in proprio dell'impianto e il ricorso a contoterzista, essa può essere affrontata analiticamente su semplice base formulistica. Esprimendo con C il costo unitario del noleggio, si avrà l'indifferenza nella scelta allorché esso equivarrà a quello aziendale (figura 35), ovvero:

$$C = (K_f / H) + K_v$$

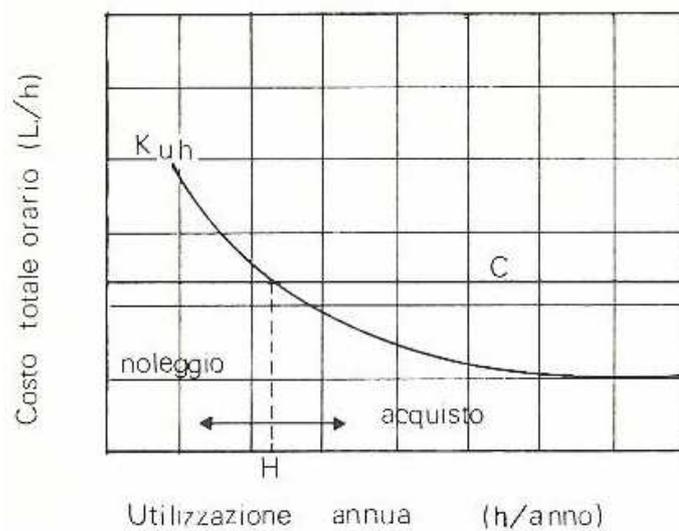


Figura 35: Determinazione delle ore annue H di utilizzazione dell'impianto oltre le quali è conveniente l'acquisto in proprio dello stesso, in quanto il costo orario di essiccazione (K_{uh}) risulta inferiore al costo di noleggjo (C)

Dalla riportata espressione si può esplicitare il *numero limite di ore annue* d'impiego al di là del quale è utile l'acquisto in proprio da parte dell'azienda:

$$H = K_f / (C - K_v)$$

Tale valore può essere individuato nel grafico del costo orario totale in corrispondenza dell'intersezione con il costo del noleggjo.

CAPITOLO 9

Il caso studio: DONI SILVANO srl

Commercio cereali e prodotti per l'agricoltura

9.1. La situazione attuale dell'azienda



Figura 36: fotografia dell'impianto di essiccazione del caso studio

Nel 1979 nacque l'attività in proprio di Silvano Doni che prevedeva il commercio di prodotti per l'agricoltura, principalmente concimi, sementi ed antiparassitari. Con l'avvento delle prime semine di soia in Italia, nel 1982, la Doni Silvano, ditta individuale, affiancò all'attività originaria la raccolta presso terzi e la commercializzazione di soia. Visto il successo di quest'ultima attività, nel 1989 si cominciò a pensare di sviluppare la sede operativa della ditta situata a Dolo, in provincia di Venezia, si realizzarono i primi 2000 m² di piazzale e la pesa per automezzi e si acquistò la prima pala gommata. A partire da quest'anno, grazie agli interventi compiuti, l'azienda decise di affiancare alla raccolta della soia quella dei cereali.

Nel 1992 si assistette alla costruzione del primo magazzino, di circa 200 m², ed il passaggio della Doni Silvano da ditta individuale a srl (società a responsabilità limitata). Lo sviluppo più importante dal punto di vista industriale si ebbe tra il 1995 e il 1998 con l'installazione prima di un impianto di essiccazione per cereali ed oleaginose, comprensivo di torre di essiccazione e due sili di stoccaggio, e poi di un impianto di termofioccatura. L'ampliamento delle opere presenti proseguì anche nei dieci anni successivi con la costruzione di due grandi magazzini di stoccaggio lungo il confine est della proprietà della ditta (un capannone da 1000 m² nel 2000 e un secondo da 1900 m² nel 2008, e di un ampio piazzale a sud).

Ad oggi la ditta Doni Silvano esercita l'attività di raccolta, essiccazione e commercializzazione di prodotti agricoli nonché la vendita di prodotti per l'agricoltura con un portafoglio prodotti più ampio di quello di origine.

Il processo di essiccazione riguarda i cereali (mais e grano) e la soia, provenienti dalla raccolta in campo e successivamente stoccati in magazzino.

L'attività è funzionale al processo agrario in quanto, oltre che essere propedeutica alla commercializzazione, è indispensabile per una corretta conservazione dei prodotti.

L'intera superficie viene classificata come agro-industriale e ha visto, come appena illustrato, lo sviluppo, nei diversi decenni posteriori alla nascita, dell'insediamento produttivo.

Attualmente l'area produttiva e commerciale comprende:

- ufficio commerciale munito di apparecchiatura per rilievo peso automezzi, sonda per prelievo campioni di materiale e sistema di misurazione dell'umidità;
- pesa disposta frontalmente all'ufficio (la sequenza di operazioni che segue il prodotto che arriva in azienda è la seguente: rilevamento del peso, prelievo di un campione mediante sonda verticale disposta all'interno del rimorchio dove giace il materiale, rilevamento dell'umidità con apparecchiatura specifica e scarico nella tramoggia di carico della torre di essiccazione);
- tre magazzini di metratura variabile, che totalmente coprono una superficie di circa 3000 m² con le caratteristiche illustrate nella tabella di figura 37.

ANNO	POSIZIONE	METRATURA	DESTINAZIONE D'USO
1992	A sud, di fronte all'ufficio commerciale	200 m ²	Prodotti per l'agricoltura
2000	Zona est della proprietà	1000 m ²	Prodotti per l'agricoltura / prodotti agricoli essiccati (capacità = 50-55.000 q.li)
2008	Zona est della proprietà	1900 m ²	Prodotti per l'agricoltura / prodotti agricoli essiccati (capacità = 80-90.000 q.li)

Figura 37: Riepilogo magazzini aziendali

- torre di essiccazione con potenzialità di 120 q/h;
- due sili di stoccaggio di capacità 15000 quintali ciascuno;
- impianto di termofiocatura con potenzialità di 20-40 q/h in funzione del prodotto trattato;
- deposito interrato di miscela propano-butano da 25 m³ destinata al bruciatore della torre di essiccazione;
- serbatoio di gasolio da 5 m³ destinato al generatore di corrente che affianca la rete elettrica durante l'utilizzo della torre e ai mezzi aziendali;
- attrezzature complementari.

Le opere murarie e le apparecchiature presenti in azienda risalgono a periodi temporali diversi in quanto la ditta ha visto un forte sviluppo tra il 1992 e il 2008.

Ad oggi, per le motivazioni che saranno dettagliatamente illustrate nel paragrafo seguente, la ditta intende dar corso ad un progetto di ammodernamento e razionalizzazione dell'impianto di essiccazione, consistente nell'installazione di una nuova torre di essiccazione.

9.2. Motivazioni sviluppo impianto di essiccazione

L'essiccazione dei prodotti agricoli è indispensabile per una corretta conservazione degli stessi.

Il processo di conservazione richiede, come illustrato in maniera approfondita nei capitoli precedenti, la sottrazione dell'umidità in eccesso in modo da ridurre i rischi di fermentazione e di attacchi di funghi ed insetti.

Per ridurre tali rischi e avere la certezza di una buona conservazione si preferisce essiccare il prodotto al 12-13% di umidità.

Al momento della raccolta in campo, i cereali, per esempio, contengono una percentuale di umidità variabile dal 25 al 35%, è perciò fondamentale procedere all'essiccazione nelle successive 24-72 ore, pena il loro deterioramento.

Come ben noto, la produzione agricola è un processo prettamente stagionale per cui la raccolta ed il conferimento ai centri di stoccaggio avviene nell'arco di pochi giorni. Di conseguenza l'impianto di essiccazione deve avere una potenzialità tale da trattare nell'arco dei tempi di raccolta tutto il prodotto conferito, diversamente questo deve essere trasportato ad altri impianti, con conseguente aggravio del traffico.

Attualmente all'impianto della ditta Doni Silvano vengono conferiti:

1. circa 250.000 quintali di mais ripartiti nell'arco di circa 40 giorni, nel periodo settembre-ottobre;
2. circa 50.000 quintali di granella di frumento ripartiti nell'arco di circa 15 giorni, nel mese luglio;
3. circa 50.000 quintali di granella di soia ripartiti nell'arco di circa 40 giorni, nel periodo settembre-ottobre.

L'impianto esistente ha una potenzialità di 120 q/h, pertanto, anche operando a ciclo continuo, è in grado di trattare non più di 2800 q/giorno, senza considerare possibili interruzioni per manutenzione e/o malfunzionamenti che andrebbero a ridurre la produzione.

La rimanente quantità di prodotti conferiti dagli agricoltori deve essere immediatamente caricata su autotreni e trasportata presso altri impianti ubicati fuori dal territorio comunale.

La realizzazione del nuovo impianto di essiccazione porterebbe la potenzialità dagli attuali 2800 q/giorno a 11000 q/giorno, rendendo lo stabilimento completamente autonomo.

La scelta di installare un nuovo impianto in aggiunta a quello esistente, anziché sostituirlo con uno più potente, è dettata dalla stagionalità delle lavorazioni e dalla diversa quantità dei prodotti conferiti dovuta a:

1. **Tipologia di prodotto** - La granella di mais è decisamente superiore a quella di frumento e di soia sia in termini assoluti che in termini relativi intesi come q/giorno;
2. **Scelte culturali** - Queste vengono fatte autonomamente dagli agricoltori in relazione all'andamento del mercato degli anni precedenti, per cui la quantità totale dei diversi tipi di prodotto varia di anno in anno, pur rimanendo invariata la quantità complessiva trattata;
3. **Andamento climatico** - Nei periodi di tempo stabile e asciutto la raccolta viene distribuita in tempi più lunghi e quindi anche l'afflusso all'impianto si riduce. Con

tempo incerto o piovoso la raccolta tende a concentrarsi in periodi più brevi con un maggior afflusso in termini di quantità giornaliera.

Stante queste condizioni, in presenza di un unico impianto di grande capacità produttiva, sarebbe necessario metterlo in esercizio anche per modeste quantità con notevole spreco di energia che si traduce in maggiori costi e quindi gestione antieconomica.

Inoltre in taluni casi si verifica la necessità di dover trattare contemporaneamente prodotti diversi (soia-mais e frumento-sorgo); con la presenza di due distinte torri di essiccazione le operazioni possono essere condotte in parallelo. Con un unico impianto si dovrebbe attendere il completo svuotamento dell'impianto da un tipo di prodotto prima di immetterne uno diverso.

Per i motivi sopra esposti, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, la presenza di due impianti con diversa potenzialità risulta una scelta più economica e funzionale di quella di un unico impianto con potenzialità pari alla somma dei due.

9.3. Il layout aziendale

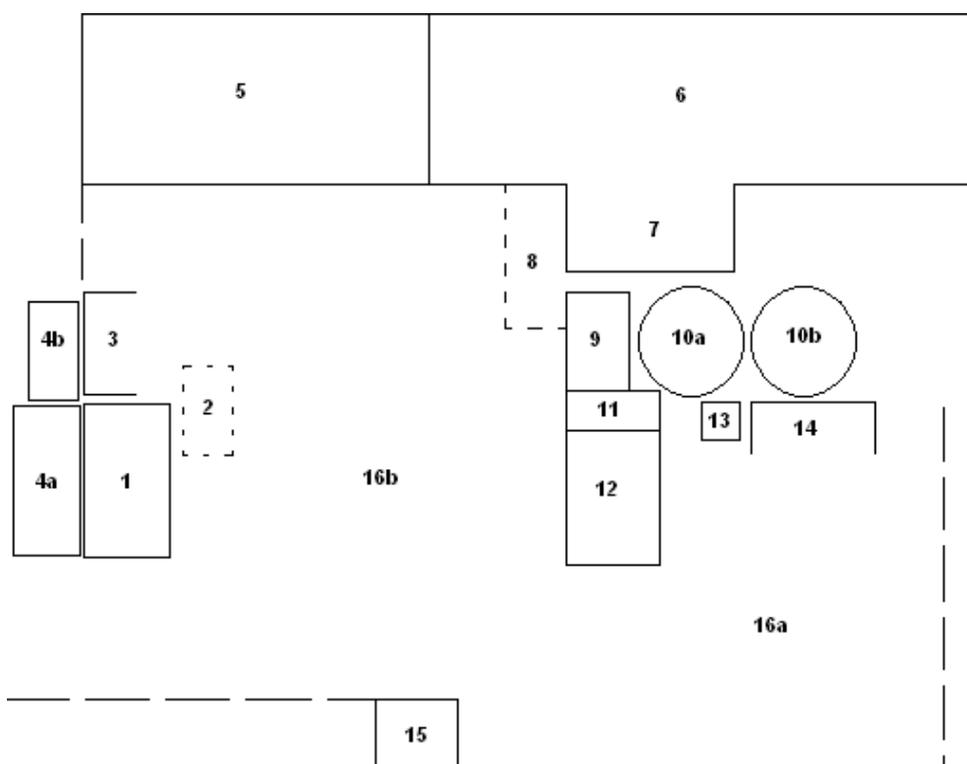


Figura 38: layout dell'area produttiva e commerciale dell'azienda

Legenda:

- 1** ufficio commerciale con annesso rurale
- 2** pesa automezzi
- 3** silo orizzontale
- 4a** annesso rustico
- 4b** annesso rustico
- 5** magazzino di stoccaggio prodotti per l'agricoltura/granella essiccata
- 6** magazzino di stoccaggio prodotti per l'agricoltura/granella essiccata
- 7** impianto di termofiocatura
- 8** tramoggia di carico della torre di essiccazione con pensilina
- 9** torre di essiccazione
- 10a** primo silo di stoccaggio
- 10b** secondo silo di stoccaggio
- 11** cabina di controllo dell'impianto di essiccazione e sede del generatore di corrente
- 12** magazzino prodotti per l'agricoltura
- 13** camera raccolta polveri
- 14** silo orizzontale
- 15** sede deposito interrato miscela
- 16a** piazzale sud
- 16b** piazzale nord con ingresso

L'area produttiva e quella commerciale si trovano una di fronte all'altra e sono collegate da un grande piazzale che si snoda da nord a sud; sul lato est dell'area corrono invece i due magazzini più recenti. Essi, a seconda del periodo e delle necessità, possono ospitare sia prodotti per l'agricoltura sia materiale essiccato in attesa di essere commercializzato.

La zona di interesse per questo studio è quella dove risiede l'impianto di essiccazione; è qui che si riscontra la quasi totalità dei consumi sia termici che elettrici.

9.4. I prodotti

L'azienda, come accennato nella premessa di questo capitolo, svolge due attività ben distinte:

- 1) commercio di prodotti per l'agricoltura ovvero sementi, concimi e prodotti per il trattamento dei terreni ma anche per l'allevamento ovvero mangimi di diversa natura e destinazione zootecnica;

2) raccolta, essiccazione e commercializzazione di prodotti agricoli, principalmente, data la zona climatica, frumento, mais e soia.

Per quanto riguarda la prima attività, ai fini dello studio che viene svolto in questo elaborato, ci si soffermerà sui prodotti destinati agli allevamenti. Infatti il processo alla base dell'impianto di termofiocatura, ovvero la trasformazione dei grani di cereali ed oleaginose in fiocchi, ha come output un alimento sostitutivo o complementare ai mangimi. L'impianto di termofiocatura ha visto un arresto negli ultimi anni; le cause sono da ritrovare in una domanda non elevatissima e nella scelta aziendale di focalizzare le risorse sull'attività di essiccazione e commercializzazione di prodotti agricoli visto il suo crescente successo. I benefici dal punto di vista energetico e quindi economico dati dalla cogenerazione, argomento che verrà discusso nell'ultima parte di questo lavoro, possono però valorizzare il commercio di questo alimento.

Per quanto riguarda invece l'attività di raccolta, essiccazione e commercializzazione di prodotti agricoli, attività su cui la ditta ha puntato e continua a puntare molto, sarà il punto focale di questo lavoro. Come illustrato nell'introduzione, verrà preso in esame l'impianto di essiccazione, la situazione in essere e i possibili interventi migliorativi.

I prodotti processati dall'impianto dell'azienda Doni Silvano sono diversi, ma nell'analisi che verrà svolta ci si soffermerà su mais e soia in quanto sono i prodotti maggiormente trattati insieme al frumento. Quest'ultimo però, a differenza dei primi due, riesce a raggiungere l'umidità necessaria per un'ottima conservazione già sul campo, quindi l'utilizzo dell'impianto è assai contenuto e limitato a partite di materiale.

Il periodo di raccolta di mais e soia è il medesimo, ovvero settembre-ottobre, mentre le quantità variano di anno in anno per esigenze di mercato, anche se, date le condizioni climatiche e di terreno, c'è un valore medio per entrambi che ricorre negli anni.

Si sono riassunti nel diagramma di figura 39 le quantità relative ai due prodotti (intese come quintali di materiale raccolto¹²) degli ultimi tre anni.

¹² Non tutto il materiale raccolto viene essiccato, una quota viene venduta all'umidità di raccolta. La scelta di vendere viene fatta sulla base di due fattori, la capacità dell'impianto di essiccazione di seguire la cadenza di consegna e la quantità di materiale dei coltivatori, e il valore di mercato del prodotto. Tale dato viene quotato in borsa quindi varia non solo quotidianamente ma anche durante le diverse ore del giorno.

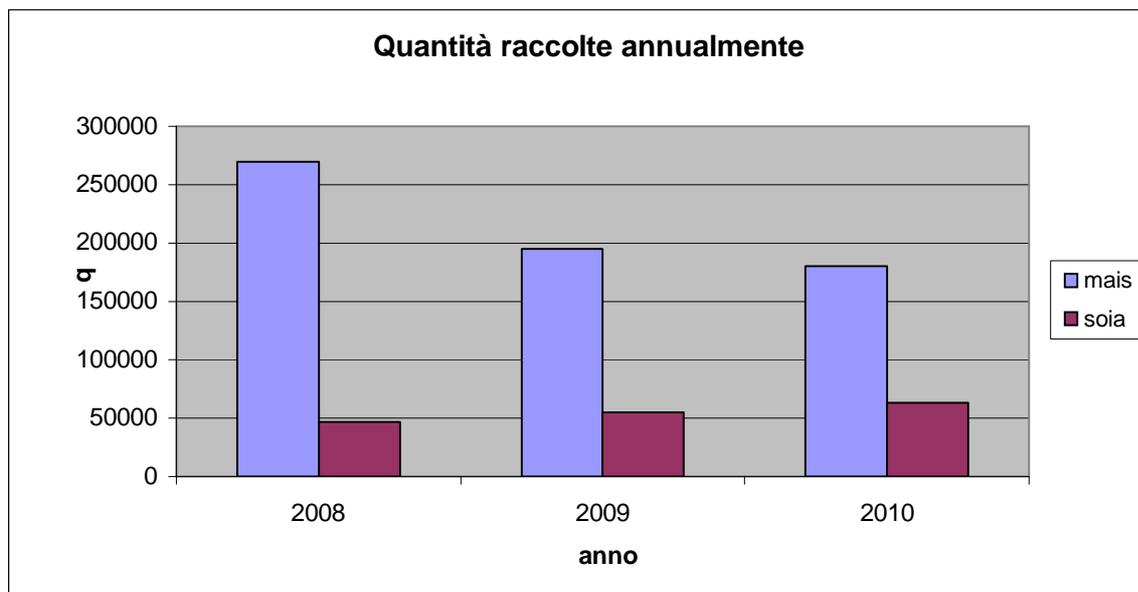


Figura 39: andamento delle quantità raccolte di materiale tra il 2008 e il 2010

Il mix di quantità da essiccare varia in funzione delle esigenze di mercato, non è possibile quindi avere una percentuale annuale media di mais e soia essiccati. Sulla base dell'esperienza l'imprenditore ha fornito un dato medio complessivo pari a 100-120.000 quintali.

9.5. Consumi energetici

Per i ragionamenti inerenti ai consumi energetici si farà riferimento alle quantità essiccate nell'ultimo anno, il 2010, illustrate nella tabella di figura 40:

	QUANTITA' RACCOLTA	QUANTITA' ESSICCATA
Mais	180.000 q	40.000 q
Soia	63.000 q	63.000 q

Figura 40: Quantità raccolte ed essiccate nel 2010

È importante distinguere le due quote di materiale essiccato (40% mais, 60% soia) in quanto il salto di umidità che subisce il prodotto è diverso per i due (mais: da 25% a 13-13,5%; soia: da 17-18% a 13%). Inoltre la temperatura dell'aria calda durante il processo non è la medesima, infatti per il mais si aggira intorno ai 110-120 °C mentre per la soia intorno agli 80-90 °C. Il vantaggio temporale che si avrebbe dal minor salto di umidità che deve subire la soia viene quindi annullato dalla minor temperatura in gioco, e di conseguenza si può affermare che il tempo di processo per i due prodotti agricoli è il medesimo. Per quanto riguarda il consumo energetico, mentre il consumo

di energia elettrica è lo stesso, quello di combustibile per il bruciatore diminuisce. Si è stimato un consumo inferiore del 30% di miscela nel caso della soia.

L'impianto di essiccazione infatti richiede energia principalmente sotto forma di:

- 1) energia elettrica prelevata dalla rete o prodotta, quando la potenza richiesta risulta maggiore di quella contrattualmente disponibile, da un generatore di corrente alimentato a gasolio;
- 2) energia termica prodotta da un bruciatore alimentato a miscela di propano-butano.

La potenza del bruciatore è modulata in funzione del prodotto da trattare per le esigenze appena illustrate, variando di conseguenza il consumo di miscela.

Per quanto riguarda invece l'energia elettrica, essa viene prelevata o prodotta in funzione del periodo dell'anno; quando la torre di essiccazione è funzionante si utilizza l'energia elettrica prodotta da un generatore a motore di proprietà per soddisfare il fabbisogno dell'essiccatoio e delle apparecchiature che gli gravitano attorno, mentre quando non si sta essiccando, ma si utilizzano comunque le apparecchiature dell'impianto (elevatori a tazze, trasportatori a catena) per movimentare il prodotto essiccato da commercializzare, si utilizza la rete. Le utenze elettriche esterne all'impianto di essiccazione, invece, per l'intera durata dell'anno fanno riferimento alla rete elettrica locale.

ENERGIA ELETTRICA	
CONTRATTO FORNITURA	Potenza = 15 kW Costo = 0,143 €/kWh (08:00-20:00) 0,088 €/kWh (20:00-08:00 e week-end)
GENERATORE A GASOLIO	Potenza = 150 kW Costo = 1 €/litro di gasolio

Figura 41: La fornitura e la produzione di energia elettrica

La valutazione energetica sviluppata in questo elaborato fa riferimento all'impianto di essiccazione durante il periodo di raccolta e quindi al consumo di gasolio del generatore. Essendo esso necessario per le esigenze della torre, si ha che la quota ad esso relativa varia con il tempo di processo. Quest'ultimo è il medesimo per i due prodotti e si ipotizza un funzionamento continuativo, giorno e notte, per 40 giorni dell'impianto con generatore al 70% della potenza nominale, valore che corrisponde al rendimento massimo. Ciò è giustificabile in quanto il generatore è stato scelto per aderire al meglio alle richieste energetiche dell'impianto. Quindi il consumo giornaliero

di gasolio del generatore è una voce costante di costo. Anche per il bruciatore si considera un funzionamento continuativo al 70% della potenza massima e una costanza nel consumo legata al mantenimento della temperatura desiderata. In questo caso però, essendo richieste temperature diverse per mais e soia, il consumo di miscela del bruciatore è diverso per tipo di prodotto ma comunque costante per ognuno di essi.

I consumi di energia dell'impianto di essiccazione sono una voce importante dei costi che l'azienda deve sostenere nonostante siano concentrati in pochi mesi all'anno. Nei mesi di fermo impianto il consumo di energia, quasi esclusivamente elettrica, è abbastanza contenuto e stimato in un valore annuo di circa 2500 € (200 €/mese come valore medio per le due casistiche di consumo ovvero sole utenze esterne all'impianto e utenze unite alle apparecchiature complementari all'impianto per lo scarico di materiale da commercializzare).

Se si distribuiscono nell'arco dell'intera annata i costi dell'impianto di essiccazione, preso per esempio il 2010, si ottiene la seguente ripartizione dei costi aziendali:

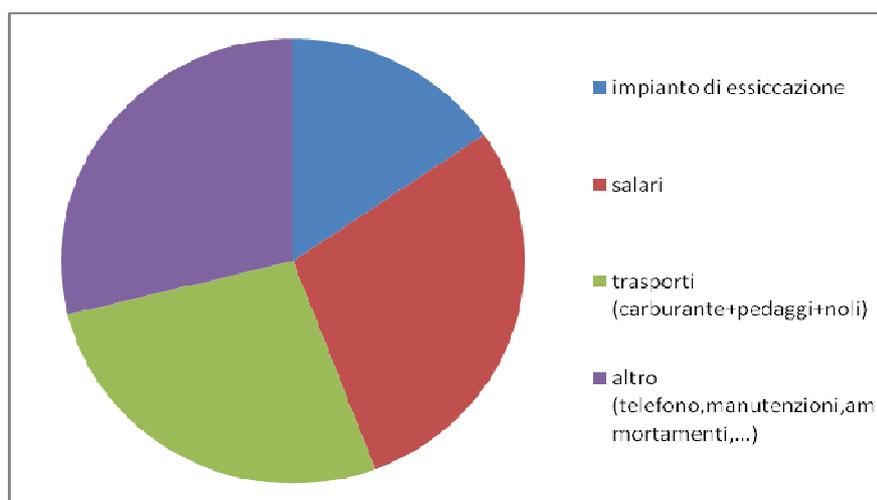


Figura 42: Diagramma ripartizione costi aziendali

Il generatore ha un consumo pari a circa 250-300 l_{gasolio}/gg. Ricontrato dalle fatture un costo di circa 1 €/l_{gasolio}, si ottiene un costo giornaliero per il funzionamento dell'impianto pari a circa **250-300 €/gg**

Per quanto riguarda invece il consumo del bruciatore, esso è pari a 100-110 kg_{miscela}/h nel caso del mais. Dato un prezzo di circa 0,7 €/kg_{miscela}, il costo giornaliero della miscela propano-butano è di circa **1.700 €/gg**. Mentre per la soia si aggira intorno a **1.200 €/gg**

Il gasolio viene utilizzato non solo per alimentare il generatore di corrente ma anche tutti i mezzi su gomma che lavorano per il funzionamento dell'impianto ovvero le pale

gommate. Si ha un consumo totale pari a 600 €/gg, ripartiti equamente tra generatore e mezzi di supporto.

Nel periodo settembre-ottobre 2010 si può osservare quindi che, dei totali costi dovuti all'approvvigionamento di energia, il 65% è dovuto alla fornitura di miscela propano-butano e il restante alla fornitura di gasolio (con riferimento al mais).

Per quanto riguarda la fornitura di energia elettrica dalla rete, che rifornisce le utenze estranee all'impianto di essiccazione e le apparecchiature di questo quando la torre è ferma, essendo indipendente dal funzionamento dell'impianto di essiccazione, non viene tenuto in considerazione nella valutazione energetica.

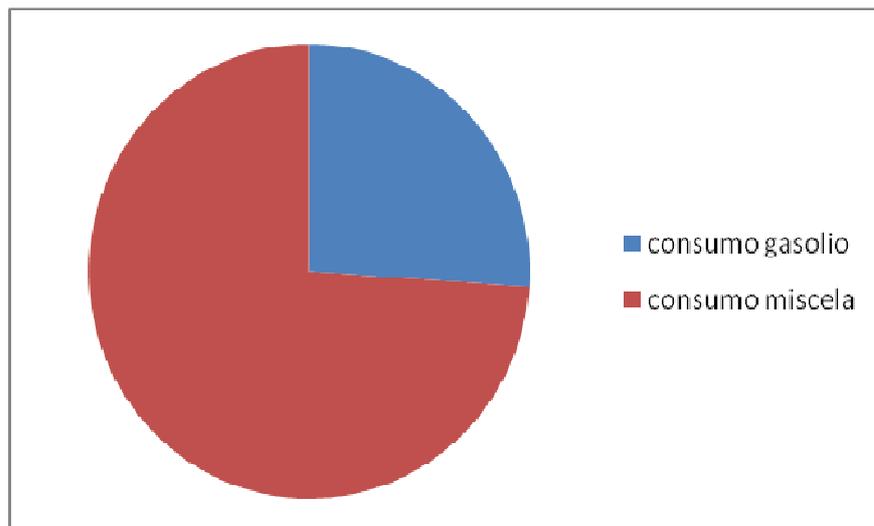


Figura 43: Diagramma ripartizione consumi di combustibile per il funzionamento dell'impianto:

- 300 €/gg gasolio per generatore
- 300 €/gg gasolio per mezzi su gomma
- 1700 €/gg miscela per bruciatore (mais)

Grazie ai dati appena illustrati è possibile calcolare il costo totale energetico della campagna di raccolta dell'anno 2010. I due prodotti comporterebbero nei 40 giorni di essiccazione i costi riportati nella tabella di figura 44.

MAIS		
Costo per il gasolio	[€]	12.000
Costo per la miscela	[€]	68.000
SOIA		
Costo per il gasolio	[€]	12.000
Costo per la miscela	[€]	48.000

Figura 44: Costo energetico per mais e soia

Sapendo però che nel 2010 il 40% del prodotto essiccato è stato mais e il rimanente soia, il costo totale dovuto all'impianto è pari a:

$$40\% (12.000 + 68.000) + 60\% (12.000 + 48.000) = 32.000 + 36.000 = 68.000 \text{ €}$$

Per valutare infine il costo complessivo della campagna si deve sommare la quota di gasolio spesa per i mezzi di servizio e pari a 12.000 € (300 €/gg x 40 gg). Quindi il costo dato dal funzionamento dell'impianto di essiccazione è pari a **80.000 €/anno** (quota dell'impianto nel diagramma di figura 42).

9.6. Il percorso del prodotto agricolo

Nel periodo di raccolta, settembre-ottobre per mais e soia, giugno-luglio per il frumento, le fasi seguite dal materiale all'interno dell'azienda sono le seguenti:

- 1) pesatura del rimorchio con il materiale proveniente dalle coltivazioni;
- 2) prelievo di un campione di prodotto mediante sonda;
- 3) rilievo dell'umidità tramite apposita apparecchiatura;
- 4) scarico della granella nella tramoggia di carico della torre di essiccazione, comunemente chiamata fossa di carico;
- 5) ingresso del materiale nella torre di essiccazione mediante prima trasportatore a catena e poi elevatore a tazze;
- 6) essiccazione nell'impianto (ove necessario);
- 7) stoccaggio nei sili o nei magazzini adiacenti all'impianto oppure carico del materiale su automezzi.



Figura 45: Pesatura del rimorchio caricato con la granella da trattare



Figura 46: Apparecchio per la pesatura dei rimorchi

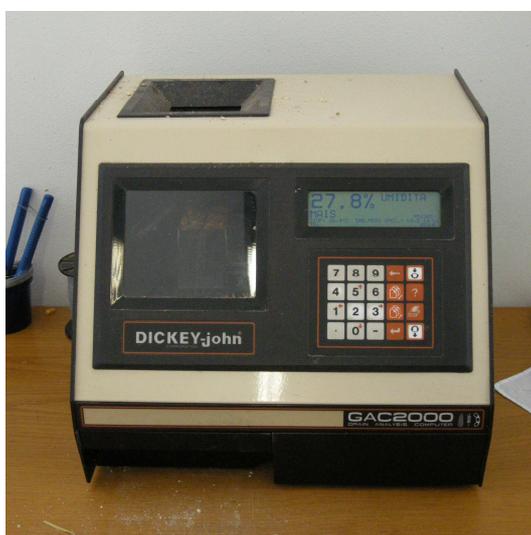


Figura 47: Apparecchio per il rilevamento dell'umidità

Il prodotto agricolo, a valle o meno del processo di essiccazione, viene inviato verso diverse destinazioni ed esattamente:

MATERIA PRIMA	DESTINAZIONE	PRODOTTI
Mais	Mangimifici	unito ad altri prodotti per ottenere mangimi
soia	oleifici	olio, farina di soia e lecitina di soia
frumento	mangimifici (qualità più bassa) molini (qualità più alta)	mangimi farina per pane

Figura 48: Destinazione e utilizzo delle diverse materie prime trattate nell'impianto

9.7. L'impianto di essiccazione

9.7.1. Il layout dell'impianto

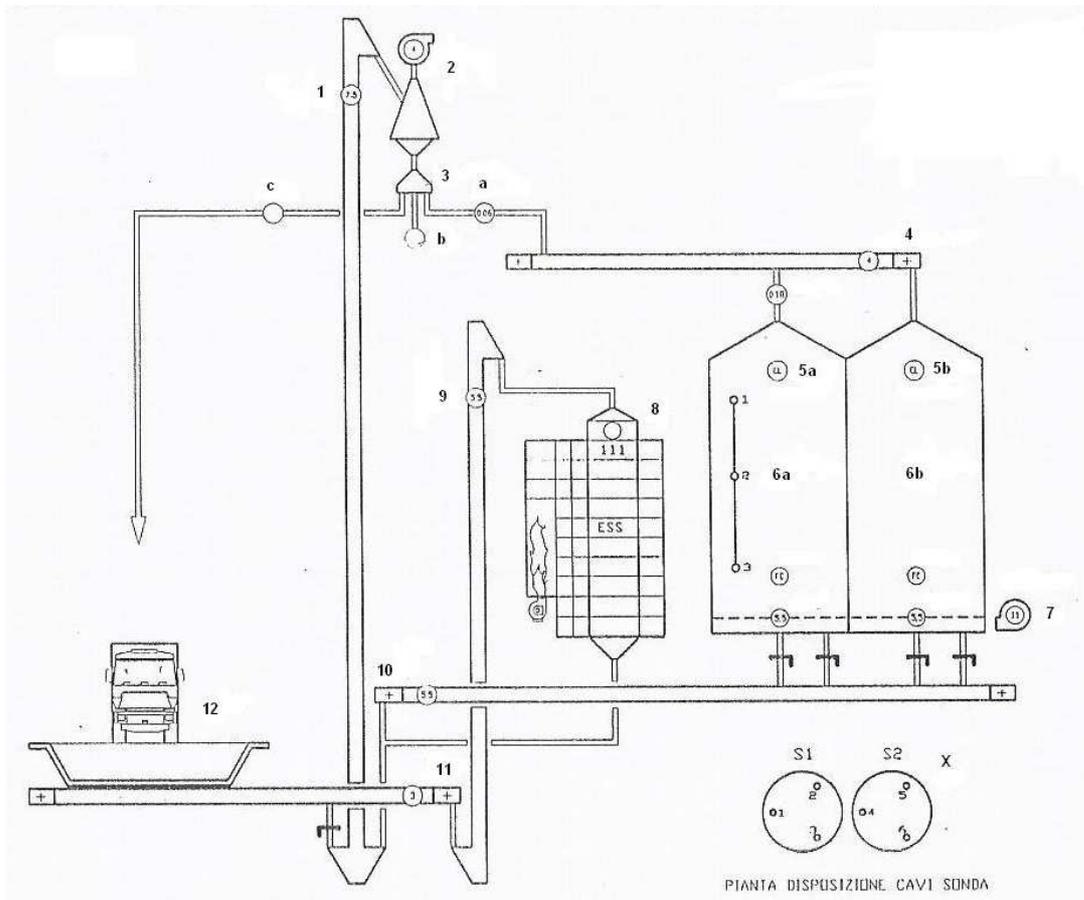


Figura 49: Sinottico impianto di essiccazione

Legenda:

- 1 elevatore a tazze di dimensioni maggiori
- 2 pulitore ad aria con relativo ventilatore
- 3 valvola a tre vie per percorsi materiale essiccato
- a direzione sili di stoccaggio
- b direzione magazzino di stoccaggio
- c direzione tubo verticale per carico automezzi
- 4 trasportatore a catena
- 5a indicatore di livello ad elica del primo silo
- 5b indicatore di livello ad elica del secondo silo
- 6a primo silo di stoccaggio
- 6b secondo silo di stoccaggio
- 7 ventilatore per aerazione sili di stoccaggio
- 8 torre di essiccazione con indicazione del bruciatore

- 9 elevatore a tazze di dimensioni minori
- 10 trasportatore a catena
- 11 trasportatore a catena per fossa
- 12 tramoggia di carico della torre di essiccazione
- X pianta disposizione cavi sonda dei sili di stoccaggio

9.7.2. I fornitori

Gli impianti di essiccazione e lavorazione dei prodotti agricoli sono realizzati sulla base delle specifiche date dal cliente, il quale spesso si avvale di diverse aziende fornitrici. In taluni casi è necessario in quanto concorrono a formare l'impianto attrezzature che non sono offerte dalla medesima azienda.

Nel caso studio esaminato le apparecchiature principali dell'impianto di essiccazione sono prodotte da due ditte. La torre di essiccazione è stata realizzata da Minute di Treviso mentre i primi trasportatori installati, gli elevatori, il pulitore ad aria e i due sili di stoccaggio con i relativi sistemi collegati (sistema di ventilazione, misuratore di temperatura e relativi cavi sonda ed indicatori di livello ad elica) da Mulmix di Padova.

9.7.3. Motivazioni scelta dell'impianto

L'impianto installato nell'azienda presa in esame appartiene ad una categoria di impianti affidabili e con un'alta efficienza, resa possibile dal recupero energetico sull'aria calda a diversi step del processo, consentendo una diminuzione della potenza elettrica installata fino al 35% rispetto agli impianti tradizionali.

Oltre a garantire un'essiccazione rapida con basso consumo di energia grazie ad una concezione d'avanguardia ed una contenuta potenza elettrica installata, questo impianto è caratterizzato da:

- sicurezza nell'utilizzazione che permette l'essiccazione di prodotti difficili come le oleaginose (uso di speciali dispositivi, integrati nel quadro di comando, per la sorveglianza in continuo dell'essiccatoio che misurano in scansione automatica le temperature dell'aria usata);
- dispositivi di estrazione brevettati che consentono uno scarico totale ed omogeneo del prodotto essiccato nonché limitano al massimo i rischi di incrostazioni nell'essiccatoio grazie all'effetto di autopulitura provocato dalla discesa del prodotto per impulsi (l'impulso ha durata inferiore al secondo, quando avviene delle serrande si aprono e il materiale viene fatto scendere);
- isolamento dei cassoni caldi e del circuito dell'aria riscaldata mediante utilizzo di pannelli di lana di roccia;

- robusti ventilatori centrifughi che assicurano un alto rendimento, un basso inquinamento acustico ed il raggruppamento delle polveri;
- parte inferiore della torre di essiccazione completa di una base di appoggio e di un estrattore; ciò rende semplice e rapida l'installazione senza opere di muratura;
- potenza del bruciatore modulata in funzione del carico di materia da trattare e quindi delle esigenze di essiccazione;
- sistemi di stabilizzazione e regolazione che assicurano un avviamento facile l'indomani mattina (l'impianto può funzionare in modo continuativo ma, nel caso di fermata, grazie a questa caratteristica, non ci sono problemi di riavvio legati all'umidità del materiale);
- lievissima emissione di polveri, grazie all'inserimento di serrande anti-polvere e sistemi di filtrazione, e di rumore, in quanto i ventilatori sono all'interno della torre di essiccazione;
- durata elevata dell'essiccatoio resa possibile dall'impiego di lamiere zincate strutturali che garantiscono un altissimo livello di protezione dagli agenti atmosferici e dalla corrosione.

9.7.4. Il flusso del materiale nell'impianto

Il prodotto proveniente dalla raccolta sul campo viene conferito all'impianto a mezzo di rimorchi agricoli trainati da trattore (solo occasionalmente vengono utilizzati autocarri o autotreni).

Giunti all'impianto i mezzi di trasporto, dopo pesatura e rilevazione dell'umidità, come visto in precedenza, scaricano la granella sul piazzale in prossimità della fossa di carico. Quest'ultima è costituita da una vasca, posta a quota inferiore rispetto al piano del piazzale, a sezione tronco piramidale, sul cui fondo scorre un nastro che trasporta la granella fino all'elevatore che alimenta dall'alto la torre di essiccazione.

Le dimensioni della fossa di carico dipendono dalla potenzialità dell'impianto di essiccazione che deve essere alimentato, dalla profondità a cui è posto il nastro trasportatore e dalla sua capacità di trasporto. Nel caso studiato essa ha una capacità pari a 6.000 q/h. Tutti i trasportatori e gli elevatori sono stati dimensionati per soddisfare le potenzialità di fossa e torre di essiccazione.

La granella indirizzata verso l'essiccatoio dal trasportatore a catena, viene raccolta da un elevatore a tazze, quello di dimensioni più contenute, e sollevata fino alla sommità della torre di essiccazione. Quest'ultima prevede una sorta di serbatoio superiore di raccolta, la cui quantità è circoscritta all'interno di un intervallo predefinito e monitorata costantemente. Lo scarico del prodotto umido nella colonna avviene in funzione delle

tempistiche di processo e determinata a valle della torre stessa dal sistema di scarico del prodotto secco. Si ricorda infatti che il tempo di essiccazione è in funzione del salto di umidità che deve subire il prodotto; la capacità totale della colonna è costante e pari a 42 tonnellate.

Il prodotto, mentre scende fino alla base dell'essiccatore, viene investito da un flusso di aria calda generata da un bruciatore a gas che rimuove l'umidità in eccesso fino al tenore predeterminato (schema di funzionamento evidenziato in figura 67).

L'aria più umida viene espulsa dal ventilatore posto in sommità dell'impianto, mentre la granella secca viene raccolta e trasportata mediante un secondo elevatore a tazze, quello di dimensioni maggiori, fino al filtro pulitore del secco per rimuovere le impurità e gli scarti residui.

Il prodotto arriva in questa apparecchiatura e per aspirazione, mediante ventilatore, la quota più leggera ovvero le impurità vengono convogliate nel ciclone (una delle due parti dell'organo) mentre il materiale essiccato, più pesante, rimane nella zona di arrivo al pulitore e indirizzato verso il punto finale del percorso. Gli scarti, raccolti nel ciclone, sottoforma di polvere, vengono poi condotti mediante tubatura all'interno di una camera di 5x5 m di cemento.

A questo punto la granella definitivamente essiccata e pulita può percorrere tre cammini; ciò viene gestito mediante una valvola a tre vie che devia il percorso del materiale nella direzione prescelta:

destinazione a: sili di stoccaggio attraverso un trasportatore a catena che corre superiormente ai due sili (visibile in figura 50);



Figura 50: Pulitore ad aria e camera di raccolta degli scarti



Figura 51: Trasportatore in direzione magazzini e tubazione per carico automezzi
destinazione b: magazzini di stoccaggio adiacenti all'impianto di essiccazione attraverso un trasportatore a catena (visibile in figura 51) e un sistema di distribuzione del materiale realizzato all'interno dei capannoni (figura 52);



Figura 52: Sistema di distribuzione del materiale dentro ai magazzini

destinazione c: carico su automezzi mediante una tubazione che termina con un tratto verticale posto superiormente alla zona di carico prevista vicino alla tramoggia di ricezione della torre (visibile in figura 51).

Nel caso di stoccaggio, il materiale permane nei sili o nei magazzini in attesa della successiva commercializzazione.

Il percorso è però ciclico in quanto il materiale essiccato e stoccato nei sili può, quando l'impianto è spento, essere caricato su mezzi gommati o ulteriormente stoccato. Sotto i sili è infatti presente un nastro di estrazione che porta all'elevatore a tazze più grande. Il prodotto giunge quindi alla valvola a tre vie dove può essere destinato agli autotreni, ai magazzini oppure nuovamente ai sili.

9.7.5. Introduzione all'impianto di essiccazione

La torre di essiccazione esistente, come quella nuova che si desidera realizzare, è a funzionamento continuo, del tipo a colonna, più precisamente a losanga. Sono essiccatoi che prevedono un flusso continuo di materiale da essiccare e il ricircolo di una quota di aria utilizzata nel processo. Per questa ragione appartengono alla categoria di impianti a basso consumo energetico. Consentono di essiccare per 30-40 giorni consecutivi qualsiasi prodotto agricolo in granella: frumento, mais, soia, orzo, girasole, colza, risone, sorgo, legumi, caffè, cacao, prodotti tropicali.

Attualmente l'impianto in uso è specializzato nella lavorazione di frumento, mais e soia, principalmente mais che deve essere portato da un'umidità del 28% circa ad una del 13-13,5% circa. Questo significa che da un quintale di mais vengono estratti quattordici chilogrammi di acqua. In realtà una parte di quanto liberato non è acqua ma bensì residui del prodotto (impurità e sostanze contenute nel mais che con il trattamento vengono liberate). Ad ogni chilogrammo di acqua estratto si hanno 164 g di questi elementi.

Le denominazioni esatte date ai due impianti dall'azienda produttrice ovvero Minute, sono le seguenti:

- impianto esistente: **essiccatoio a risparmio energetico Strahl serie FR modello 3000 a 6 moduli**;
- impianto nuovo in progetto: essiccatoio a risparmio energetico Strahl serie FRT modello 8000 a 8 moduli.

Il valore numerico che affianca il modello sta ad indicare la produttività massima giornaliera dell'impianto, espressa in quintali nelle 24 ore, mentre il numero di moduli rappresenta la larghezza della zona centrale della torre, ovvero la parte dove avviene il contatto tra prodotto e aria di processo. Il moduli sono le file di canalette presenti. Ovviamente più è larga la zona che subisce il trattamento termico, più materiale può essere trattato a parità di tempo.

In questo elaborato si farà riferimento, in termini di dinamica di processo, consumi e problematicità, alla torre esistente, anche se i ragionamenti si possono considerare analoghi per quella di progetto in quanto appartenente alla medesima famiglia. La differenza più importante tra le due è la produttività e quindi i consumi energetici. Ovviamente, però, mettendo a confronto la struttura, sono evidenti anche delle variazioni, seppur minimali, dovute agli anni trascorsi tra le due installazioni che hanno visto dei perfezionamenti della tecnologia e un incremento del recupero sull'aria di processo. Infine, nel progetto della nuova torre, sono previsti due pulitori di prodotto; mentre nell'impianto esistente il materiale viene pulito dalle impurità a valle

dell'essiccazione, nella torre nuova oltre a questo organo ce n'è un secondo a monte dell'essiccatoio dedicato alla pulitura del cereale "verde".

La granella, prima di entrare nella torre, viene portata ad un filtro pulitore per la materia verde, viene pulita da impurità, scorie, parti della pianta raccolte durante la mietitura, grani spezzati, ecc. Si è prevista poi la raccolta di questi prodotti residui in un apposito locale (locale polveri) con pareti in calcestruzzo dotato di apertura frontale in modo da consentire la movimentazione con i mezzi meccanici, e la successiva vendita come materie prime secondarie ad altre aziende di trasformazione.

Nell'impianto esistente la mancanza della zona di pulitura del verde è giustificata da una serie di motivi:

- 1) le impurità sono in quantità contenuta;
- 2) la pulizia è più efficace se realizzata sul materiale essiccato (circa 1% di impurità sul prodotto secco);
- 3) il pulitore del verde non è conveniente date le dimensioni dell'impianto. Non è possibile utilizzare lo stesso apparecchio per entrambe le funzioni date le caratteristiche ben diverse della materia alle differenti umidità e la convenienza economica di un doppio organo è proporzionale alla quantità di prodotto trattata.

9.7.6. Descrizione impianto di essiccazione

9.7.6.1. La torre di essiccazione

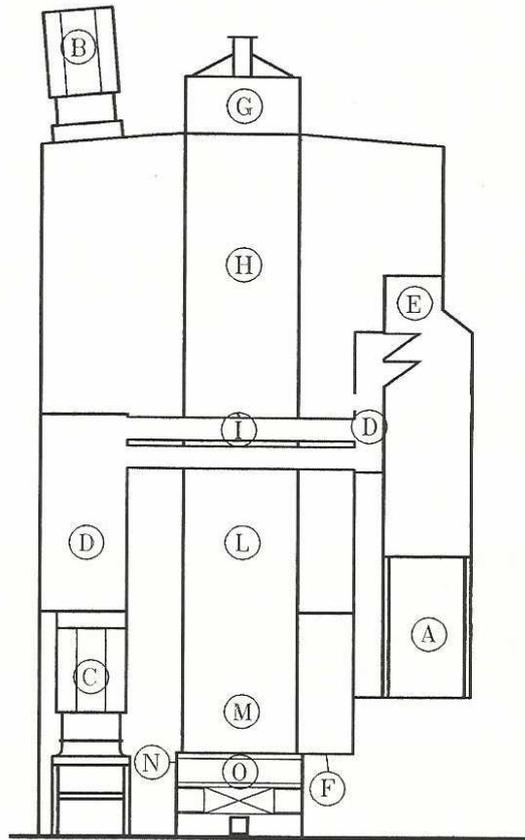


Figura 53: Zone della torre di essiccazione

Legenda:

A – Generatore di calore	H – Prima zona di essiccazione
B – Aspiratore aria umida	I – Zona di riposo
C – Ventilatore riciclo aria	L – Seconda zona di essiccazione
D – Condotto riciclo aria	M – Zona di raffreddamento
E – Zona di miscelazione	N – Dispositivo di estrazione
F – Serrande regolazione raffreddamento	O – Tramoggia prodotto secco
G – Tramoggia prodotto umido	

9.7.6.1.1. Caratteristiche costruttive

MODELLO	A	B	C
4 MODULI			
2000 FR	11500	12200	13250
2500 FR	13500	14200	15250
3000 FR	15500	16200	17250
6 MODULI			
3000 FR	11500	12200	13250
3500 FR	13000	13700	14750
4000 FR	14000	14700	15750
4500 FR	15500	16200	17250
5000 FR	17000	17700	18250
5500 FR	18500	19200	19750
6000 FR	19500	20200	20750

Figura 54: Tabella modelli essiccatoi Minute

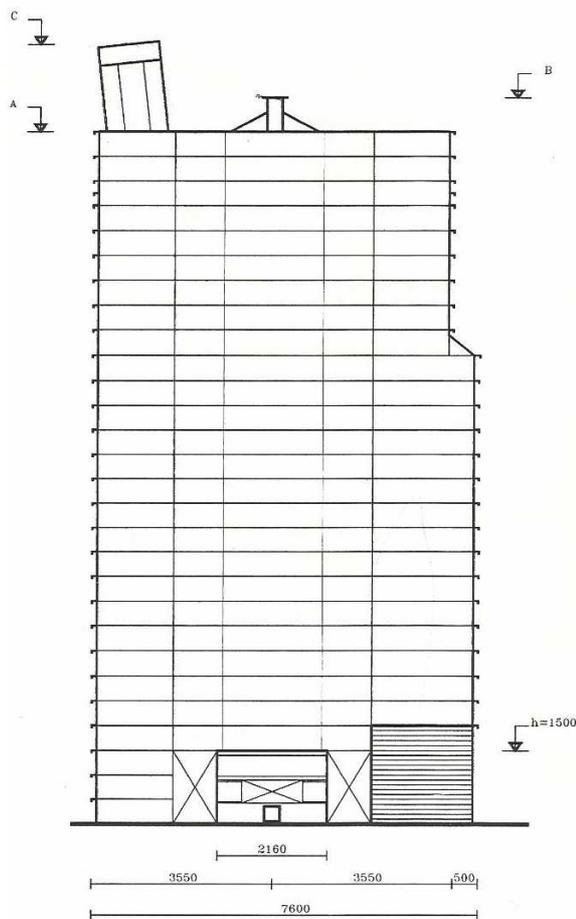
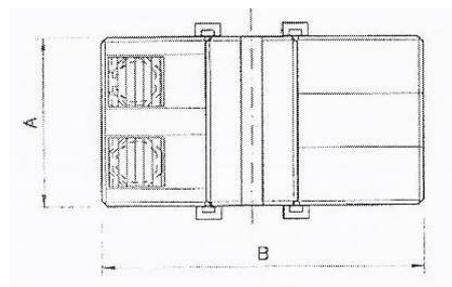


Figura 55 : Ingombri (sezione)

L'essiccatoio in esame, modello 3000 FR, come indicato in figura 54, ha un'altezza di 12,20 metri dalla tramoggia di raccolta del prodotto umido al suolo.

Figura 56: Ingombri (pianta)



Legenda:

- - : asse coclee distribuzione ed estrazione

A, B: dimensioni di base della torre

A : larghezza della torre pari a 4,10 metri per il modello considerato

B: lunghezza della torre pari a 7,60 metri per il modello considerato

Per quanto riguarda le due figure esagonali sul lato sinistro dell'immagine 56, stanno ad indicare i ventilatori di riciclo. Nel caso del modello 3000 FR 6 moduli, è presente un unico ventilatore.

MODELLO 3000 FR a 6 moduli		
Ingombri	A [m]	4,10
	B [m]	7,60
	H [m]	12,20
Capacità torre (verde + secco)	[ton]	42
Ventilatori superiori	n°	1
	[kW]	18
Ventilatori inferiori	n°	1
	[kW]	11
Potenzialità termica	[kW]	2.250
	[Mcal/h]	1.950
<u>Mais 28%-14%</u> (temperatura esterna 15°C, umidità relativa 70%)		
Capacità lavorativa giornaliera [q/24h]		2.880
Umido	[t/h]	12,0
Secco	[t/h]	10,0
Acqua	[kg/h]	1.950

Figura 57: Dati riassuntivi torre di essiccazione

9.7.6.1.2. Colonna

La colonna di essiccazione è realizzata con pannelli in lamiera zincata strutturale e le canalette dell'aria vengono fissate ai pannelli con otto bulloni ciascuna creando una struttura particolarmente robusta. Le canalette di distribuzione dell'aria calda e quelle di raccolta dell'aria non satura sono in acciaio ALUZINC, materiale particolarmente resistente agli agenti atmosferici, mentre quelle di scarico dell'aria satura sono realizzate in acciaio INOX.

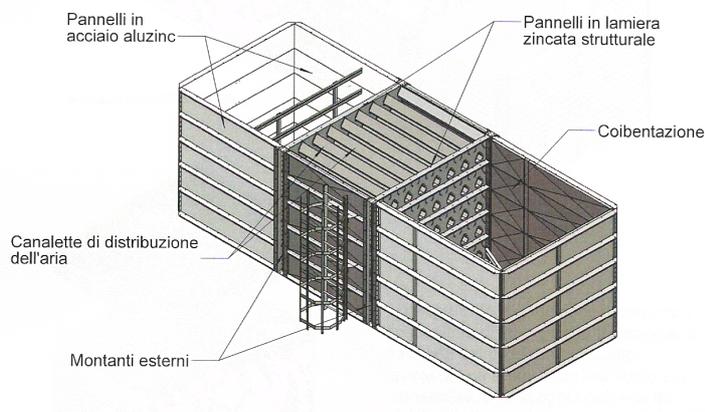


Figura 58: Materiali utilizzati

Le camere di distribuzione dell'aria sono realizzate anch'esse con pannelli in ALUZINC. Tali pannelli sono coibentati con uno strato di 50 mm di lana minerale e un contropannello in lamiera zincata.

L'attenzione ai materiali e ai dettagli costruttivi è evidente anche nel particolare sistema costruttivo dei pannelli con risvolti all'esterno e sgocciolatoio finale che evita pericolosi ristagni di polvere e prodotto nella parete interna dell'essiccatoio evidenziato in figura 59.

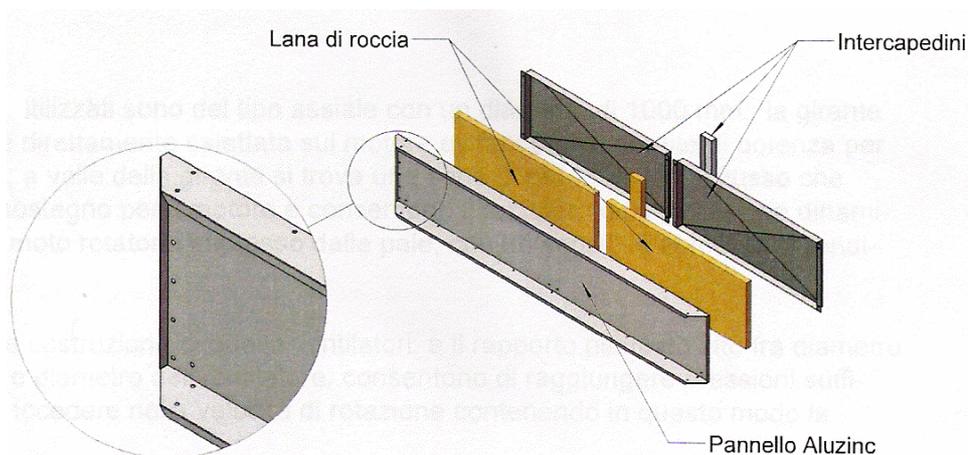


Figura 59: Particolare costruttivo

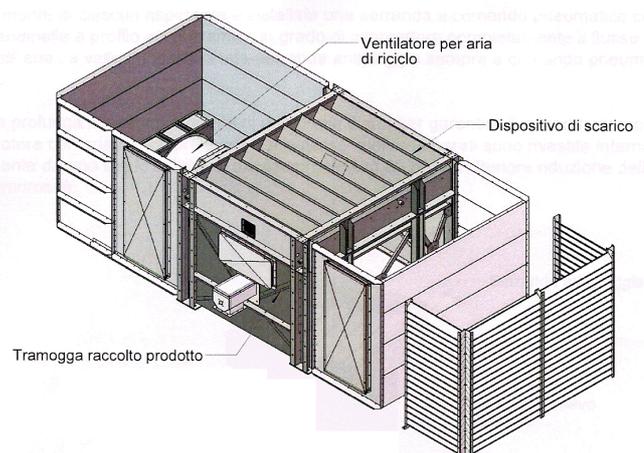


Figura 60: Dispositivi basamento

Il basamento monoblocco, illustrato in figura 61, incorpora il dispositivo di scarico e la tramoggia di raccolta del prodotto essiccato; quest'ultima è sollevata dal suolo per consentire il passaggio dell'aria da riciclare e una totale pulizia del fondo.

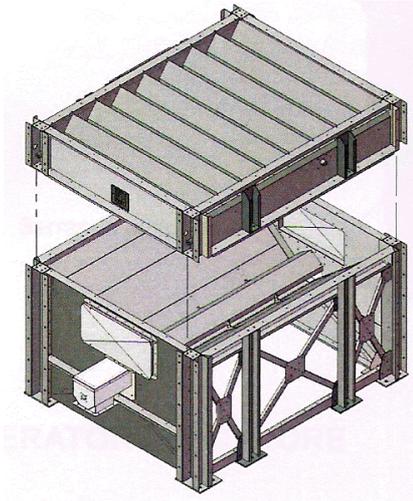


Figura 61: Basamento monoblocco

9.7.6.1.3. Ventilatori

Nell'impianto esaminato sono presenti due ventilatori, uno nella parte superiore della torre con doppia funzione (aspira l'aria calda portandola a contatto con il materiale da trattare e permette l'uscita dell'aria satura nell'ambiente) e un secondo nella parte inferiore per il trattamento dell'aria di ricircolo.

Gli aspiratori utilizzati, illustrati in figura 62, sono del tipo assiale con un diametro di 1000 mm; la girante in alluminio è direttamente calettata sul motore evitando così perdite di potenza per trasmissione e a valle della girante si trova una serie di raddrizzatori di flusso che fungono da sostegno per il motore e consentono il recupero della pressione dinamica dovuta al moto rotatorio impresso dalle pale, con un sensibile aumento di rendimento.

La particolare costruzione di questi ventilatori, e il rapporto piuttosto alto fra diametro della girante e diametro del ventilatore, consentono di raggiungere pressioni sufficienti senza eccedere nella velocità di rotazione contenendo in questo modo la rumorosità.

A monte di ciascun aspiratore è installata una serranda a comando pneumatico con bandinelle a profilo aerodinamico in grado di intercettare completamente il flusso dell'aria, mentre a valle è installata una serranda antipioggia sempre a comando pneumatico.

Ulteriori accorgimenti sono i seguenti. La prolunga di scarico è dotata di una presa d'aria per garantire il raffreddamento del motore con aria fresca prelevata dall'esterno e le pareti sono rivestite internamente da uno strato di lana di roccia per un'ulteriore riduzione della rumorosità.

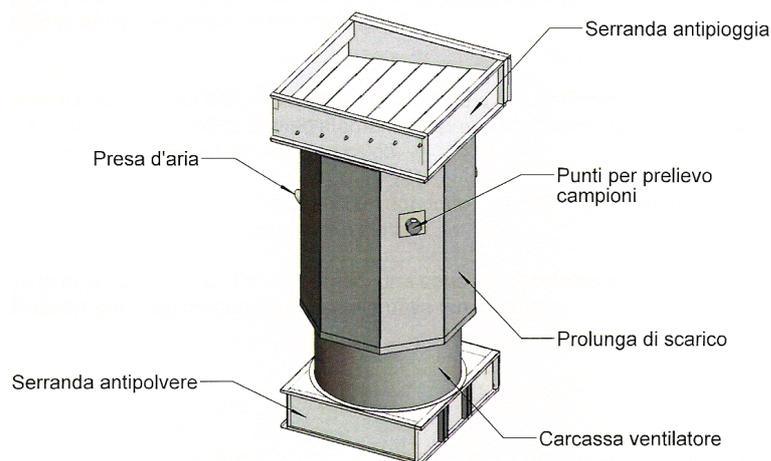


Figura 62: Schema aspiratore

Grazie agli accorgimenti dell'azienda fornitrice, si hanno i seguenti dati relativi alla rumorosità, nel rispetto delle norme istituite in merito:

LIVELLI DI RUMOSITA'	
Livello rumorosità a 20 m	circa 65 dBA
Livello rumorosità a 1,5 m	circa 85 dBA

Figura 63: Parametri relativi alla rumorosità

9.7.6.1.4. Generatore di calore

L'azienda fornitrice propone due versioni della serie FR che si distinguono per il tipo di bruciatore utilizzato e sono:

- Versione BT con bruciatori tradizionali:** questa versione prevede uno o più forni a fuoco diretto, montati in posizione verticale per ridurre gli ingombri, per l'utilizzo di bruciatori pressurizzati a gasolio, metano o GPL. Le camere di combustione in acciaio inox sono realizzate con particolare cura per ottenere la massima miscelazione fra i fumi di combustione e l'aria. Il corpo principale della camera è cilindrico con la parte iniziale e terminale, quest'ultima chiusa, a forma di cono allo scopo di assorbire le dilatazioni al variare della temperatura. I fumi trovano sfogo attraverso otto tubi laterali sfalsati e vengono convogliati verso le zone periferiche del forno dove, tramite appositi deflettori, vengono miscelati con l'aria più fredda. Con questo accorgimento si ottiene una notevole uniformità di temperatura e si evita la formazione di pericolose vene di aria troppo calda.
- Versione VA con bruciatori in vena d'aria:** in questo secondo caso per la combustione vengono utilizzati bruciatori in vena d'aria funzionanti a gas metano, miscela o GPL; questa soluzione consente una migliore distribuzione del calore

rispetto ai bruciatori pressurizzati tradizionali. La velocità dell'aria sul bruciatore è regolata grazie a due deflettori mobili mentre un pannello in acciaio inox è montato immediatamente sopra al bruciatore per rompere la fiamma ed evitare filetti di aria troppo calda.

L'aria calda si distribuisce all'interno di un condotto verticale molto ampio e coibentato con lana di roccia e contropannello zincato. Dopo la miscelazione con l'aria di riciclo, una serie di miscelatori creano una ulteriore miscelazione migliorando l'omogeneità della temperatura.

Il generatore del caso studio è di questa seconda tipologia, con bruciatore in vena d'aria a modulazione di fiamma, della capacità termica massima di 1.950 Mcal/h, 2250 kW, con alimentazione a miscela di propano e butano e completo di candela di accensione ed elettrodo di rilevazione fiamma pilota. Di solito viene utilizzato al 70-80% del valore massimo quindi ad una potenza di 1700-1800 kW.

L'essiccatoio viene messo in depressione tramite il ventilatore superiore che aspira aria, essa a contatto con la fiamma del bruciatore alimentato da una rampa che porta la miscela in camera di combustione, si riscalda e agisce sul materiale da trattare.

9.7.6.1.5. Dispositivo di scarico

Il dispositivo di scarico consente la discesa di una grande quantità di prodotto in tempi brevissimi, evita fenomeni di inquinamento quando si passa da un prodotto all'altro ed esclude il pericolo di inceppamento anche in presenza di corpi estranei.

Al termine della colonna il prodotto viene convogliato in una serie di canali paralleli; sotto ciascun canale si trova una bascula oscillante che, in posizione normale, impedisce al prodotto di scendere.

Tutte le bascule sono collegate fra di loro tramite due robuste aste alla cui estremità si trova una barra di torsione ben ancorata grazie a tre supporti a sfere.

Un pistone pneumatico provoca la rotazione della barra e di conseguenza l'oscillazione delle bascule che permettono al prodotto di cadere nella sottostante tramoggia. Questo movimento è estremamente rapido (da mezzo secondo a un secondo).

Ciò regola il flusso di materiale lungo la colonna, la quantità di materiale e il riempimento del serbatoio superiore della torre. All'aumentare dell'umidità del prodotto cresce anche il suo tempo di permanenza nell'essiccatoio.

Il tutto è stato dimensionato in modo da ottenere uno spazio libero fra i canali fissi e le bascule mobili sufficiente a rendere praticamente nullo il pericolo di bloccaggio per la presenza di corpi estranei.

**SCHEMA DI FUNZIONAMENTO
DISPOSITIVO DI SCARICO**

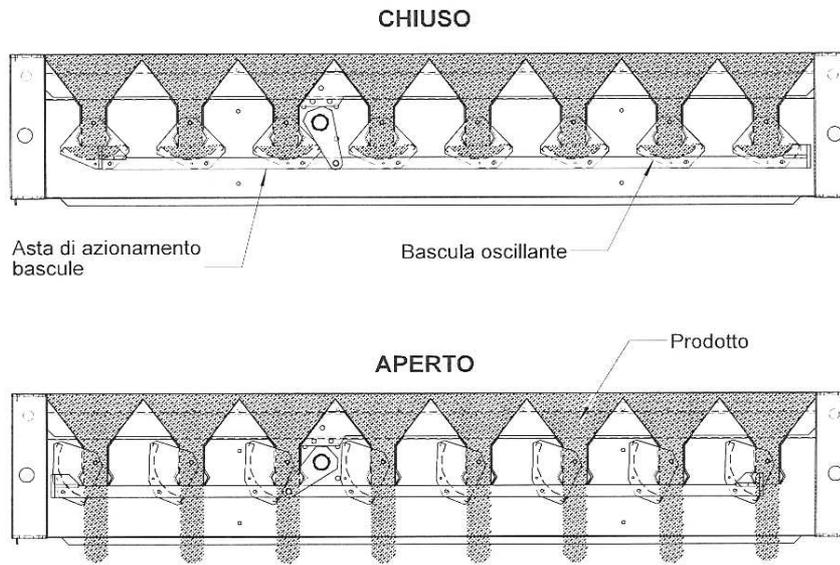


Figura 64: Schema di funzionamento dispositivo di scarico

9.7.6.1.6. Cura costruttiva per una manutenzione agevolata

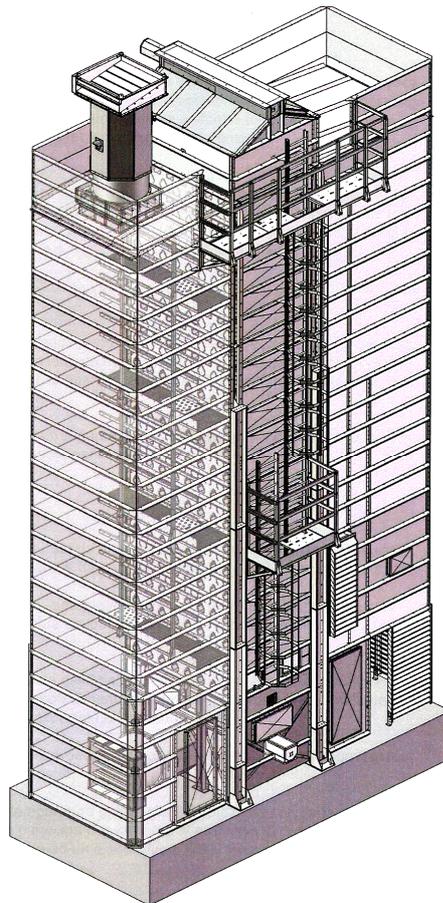


Figura 65: Sistema di scalette e ballatoi per la manutenzione

Ogni particolare è stato studiato per rendere agevole la manutenzione e la pulizia della macchina. Una serie di scalette, con piano di riposo rompitratta per quelle più lunghe, consente l'accesso ad un comodo ballatoio e a due piani di controllo delle serrande superiori e della tramoggia del prodotto umido. Sui due lati della colonna sono previsti dei comodi piani di lavoro per la pulizia di ogni angolo della colonna; i piani sono posizionati ad una altezza di 2,5 metri uno dall'altro e sono completamente protetti contro le cadute; una serie di scalette sfalsate consentono il passaggio dall'uno all'altro tramite una botola di sicurezza.

Due ampie porte consentono l'accesso alla parte bassa dell'essiccatoio e la zona della rampa bruciatore è protetta da un grigliato anti-pioggia.

Tutto quello descritto in questo paragrafo è visibile in figura 65.

9.7.6.1.7. Controllo dell'impianto

L'intero impianto di essiccazione, ovvero torre, sili e apparecchiature complementari, viene monitorato e gestito nel suo funzionamento mediante un pannello di comando. Il controllo maggiore viene ovviamente fatto sulla torre di essiccazione, laddove cioè avviene il processo di lavorazione. Al di là del funzionamento corretto si devono monitorare i due parametri chiave, cioè temperatura e umidità. Ciò viene fatto mediante delle sonde poste all'interno dell'essiccatoio ma anche dentro ai due sili di stoccaggio. La situazione è visibile all'operatore tramite un sinottico con spie di segnalazione (figura 66).



Figura 66: Sinottico con spie di segnalazione

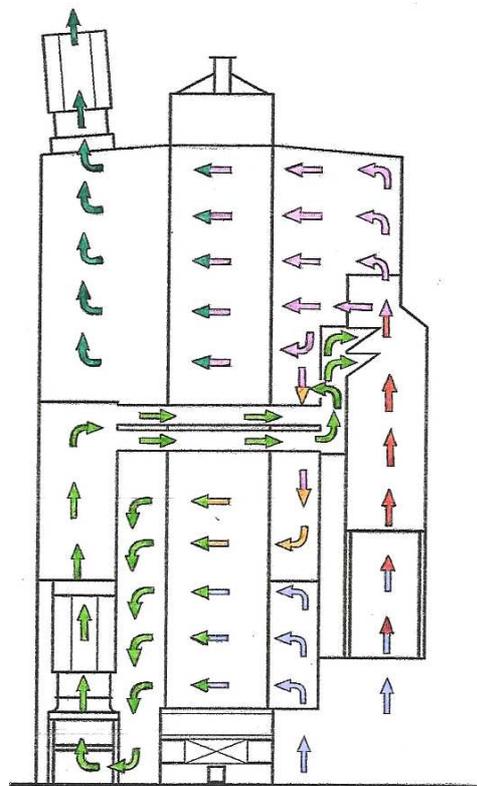
Il carico, l'essiccazione e lo scarico vengono controllati e comandati direttamente dal quadro elettrico di comando grazie ad apparecchiature automatiche di regolazione.

9.7.6.1.8. Funzionamento

Trattamento del prodotto

Il prodotto nella colonna scende per gravità attraversando una serie di canali sfalsati che provocano un movimento a zig-zag ed un continuo rimescolamento. La geometria dei canali e lo scarico ad impulsi garantiscono una discesa uniforme lungo tutta la sezione della torre evitando la formazione di correnti preferenziali.

Nella prima zona di essiccazione il prodotto viene investito da aria calda e cede la maggior parte dell'umidità. Fra la prima e la seconda zona di essiccazione il prodotto attraversa un'area di riposo dove non è interessato da alcun flusso d'aria. In questa zona l'umidità più interna del chicco tende a migrare verso l'esterno facilitando la successiva evaporazione e migliorando l'omogeneità di essiccazione.



- ⇨ - Aria ambiente
- ⇨ - Aria alta temperatura
- ⇨ - Aria media temperatura
- ⇨ - Aria del generatore
- ⇨ - Aria riciclata
- ⇨ - Aria umida

Figura 67: Schema di funzionamento

Nella seconda zona di essiccazione viene asportata la residua umidità fino al valore finale desiderato.

Infine il prodotto viene interessato da una corrente di aria a temperatura ambiente ovvero viene raffreddato per evitare fenomeni di condensa durante il percorso fino alla zona di stoccaggio e soprattutto all'interno dei sili. L'ampiezza della zona di raffreddamento finale è regolabile e può essere aumentata o diminuita a seconda del prodotto da trattare, della temperatura di lavoro e delle condizioni ambientali. Inoltre la quantità di aria di raffreddamento può essere dosata con apposite serrande.

Circuito dell'aria

Il movimento dell'aria è assicurato da un ventilatore posto nella parte bassa della camera di raccolta dell'aria e da un ventilatore posto nella parte alta.

Il ventilatore superiore aspira l'aria proveniente dalla parte alta della colonna dove il prodotto è ancora umido, pertanto l'aria è satura e viene espulsa in atmosfera.

Il ventilatore inferiore invece aspira sia dalla parte più bassa della zona di essiccazione, dove l'aria è tiepida e non completamente satura, sia dalla zona di raffreddamento dove l'aria contiene il calore asportato dal prodotto.

Quest'aria, ancora con una certa quantità di calore, viene recuperata e attraversando la colonna e defluendo sotto il basamento, viene convogliata verso l'alto attraverso un condotto. Viene quindi innalzata di temperatura grazie alla miscelazione con l'aria proveniente dal generatore di calore e partecipa nuovamente al processo di essiccazione.

La miscelazione è ottimale grazie ad un dispositivo a flussi incrociati.

I flussi d'aria che permettono l'essiccazione del prodotto sono visibili in figura 67.

Scambio aria-prodotto

Come già riportato, la colonna è costituita da una serie di file di canalette equidistanti sfalsate. Le canalette di ciascuna fila hanno un lato aperto ed il lato opposto chiuso; quelle della fila successiva e della precedente hanno il lato aperto dalla parte opposta. Pertanto si alternano file di canalette di entrata dell'aria a file di canalette di uscita dell'aria.

L'aria che entra in una canaletta attraversa il prodotto e trova sfogo nelle quattro canalette di uscita che la circondano; d'altra parte ogni canaletta di uscita riceve l'aria entrata dalle quattro canalette circostanti.

Si forma quindi un sistema di scambio fra aria e prodotto detto "a flusso misto" avente le seguenti caratteristiche:

- tutto il prodotto viene attraversato dall'aria;
- il prodotto nella sua discesa viene alternativamente attraversato da aria equicorrente e controcorrente.

Inoltre il lato di apertura delle canalette viene invertito circa ogni 3 metri di colonna in modo da evitare che uno strato di prodotto sia più esposto all'aria calda rispetto ad un altro.

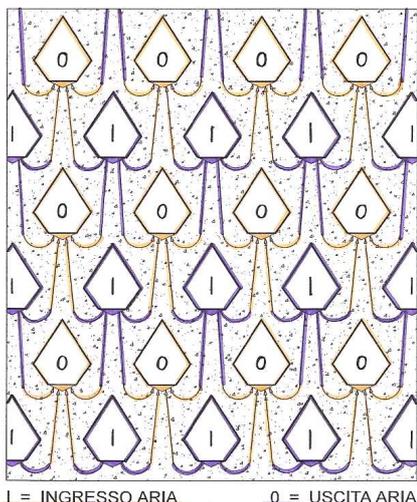


Figura 68: Scambio aria-prodotto:

in viola: canalette aria in uscita e flussi aria in uscita

in giallo: canalette aria in ingresso e flussi aria in ingresso

in lilla: granella da trattare

I flussi d'aria all'interno della torre di essiccazione

La portata oraria totale di aria trattata dall'impianto è pari a **81.600 Nm³/h**; di questa quantità, una quota, quella a più bassa umidità, ovvero quella che interessa la seconda zona di essiccazione, viene riciclata mentre la parte più umida, ovvero quella che entra in contatto con il prodotto più "verde", viene liberata in atmosfera attraverso un camino. Quest'ultima, che in realtà è un fluido gassoso composto da aria e particelle di polvere ed impurità derivanti dal contatto con il materiale da essiccare, è pari a circa **50.000 Nm³/h**.

Le portate sono molto importanti in termini quantitativi in quanto il materiale deve subire un'essiccazione rilevante unicamente attraverso il passaggio dell'aria calda.

Come illustrato poc'anzi, viene eseguito un recupero sull'aria meno umida e su quella utilizzata per il raffreddamento finale del prodotto secco, in quanto ancora con un certo potere termico. Questi flussi vengono convogliati mediante l'aspiratore inferiore della torre verso la zona di miscelazione a valle del bruciatore. In questo modo si ottiene un flusso d'aria ad una temperatura adatta al trattamento, ovvero attorno ai 110-120 °C per il mais, 80-90 °C per la soia. Il bruciatore è in vena d'aria ovvero non c'è uno scambiatore per il riscaldamento dell'aria ma essa viene portata alla temperatura desiderata entrando in contatto con la fiamma. La temperatura che raggiunge l'aria a valle del bruciatore si aggira intorno ai 220 °C per il mais, 200 °C per la soia ma grazie alla miscelazione si raggiungono le temperature d'esercizio desiderate in funzione del prodotto. Il contatto diretto e la temperatura non bassa non sono delle problematiche in quanto il prodotto che viene trattato, come visto in precedenza, è destinato ad uso zootecnico.

Le temperature in gioco nella torre di essiccazione sono quindi:

- 1 – Temperatura all'uscita del bruciatore = 200-220 °C
- 2 – Temperatura dell'aria riciclata = 50 °C
- 3 – Temperatura post miscelazione = 80-90 °C o 110- 120 °C
- 4 – **Temperatura dell'aria rilasciata in atmosfera = 45-50 °C**

L'essiccatoio installato, come visto nell'introduzione, è denominato "a risparmio energetico", in quanto viene eseguito un recupero su due dei tre flussi d'aria che interessano il processo. Tale recupero è importante in quanto permette di avere un risparmio in termini di combustibile per il bruciatore e di potenza elettrica installata, stimato dall'azienda fornitrice intorno al 35% rispetto ad un impianto tradizionale.

Si potrebbe però pensare di agire anche sul terzo flusso, ovvero sull'aria umida rilasciata in atmosfera. Questa è caratterizzata da una temperatura abbastanza contenuta, 45-50°C, da un' **umidità relativa** pari a circa il **52%** (con punto di rugiada alla temperatura di circa 38 °C) e da una portata rilevante.

Si andrà quindi a valutare la possibilità di inserire uno scambiatore di calore a valle del camino superiore per il recupero di questo flusso e, tra alcune opzioni costruttive, si stimerà quella preferibile dal punto di vista energetico ed economico.

9.7.6.1.9. Emissioni in atmosfera

Per contenere l'emissione di polveri è stata adottata una serie di accorgimenti costruttivi da parte dell'azienda fornitrice dell'essiccatoio. Tali accorgimenti interessano:

- a) tipo di funzionamento;
- b) velocità dell'aria;
- c) movimento del prodotto;
- d) riciclo dell'aria non satura.

Tipo di funzionamento: il funzionamento in depressione

Innanzitutto l'essiccatoio viene posto in depressione e l'aria satura viene raccolta dall'aspiratore superiore. Per tale ragione non ci sono emissioni diffuse nel luogo di lavoro dove agiscono gli operatori.

Velocità dell'aria

L'emissione delle polveri è dovuta all'attraversamento del prodotto da parte dell'aria che ne asporta le parti più leggere: naturalmente maggiore è la velocità dell'aria, maggiore è la quantità di polveri emesse.

Per questo motivo sono state realizzate delle canalette di attraversamento dell'aria con una elevata superficie di ingresso; in pratica per ogni canaletta passano circa 425 m³/h di aria e la superficie esposta del prodotto è di 0,37 m² quindi la velocità dell'aria in uscita dal prodotto è pari a 0,32 m/s, valore piuttosto basso.

Inoltre le camere di distribuzione dell'aria sono piuttosto grandi in modo da consentire una distribuzione uniforme dell'aria nelle varie canalette.

Movimento del prodotto

Osservando il funzionamento di un essiccatoio si può agevolmente constatare che **l'emissione di polveri avviene soprattutto quando il prodotto è in movimento**, a prodotto fermo l'emissione è trascurabile; pertanto sono stati adottati due accorgimenti per ridurre la movimentazione del prodotto e la velocità dell'aria durante questa fase.

In primo luogo il dispositivo di estrazione della colonna descritto in precedenza è stato studiato in modo da consentire lo scarico di una grande quantità di prodotto in un tempo brevissimo. La velocità di estrazione è tale che in pratica il tempo totale di

estrazione per questo essiccatoio si aggira intorno ai 20-40 secondi ogni ora; **solo durante queste estrazioni avviene una significativa emissione di polvere.**

Inoltre, per ridurre queste emissioni, il flusso dell'aria viene interrotto durante il movimento del prodotto. Alcuni decimi di secondo prima dello scarico le serrande si chiudono in modo da bloccare completamente il flusso dell'aria; alcuni secondi dopo lo scarico, quando il prodotto ha terminato la sua discesa e si è assestato, le serrande si riaprono. Il pannello di comando consente di impostare i tempi di anticipo e ritardo.

Riciclo dell'aria non satura

Un'altra constatazione che può essere facilmente fatta è la seguente: **nelle zone dove il prodotto è umido la polvere emessa è notevolmente inferiore rispetto alle zone dove il prodotto è secco.**

Il particolare circuito dell'aria di questo essiccatoio, studiato anche per contenere il consumo di combustibile, consente un'ulteriore riduzione delle emissioni.

L'aspiratore superiore estrae l'aria proveniente dalla parte alta della colonna; questa aria contiene un tasso di impurità ridotto sia perché ha attraversato il mais nella zona più umida sia grazie agli accorgimenti descritti in precedenza.

Il ventilatore inferiore invece aspira l'aria della parte bassa della colonna; questa aria contiene un tasso di polverosità più elevato e non è completamente satura; tramite una serie di condotti viene rimessa in ciclo e miscelata con l'aria proveniente dal generatore di calore; quindi attraversa nuovamente il prodotto nella parte alta. In questo modo è il prodotto stesso che fa da filtro all'aria.

Con questo sistema si ottiene un doppio risultato:

- viene emessa solo una parte dell'aria necessaria all'essiccazione (circa 2/3);
- non viene emessa l'aria che contiene un maggior tasso di polverosità.

Campionamento delle emissioni

L'azienda fornitrice ha inoltre previsto la possibilità di effettuare dei campionamenti delle emissioni. Tale operazione avviene nel piano superiore dell'essiccatoio dove sono presenti i camini; l'accesso a questo piano è consentito tramite una scaletta alla marinara montata su uno dei due lati e dotata di piani intermedi di riposo in modo da non avere una tratta superiore ai 7,5 metri.

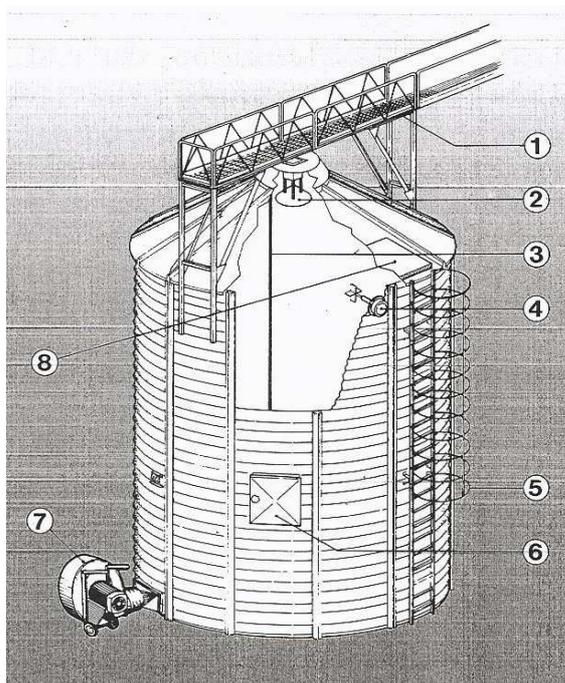
Su ciascun camino sono previsti due bocchettoni, ortogonali fra loro, predisposti per le sonde di campionatura. Le indicazioni di massima delle emissioni previste per l'impianto esistente sono evidenziate in figura 69.

DATI EMISSIONI	
Emissione polveri	< 50 mg/m ³
Emissioni ossidi di azoto (NO ₂)	< 500 mg/m ³
Emissioni di zolfo (SO ₂)	< 1700 mg/m ³

Figura 69: Parametri relativi alle emissioni

9.7.6.2. I sili di stoccaggio

9.7.6.2.1. Descrizione sili di stoccaggio



Legenda:

1	Passerella ispezione
2	Distributore-livellatore
3	Tre cavi sonda temperatura a 120° l'uno dall'altro
4	Indicatore di livello
5	Scaletta
6	Porta ispezione
7	Ventilatore
8	Boccaporto tetto

Figura 70: Silo in lamiera ondulata

I due sili presenti nell'azienda Doni Silvano sono sili per cereali in lamiera ondulata come quello illustrato in figura 70. Sono prodotti, come accennato in precedenza, dalla ditta di Padova Mulmix e a livello costruttivo hanno le seguenti caratteristiche:

- **CILINDRO SILO:** il corpo del silo è composto da virole (lamiere di forma particolare) di dimensioni 2910x830 millimetri in lamiera d'acciaio strutturale con un elevato rivestimento di zinco che permette una più lunga resistenza agli agenti atmosferici. La dolce ondulazione delle virole facilita lo scorrimento dei prodotti insilati. A seconda poi del diametro ed altezza del silo vengono installati dei montanti verticali zincati a caldo di diverso spessore e sezione, che aderendo alle virole assicurano un irrigidimento rilevante alla struttura;
- **TETTO:** è costituito da elementi trapezoidali in lamiera zincata liscia con una speciale piega per la congiunzione (unione ad omega), al fine di rendere la struttura perfettamente ermetica ed autoportante. Per ovviare al frequente

fenomeno della condensa, il tetto è realizzato con inclinazione 25° e 30° e rialzato dal cilindro di circa 40 mm con speciali piastrine.

La struttura, studiata nei materiali e in ogni dettaglio, è perfettamente ermetica.

È possibile ispezionare il materiale stoccaggio mediante una porta d'ispezione prevista sul corpo, un boccaporto centrale sul tetto ed uno supplementare sullo spicchio inferiore. Delle scalette zincate permettono l'accesso alla porta, al tetto o alla passerella.

MODELLO 1290/14		
diámetro	[m]	12,97
altezza con tetto	[m]	17,50
altezza senza tetto	[m]	11,50
capacità	[ton]	1500

Figura 71: Parametri costruttivi sili

9.7.6.2.2. Il sistema di ventilazione

Al fine di ottenere le condizioni ottimali di conservazione dei cereali stoccati, nei sili vengono applicate apposite apparecchiature per ottenere una circolazione forzata di aria che ha come oggetto il raffreddamento e la conservazione del cereale.

Nel caso in esame si ha un **sistema di ventilazione a piattaforma** (figura 72) ovvero i condotti della ventilazione sono disposti lungo l'intera superficie di base del silo. Quest'ultimi non poggiano sulle fondamenta bensì presentano una base circonferenziale di altezza pari a 80 centimetri di cemento e la superficie è in lamiera forata sorretta da un'impalcatura.

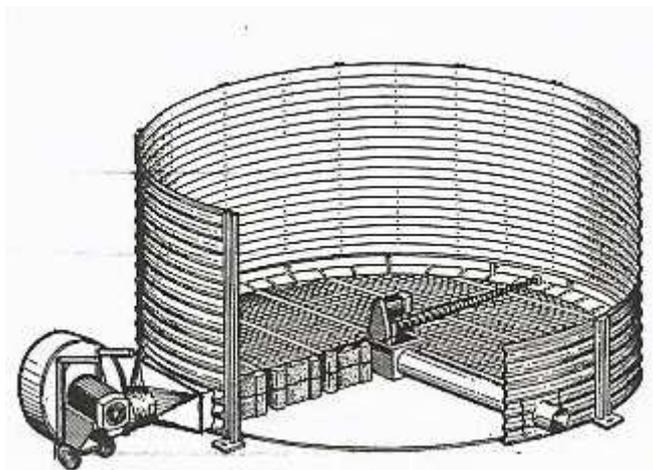


Figura 72: Sistema di ventilazione a piattaforma

La ventilazione ha come obiettivo il raffreddamento del cereale ed il suo mantenimento ad una temperatura non superiore ai 20 °C in modo da conservarlo in ottimo stato evitando la formazione di insetti e di muffe aerobiche. Essa ha due effetti simultanei: il raffreddamento e l'essiccazione.

Viene realizzata per mezzo di una circolazione forzata di aria ambiente ed è resa possibile dal fatto che la massa di cereale non rappresenta un insieme compatto. Il coefficiente di porosità varia in base al tipo, alla qualità ed alla pulizia del prodotto. Occorrono pertanto potenze differenti per vincere le perdite di carico date dalla resistenza che la massa oppone al passaggio dell'aria.

La ventilazione su cereali con umidità compresa tra il 14% ed il 16% viene eseguita più o meno di frequente, in genere ogni qualvolta la temperatura esterna lo permetta, per prevenire o fronteggiare principi di surriscaldamento della massa.

La figura 73 mostra la circolazione naturale dell'aria sul cereale insilato senza la ventilazione forzata.

L'aria più fredda circonferenziale sale riscaldandosi ed umidificandosi verso la superficie creandovi una zona d'alta umidità con formazione di strati più o meno spessi di muffa.

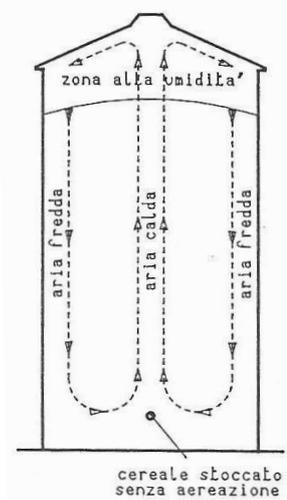
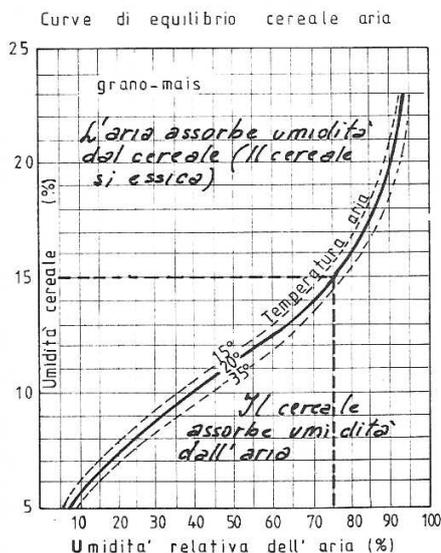


Figura 73: Circolazione naturale dell'aria in un silo

Come descritto nei capitoli introduttivi di questo elaborato, relativi alla conservazione dei cereali, si parla di curve di equilibrio aria-cereale.

La figura 74 mostra la curva di equilibrio dell'umidità aria-mais con temperatura dell'aria di 15-20 e 35°C.



Quando la linea orizzontale dell'umidità del cereale incontra la verticale dell'umidità relativa dell'aria nella zona a destra della linea di demarcazione, il cereale assorbe umidità dell'aria, invece quando l'incontro avviene a sinistra il cereale cede l'umidità all'aria essiccandosi ulteriormente.

È quest'ultima condizione quella utile per la ventilazione dei cereali.

Figura 74: Curva di equilibrio aria-cereale

Un diagramma utile a chi gestisce lo stoccaggio, insieme a quelli delle curve di equilibrio, è quello di figura 75, in quanto consente di vedere, in funzione del tenore d'acqua del prodotto e della sua temperatura, la zona di sicurezza per un'ottima conservazione.

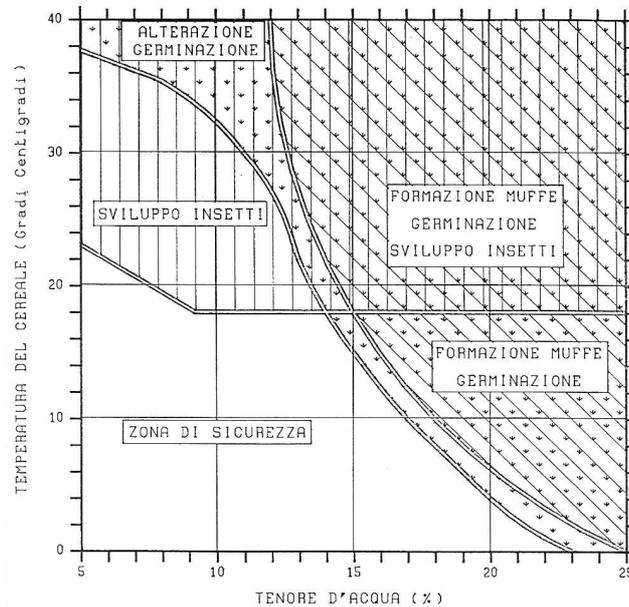


Figura 75: Diagramma di conservazione dei cereali

Nell'impianto esaminato viene attuata la ventilazione forzata mediante un ventilatore da 12 kW ovvero, appena la stagione lo permette (le temperature si abbassano) sfruttando le temperature più contenute della notte, il ventilatore confluisce l'aria all'interno del silo in modo da mantenere la temperatura desiderata.

Sono stati però riscontrati due problemi, il primo legato alla situazione meteorologica e il secondo legato alla temperatura di diffusione dei parassiti.

Infatti la ventilazione va bene qualora la stagione autunnale porti con sé temperature abbastanza gelide altrimenti non si può sfruttare il freddo della notte. In secondo luogo, come si può osservare nel diagramma di diffusione delle varie specie di parassiti in funzione della temperatura (figura 76), la temperatura ottimale di conservazione si aggira intorno ai 12-14°C, valori non ottenibili con la semplice ventilazione.

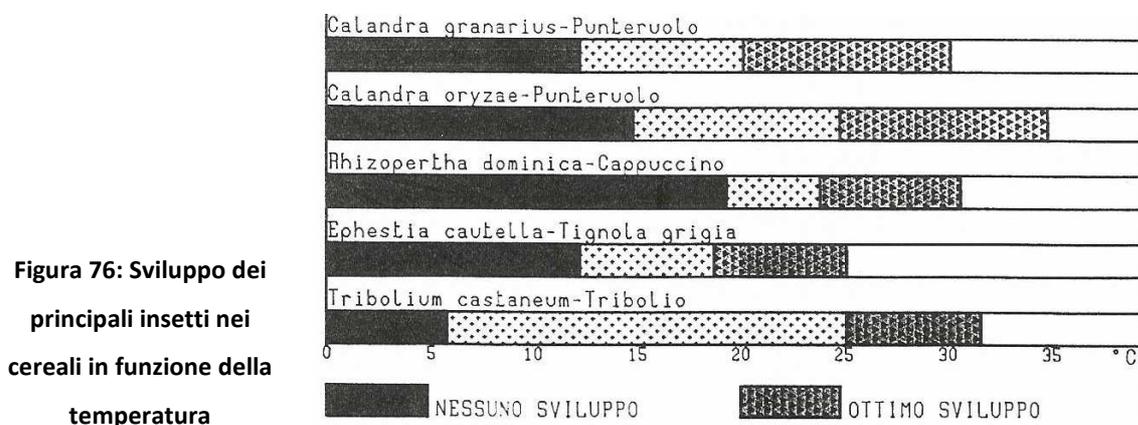


Figura 76: Sviluppo dei principali insetti nei cereali in funzione della temperatura

Per tale ragione, per la prossima stagione di raccolta, si è previsto di inserire un impianto frigorifero in sostituzione al ventilatore, che permetta di immettere aria alla temperatura desiderata. Inoltre esso ha l'importante funzione di deumidificare l'aria, caratteristica fondamentale in quanto non si deve aumentare l'umidità del prodotto.

La conservazione ottimale e indipendente dalle condizioni meteorologiche ha però un costo, infatti il sistema di refrigerazione ha un consumo energetico più elevato del ventilatore, mentre quest'ultimo ha una potenza di 12 kW, il frigorifero ne ha una di 52 kW.

Un accorgimento importante è il seguente: l'apparecchio per il raffreddamento, sia questo il frigorifero o il ventilatore, deve essere attivato quando il silo è alla massima capacità, altrimenti non sarebbe conveniente. In questo modo infatti si sfrutta completamente la vena d'aria fredda inserita. Qualora il silo non fosse pieno, l'aria prediligerebbe dei cunicoli preferenziali che si andrebbero a formare in seno al materiale e tra materiale e struttura del silo, non agendo in maniera totale.

9.7.6.2.3. I cavi sonda e il misuratore di temperatura

A differenza della torre di essiccazione, dove vengono controllate sia umidità che temperatura, nei sili viene monitorata solo la seconda variabile in quanto l'umidità è stata definita nel processo di essiccazione a monte.

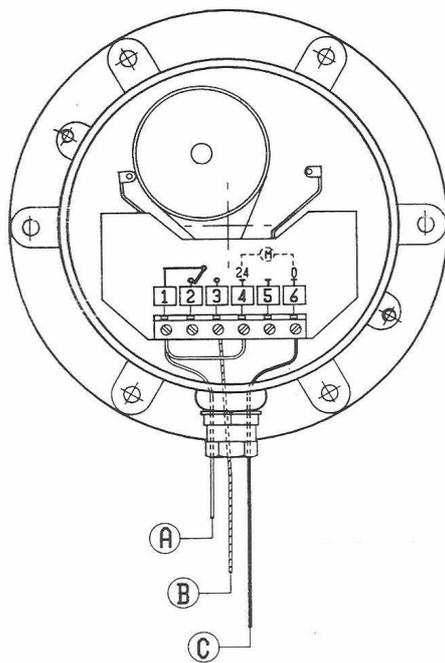
Dato che ogni forma di deperimento dei cereali, sia per germogliamento che per attacco di insetti, si manifesta con un processo esotermico e quindi con sviluppo di calore, risulta evidente l'importanza di un controllo continuo delle variazioni della temperatura all'interno della massa del prodotto.

Per realizzare questa funzione occorre inserire nei sili opportune sonde lungo le quali si trova distribuito un adeguato numero di elementi termosensibili. Quest'ultimi sono costituiti da termoresistenze di nickel o platino con parametri e tolleranze secondo le norme DIN 43760 e DIN IEC 751, alle quali un generatore invia impulsi di corrente costante. Ai capi delle termoresistenze viene rilevata la caduta di tensione che viene trasmessa all'unità di misura che amplifica e visualizza il segnale. Questo metodo di misura rende la rilevazione indipendente dalla resistenza dei cavi di collegamento e quindi dalla loro lunghezza; è pertanto possibile eseguire tutte le tarature in laboratorio, senza necessità di dover ulteriormente intervenire ad impianto installato.

I sensori di misura (termoresistenze) sono posati ad intervalli regolari all'interno di funi flessibili rinforzate con armature in trefolo di acciaio, adatte per resistere alle sollecitazioni dovute al carico e scarico del prodotto. Le sonde vengono fissate alla sommità del silo e devono essere introdotte quando la cella è vuota. La distanza tra due sensori non deve superare i 4 metri.

Nell'azienda Doni Silvano ogni silo è provvisto di tre cavi sonda, disposti a 120° l'uno dall'altro e ognuno a sua volta formato da tre sonde poste a diverse altezze in modo da tenere monitorata la situazione in tutta la dimensione verticale dell'impianto di stoccaggio (nel rispetto della distanza massima pari a 4 metri). Questi cavi sonda sono collegati ad una centralina a selezione manuale di punto e cella, ed esattamente il modello Thermo DMS 7 della Mulmix, una centralina per misura e selezione manuale di massimo 7 sonde a 5 punti.

9.7.6.2.3. Indicatori di livello ad elica



- (A) COLLEGAMENTO COMUNE MOTORINO-FINE CORSA
- (B) RITORNO CONTATTO NORMALMENTE APERTO DEL F
- (C) COLLEGAMENTO DIRETTO AL MOTORINO 24V

Per il controllo e la regolazione del livello del materiale stoccato nei sili è previsto l'inserimento di un indicatore di livello ad elica. Il funzionamento del segnalatore di massimo livello è molto semplice: un motorino sincrono di 0,2 kW che ruota a bassa velocità aziona un'elica posta all'interno del serbatoio da controllare. In assenza di materiale il motorino è sotto tensione e l'elica ruota mentre la presenza di materiale intorno all'elica ne frena la rotazione provocando uno scambio dei contatti di comando e un secondo microinterruttore provoca poi il distacco della tensione di alimentazione del motorino. L'apertura o la chiusura del circuito elettrico determina il comando di un segnale acustico o visivo, oppure il carico del silo, la fermata di trasportatori, coclee, ecc.

Figura 77: Schema allacciamento elettrico

Viene utilizzato questo apparecchio nel caso di materiale secco in quanto il materiale umido bloccherebbe il movimento dell'elica, si avrebbe un mal funzionamento e la necessità di una frequente manutenzione. Nel caso di prodotto umido si utilizza invece una membrana che subisce la pressione del prodotto stoccato.

9.7.6.3. Le apparecchiature complementari

9.7.6.3.1. I trasportatori a catena

Il trasportatore a catena è indicato per trasportare materiale sfuso, pulverulento o semiagglomerato, attraverso una cassa metallica mediante una catena chiusa ad anello, munita di pale raschianti.

Il tratto di catena che traina il prodotto sul fondo della cassa è quello che imprime il movimento di traslazione alla massa del materiale, mentre il tratto di ritorno è quello che passa superiormente ed è sostenuto da rulli di scorrimento o guide superiori. La velocità della catena imprime alla massa del materiale un movimento di traslazione continuo. L'altezza dello strato di materiale può essere diverse volte superiore all'altezza della catena, secondo l'esperienza acquisita in proposito, l'altezza effettivamente realizzabile è pressappoco uguale alla larghezza della catena. Il prodotto trasportato con questo sistema non subisce rotture né da sviluppo di polveri e regolando la velocità in modo adeguato, si può ottenere un trasporto uniforme e costante. Essa può essere fissata una volta per tutte o variata mediante l'adozione di un variatore di giri, comandato manualmente oppure a distanza mediante telecomando a mezzo di servomotore.

Legenda:

1	Motoriduttore
2	Pignone comando
3	Catena di trasmissione
4	Pignone condotto
5	Supporto su testa
6	Supporto su piede
7	Tenditore catena trasporto
8	Catena trasporto
9	Vite tensione catena trasmissione

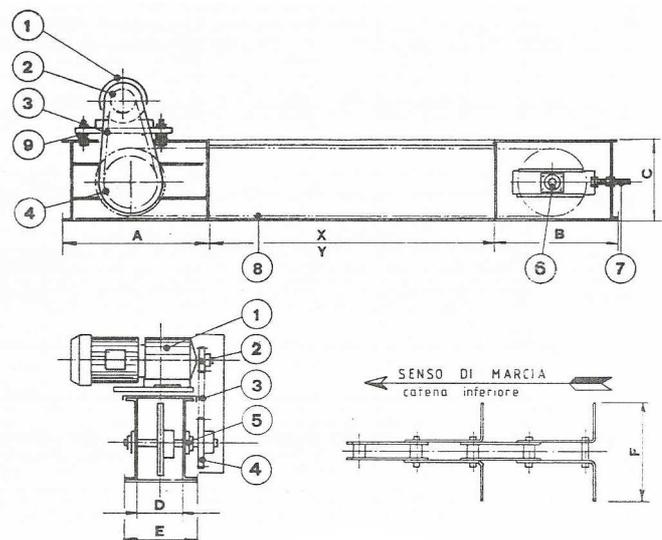


Figura 78: Trasportatore a catena Mulmix standard

I trasportatori presenti nell'impianto, il cui schema costruttivo è evidenziato in figura 78, sono tutti a catena e in totale sono cinque. Tre sono prodotti Mulmix mentre i rimanenti due, di più recente installazione, sono prodotti Silesfor (azienda di Rubano (PD)).

I primi trovano spazio nel seguente modo: uno all'interno della fossa di carico ed è aperto lateralmente per consentire l'accesso del materiale, uno corre superiormente ai

sili per il carico degli stessi e il terzo inferiormente per lo scarico. I due che servono i sili sono aperti sia superiormente che inferiormente per il transito del materiale.

Per quanto riguarda i trasportatori Silesfor, uno trasporta il materiale dal secondo elevatore, quello di dimensioni maggiori, ai magazzini di stoccaggio mentre l'altro distribuisce il materiale secco all'interno di essi.

TRASPORTATORI MULMIX STANDARD	
Funzione	movimentazione in orizzontale e inclinata su lunghe distanze di cereali secchi o umidi e prodotti pulverulenti, senza rotture
Struttura	interamente in lamiera di acciaio zincato di elevato spessore e completamente ermetica per installazioni esterne
Testata	in elementi modulari ad elevato spessore con ruota dentata di trazione montata su albero in acciaio con supporti autolubrificanti
Piede	in elementi modulari zincati con ruota interna di tensione montata su albero in acciaio con supporti autolubrificanti
Cassa	in lamiera d'acciaio zincata ad elementi componibili e imbullonati per un facile montaggio e manutenzione
Catena	in acciaio di elevata resistenza (fino a 27.000 Kgs/m) con bussole e perni in acciaio temperato
Avanzamento catena	lento e silenzioso (0,50 m/s)
Comando	tramite motoriduttore in bagno d'olio a basso numero di giri con pignoni e catena di trasmissione

Figura 79: Caratteristiche costruttive dei trasportatori Mulmix standard

Nel caso del trasportatore a catena in fossa le caratteristiche sono analoghe ma l'apertura è laterale ed è previsto un coperchio detto "a schiena d'asino".

9.7.6.3.2. Gli elevatori a tazze



Figura 80: Sezione dell'elevatore a tazze dell'impianto del caso studio

Nell'impianto dell'azienda Doni Silvano sono presenti due elevatori a tazze di diversa altezza, entrambi modello 6 della Mulmix di cui una sezione è illustrata in figura 80. Tale modello prevede le caratteristiche tecniche evidenziate nella tabella di figura 81:

ELEVATORI A TAZZE MULMIX MODELLO 6		
Portata	[t/h]	60
Tazze per metro		6,6
Larghezza tazze	[mm]	180
Larghezza cinghia	[mm]	200
Resistenza cinghia	[kg/cm]	600

Figura 81: Caratteristiche tecniche degli elevatori a tazze Mulmix modello 6

N.B.: La portata è calcolata per cereale a peso specifico 780 kg/m^3 ed umidità 15%.

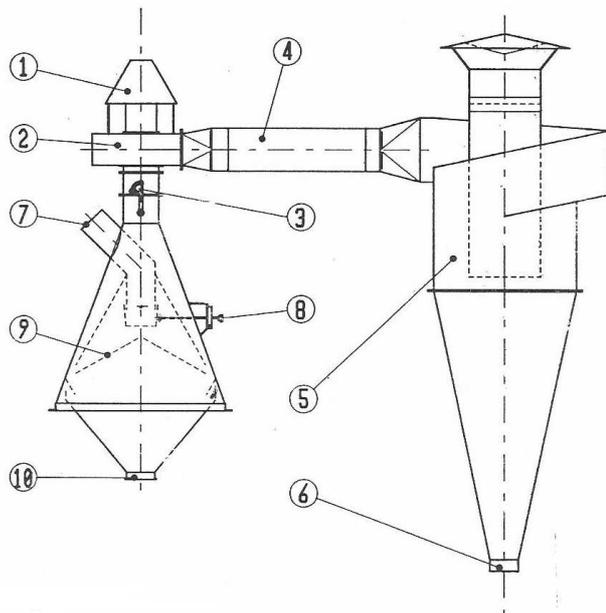
ELEVATORI A TAZZE MULMIX STANDARD	
Funzione	sollevamento verticale di prodotti granulari (cereali secchi o umidi) e prodotti pulverulenti in genere
Struttura	interamente zincata a caldo autoportante ed ermetica per installazioni esterne
Testata	componibile con piastra antiusura intercambiabile e sportelli d'ispezione
Piede	a elementi componibili con sportelli di ispezione per pulizia e piastra antiusura
Canne	in acciaio di elevato spessore a sezione rettangolare con sportello d'ispezione e di manutenzione per tensione della cinghia
Cinghia	speciale in PVC o gomma a 2-3 tele con resistenza determinata in base all'altezza e portata dell'elevatore; la bassa velocità impiegata (2-8 m/s) evita una anormale usura della macchina
Tazze	in acciaio stampato in esecuzione speciale per il massimo rendimento
Comando	con riduttore a bagno d'olio e antiretro incorporato

Figura 82: Caratteristiche costruttive degli elevatori a tazze Mulmix standard

9.7.6.3.3. Pulitore ad aria

Il pulitore ad aria è un'attrezzatura che toglie le parti leggere per aspirazione al prodotto essiccato. È indispensabile per avere una conservazione del cereale insilato nelle migliori condizioni e quindi migliorare la qualità del prodotto commercializzato.

Nell'impianto analizzato è presente un pulitore ad aria della Mulmix, modello PA500 così realizzato:



Legenda:

1	Motore elettrico trifase
2	Ventilatore centrifugo
3	Farfalla per la regolazione dell'aspirazione
4	Condotto zincato di collegamento con ciclone
5	Ciclone di decantazione
6	Raccordo di scarico del ciclone
7	Manicotto con tramoggia di alimentazione pulitore
8	Regolatore centraggio prodotto
9	Cono di dispersione
10	Raccordo di scarico del pulitore

Figura 83: Pulitore ad aria

Tale apparecchio, illustrato in figura 83, si basa sul seguente principio base: agitando il prodotto si riesce ad allontanare la polvere.

Ciò viene messo in pratica con un ventilatore centrifugo, il quale consente di distribuire il materiale essiccato sul fondo del pulitore e, nel contempo, aspirare la quota più leggera ovvero le impurità che poi vengono convogliate nel ciclone di decantazione. Alla fine si ha il materiale pulito sul fondo dell'organo principale e le polveri nel ciclone dove poi, attraverso una tubazione, vengono raccolte in una camera apposita.

9.7.6.3.4. Generatore di corrente

Il generatore di corrente è un'attrezzatura di per sé non indispensabile per il funzionamento di un impianto di essiccazione. Infatti è possibile utilizzare l'energia elettrica allacciandosi alla rete. Nel caso però studiato la potenza messa a disposizione non era e non è sufficiente a soddisfare il fabbisogno richiesto dalle attrezzature presenti. Durante i due mesi in cui l'impianto funziona in modo continuativo, oltre ai 15 kW disponibili, l'azienda utilizza, ad oggi, un generatore di corrente di proprietà da 150 kW. Per avere il rendimento massimo lo si deve far funzionare al 70% della potenza massima. E' stato dimensionato a tale scopo prendendo in considerazione le diverse utenze elettriche presenti nell'impianto (torre di essiccazione, trasportatori, elevatori, sistema di ventilazione dei sili,...).

Quando sarà installata la seconda torre di essiccazione, si è previsto di sostituire il generatore attualmente usato con uno da 300 kW che permetta di soddisfare i fabbisogni elettrici di entrambi gli impianti, quello esistente e quello di progetto.

L'azienda, al tempo della prima installazione, ha pure valutato la possibilità di installare una cabina elettrica ma ciò non era conveniente dato il numero contenuto di giorni all'anno di funzionamento dell'impianto.

Nel capitolo finale di questo elaborato si farà una valutazione di un possibile intervento di cogenerazione. Per legittimare tale intervento dal punto di vista energetico, economico e burocratico, si stimerà come la quota elettrica e termica potrà essere utilizzata nell'impianto di essiccazione esistente e in quello di termofiocatura che potrebbe essere di nuovo messo in funzione.

9.7.6.4. Consumi

Nelle aziende manifatturiere quando si valutano i consumi, si distingue tra le apparecchiature il cui consumo non è direttamente correlabile al tipo di produzione, ma che può essere invece ritenuto una costante, e quelle il cui consumo è invece dipendente da tipo e quantità di prodotto che si vuole ottenere. Nel caso invece dell'azienda considerata, i consumi sono una costante a meno della variabilità di alcune apparecchiature legata però al funzionamento intrinseco della macchina. Ad esempio gli elevatori a tazze e i trasportatori a catena hanno un consumo diverso se sono carichi o scarichi di materiale. Si è quindi fatta un'ipotesi forte, cioè che tutte le apparecchiature complementari alla torre di essiccazione abbiano funzionamento continuativo al massimo consumo. In questo modo si evitano difficoltà di stima e si trova il fabbisogno massimo.

Per avere un quadro generale delle richieste elettriche e termiche dell'impianto di essiccazione esistente nell'azienda Doni Silvano, durante i due mesi di attività continuativa, si è deciso di riassumere i dati più rilevanti nelle tabelle di figura 84 e 85.

RICHIESTE ELETTRICHE	
<u>TORRE DI ESSICCAZIONE</u>	
Ventilatore superiore	18 kW
Ventilatore inferiore	11 kW
Motore coclea carico torre	2 kW
Motore coclea estrazione torre	2 kW
<u>SILI DI STOCCAGGIO</u>	
Indicatori di livello	0,2 kW x 2 = 0,4 kW
Ventilatore (futuro = impianto frigorifero)	12 kW (futuro = 52 kW)
<u>ELEVATORI A TAZZE</u>	
consumo da carichi	5 kW x 2 = 10 kW
consumo da scarichi	2,5 kW x 2 = 5 kW
<u>TRASPORTATORI A CATENA</u>	
<i>Tre trasportatori lungo impianto:</i>	
consumo da carichi	5 kW x 3 = 15 kW
consumo da scarichi	2,5 kW x 3 = 7,5 kW
<i>Trasportatore verso magazzini:</i>	
consumo da carico	7,5 kW
consumo da scarico	3 kW
<i>Trasportatore interno ai magazzini:</i>	
consumo da carico	16 kW
consumo da scarico	5 kW
<i>Pareggiatore dentro magazzini:</i>	
motore centrale	2,5 kW
motori laterali	1,2 x 2 = 2,4 kW
<u>PULITORE AD ARIA</u>	
Ventilatore	7,5 kW
TOTALE	105 kW = 70% della potenza massima del generatore (150 kW)

Figura 84: Richieste elettriche dell'impianto di essiccazione

RICHIESTE TERMICHE	
Bruciatore torre di essiccazione	1600-1700 kW termici = 70% della potenza massima del bruciatore (2.250 kW)

Tabella 85: Richieste termiche dell'impianto di essiccazione

Le tabelle di figura 84 e 85 permettono di avere una visione d'insieme delle utenze elettriche e termiche che fanno capo all'impianto di essiccazione. Tali richieste hanno un corrispettivo in termini di consumo di combustibile usato, sia per il generatore che per il bruciatore, che equivale a sua volta ad una spesa economica.

Questi dati saranno utili nel prossimo capitolo per valutare il risparmio energetico nel caso dell'installazione di uno scambiatore di calore per l'aria umida e per valutare l'utilizzo del cogeneratore in funzione delle apparecchiature aziendali.

9.7.6.5. Isolamento

L'isolamento termico a livello industriale è stato spesso trascurato, non essendo adeguatamente conosciuto il costo imputabile alle perdite di calore attraverso le pareti e le tubature.

L'isolamento termico si basa sull'utilizzo di materiali aventi coefficienti di conduttività termica λ molto ridotti; si tratta di materiali a bassa densità che, grazie alle loro caratteristiche porose, rendono difficile la conduzione del calore. In tali materiali la conduttività minima è raggiunta tramite un giusto compromesso tra le dimensioni delle celle interne e le dimensioni delle fibre: al crescere delle prime aumenta infatti il calore scambiato per convezione attraverso l'aria, ma diminuisce quello per conduzione attraverso le fibre.

Nel caso dell'impianto della Doni Silvano si è visto come l'azienda fornitrice della torre di essiccazione abbia posto estrema attenzione ai materiali utilizzati e all'isolamento per evitare dispersioni di calore ed avere una struttura longeva. Ha utilizzato dove necessario strati spessi di lana minerale e contropannelli.

Tali materiali offrono buoni livelli di isolamento quindi non si ritiene economicamente valida l'ipotesi di sostituire l'isolante.

9.7.6.6. Possibili interventi migliorativi

A valle di quanto espresso in questo capitolo appare evidente come l'impianto di essiccazione presentato sia uno dei prodotti migliori sul mercato in termini tecnici ed energetici. Tale affermazione è supportata dalla mancanza di sviluppi tecnologici di rilievo in questa tipologia di impianti negli ultimi vent'anni. L'azienda fornitrice, come altre del settore, propone ancor oggi, impianti a colonna con le caratteristiche illustrate. Già negli anni '90 si spingeva verso il risparmio energetico e la cura dei materiali e dei dettagli costruttivi. La tecnologia ha visto dei perfezionamenti e un maggiore recupero del calore sull'aria di processo, ma non drastici cambiamenti.

Quindi l'unico possibile intervento sull'impianto descritto è quello dell'inserimento di uno scambiatore di calore a valle del camino per il recupero del calore dell'aria calda e

umida in uscita. L'energia recuperata andrà ad interessare il flusso d'aria in ingresso al bruciatore e quindi si avrà un risparmio in termini di consumo di miscela.

Tale analisi viene tenuta nel capitolo successivo. Infine, questo elaborato vede lo studio di fattibilità di un intervento di cogenerazione, non strettamente legato all'impianto esistente ma fine anche a questo.

CAPITOLO 10

Interventi per il risparmio energetico ed economico

10.1. Introduzione

Lo studio svolto in questo elaborato sull'impianto di essiccazione dell'azienda Doni Silvano si conclude con la presentazione di alcune ipotesi di interventi migliorativi che potrebbero portare a dei vantaggi in termini energetici ed economici. In questo ultimo capitolo saranno illustrate tali ipotesi, prese in esame le problematiche relative e analizzati i costi e i benefici degli interventi. Questi sono due, ovvero l'installazione di uno scambiatore di recupero sull'aria espulsa dalla torre di essiccazione e l'introduzione di un cogeneratore in azienda. Osservando la dinamica di processo della torre di essiccazione e i principali parametri in gioco ovvero portata, temperatura ed umidità dei flussi d'aria che interessano il materiale da essiccare, si vuole valutare se un sistema di recupero del calore sul flusso in uscita dal camino può essere una soluzione fattibile ed economicamente vantaggiosa. Per quanto riguarda invece il cogeneratore, l'idea è nata da una visione più ampia dell'azienda, dall'analisi delle richieste delle utenze elettriche e termiche presenti.

10.2. Installazione di uno scambiatore di calore

10.2.1. Introduzione

L'impianto preso in considerazione in questo elaborato è classificato come "essiccatoio a risparmio energetico", appartiene cioè alla categoria di impianti di essiccazione per cereali che prevedono il recupero del calore sull'aria durante il processo di essiccazione. Un intervento di risparmio energetico è ancora però potenzialmente possibile, infatti c'è il riversamento in atmosfera di aria ancora con una certa quantità di calore.

La torre di essiccazione tratta una portata d'aria pari a circa 81.600 Nm³/h di cui circa 50.000 Nm³/h vengono liberati in atmosfera. La temperatura in gioco si aggira intorno ai 45-50°C mentre l'umidità relativa intorno al 52% con punto di rugiada sui 38°C.

Il fluido però non è costituito nella sua totalità di aria, infatti quest'ultima, durante il processo a contatto con il materiale da trattare, si mescola con del pulviscolo. La scheda tecnica rilasciata dall'azienda fornitrice dichiara che le emissioni di polvere sono inferiori a 50 mg/m³, ben al di sotto dei limiti di legge. Al di là della normativa è

necessario considerare la questione dal punto di vista dell'intervento che si vorrebbe attuare ovvero l'inserimento di uno scambiatore di calore aria-aria che permetta di fare il recupero termico sul calore al camino per preriscaldare l'aria di processo diminuendo di conseguenza l'apporto termico dato dal bruciatore.

Un altro aspetto importante da tenere in considerazione è il layout dell'impianto: il camino infatti dista una dozzina di metri dalla zona di immissione dell'aria di processo e lo spazio non occupato da apparecchiature dell'impianto oppure da opere murarie è di pochi metri. L'area infatti dove è stato eretto l'impianto di essiccazione è stata sfruttata al massimo (figure 86 e 87). Questa peculiarità è rilevante in quanto, trattandosi di aria, c'è la necessità di movimentare dei canali di dimensioni notevoli. Oltre alla necessità di uno studio degli spazi, ciò va ad impattare pesantemente sul costo di installazione e quindi sul costo dell'intero intervento. E' stato stimato che il costo di installazione può andare in linea di massima da 1,5 a 4 volte il costo del solo apparecchio.



Figura 86 e 87: L'area dove è stato eretto l'impianto di essiccazione

Le problematiche generate dall'impianto sono:

1. Fluido da trattare non a temperatura molto elevata, con una certa umidità e con presenza di inquinante;
2. Spazio di intervento contenuto a causa della struttura dell'impianto di essiccazione;
3. Numero di giorni all'anno di funzionamento contenuto, solo 40 giorni.

10.2.2. Gli scambiatori aria-aria

Gli scambiatori aria-aria si distinguono in due grandi famiglie:

- recuperatori
- rigeneratori

I primi tengono separati i due fluidi, i quali si scambiano calore attraverso una parete di separazione. I secondi invece prevedono una matrice con capacità termica la quale entra in contatto in maniera intermittente con il fluido caldo e freddo. In questo secondo caso esiste un certo livello di rimescolamento dei due fluidi.

Un'ulteriore distinzione fra gli scambiatori è fra quelli che consentono solo lo scambio di calore sensibile (più diffusi) e gli scambiatori di calore totale che consentono il recupero anche sulla frazione latente. Nel primo caso l'aria che transita non vede variare la sua umidità specifica, c'è solo una variazione di temperatura. Nel secondo invece avviene anche uno scambio di massa, c'è uno scambio tra la quantità di vapore contenuta nei due fluidi, quello con maggiore umidità ne cede a quello con minore, c'è una variazione di temperatura ed umidità.

Nella scelta dell'apparecchio più adatto alle esigenze impiantistiche saranno prese in esame due tipologie di scambiatore:

- 1) un recuperatore a piastre sigillate;
- 2) una ruota entalpica.

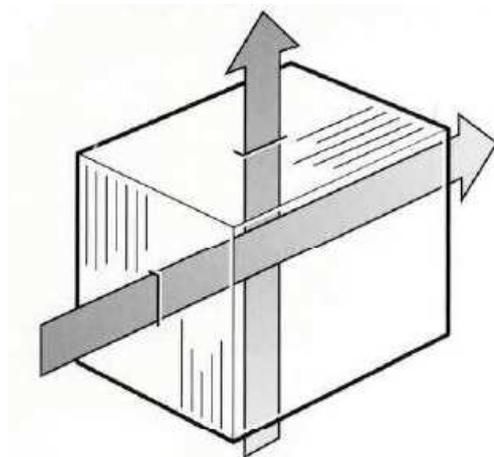


Figura 88: Scambiatore aria-aria a piastre sigillate a flussi incrociati

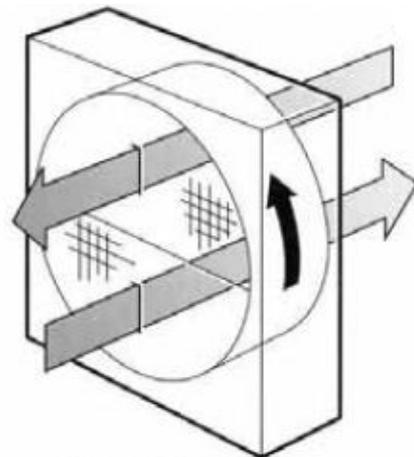


Figura 89: Scambiatore aria-aria a tamburo rotante

Il primo consente unicamente lo scambio di calore sensibile mentre il secondo è uno scambiatore di calore totale. Inoltre, mentre nel recuperatore non c'è rimescolamento dei due fluidi, nella ruota c'è un fattore di trascinamento che impatta sull'efficienza dell'apparecchio.

10.2.3. Recuperatore a piastre a flussi incrociati

I recuperatori a piastre sigillate sono gli apparecchi più venduti, più sperimentati e più economici per il recupero di calore da impianti di ventilazione. L'aria convogliata nel recuperatore si suddivide in numerosissimi canali formati da sottili piastre, che separano il fluido uscente, inquinato, da quello entrante. Attraverso le piastre il fluido più freddo assorbe calore da quello più caldo. Per evitare fughe d'aria tra i due circuiti, vengono impiegati sigillanti in pasta che assicurano una tenuta pressoché perfetta. Perciò questi scambiatori sono ideali per applicazioni con alto contenuto di inquinanti, umidità, odori nell'aria espulsa.

Quindi tale scambiatore è stato candidato per i seguenti motivi:

- bassi costi di acquisto, installazione e d'esercizio;
- molto diffuso quindi molto conosciuto e di conseguenza di facile manutenzione;
- completa separazione dei due fluidi.

La configurazione a flussi incrociati invece è stata scelta perché più comune e comoda dal punto di vista dell'installazione dell'apparecchio rispetto ai canali dei due fluidi che interessano lo scambiatore, infatti i canali che arrivano all'apparecchio sono a sezione rettangolare generalmente e quindi appare facile il collegamento tra di essi e lo scambiatore.

L'efficienza è però relativamente bassa, normalmente 50-60%, mentre uno scambiatore a piastre liquido-liquido raggiunge facilmente l'80-90%, valori non raggiungibili con l'aria a causa dei bassi coefficienti di scambio degli aeriformi. Generalmente comporta una perdita di carico tra i 250 Pa e i 300 Pa.

La capacità unitaria di scambio termico infine è dell'ordine di $4000 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$. Questo parametro ha il seguente significato: uno scambiatore che occupa un volume di 1 m^3 scambia 4kW per grado di differenza di temperatura tra i due flussi. Tale parametro è legato alla compattezza dell'apparecchio, tanto più il parametro è grande tanto più lo scambiatore è compatto.

Quindi gli svantaggi di questa soluzione sono:

- efficienza non elevata;
- installazione costosa legata alla movimentazione dei canali;
- ingombro importante dovuto alle portate in gioco.

10.2.4. Scambiatore rotativo entalpico

In questa tipologia di scambiatori vi è un solido intermedio che viene a contatto prima con un flusso d'aria e poi con l'altro. L'elemento rotante è una matrice di forma cilindrica, spesso metallica, che può essere di tipo incoerente (truciolo o maglia metallica) oppure ordinata (elementi corrugati che formano innumerevoli canali di

passaggio attraverso la ruota). La matrice viene trattata con una sostanza igroscopica solitamente a base di cloruro di litio. I due flussi d'aria pervengono alla ruota, interessando ciascuno di solito una metà della ruota. La velocità di rotazione è molto bassa, di appena 0,5-5 giri/h in quanto deve permettere lo scambio di massa.

In questo caso è possibile la contaminazione dei due fluidi, sia da trafiletti che da trascinamento. Questa seconda tipologia di causa è più temibile, l'aria intrappolata nelle celle della matrice durante la rotazione è proporzionale al volume vuoto della ruota ed alla sua velocità di rotazione.

Esistono dei provvedimenti per ovviare a questo problema, quello più efficiente è l'inserimento di una sezione di pulizia. Dopo che la matrice è stata a contatto con il flusso inquinante, un primo settore della ruota viene messo in contatto con aria di rinnovo indirizzata poi all'espulsione. Questo intervento può ridurre il trascinamento al di sotto dello 0,1 % ma comporta una riduzione importante dell'efficienza dello scambiatore in quanto l'aria di pulizia raffredda la matrice.

Altro problema è dato dalla necessità di rigenerare la sostanza igroscopica. Questo viene fatto investendo la ruota con un flusso d'aria ad elevata temperatura.

La scelta di candidare uno scambiatore di questo tipo è da ricercare nei seguenti motivi:

- recupero del calore sensibile ma anche latente;
- efficienza molto elevata, fino all'80 %
- capacità di scambio termico unitaria abbastanza alta, $5.400 \text{ W}/(\text{m}^3\text{K})$;
- nel caso di dimensioni elevate della ruota è possibile realizzare una versione alternativa che prevede la matrice fissa e la cappa che distribuisce i flussi che ruota.

I problemi sono invece:

- costo molto più elevato di uno scambiatore a piastre;
- installazione problematica legata alla movimentazione dei canali d'aria;
- problema del trascinamento;
- problema della riattivazione della sostanza igroscopica utilizzata.

10.2.5. Parametri di processo

Nella procedura di dimensionamento dello scambiatore si deve tener conto dei volumi, delle temperature e delle umidità relative dell'aria in ingresso e in uscita che assumono i seguenti valori:

aria in ingresso			aria in uscita		
portata (m ³ /h)	temperatura (°C)	um.relativa (%)	portata (m ³ /h)	temperatura (°C)	um.relativa (%)
50.000	21	75	50.000	50	52

Figura 90: Parametri relativi all'aria in ingresso e in uscita dalla torre di essiccazione

I valori dei parametri relativi all'aria in uscita rappresentano i valori medi del flusso rilevati dal gestore dell'impianto nel periodo di essiccazione e confermati dall'azienda fornitrice. Per quanto riguarda invece i valori di temperatura ed umidità dell'aria in ingresso sono stati determinati a partire dai dati climatici per la provincia di Venezia con cadenza oraria raccolti nei TEST REFERENCE YEAR TRY "Data Sets for Computer Simulations of Solar Energy Systems and Energy Consumption in Buildings." del 1985 realizzati dalla Commissione della Comunità Europea.

Si è fatta la media dei dati inerenti i mesi di Settembre ed Ottobre ovvero i mesi di raccolta di mais e soia e quindi di utilizzo dell'impianto di essiccazione.

A partire dai valori di figura 90 sono stati contattati diversi fornitori di sistemi di recupero in ambito industriale. Questi però hanno messo in evidenza l'antieconomicità dei loro prodotti per il fine di questa azienda in quanto la temperatura dell'aria in uscita è contenuta rispetto ai valori tipici del settore industriale che quindi prevedono materiali e scelte tecnologiche più performanti con relativi costi elevati. La ricerca si è quindi svolta tra i fornitori di prodotti per la ventilazione e si sono prese in considerazione le seguenti offerte:

- 1) proposta dell'azienda Savio s.r.l.: unità di recupero con scambiatore a piastre a flussi incrociati;
- 2) proposta dell'azienda Munters: scambiatore rotativo entalpico.

10.2.6. Analisi dell'intervento

Venendo a contatto con i fornitori dei due prodotti candidati alla scelta è emersa la necessità di provvedere all'abbattimento dell'inquinante presente nel fluido di ripresa prima dell'ingresso nello scambiatore. Applicazioni di scambiatori esistenti nel settore dell'essiccazione dei cereali hanno evidenziato che il quantitativo di inquinante (2.500 g/h) unito all'umidità del fluido obbliga ad una manutenzione frequente ed importante.

L'unità proposta dall'azienda Savio presenta due sezioni filtranti, sia sull'aria di ripresa che su quella di mandata, ma di medio-bassa efficienza per aria già pulita. Nel caso invece dello scambiatore entalpico dell'azienda Munters il fattore di sporco è un

vero problema data la tipologia di scambiatore (la matrice molto delicata ne risentirebbe fortemente).

Quindi per rispondere al meglio alle esigenze delle due proposte si è scelto di analizzare, come sistema di filtraggio, un prodotto che permette di avere un rendimento molto alto, ovvero il filtro a maniche autopulente con getto di aria compressa in controcorrente. Oltre ad avere un rendimento molto elevato, avendo le maniche coibentate garantisce basse dispersioni termiche. Ciò è importante in quanto si deve preservare la temperatura del fluido caldo. Per l'analisi di tale apparecchiatura si è fatto riferimento ai prodotti offerti dall'azienda Ventilazione industriale s.r.l.

10.2.6.1. Depolveratore a maniche autopulenti

Si tratta di filtrazione a secco per l'abbattimento di qualsiasi tipologia di polvere. Il campo di impiego è molto ampio, da polveri grossolane fino a polveri submicromiche (0,20 – 0,25 micron) con rese di abbattimento che, con superfici filtranti adeguate, superano il 97 %.

E' un depolveratore automatico, a tessuto, adatto per funzionamento continuo (24 ore su 24), con pulizia del tessuto filtrante in controcorrente.

Può trattare aria contenente polveri molto fini, conservando un rendimento di captazione assai elevato, anche per particelle aventi dimensioni inferiori a 1 micron.

Con l'impiego di particolari tessuti, può essere impiegato per temperature massime di esercizio superiori anche a 200 °C (fibre di vetro) .

La costruzione prevede pannelli componibili. Questo facilita il trasporto e il montaggio, e rende possibile e semplice l'eventuale ampliamento del depolveratore anche dopo l'installazione.

L'apparecchio è dotato di ampi portelli di ispezione che consentono di eseguire con estrema facilità le operazioni di manutenzione o, comunque, il controllo delle parti interne.

Gli elementi filtranti sono costituiti da cestelli opportunamente dimensionati e da una manica costituita da un particolare tessuto filtrante le cui caratteristiche vengono determinate in funzione della specifica applicazione.

Il ciclo di lavaggio che permette il distacco dello strato di polvere depositato sul tessuto restituendone il massimo grado di permeabilità è variabile in funzione delle reali necessità dell'impianto al quale il depolveratore è collegato. Il dispositivo di controllo è concepito in modo da poter ottenere sia la variazione del tempo di lavaggio sia la variazione della frequenza dell'aria.

È infine possibile effettuare la pulizia dei tessuti filtranti a temperature diverse da quella ambiente, a seconda delle necessità dell'impianto, in relazione ai fenomeni di condensazione che vi si possono verificare.

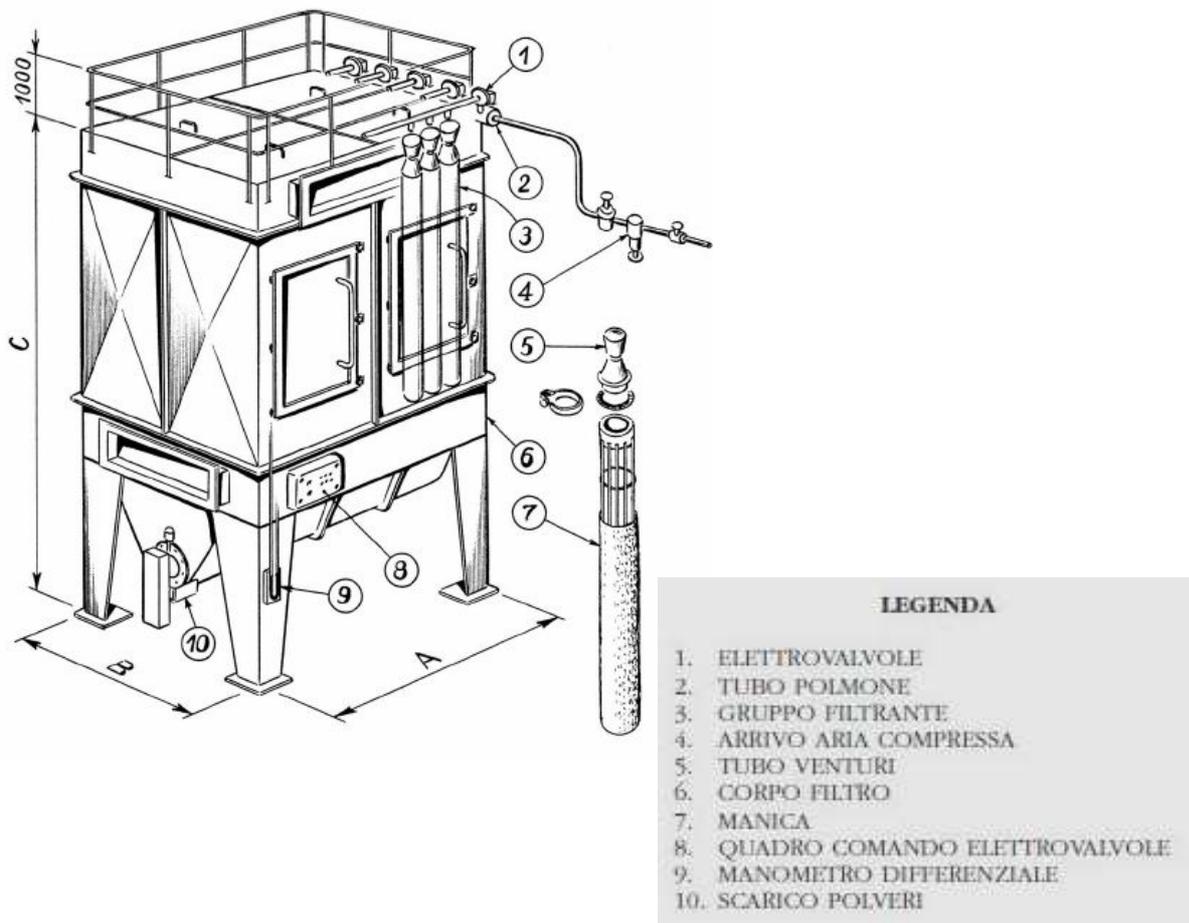


Figura 91: Componenti sistema di filtrazione

10.2.6.2. Funzionamento del depolveratore

L'aria polverosa entra nella camera filtrante e passa attraverso le maniche dall'esterno verso l'interno.

La pulizia avviene facendo fluire il getto d'aria compressa (6-7 atm) attraverso delle elettrovalvole dall'interno verso l'esterno delle maniche.

Ogni elettrovalvola è comandata con intervalli sequenziali da 10-50 s da un pannello elettronico.

Le perdite di carico delle maniche generalmente non superano i 120 mm H₂O e il consumo di aria compressa è di circa 0,15 m³/h per m² di tessuto (2,5 l/min).

10.2.6.3. Dimensionamento dell'impianto di depolverazione

Per valutare la perdita di carico che subisce il flusso d'aria attraversando il sistema di filtraggio e quindi vedere se è necessario sostituire il ventilatore a monte della torre di essiccazione che, gestendo il flusso nella torre, risente dell'introduzione sia di questo apparecchio che dell'unità di recupero, si deve utilizzare la seguente relazione:

$$HT = HD + HS + HF$$

Dove:

HT = resistenza totale dell'impianto di filtrazione [mm H₂O];

HD = pressione/resistenza dinamica dell'impianto = $Y * [V^2/(2*g)]$

Con:

- V = velocità di ingresso dell'aria nell'impianto = velocità di uscita dell'aria dalla torre di essiccazione;

- Y = peso specifico dell'aria alla temperatura di ingresso nell'impianto = peso specifico dell'aria in uscita dalla torre di essiccazione;

- g = accelerazione di gravità = 9,81 m/s².

HS = pressione/resistenza statica dell'impianto = resistenza lungo la linea che collega la torre di essiccazione all'impianto di filtrazione, in relazione alla tipologia, lunghezza e diametro delle tubazioni di collegamento;

HF = resistenza filtro = 120 mm H₂O.

Quindi il solo passaggio attraverso il tessuto filtrante comporta una perdita di carico pari a 120 mm H₂O ovvero 1176 Pa (1 m H₂O = 9.806 Pa).

Il flusso d'aria che tratta il prodotto nella torre di essiccazione subisce, lungo la torre stessa, una perdita di carico di 6 millibar ovvero 600 Pa (1 millibar = 100 Pa). Su tale valore è stato dimensionato il ventilatore superiore dell'impianto che permette il movimento del flusso.

Data la perdita di carico dovuta al solo passaggio attraverso il filtro, senza aver quantificato le ulteriori perdite presenti (resistenza statica e dinamica dell'impianto di filtrazione e resistenza dell'unità di recupero), appare evidente come sia necessaria la sostituzione del ventilatore con uno di potenza superiore che avrà di conseguenza una richiesta elettrica maggiore.

E' possibile poi quantificare il numero di metri quadri di tessuto filtrante necessari nel caso trattato.

Innanzitutto si deve valutare la velocità di filtrazione, questa la si ricava dalle tabelle tecniche dell'azienda. In funzione dell'inquinante l'azienda propone un materiale per il filtro con la relativa velocità di filtrazione. Nel caso esaminato si ha:

INQUINANTE	TIPO DI FELTRO	VELOCITA' DI FILTRAZIONE (m/s)
Pulviscolo derivante da granaglie di cereali e soia	Feltro poliestere o lana	0,030

Figura 92: Tipo di materiale e velocità di filtrazione in funzione dell'inquinante

Data una velocità di filtrazione di 0,030 m/s e una portata da trattare pari a 50.000 m³/h (13,9 m³/s) si ottiene la seguente superficie di filtrazione:

$$S = \text{portata} / \text{velocità} = 13,9 / 0,030 = 463 \text{ m}^2$$

Sono necessari 463 m² di tessuto filtrante del tipo illustrato in tabella di figura 93.

La maniche possono avere diametri e spessori diversi ma devono realizzare la superficie calcolata.

Si può anche valutare la perdita di carico per singola manica con la seguente relazione:

$$H = K * \text{portata d'aria (m}^3) / \text{superficie (m}^2)$$

Dove:

K = coefficiente variabile da 0,015 (maglia larga) a 0,03 (maglia stretta).

L'azienda fornitrice propone diversi modelli di filtri con relative superfici, numero di maniche e caratteristiche costruttive. Il modello proposto che offre la superficie di tessuto maggiore è il modello 400/40/R con 314 m².

L'azienda però può progettare e realizzare filtri a maniche di dimensioni maggiori su richiesta.

10.2.6.4. Costi

Il costo specifico di acquisto per applicazioni che non richiedono accorgimenti costruttivi particolari è compreso tra 160 e 200 €/m² di superficie filtrante. Nel caso analizzato il solo costo d'acquisto si aggira intorno agli 80.000 €:

$$C = \text{costo specifico} * \text{superficie filtrante} = 160-200 \text{ €/m}^2 * 463 \text{ m}^2$$

A tale costo va aggiunto tra i costi iniziali, il costo di installazione, mentre i costi di funzionamento prevedono:

- costo per la produzione di energia elettrica per l'aria compressa necessaria per la pulizia del filtro;
- costo per la manutenzione ordinaria.

Quindi per ottenere un flusso pulito l'azienda Doni Silvano deve investire su un impianto delle caratteristiche appena illustrate che comporta però:

1. investimento per l'impianto abbastanza rilevante (macchinario, tubazioni di collegamento e installazione);
2. sostituzione del ventilatore superiore della torre di essiccazione;
3. aumento del consumo di energia elettrica del ventilatore della torre;
4. costi di funzionamento dell'impianto di filtrazione;
5. manutenzione dell'impianto di filtrazione;
6. ingombro importante.

Relativamente a questo ultimo punto è possibile stimare l'impatto di un'opera di questo tipo dall'osservazione dell'applicazione illustrata in figura 93:



Figura 93: Filtro a maniche autopulente per la filtrazione di polveri di resina poliesteri. Portata d'aria 15.000 Nm³/h

Tale opera è stata dimensionata per un flusso di portata pari a 15.000 m³/h, meno di un terzo di quello trattato nell'azienda Doni Silvano. Ovviamente non è possibile un paragone diretto in quanto le dimensioni dipendono dal modello di filtro scelto, però è evidente il fatto che si tratta di macchinari importanti con diversi metri di ingombro.

10.2.6.5. Problematiche dell'intervento

Le problematiche generate dall'installazione di uno scambiatore per il recupero del calore sul flusso in uscita dalla torre di essiccazione per ridurre l'apporto termico dato dal bruciatore sono molteplici:

- investimento molto ingente dovuto principalmente all'unità di filtrazione e agli interventi da fare (installazione dell'unità di filtrazione e dell'unità di recupero e realizzazione dei collegamenti necessari tra esse e l'essiccatoio);
- necessità di un ampio spazio di intervento (la sola unità di filtrazione occupa diversi metri nelle tre dimensioni) che non è presente data la struttura dell'impianto di essiccazione, come illustrato in precedenza;
- sostituzione del ventilatore superiore della torre di essiccazione (costo della sostituzione e maggiori spese energetiche dovute alla maggiore potenza dello stesso);
- ulteriori consumi energetici generati sia dall'unità di filtrazione (produzione di aria compressa) che dall'unità di recupero (per il recuperatore a piastre l'azienda Savio prevede l'installazione di due ventilatori mentre per lo scambiatore rotativo invece è necessario un motore per movimentare la ruota).

E' necessario inoltre prendere in considerazione due altri fattori importanti:

- a causa del processo di pulitura del flusso di mandata la temperatura di questo diminuisce impattando sul risparmio energetico conseguibile (già contenuto data la temperatura non elevata e al numero ridotto di giorni di funzionamento dell'impianto);
- l'impianto funziona pochi giorni all'anno e ha già un certo numero di anni di funzionamento alle spalle.

Per tutte queste ragioni appare non conveniente dal punto di vista economico l'installazione di uno scambiatore di calore.

A dimostrazione di ciò si riporta il calcolo del risparmio energetico generato dalla prima alternativa di scelta ovvero lo scambiatore a piastre. Il valore calcolato evidenzia come il recupero di un investimento così importante necessiti di molti anni di funzionamento.

La seconda alternativa permetterebbe di avere un risparmio energetico maggiore dovuto allo scambio di massa ma comporta maggiori spese date dal prezzo d'acquisto

maggiore dello scambiatore ma anche di funzionamento. Uno dei problemi aggiuntivi è la riattivazione della sostanza igroscopica che necessita di un flusso di aria calda.

10.2.6.6. Il risparmio dato dalla prima alternativa

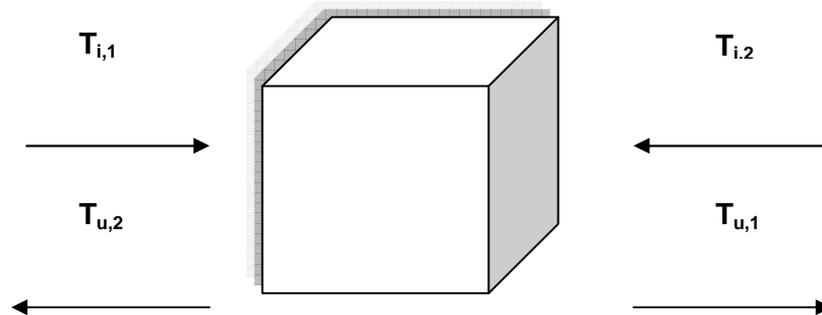


Figura 94: Schema dello scambiatore a flussi incrociati;

$T_{i,1}$, $T_{i,2}$ = temperature di ingresso del flusso primario (aria calda) e secondario (aria nuova);

$T_{u,1}$, $T_{u,2}$ = temperature di uscita del flusso primario e secondario

L'efficienza ε di uno scambiatore viene definita come il rapporto tra il flusso termico effettivamente scambiato q ed il flusso termico massimo q_{\max} che potrebbe essere trasferito, per sola operazione di scambio termico tra i due fluidi, in un apparecchio ideale con le stesse temperature di ingresso:

$$\varepsilon = q / q_{\max}$$

Il flusso termico massimo q_{\max} corrisponde a quello necessario per portare la temperatura dell'aria in ingresso all'essiccatoio fino al valore della temperatura di ingresso allo scambiatore del flusso in uscita dal camino; ciò potrebbe al limite essere conseguito in uno scambiatore in controcorrente perfetta di area infinita.

$$q_{\max} = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{i,1} - T_{i,2})$$

$$q = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{u,2} - T_{i,2}) = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{i,1} - T_{u,2})$$

L'efficienza ε può allora essere espressa come:

$$\varepsilon = [m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{u,2} - T_{i,2})] / [m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{i,1} - T_{i,2})] = (T_{u,2} - T_{i,2}) / (T_{i,1} - T_{i,2})$$

Nel caso trattato si ha:

$$\varepsilon = 50 \%$$

$T_{i,1} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ (si ipotizza che il fluido attraversando le tubazioni e l'unità di filtrazione abbia una diminuzione della sua temperatura pari a $5 \text{ }^\circ\text{C}$);

$$T_{i,2} = 21 \text{ }^\circ\text{C}.$$

L'unica incognita risulta quindi essere la temperatura di uscita dell'aria in ingresso alla torre che si può pertanto facilmente determinare; essa corrisponde a $33 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'immissione dei $50.000 \text{ m}^3/\text{h}$ di aria alla temperatura di $33 \text{ }^\circ\text{C}$ invece di $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 12 \text{ }^\circ\text{C}$), comporta un risparmio energetico di 171.968 kcal/h pari a 200 kW . Date le ore di funzionamento dell'impianto di essiccazione e quindi del bruciatore ($24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno}$), il PCI della miscela propano-butano utilizzata ($11.000 \text{ kcal/kg} = 13,2 \text{ kWh/kg}$) e considerando un costo della miscela di $0,7 \text{ €/kg}$, si può determinare l'entità del recupero annuo:

recupero energetico	200	kW
ore di funzionamento bruciatore	960	H
recupero energetico annuo	192.000	kWh
PCI	13,2	kWh/kg
risparmio di miscela annuo	14.545	kg
costo miscela	0,7	Euro/kg
risparmio economico annuo	10.182	Euro

Figura 95: Analisi recupero energetico-economico scambiatore a piastre

L'investimento per realizzare il sistema di recupero ovvero l'installazione dell'unità di filtrazione e l'unità di recupero e la realizzazione di tutti i collegamenti necessari è superiore ai 100.000 € . Sono poi da considerare le spese di funzionamento (energia elettrica per i due ventilatori dell'unità di recupero, per la produzione dell'aria compressa dell'unità di filtrazione e quella aggiuntiva per il nuovo ventilatore superiore della torre). Confrontando il risparmio economico annuo di circa 10.000 € con tutte queste uscite di denaro appare evidente che sono necessari molti anni per il recupero dell'investimento. Visto poi che l'impianto è già datato si può affermare che la soluzione non è economicamente vantaggiosa.

10.3. Intervento di cogenerazione

10.3.1. La cogenerazione

Col termine cogenerazione si indica la produzione contemporanea di diverse forme di energia secondaria (energia elettrica e/o meccanica ed energia termica) partendo da un'unica fonte (sia fossile che rinnovabile) attuata in un unico sistema integrato.

Alla base sta il secondo principio della termodinamica per il quale ogni qualvolta si trasforma dell'energia termica prelevata da una sorgente ad elevata temperatura in energia elettrica o meccanica si deve cedere una certa quantità di calore ad un pozzo ambientale. Nella cogenerazione tale calore non viene identificato come uno scarto ma come un prodotto utile e viene impiegato. In tal modo, a parità di energia primaria immessa (il combustibile), si ha una maggiore quantità di energia secondaria prodotta (lavoro, calore). L'energia termica può essere utilizzata per uso industriale o condizionamento ambientale (riscaldamento, raffreddamento).

Uno dei primi esempi di diffusione della cogenerazione su piccola scala in Italia è stato il TOTEM realizzato nel 1973 dall'ing. Palazzetti del Centro Ricerche Fiat.

Un problema controverso nella valutazione dei sistemi di cogenerazione è quello della loro resa dal momento che essi presentano un certo rendimento elettrico/meccanico ed un certo rendimento termico. Per tale ragione sono stati introdotti una serie di parametri quali IEN (Indice Energetico) e IRE (Indice di Risparmio Energetico).

Un sistema di cogenerazione è conveniente generalmente quando si è in presenza di una domanda elettrica e termica importanti ed i consumi di elettricità e calore sono il più possibile costanti nel tempo, o variabili in modo da mantenere circa costante il loro rapporto.

In questo elaborato si parla di piccola cogenerazione in quanto la potenza elettrica è inferiore ad 1 MW (secondo le fasce di potenza elettrica convenzionalmente utilizzate per classificare la cogenerazione). I sistemi trattati sono motori alternativi a combustione interna a recupero parziale (sui fumi di scarico). Infatti il recupero su tale categoria di cogeneratori è a due livelli termici, uno dell'ordine di 70-80°C dall'acqua di raffreddamento ed uno a temperatura più alta dato dal raffreddamento dei fumi. Nel caso illustrato, come verrà descritto successivamente, l'azienda per uno dei suoi processi utilizza vapore, quindi è necessario fare il recupero sui fumi di scarico per raggiungere le temperature desiderate. Non avendo modo di sfruttare invece la quota di calore data dall'acqua di raffreddamento si prevede di disperderla e quindi di non poter attuare un recupero totale.

Data la potenza nominale del cogeneratore di interesse, inferiore ad un 1 MW, si ha che il rendimento elettrico e quello termico sono tra loro paragonabili e si aggirano intorno al 35-45%. Quindi si ha un'efficienza globale pari a circa l'80%.

In estrema sintesi i vantaggi della piccola cogenerazione sono:

- potenziale risparmio del 35-40% dell'energia primaria con relativa diminuzione dei costi energetici. E' un vantaggio rilevante per un paese come l'Italia, grande importatore di energia primaria;
- salvaguardia dell'ambiente con emissioni di molto contenute di anidride carbonica (oltre un milione di tonnellate di anidride carbonica in meno);
- zero perdite legate alla distribuzione del calore (utilizzato in loco);
- zero perdite legate alla distribuzione dell'energia elettrica (riversata direttamente nelle linee a bassa tensione);
- nessuna necessità di costruire grandi locali appositi (costi di investimento contenuti).

10.3.2. Incentivi e benefici per la cogenerazione ad alto rendimento

La cogenerazione rappresenta una tecnologia energeticamente efficiente, per questo motivo esistono alcune agevolazioni di varia natura ed alcune semplificazioni amministrative che ne promuovono l'utilizzo.

Se si ottiene infatti la qualifica di impianto di cogenerazione ad alto rendimento (vincoli definiti nel D.Lgs. 8 febbraio 2007, n°20; criteri per il riconoscimento corrispondenti a quelli stabiliti dalla Delibera dell'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) n. 42/02 e successive modifiche ed integrazioni.) si usufruisce di:

- esenzione per l'elettricità prodotta in cogenerazione dall'obbligo del 3,10% di energia prodotta da fonti rinnovabili per imprese che importano o producono più di 100 GWh/anno;
- priorità di dispacciamento a borsa operante;
- ritiro garantito delle eccedenze e valorizzazione regolata dell'energia elettrica immessa in rete (Del. AEEG 280/07);
- possibilità di accedere ai benefici previsti dai D.M. 20 luglio 2004 che consentono di conseguire per i primi anni di funzionamento Titoli di Efficienza Energetica (TEE) attestanti il risparmio di energia primaria ottenuto e vendibili sul mercato dell'efficienza energetica, purchè l'impianto raggiunga la soglia minima di risparmio stabilita per tipologia di intervento; il decreto è stato recentemente aggiornato e la durata del periodo di conseguimento dei titoli è stata portata da 5 a 10 anni;
- riduzione del carico fiscale sul consumo di gas naturale: su una quota pari a 0.25 m³ di gas/ kWh e prodotto si ha infatti la riduzione dell'accisa nazionale per utilizzo industriale del gas e l'annullamento dell'addizionale regionale (presente solo nelle Regioni a Statuto Ordinario).

10.3.2.1. Titoli di efficienza energetica (TEE)

I Titoli di Efficienza Energetica (TEE), denominati anche certificati bianchi, sono stati istituiti dai Decreti del Ministero delle Attività Produttive, di concerto con il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (D.M. 20/7/04 elettricità, D.M. 20/7/04 gas), successivamente modificati ed integrati con il D.M. 21/12/07, sulla base degli obiettivi quantitativi nazionali di incremento dell'efficienza energetica.

I TEE sono emessi dal GME (Gestore del Mercato Elettrico) a favore dei distributori, delle società controllate dai distributori medesimi e a favore di società operanti nel settore dei servizi energetici (ESCO) al fine di certificare la riduzione dei consumi conseguita attraverso interventi e progetti di incremento di efficienza energetica.

I TEE hanno un valore pari ad un tep e si distinguono in tre tipologie:

1. tipo I: attestanti il conseguimento di risparmi di energia primaria attraverso interventi per la riduzione dei consumi finali di energia elettrica;
2. tipo II: attestanti il conseguimento di risparmi di energia primaria attraverso interventi per la riduzione dei consumi di gas naturale;
3. tipo III: attestanti il conseguimento di risparmi di energia primaria attraverso interventi diversi da quelli di cui ai punti 1 e 2.

I distributori di energia elettrica e di gas naturale possono conseguire gli obiettivi di incremento di efficienza energetica sia attraverso la realizzazione di progetti di efficienza energetica e la conseguente emissione dei TEE sia acquistando TEE da altri soggetti.

Il GME organizza e gestisce la sede per la contrattazione dei TEE ed ha predisposto, d'intesa con l'AEEG, le regole di funzionamento del mercato dei TEE, che consentono:

- l'acquisto di titoli da parte dei distributori che, attraverso i loro progetti, ottengono dei risparmi inferiori al loro obiettivo annuo e pertanto devono acquistare sul mercato i titoli mancanti per ottemperare all'obbligo;
- la vendita di titoli da parte dei distributori che raggiungono risparmi oltre l'obiettivo annuo e che possono realizzare dei profitti vendendo sul mercato i titoli in eccesso;
- la vendita di titoli ottenuti da progetti autonomi da parte delle ESCO che, non dovendo ottemperare ad alcun obbligo, hanno la possibilità di realizzare dei profitti sul mercato.

Il valore dei TEE

Il valore assunto dai TEE varia durante l'anno e viene aggiornato nel sito del Mercato Elettrico circa ogni 15 giorni. Per la valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica, in questa analisi, si sono presi come riferimento i prezzi medi ponderati riportati nel rapporto di monitoraggio semestrale riferito al primo semestre 2010 (Gennaio 2010-Giugno 2010): TEE I **92,38 €/TEE**, TEE II **91,79 €/TEE**

Per quanto riguarda invece la stima del numero di TEE che potrebbero essere rilasciati a valle dell'intervento si è utilizzata la scheda 21-bis promulgata dall'AEEG. Tale scheda è applicabile nel settore civile di piccoli sistemi di cogenerazione per la climatizzazione invernale ed estiva degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria però l'algoritmo è estendibile anche al caso studio trattato in questo elaborato.

10.3.2.2. Ritiro dedicato

Il ritiro dell'energia da parte del GSE (Gestore dei Servizi Elettrici) ha preso il nome di Ritiro Dedicato ed è regolamentato dalla delibera AEEG 280/07. Tutte le operazioni di fatturazione avvengono tramite il portale predisposto dal GSE per il Ritiro Dedicato.

Si distingue in:

- ritiro dedicato con prezzi minimi garantiti;
- ritiro dedicato con prezzi medi di mercato.

Ritiro dedicato - prezzi minimi garantiti

Una modalità di vendita dell'energia prevede il ritiro dell'energia da parte del GSE a prezzi minimi garantiti. Le tariffe di anno in anno vengono adeguate sulla base dell'inflazione. I valori dei prezzi minimi garantiti per gli impianti alimentati da fonti rinnovabili di potenza nominale elettrica fino a 1 MW di cui all'articolo 7, comma 7.5, della deliberazione dell'Autorità n. 280/07, aggiornati per l'anno 2010 secondo i criteri previsti dal medesimo comma, risultano pari a:

fino a 500.000 kWh annui	€/MWh 101,8
da oltre 500.000 kWh fino a 1.000.000 kWh annui	€/MWh 85,8
da oltre 1.000.000 kWh fino a 2.000.000 kWh annui	€/MWh 75,0

Figura 96: Tabella con prezzi minimi garantiti per gli impianti da fonte rinnovabile con $P_e < 1$ MW riferiti al 2010

Ritiro dedicato - prezzi medi di mercato

A partire dal 1° Gennaio 2008 oltre alla vendita su I mercato libero e la vendita a prezzi minimi garantiti, è data la possibilità di vendere l'energia prodotta in modo semplificato ma comunque a prezzo di mercato. Il Soggetto preposto al ritiro e alla remunerazione della energia è il GSE che si pone come intermediario tra il produttore e il mercato elettrico e remunera il produttore sulla base dei prezzi di mercato correnti, per zona e per fascia oraria.

Per i prezzi medi sono state utilizzate le schede di riferimento che si trovano nel sito del GSE riferite ai diversi mesi del 2010.

10.3.2.3. Cogenerazione da fonti rinnovabili

Nel caso di cogenerazione a partire da fonti rinnovabili, si ha inoltre la possibilità di accedere ai benefici previsti dalla Tariffa onnicomprensiva oppure a quelli che consentono il conseguimento dei Certificati Verdi. La prima scelta è però possibile solo per impianti di taglia inferiore al megawatt.

10.3.2.4. Tariffa Onnicomprensiva

Il Dm Sviluppo Economico del 18 dicembre 2008 ("Decreto Rinnovabili") ha attuato alcune novità previste dalla Finanziaria 2008, tra cui il meccanismo della Tariffa onnicomprensiva a favore della produzione di elettricità da impianti a fonti rinnovabili di piccole dimensioni, entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007.

Con la delibera 1/09, l'AEEG ha definito le regole riguardanti la Tariffa onnicomprensiva.

Essa è un incentivo monetario, differenziato per fonte, che viene concesso, in alternativa ai Certificati Verdi, per l'energia elettrica netta immessa in rete. E' un beneficio studiato per promuovere i piccoli impianti, semplificando le procedure e garantendo un ritorno fisso e prevedibile. E' allargato a tutte le rinnovabili (con esclusione della fonte solare), e viene concesso per un periodo di 15 anni.

Beneficiari

Hanno diritto ad accedere alla Tariffa onnicomprensiva tutti gli impianti a fonti rinnovabili con potenza nominale media annua non inferiore a 1 kW e con potenza elettrica nominale **non superiore a 1 MW** (non superiore a 0,2 MW per l'eolico), entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007. Gli stessi impianti hanno, alternativamente, la possibilità di accedere al sistema incentivante dei Certificati Verdi.

Fonti incentivate

Hanno diritto alla Tariffa onnicomprensiva tutti i piccoli impianti alimentati da fonti rinnovabili che producono energia elettrica, ad esclusione della fonte solare.

Sono dunque esclusi dal beneficio gli impianti fotovoltaici (incentivati attraverso il Conto energia) e gli impianti solari termici, la geotermia a bassa temperatura, le biomasse per il riscaldamento e tutte le tecnologie che producono calore ma non energia elettrica.

Sono invece incluse le centrali ibride, gli impianti di cogenerazione abbinati al teleriscaldamento (che hanno acquisito i diritti all'ottenimento dei Certificati Verdi, e

quindi alla Tariffa, in applicazione del decreto ministeriale 24 ottobre 2005 "altre produzioni").

Calcolo della tariffa

La Tariffa onnicomprensiva consiste nell'erogazione di un beneficio monetario, **differenziato per fonte, corrisposto per ogni kWh netto di energia elettrica immesso in rete**. Diversamente dal Conto energia per il fotovoltaico e dai Certificati Verdi, che incentivano tutta l'energia prodotta (compresa quella autoconsumata), la Tariffa è corrisposta solo per l'elettricità effettivamente ceduta alla rete, al netto degli autoconsumi.

Il valore economico della Tariffa incorpora, seppur non in maniera esplicita, sia una quota incentivante che un corrispettivo per la vendita dell'energia (per questo motivo è definita "onnicomprensiva"). In altre parole, il produttore che beneficia della Tariffa onnicomprensiva non ha il diritto di vendere l'energia prodotta, quindi rinuncia a qualsiasi ulteriore corrispettivo economico.

Al contrario, il beneficio economico dei Certificati Verdi va a sommarsi ai proventi derivanti dalla vendita di elettricità. Inoltre, il beneficio economico è calcolato sul totale dell'energia prodotta dall'impianto, compresa quella eventualmente autoconsumata dal produttore.

Le differenze tra le tariffe rispecchiano i costi delle diverse tecnologie, consentendo una buona redditività anche alle soluzioni impiantistiche meno diffuse e che comportano un maggiore investimento economico.

Le tariffe possono essere aggiornate ogni 3 anni, con decreto del ministro dello Sviluppo economico. Attualmente le tariffe sono quelle illustrate in tabella di figura 97:

N°	FONTE	TARIFFA (€ cent / kWh)
1	Eolica per impianti di taglia inferiore a 200 kW	30
2	Solare	*
3	Geotermica	20
4	Moto ondoso e maremotrice	34
5	Idraulica diversa da quella del punto precedente	22
6	Biogas e biomasse, esclusi i biocombustibili liquidi ad eccezione degli oli vegetali puri tracciabili attraverso il sistema integrato di gestione e di controllo previsto dal regolamento (CE) n. 73/2009 del Consiglio, del 19 gennaio 2009	28
8	Gas di scarica, gas residuati dai processi di depurazione e biocombustibili liquidi ad eccezione degli oli vegetali puri tracciabili attraverso il sistema integrato di gestione e di controllo previsto dal regolamento (CE) n. 73/2009 del Consiglio, del 19 gennaio 2009	18

Figura 97: Tabella con la Tariffa onnicomprensiva riferita alle diverse tipologie di fonte

Nella tabella è stato messo in evidenza il caso trattato in questo elaborato, la scelta del cogeneratore sarà tra l'alimentazione a gas naturale e quella ad olio vegetale.

10.3.2.5. Certificati Verdi (CV)

I Certificati Verdi (CV) costituiscono una forma di incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Infatti, secondo quanto disposto dalla legge 244/07, la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili in impianti entrati in esercizio o ripotenziati a partire dal 1° aprile 1999 fino al 31 dicembre 2007, ha diritto alla certificazione di produzione da fonti rinnovabili (certificato verde) per i primi dodici anni di esercizio. La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili in impianti entrati in esercizio o ripotenziati a partire dal 1° gennaio 2008, invece, ha diritto alla certificazione di produzione da fonti rinnovabili per i primi quindici anni di esercizio. Il CV è emesso dal Gestore dei Servizi Energetici su comunicazione del produttore e riguarda la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili dell'anno precedente o la producibilità attesa nell'anno in corso o nell'anno successivo e rappresenta 1 MWh di energia elettrica.

Per gli impianti, entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2007, di potenza nominale media annua superiore a 1 MW e a 0,2 MW per gli impianti eolici, il GSE rilascia i CV per 15 anni, moltiplicando l'energia netta EI riconosciuta all'intervento effettuato per le costanti, differenziate per fonte, della tabella di figura 97 della Legge Finanziaria 2008 e aggiornata dalla Legge 23/07/2009 n.99:

	Fonte	Coefficiente
1	Eolica per impianti di taglia superiore a 200 KW	1,00
1 bis	Eolica offshore	1,50
3	Geotermica	0,90
4	Moto ondoso e maremotrice	1,80
5	Idraulica diversa da quella del punto precedente	1,00
6	Rifiuti biodegradabili, biomasse diverse da quelle di cui al punto 7	1,30
7	Biomasse e biogas prodotti da attività agricola, allevamento e forestale da filiera corta	1,80
8	Gas di discarica e gas residuati dai processi di depurazione e biogas diversi da quelli del punto 7	0,80

Figura 98: Tabella inerente i coefficienti di valorizzazione dell'energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile

E' stato messo in evidenza il caso trattato in questo lavoro ovvero le biomasse prodotte da attività agricola anche se non si utilizzerà il coefficiente in quanto la potenza nominale media annua è inferiore al megawatt.

Il d. lgs. 79/99, art. 11, prevede che, dal 2002, produttori e importatori di energia elettrica prodotta da fonti non rinnovabili hanno l'obbligo di immettere ogni anno in rete una quota di energia elettrica prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili. Tale quota è pari al 3,10% (valore aggiornato al periodo 2007-2012) dell'energia elettrica prodotta o importata da fonte non rinnovabile nell'anno precedente, eccedente i 100 GWh/anno.

L'obbligo può essere soddisfatto anche attraverso l'acquisto di CV relativi alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili effettuata da altri soggetti. Il GME organizza e gestisce il mercato dei CV. Possono partecipare al mercato dei CV, come acquirenti o venditori, il GSE, i produttori nazionali ed esteri, gli importatori di energia elettrica, i clienti grossisti e le formazioni associative (associazioni di consumatori e utenti, ambientaliste, sindacati) previa domanda al GME e ottenimento della qualifica di operatore di mercato.

Il valore dei CV

Il valore assunto dai CV varia durante l'anno e viene aggiornato nel sito del Mercato Elettrico. Le sessioni di contrattazione si svolgono usualmente con cadenza settimanale, attraverso negoziazione continua. Proprio perché soggetto ad una variabilità costante, il valore considerato nell'analisi tenuta in questo elaborato è stato tratto dallo spettro riassuntivo dell'andamento degli ultimi tre anni. E' stato utilizzato il prezzo medio ponderato del 2010 pari a **84,18 €/MWh**

10.3.3. Introduzione all'intervento

In un primo momento, durante l'analisi energetica dell'impianto di essiccazione, si è valutata l'ipotesi di installare un cogeneratore a motore per coprire le richieste elettriche e termiche di tale impianto. Si è giunti però, in breve tempo, alla conclusione che tale soluzione è antieconomica e complessa nella realizzazione. La non economicità risiede nel fatto che il funzionamento del cogeneratore deve essere limitato al periodo di utilizzo dell'impianto di essiccazione ovvero una quarantina di giorni all'anno e quindi le domande, elettrica e termica, non sono sufficienti per rendere ragionevole l'investimento. La complessità di realizzazione invece è dovuta alla struttura della torre di essiccazione e ai valori di temperatura che devono essere raggiunti dall'aria in ingresso alla torre. Innanzitutto l'essiccatoio è un macchinario compatto, fatto su misura dall'azienda fornitrice, per cui appare difficile apportare delle modifiche e in secondo luogo l'aria in ingresso deve essere portata da una temperatura di circa 21°C ad una di 90-120°C in funzione del prodotto, sia questo soia o mais. Per raggiungere queste temperature è necessario fare un recupero sui fumi del cogeneratore. Ciò comporta due rilevanti problemi. In primo luogo si dovrebbero

prevedere due scambiatori, uno fumi/acqua e a valle uno acqua/aria, in quanto agire in maniera diretta con uno scambiatore fumi/aria sarebbe impossibile. Uno scambiatore di questo tipo infatti, trattando due fluidi gassosi, prevede delle superfici di scambio importanti e quindi si dovrebbe avere un ampio spazio di intervento che nel caso analizzato non è presente data la struttura della torre e dalle opere murarie che la circondano. In secondo luogo la potenza nominale termica richiesta dal cogeneratore sarebbe molto alta, ben al di sopra del valore limite per essere soggetti adatti alla Tariffa onnicomprensiva. L'analisi che verrà discussa in seguito infatti prende in considerazione tre alternative, dato che una di queste prevede tale incentivo, è necessario soddisfare il limite di potenza elettrica da esso previsto.

La potenza nominale termica è pari a:

$$P_t = V * \rho * c_p * \Delta T$$

Dove:

P_t = potenza nominale termica [W];

V = portata volumetrica [m^3/h]

ρ = densità dell'aria [kg/m^3];

c_p = calore specifico dell'aria [$kJ/(kg K)$];

ΔT = differenza di temperatura tra l'aria in uscita e in ingresso allo scambiatore.

Considerando la relazione $1 \text{ kW} = 3600 \text{ kJ/h}$ per avere l'uniformità nelle unità di misura, si ottiene la potenza nominale termica in kW semplicemente usando nella formula la portata volumetrica in m^3/s .

Ricordando che nel caso specifico la portata volumetrica dell'aria da trattare è pari a $50.000 \text{ m}^3/h$ e che la temperatura deve essere portata da $21 \text{ }^\circ\text{C}$ a $120 \text{ }^\circ\text{C}$ si ha che:

$$P_t = (50.000 / 3600) * 1,2 * 1 * (120 - 21) = 1650 \text{ kW} = 1,65 \text{ MW}$$

Per essere un soggetto idoneo è necessario raggiungere al massimo 1 MW elettrico (nei cogeneratori la quota elettrica e termica sono tra loro simili in termini quantitativi), quindi, come illustrato dal risultato del calcolo, l'azienda analizzata non rispetterebbe tale condizione.

Date le premesse si è cercata una soluzione che reggesse economicamente il progetto di installazione del cogeneratore. L'unica via era avere delle domande, soprattutto quella termica, maggiori nell'arco dell'anno. Infatti, come evidenziato nel paragrafo 10.3.1., un sistema di cogenerazione è conveniente generalmente quando si è in

presenza di una domanda elettrica e termica importanti ed i consumi di elettricità e calore sono il più possibile costanti nel tempo, o variabili in modo da mantenere circa costante il loro rapporto.

Quindi si è passati dall'osservazione del solo impianto di essiccazione ad una visione più ampia, di tipo aziendale. L'impresa Doni Silvano, come illustrato nel capitolo 9, possiede un secondo impianto di processo, un termofioccatore. Tale impianto, ad oggi non utilizzato, prevede un funzionamento di circa 240 giorni all'anno e una richiesta termica media di 300 kWt, la produzione di vapore da parte di una caldaia a miscela propano-butano. La soluzione che è stata quindi analizzata consta nell'installazione di un cogeneratore a motore che permette di coprire le richieste elettriche sia dell'impianto di essiccazione che di termofioccatura e la richiesta termica di quest'ultimo. Tale scelta rende la proposta del cogeneratore fattibile; la sua convenienza economica invece verrà stimata nei paragrafi seguenti.

10.3.4. Descrizione dell'impianto di termofioccatura

10.3.4.1. Introduzione alla processo di termofioccatura

Il processo di termofioccatura consiste nella trasformazione dei grani di cereali in fiocchi (cereali precotti a vapore e fioccati) per l'alimentazione del bestiame. E' nato per rispondere alle sempre più elevate esigenze qualitative del mercato mangimistico. L'allevatore moderno cerca infatti un mangime sano senza per questo dover rinunciare all'incremento produttivo. Il processo di termofioccatura prevede l'utilizzo del vapore e alte pressioni meccaniche per gelatinizzare l'amido, modificarne la struttura e quindi facilitare l'attacco enzimatico. Questo significa una migliore digeribilità e una maggiore assimilazione del prodotto da parte dell'animale.

Il processo si articola in tre fasi:

1. **trattamento idrotermico**, con la cottura a vapore delle materie prime ad una temperatura variabile da 110 °C fino a 140 °C;
2. **trattamento meccanico**, tramite il quale i grani vengono schiacciati o ridotti in lamine;
3. **trattamento di essiccazione-raffreddamento**, grazie al quale i fiocchi acquisiscono le caratteristiche di umidità e temperatura adeguate alla conservazione.

Quindi dal punto di vista più strettamente tecnico il processo di termofioccatura si svolge in tre momenti significativi:

1. Cottura
2. Fiocatura o schiacciatura
3. Essiccazione/ Raffreddamento

La cottura

La cottura avviene tramite iniezione di vapore, prodotto da una caldaia, nella camera di cottura. Una rete di distribuzione del vapore permette di dosare la quantità di vapore nei diversi punti della camera di cottura, ottenendo un trattamento idrotermico ottimale caratterizzato da un rapporto tempo-temperatura adatto ad ogni tipo di materia prima. Il vapore è regolabile sia in quantità che in temperatura per soddisfare tutte le esigenze di cottura. Tramite poi opportune apparecchiature è possibile definire la produzione oraria e regolare il caricamento del materiale nella torre.

La fioccatrice o schiacciatura

La fioccatrice o schiacciatura è fondamentalmente una laminazione attraverso la quale i grani vengono ridotti in fiocchi da un laminatoio composto da una coppia di rulli, di cui uno fisso ed uno mobile. E' possibile regolare la distanza tra i cilindri, così da ottenere fiocchi dello spessore desiderato.

L'essiccazione/ il raffreddamento

I cereali ormai schiacciati vengono essiccati e poi raffreddati, al fine di ridurre la percentuale di umidità fino al 12-15 %. Questa è infatti la condizione necessaria per una perfetta conservazione dei cereali nel tempo.

L'apparato è costituito da una tavola vibrante forata e permette di regolare il tempo di transito dei fiocchi (si tratta di tecnologia detta "a letto fluido"). L'aria può essere riscaldata o a temperatura ambiente, è proprio la temperatura dell'aria movimentata che distingue l'essiccazione dal raffreddamento. L'aria, calda o meno, viene soffiata all'interno della camera di essiccazione tramite due ventilatori.



Figura 99: Esempio di impianto di termofioccatrice

La termofioccatrice è solo il passaggio chiave del processo di lavorazione dei cereali al fine di ottenere un prodotto di qualità veramente eccellente. E' possibile prevedere infatti altre attrezzature, di pulitura e di trasporto.

La pulitura della granella è importante perché il cereale giunga al gruppo di termofiocatura nella sua forma migliore.

Il materiale deve essere poi movimentato all'interno dell'impianto lungo le diverse apparecchiature. Una volta studiata la disposizione dei macchinari, le coclee, i nastri trasportatori ed gli elevatori a tazze diventano indispensabili per agevolare al massimo la movimentazione dei prodotti.

Infine un impianto completo di tutte le unità pre-termofiocatura e termofiocatura necessita di un controllo elettronico adeguato. La verifica da parte dell'operatore dello stato del sistema è possibile mediante un pannello sinottico.

10.3.4.2. L'impianto dell'azienda Doni Silvano

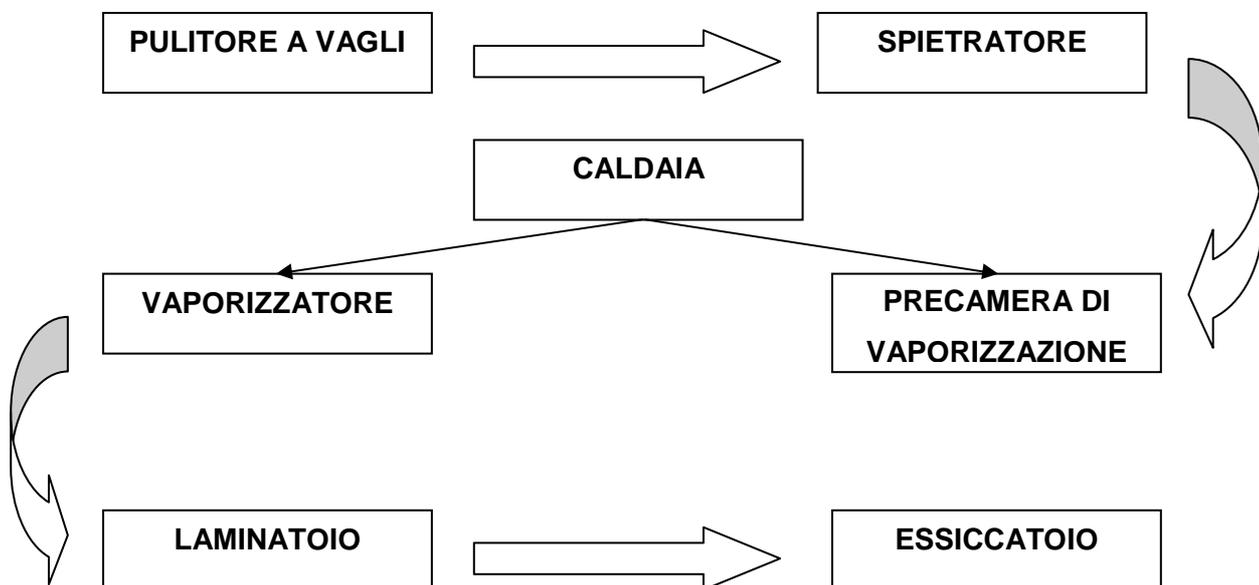


Figura 100: Schema a blocchi dell'impianto di termofiocatura

La figura 100 mette in evidenza i principali apparecchi presenti nell'impianto di termofiocatura dell'azienda Doni Silvano e la relativa sequenza di operazioni e quindi di trattamenti che subisce il materiale.

Il prodotto, convogliato mediante una tramoggia di carico su di un sistema di trasporto ovvero un nastro trasportatore, viene inviato ad un piccolo elevatore a tazze. Questo lo porta fino al primo pulitore, un pulitore a vagli, che con funzionamento a setaccio permette la pulizia del prodotto da tutoli e pula. E' un organo composto da un ventilatore e da un vaglio, dimensionato per piccole quantità di prodotto (mentre il pulitore ad aria dell'impianto di essiccazione tratta circa 300 q/h, questo ne tratta circa 30 q/h). A questo punto il materiale passa attraverso un secondo pulitore detto "spietratore" che toglie i corpi estranei portati inevitabilmente dal raccolto quali per

esempio piccoli sassi che potrebbero danneggiare i rulli del laminatoio. Questo apparecchio si basa sul concetto del peso specifico: è costituito da un piano inclinato messo in movimento da un vibratore, a causa del movimento, la parte più leggera del materiale scende lungo il piano portandosi nella zona inferiore mentre la parte più pesante ovvero i corpi estranei quali sassi o altre impurità, non discendendo permangono nella zona superiore del piano.

Il prodotto così pulito viene trasportato mediante un secondo elevatore a tazze nel sistema di vaporizzazione dove la granella entra in contatto con il vapore prodotto dalla caldaia. L'apparecchio è costituito da due camere, la precamera di vaporizzazione e il vaporizzatore vero e proprio. Il prodotto, iniettato di vapore, permane nella precamera per circa 10 minuti; in questo modo viene preparato alla seconda fase di iniezione prevista nel vaporizzatore dove soggiorna per 20 minuti circa. Grazie all'introduzione della precamera la cadenza produttiva aumenta del 25% passando da 30q/h a 40q/h (valori riferiti alla granella di mais), infatti il prodotto già umido è più facilmente e velocemente trattabile nel vaporizzatore. Quando la granella ha il contenuto d'acqua desiderato viene fatta cadere sul laminatoio composto da due rulli da 30 quintali ciascuno, pressati a 120-150 atm uno all'altro. Il prodotto schiacciato e ridotto in piccoli fiocchi viene trasportato mediante nastro trasportatore all'interno di un essiccatoio ad aria. Mentre nell'impianto di essiccazione la torre tratta il materiale mediante immissione di aria calda, in questo caso i fiocchi vengono portati alla temperatura e all'umidità desiderate mediante ventilazione di aria a temperatura ambiente. Il materiale, distribuito su di un tappeto lungo 5 metri e largo 1 metro, viene investito da una corrente d'aria in direzione apposta al suo moto e prodotta da due ventilatori posti sui due lati lunghi del tappeto e sfalsati uno dall'altro (figura 101).



Figura 101: Collocazione dei ventilatori rispetto al tappeto dove giace il materiale nell'essiccatoio

Infine il prodotto, schiacciato e asciutto, viene portato fuori dall'impianto di termofiocatura mediante un trasportatore in gomma. Il ciclo appena descritto è continuo e si prevede di far funzionare l'impianto giorno e notte per otto mesi all'anno in modo di avere una domanda termica ed elettrica abbastanza costante, insieme all'impianto di essiccazione.

10.3.4.3. I prodotti

Attualmente, come illustrato nel capitolo 9, l'impianto di termofiocatura non è utilizzato data la bassa richiesta di prodotto fioccato e dall'attenzione posta dall'azienda sull'impianto di essiccazione piuttosto che su questo secondo impianto di processo. Se l'introduzione del cogeneratore fosse conveniente rispetto alla situazione attuale dell'azienda allora il titolare avrebbe le giuste motivazioni per riavviare l'impianto di termofiocatura. Si prevede un funzionamento continuativo dell'impianto, giorno e notte, nei mesi di massimo lavoro dell'azienda ovvero i periodi:

- 1) da febbraio a giugno (compresi gli estremi dell'intervallo);
- 2) da settembre a novembre (compresi gli estremi dell'intervallo).

Quindi con un semplice calcolo si ottiene un numero di giorni all'anno di funzionamento dell'impianto di termofiocatura pari a circa 241.

Data la tipologia di prodotto raccolto dall'azienda Doni Silvano, mais e soia, si pensa di produrre con la termofiocatura principalmente fiocchi di mais e fiocchi di soia. I fiocchi, come precedentemente accennato, sono un alimento alternativo ai tradizionali mangimi per allevamenti con una serie di vantaggi nutrizionali come l'aumento della digeribilità, dell'appetibilità e del senso di sazietà.

L'output dell'impianto analizzato può avere due destinazioni:

- a) la clientela dell'azienda che acquista generalmente mangimi e che quindi vede in questo prodotto un alimento zootecnico alternativo o complementare;
- b) i mangimifici.

La domanda e il prezzo di vendita di questi prodotti sono variabili anno dopo anno in quanto legati all'andamento del mercato cerealicolo e alle esigenze zootecniche. Si può fare un'ipotesi semplificativa di ripartizione del prodotto nel seguente modo: 50% destinato alla clientela e 50% destinato ai mangimifici.

I due prodotti trattati, ovvero mais e soia, come nell'impianto di essiccazione, anche in questo caso, hanno esigenze diverse; a parità di parametri funzionali, la soia necessita di un maggior tempo di processo. Ciò è dovuto alle diverse caratteristiche chimico-fisiche, la soia infatti tra i suoi costituenti ha un acido che diminuisce la bagnabilità del prodotto quindi, affinché la granella raggiunga l'umidità desiderata a contatto con il vapore, è necessario prima eliminare questo acido. Aumentando il tempo di processo, diminuisce di conseguenza la cadenza produttiva; mentre per il mais si raggiunge il valore di 40 q/h, per la soia solo 20 q/h. La produzione giornaliera, riferita al mais, si stima intorno ai 750 quintali quindi, dato un utilizzo dell'impianto di circa 240 gg/anno, si ha una produzione annua di circa 180.000 quintali. Ovviamente i fiocchi di mais e quelli di soia avranno un prezzo diverso legato al differente prezzo della materia prima e al diverso tempo di processo. Non è possibile fare una stima realistica del mix

produttivo e del prezzo di vendita dei due prodotti finiti in quanto dipendono dal mercato.

10.3.4.4. Consumi

Per avere un quadro generale delle richieste elettriche e termiche dell'impianto di termofiocatura esistente nell'azienda Doni Silvano, si è deciso di riassumere i dati più rilevanti nelle tabelle di figura 102 e 103.

RICHIESTE ELETTRICHE	
<u>NASTRI TRASPORTATORI</u>	
Nastro trasportatore di ingresso	2 kW
Nastro trasportatore tra laminatoio ed essiccatoio	2 kW
Trasportatore in gomma per uscita prodotto	0,5 kW
<u>ELEVATORI A TAZZE</u>	
Elevatore a tazze per carico pulitore a vagli	3 kW
Elevatore a tazze per carico sistema di vaporizzazione	3 kW
<u>PULITORE A VAGLI</u>	
Ventilatore	4 kW
<u>SPIETRATORE</u>	
Motori asincroni movimento piano inclinato	1,5 kW x 2 = 3 kW
<u>SISTEMA DI VAPORIZZAZIONE</u>	
Motori per movimentazione prodotto	2,5 kW x 4 = 10 kW
<u>LAMINATOIO</u>	
Motore movimento rulli	60 kW
<u>ESSICCATOIO</u>	
Ventilatori	5 kW x 2 = 10 kW
Motori movimento tappeto	3 kW x 2 = 6 kW
TOTALE	103,5 kW

Figura 102: Richieste elettriche dell'impianto di termofiocatura

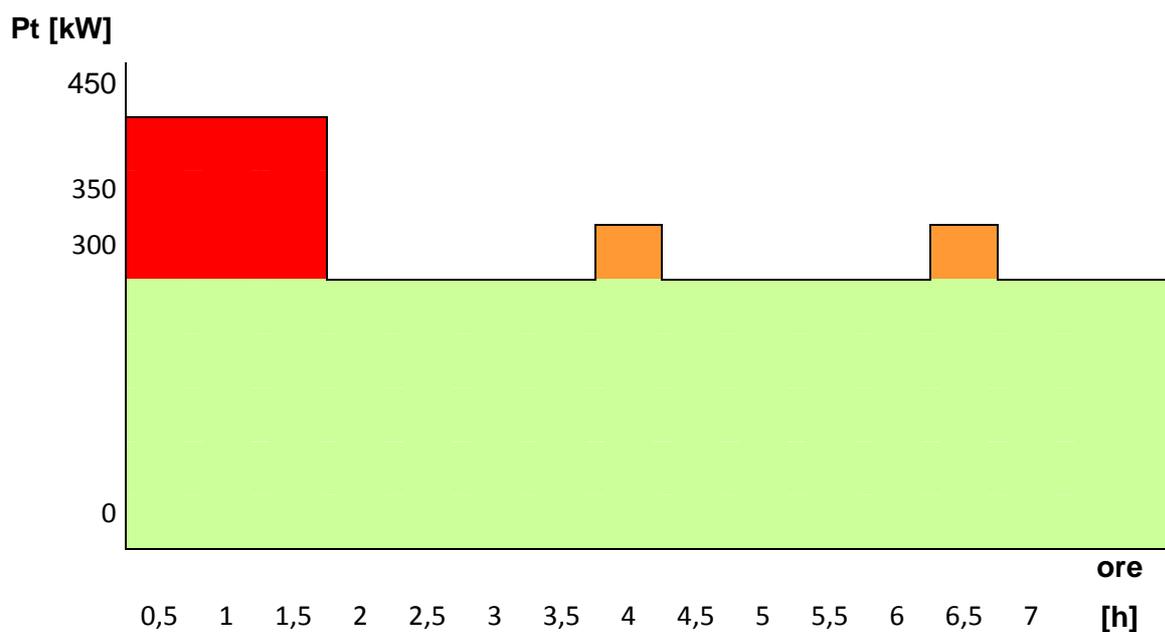
RICHIESTE TERMICHE	
Caldaia	300 kW termici medi

Figura 103: Richieste termiche dell'impianto di termofiocatura

Le tabelle di figura 102 e 103 permettono di avere una visione d'insieme delle utenze elettriche e termiche che fanno capo all'impianto di termofiocatura. Tali richieste hanno un corrispettivo in termini di consumo di combustibile usato, sia per la caldaia che per il generatore che si dovrebbe utilizzare, che equivale a sua volta ad una spesa economica. Per rispondere alle esigenze elettriche dei due impianti di processo dell'azienda, al tempo dell'installazione dell'impianto di termofiocatura si era acquistato un generatore di corrente da 300 kW da mettere in sostituzione a quello usato per l'impianto di essiccazione in quanto, come illustrato nel capitolo 9, non è sufficiente allacciarsi alla rete per soddisfare le esigenze aziendali.

Il funzionamento dell'impianto è continuo quindi si può assumere che le richieste elettriche medie siano pari a circa il 90 % di quelle massime riportate in tabella (sistemi di trasporto funzionamento non proprio continuo nel tempo), **95 kW**.

La curva di carico giornaliera della richiesta termica è osservabile nel grafico di figura 104:



LEGENDA:

- richiesta termica di 450 kW per primo avvio
- richiesta termica di 350 kW ogni due ore per 30 minuti
- richiesta termica di 300 kW costanti

Figura 104: Andamento della domanda termica della caldaia dell'impianto di termofiocatura

L'andamento illustrato in figura 104 si basa su due importanti ipotesi:

- 1) funzionamento continuo per circa 240 giorni nelle 24 ore (condizione ottimale per il funzionamento del cogeneratore) con chiusura nei mesi di Dicembre-Gennaio e Luglio-Agosto. Quindi il picco di potenza di 450 kW, picco relativo alla messa in moto della caldaia, lo si avrà solo due giorni all'anno ed esattamente il 1°Febbraio e il 1°Settembre;
- 2) andamento della richiesta termica nel tempo relativo alla granella di mais in quanto è diverso in funzione del prodotto trattato (principalmente in termini di tempo-potenza).

Sulla base di quanto emerso allo scopo di far operare il cogeneratore in modo il più costante possibile, si può ipotizzare la seguente taglia: 350 kW di potenza termica con funzionamento a pieno carico per tutte le ore utili.

Data la potenza termica e supponendo un rendimento termico di circa il 45 % ed elettrico di circa il 40 % (valori tipici per cogeneratori a motore di taglia media) si ottiene una potenza elettrica pari a circa 320 kW.

Per i picchi richiesti nelle due giornate di avvio dell'impianto si prevede l'utilizzo della caldaia esistente, una caldaia a miscela propano-butano che quindi fa riferimento al medesimo serbatoio del bruciatore dell'impianto di essiccazione.

Il consumo della caldaia per l'avvio è pari a:

$$\text{Consumo} = \Delta P / \text{PCI} \quad [\text{kg miscela/h}]$$

Dove:

ΔP = potenza richiesta alla caldaia in kcal/h (1 kW = 860 kcal/h);

PCI = potere calorifico inferiore del combustibile utilizzato (miscela propano-butano: PCI di circa 11.000 kcal/kg).

Quindi si ha:

$$\text{Consumo} = [(450 - 350) * 860] / 11.000 = 7,8 \text{ kg miscela/h}$$

Dato un costo della miscela pari a 0,7 €/kg si ottiene che nei mesi di Febbraio e Settembre è necessario considerare un costo aggiuntivo di avvio pari a :

$$\text{Costo avvio caldaia} = \text{Consumo} * \text{costo miscela} = 7,8 * 1,5 * 0,7 = \mathbf{8,2 \text{ €}}$$

Il secondo termine dell'operazione di moltiplicazione sta ad indicare il tempo in cui sono richiesti 450 kW ovvero 1,5 ore.

Quindi il costo che deve sostenere l'azienda per la **fornitura di miscela per il funzionamento della caldaia che affianca il cogeneratore** è pari a:

$$\text{Costo annuo} = 8,2 * 2 = \mathbf{16,4 \text{ €}}$$

Tale costo non viene preso in considerazione nell'analisi energetico-economica, al di là del valore pressochè irrilevante, per un motivo di struttura dello studio. L'analisi infatti considera tre possibili scenari accomunati dall'installazione di un cogeneratore delle caratteristiche elettriche e termiche sopra citate (320 kWe e 350 kWt) e realizza un confronto differenziale tra i flussi di cassa dei tre e l'alternativa 0 ovvero l'impianto tradizionale (generatore di corrente e caldaia). Essendo tale costo sostenuto in tutti e tre gli scenari, è irrilevante al fine del confronto. E' stato illustrato per avere una visione completa dello studio sostenuto.

10.3.5. Introduzione all'analisi

Riconosciuta la fattibilità tecnica dell'intervento di cogenerazione è necessario capire se la soluzione è economicamente sostenibile.

Si è deciso di studiare due possibili alternative di cogeneratore:

- a) cogeneratore a motore a gas naturale;
- b) cogeneratore a motore ad olio vegetale.

Per quanto concerne la seconda ipotesi, è necessario fare una breve digressione relativa alla produzione dell'olio vegetale utilizzato nel cogeneratore.

In merito alla questione l'azienda si trova davanti ad una scelta, può decidere di acquistare presso terzi l'olio vegetale oppure prevedere l'autoproduzione. In questo secondo caso l'azienda deve investire in un impianto di spremitura meccanica a freddo. E' fondamentale ricordare che, per ricevere i contributi previsti mediante i Certificati Verdi o la Tariffa onnicomprensiva, è necessario produrre olio vegetale mediante spremitura meccanica e non chimica.

Prima di affrontare l'analisi energetico-economica si analizzerà la questione della produzione dell'olio vegetale per comprendere quale soluzione è economicamente più vantaggiosa per il caso trattato.

10.3.6. La spremitura meccanica a freddo



La spremitura a freddo è uno dei metodi meccanici per l'estrazione di oli vegetali. Si esegue a freddo e non comprende alcun trattamento chimico. Gli oli vegetali, ricavati da semi oleosi, hanno diversi impieghi: l'alimentazione umana, l'uso come biocombustibili ed, in ambienti rurali del terzo mondo, anche per l'illuminazione, il riscaldamento ambientale e la cottura dei cibi.

Le fasi del processo sono le seguenti:

- misurazione delle impurità e del contenuto idrico del seme;
- processo di pulitura per ridurre le impurità sotto il livello minimo prestabilito;
- trasporto automatico fino al sistema di pressatura a freddo;
- spremitura a freddo mediante presse a vite continua;
- prima filtrazione più grossolana e seconda di sicurezza;
- immissione dell'olio nella cisterna di stoccaggio;
- raccolta e stoccaggio del pannello proteico.

Il pannello è il residuo solido con una certa quantità di olio ancora presente derivante dal processo. Viene raccolto per essere venduto come alimento zootecnico in quanto è un prodotto ricco di sostanze nutritive.

Gli output del processo sono quindi tre:

- olio vegetale;
- pannello;
- sfridi.

Il rendimento del processo come il mix di output in termini quantitativi dipendono dal seme di partenza.

In realtà a monte di tale processo ne è necessario un altro per portare il seme alle condizioni di umidità richieste ovvero circa il 7 % di umidità. Nel caso del seme di soia tale processo è necessario non solo per garantire tale condizione ma anche per avere una materia prima adatta al fine zootecnico. Infatti qualora la soia non venga portata a determinate temperature, presenta tra i suoi componenti l'acido ureico che rende il pannello inadatto all'alimentazione zootecnica. E' fondamentale trattare la soia per eliminare questo componente ed avere dei pannelli vendibili ai mangimifici.

Tale lavorazione può essere fatta per tostatura o per estrusione. Il costo riconducibile a queste possibilità è più o meno lo stesso, ciò che cambia è l'investimento nel macchinario e le richieste elettriche e termiche.

Nell'ipotesi di autoproduzione di olio di soia nel caso esaminato si ipotizza di installare a monte dell'impianto di spremitura meccanica un estrusore che, agendo in maniera meccanica sul prodotto, lo porta alla temperatura necessaria all'eliminazione dell'acido ureico senza apporto termico esterno. Tale impianto ha però una richiesta elettrica di circa 80 kW che dovranno essere presi in considerazione nell'analisi.

10.3.7. L'olio vegetale

Nel settore della produzione di energia elettrica trovano principalmente utilizzo tre oli vegetali: olio di girasole, olio di colza e olio di soia.

L'olio vegetale viene principalmente ottenuto tramite il processo di spremitura meccanica per una questione economica relativa ai contributi. Gli output principali del processo, ovvero olio e pannello, vengono venduti, il primo per la produzione di energia elettrica e/o termica mentre il pannello come alimento alternativo zootecnico a mangimifici o piccoli clienti con allevamenti.

Il combustibile migliore dal punto di vista del rendimento produttivo e della semplicità di utilizzo tra i tre oli citati è l'olio di colza, infatti:

- ha una maggiore fluidità;
- permane con un'elevata fluidità anche alle basse temperature (fino a -12°C), anche se è un vantaggio relativamente irrisorio in quanto i motori prevedono una zona di preriscaldamento del combustibile;
- la coltura di colza è una coltura povera, non è molto costosa, che si adatta anche a condizioni di terreno non ottimali, quindi può trovarsi anche in terreni marginali;

- la coltura è invernale, non soffre la siccità e quindi il raccolto è garantito; infatti la semina avviene in Settembre e la raccolta invece i primi giorni di Luglio dell'anno successivo;
- il rendimento della spremitura del seme di colza è elevato, si ottengono circa 30 kg di olio a partire da 100 kg di seme a differenza del seme di soia dove dalla medesima quantità di partenza si ottengono solamente 10 kg di olio.

Il seme di soia non ha le medesime caratteristiche vantaggiose di quello di colza ma trova utilizzo per due importanti motivi:

- 1) ampia diffusione della coltura di soia nel territorio della Pianura Padana;
- 2) elevato valore del sottoprodotto della spremitura ovvero del pannello di soia.

Nel caso dell'azienda Doni Silvano sono due le possibili alternative di scelta:

- 1) acquisto dell'olio di colza da terzi per il funzionamento di un cogeneratore a motore che risponda alle richieste elettriche dell'impianto di essiccazione e di quello di termofioccatura e alla richiesta termica del secondo impianto di processo;
- 2) autoproduzione dell'olio di soia per il funzionamento di un cogeneratore a motore che risponda alle medesime esigenze illustrate al punto 1.

Nel caso della fornitura presso terzi è più conveniente l'olio di colza per la facilità di fornitura e per il prezzo minore di acquisto. Mentre nel caso di autoproduzione e quindi installazione di un impianto di spremitura meccanica, si considera l'olio di soia in quanto permette di avere un importante introito a partire dalla vendita del pannello ed essendo l'azienda un centro di raccolta di soia, si avrebbe la materia prima già in sede. Un altro aspetto rilevante nella concessione dei contributi come precedentemente accennato è la tracciabilità relativa al prodotto utilizzato come materia prima negli impianti di cogenerazione con fonte rinnovabile. E' necessario acquistare il seme o l'olio da filiera Europea. In entrambe le scelte su cui l'azienda Doni Silvano deve porre la sua decisione questa caratteristica è garantita.

10.3.7.1. Prima alternativa: acquisto dell'olio di colza

Per stimare il prezzo di acquisto del combustibile del cogeneratore da installare in azienda si è contattato un grande centro di produzione di olio vegetale di Rovigo. Tale centro lavora 50 q/h di seme ovvero 1200 q/gg di seme di diverso tipo, principalmente seme di colza. Quest'azienda svolge due attività:

- spremitura meccanica del seme dopo acquisto della materia prima e successiva vendita di olio e pannello;

- spremitura meccanica del seme di proprietà di terzi e successiva consegna di olio e pannello, solo attività di servizio (costo servizio = 7 €/q di seme da trattare).

Oggi il mercato dell'olio vegetale ha un andamento positivo, la domanda è in crescita, ragion per cui i prezzi relativi sia all'olio che al pannello sono in aumento.

Il titolare dell'azienda ha fornito i seguenti valori di riferimento relativi al seme di colza:

- olio: circa 1000 €/t;
- pannello: circa 250 €/t.

Inoltre ha fornito il consumo specifico di olio per il funzionamento di un cogeneratore, pari a: **240 g olio/kWhe**.

Quindi, nel caso dell'azienda studiata, per il funzionamento di un cogeneratore da 320 kW_e e 350 kW_t si ha un consumo di olio di colza pari a :

$$\begin{aligned} \text{Consumo orario olio} &= \text{consumo specifico} * P_e = \\ &= 240 \text{ g olio/kWhe} * 320 \text{ kW} = 76.800 \text{ g olio/h} = \mathbf{76,8 \text{ kg olio/h}} \end{aligned}$$

La quantità di olio necessaria annualmente al cogeneratore è pari a:

$$\begin{aligned} \text{Consumo annuale olio} &= \text{consumo orario} * \text{ore/anno} = \\ &= 76,8 \text{ kg olio/h} * 24 \text{ h} * 241 \text{ gg/anno} = \mathbf{444.212 \text{ kg/anno} = 444,21 \text{ t/anno}} \end{aligned}$$

Infatti si prevede l'utilizzo del cogeneratore nel periodo di utilizzo dell'impianto di termofiocatura ovvero 241 giorni all'anno.

Costo acquisto olio di colza

La spesa da sostenere per l'acquisto del combustibile per il funzionamento del cogeneratore è pari a:

$$\begin{aligned} \text{Costo acquisto olio} &= \text{consumo annuale} * \text{costo olio} = \\ &= 444,21 \text{ t/anno} * 1000 \text{ €/t} = \mathbf{444.212 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Costo per il trasporto

Si deve poi considerare il costo relativo al trasporto dell'olio dalla sede produttiva, per esempio l'azienda di Rovigo, e l'azienda Doni Silvano. Se si esternalizza il trasporto si ha un costo pari ad 1 €/q trasportato. Il valore è quello ad oggi richiesto all'azienda studiata da parte dei vettori.

Quindi il costo annuale per il trasporto è pari a :

$$\begin{aligned}\text{Costo trasporto} &= \text{costo specifico} * \text{olio acquistato} = \\ &= 10 \text{ €/t} * 444,21 \text{ t/anno} = \mathbf{4.442 \text{ €/anno}}\end{aligned}$$

Verrà realizzato uno studio economico di durata pari a 15 anni (vita utile del cogeneratore) per fare il confronto tra le due alternative di scelta relative all'olio vegetale.

A copertura del rischio di variabilità dei prezzi si prevede un tasso annuo di crescita sia del prezzo dell'olio che del costo del trasporto pari al 5 %.

10.3.7.2. Seconda alternativa: produzione dell'olio di soia

Per produrre olio di soia, come è stato descritto nel paragrafo “La spremitura meccanica”, sono necessari due macchinari posti in serie, un estrusore e una pressa meccanica con tutte le loro apparecchiature complementari.

Per valutare i costi generati dall'impianto così costituito si è fatto riferimento ai dati raccolti dall'intervista al titolare dell'azienda di Rovigo che realizza la spremitura meccanica a freddo di diversi semi vegetali.

Prima di tutto si deve scegliere l'impianto di spremitura adatto alle esigenze dell'azienda ovvero al cogeneratore ad olio che deve alimentare. Sapendo che il consumo orario del cogeneratore ad olio di soia delle caratteristiche desiderate (320 kW_e e 350 kW_t) è sostanzialmente il medesimo di quello ad olio di colza quindi pari a 76,8 kg olio/h, l'impianto di spremitura deve avere questa cadenza produttiva. Sapendo inoltre che il rendimento della spremitura nel caso della soia è pari al 10 % (da 100 kg di seme si ottengono: 10 kg di olio, 80 kg di pannello e 10 kg di sfridi) è necessario un impianto che tratti 0,77 t/h di seme. L'impianto che più si avvicina a questa cadenza è un impianto da 1 t/h.

Il surplus di olio ottenuto da spremitura e non utilizzato per il cogeneratore, pari al 23 %, si ipotizza di venderlo. Essendo una quantità pressochè contenuta rispetto ai quantitativi di chi opera nel settore della fornitura di olio, si suppone di instaurare un rapporto di collaborazione con un fornitore il quale ha già il suo mercato di riferimento. Quindi per calcolare l'ingresso di denaro generato dalla vendita dell'olio non utilizzato per la cogenerazione si possono utilizzare i prezzi proposti dall'azienda di Rovigo decurtati di un 10 % in quanto si andrebbe a vendere al fornitore e non direttamente al cliente finale. Il prezzo per la clientela è di 1230 €/t di olio di soia, togliendo il 10 % si ottiene **1107 €/t**

Un impianto di questo tipo richiede un investimento di circa **560.000 €** 160.000 € relativi all'acquisto del macchinario per la spremitura meccanica, 200.000 € per l'acquisto dell'impianto di estrusione e 200.000 € per la messa in moto del tutto, ovvero per la realizzazione della struttura che lo deve contenere e l'acquisto e l'avvio delle apparecchiature complementari necessarie (impianto elettrico, elevatori,...).

Entrambi i macchinari che compongono l'impianto hanno una certa richiesta elettrica e dei costi di funzionamento. Da quanto riferito dal titolare dell'azienda di Rovigo che possiede cinque di questi impianti da 1 t/h di seme trattato, i costi vivi (costi energetici e manodopera) relativi all'impianto di spremitura meccanica si possono assumere intorno ai **15 €/t** di seme trattato. La manodopera è necessaria per la gestione dell'impianto e lo stoccaggio dei prodotti ottenuti dal processo ovvero olio e pannello. Per quanto riguarda invece l'impianto di estrusione la spesa per il funzionamento è pari a circa **10 €/t** di materia prima processata.

Le richieste elettriche invece per impianti di queste dimensioni sono di circa 50 kWe per l'impianto di spremitura meccanica e 80 kWe per l'impianto di estrusione.

La figura 105 riassume quanto affermato finora:

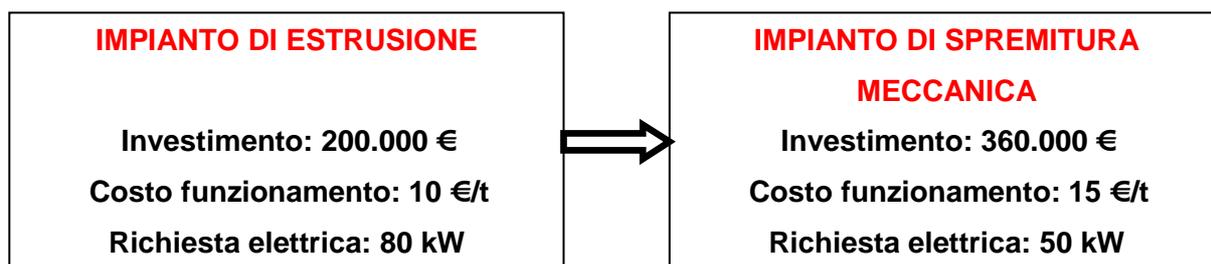


Figura 105: Dati relativi all'impianto per la produzione di olio soia da 1 t/h di seme trattato

L'impianto di spremitura meccanica può funzionare per un numero maggiore di giorni rispetto ai 241 in cui è in funzione l'impianto di termofiocatura e quindi il cogeneratore. Per avere però un confronto corretto tra le due alternative per il calcolo delle uscite e degli ingressi di denaro si utilizza come base temporale i 241 giorni di funzionamento del cogeneratore.

Le uscite di denaro che l'azienda deve prevedere sono:

- costo materia prima (soia);
- costo di funzionamento dell'impianto di estrusione;
- costo di funzionamento dell'impianto di spremitura meccanica;
- manutenzione dell'intero impianto;
- assicurazione dell'intero impianto;
- costo trasporto olio prodotto in eccedenza presso fornitore.

Dopo di che si dovrà considerare la rata per il finanziamento che sarà richiesto per l'investimento se non lo si copre con fondi propri.

Costo materia prima

Il prezzo della soia varia secondo il mercato cerealicolo ma negli ultimi anni ha un prezzo medio di circa 40 €/q.

Quindi prevedendo di installare un impianto di spremitura da 1 t/h di seme da trattare, il costo per la materia prima su base annuale (241 giorni) e costante nei 15 anni, è di:

$$\text{Costo materia prima} = 10 \text{ q/h} * 24 \text{ h/gg} * 241 \text{ gg/anno} * 40 \text{ €/q} = \mathbf{2.313.600 \text{ €/anno}}$$

Costo di funzionamento dell'impianto di estrusione

La quantità di materia prima da trattare è pari a 5.784 t/anno (1 t * 24 h/gg * 241 gg/anno). Dato un costo specifico di funzionamento di 10 €/t di seme da trattare si ottiene un costo annuale di funzionamento di:

$$\begin{aligned} \text{Costo estrusione} &= \text{costo specifico} * \text{produttività} = \\ &= 10 \text{ €/t} * 5.784 \text{ t/anno} = \mathbf{57.840 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Si suppone che tale costo sia costante nell'arco del periodo di studio.

Costo di funzionamento dell'impianto di spremitura

La cadenza produttiva è la medesima di quella dell'impianto di estrusione in quanto i due macchinari funzionano in serie. Dato un costo specifico di funzionamento di 15 €/t di seme da trattare si ottiene un costo annuale di funzionamento di:

$$\begin{aligned} \text{Costo spremitura} &= \text{costo specifico} * \text{produttività} = \\ &= 15 \text{ €/t} * 5.784 \text{ t/anno} = \mathbf{86.760 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Si suppone anche in questo caso la non variabilità nei 15 anni di analisi.

Manutenzione dell'impianto

Si ipotizza che il costo per la manutenzione ordinaria dell'impianto di spremitura meccanica a freddo sia pari al 0,5% del valore d'acquisto dell'impianto e costante nel periodo di studio.

$$\text{Costo manutenzione} = 0,5 \% * \text{valore d'acquisto} = 0,5 \% * 560.000 \text{ €} = \mathbf{2.800 \text{ €/anno}}$$

Assicurazione dell'impianto di spremitura

Si ipotizza anche in questo caso che l'uscita di denaro relativa all'assicurazione sia pari allo 0,5 % del valore d'acquisto dell'impianto e costante nei 15 anni di analisi.

$$\text{Uscita assicurazione} = 0,5 \% * \text{valore d'acquisto} = 0,5 \% * 560.000 \text{ €} = \mathbf{2.800 \text{ €/anno}}$$

Costo trasporto olio

Si suppone che il prezzo di 1107 €/t per l'olio da parte del fornitore sia franco arrivo, ovvero si deve decurtare da esso la quota relativa al trasporto.

Si deve innanzitutto calcolare la quantità di olio in eccedenza.

La produzione di olio nei 241 giorni di analisi è pari a 5.784 q (1 q/h * 24 h/gg * 241 gg/anno).

Quindi la quantità di olio non utilizzata per la cogenerazione e quindi vendibile è pari a:

$$\text{Quantità vendibile olio} = 23\% * (1 * 24 * 241) = \mathbf{1.330 \text{ q/anno}}$$

Supponendo come per l'alternativa 1 un costo del trasporto pari a 1 €/q si ha un costo annuale di trasporto di:

$$\begin{aligned} \text{Costo trasporto} &= \text{costo specifico} * \text{quantità trasportata} = \\ &= 1 \text{ €/q} * 1.330 \text{ q/anno} = \mathbf{1.330 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Si suppone un incremento del costo del trasporto pari al 5 % annuo come nell'alternativa 1.

Rata per il finanziamento richiesto

Si suppone che l'azienda richieda un mutuo per realizzare l'impianto di spremitura meccanica. La rata è formata quota parte dal valore degli interessi e quota parte dal valore relativo al recupero del capitale anticipato. Le due parti variano anno dopo anno relativamente tra loro ma la rata rimane costante. La rata molto spesso è mensile o semestrale. In questo caso per agevolare il calcolo relativo agli oneri finanziari si riporta la rata su base annuale. Dato l'investimento di 560.000 €, ipotizzato un tasso di interesse del 3,5 % e una durata del mutuo di 15 anni, si ottiene una rata annuale pari a **48.330 €**

In questo caso però ci sono anche degli ingressi derivanti dalla vendita sia dell'olio prodotto e non utilizzato, come sopra illustrato, che del pannello di soia.

Ricavo vendita olio di soia in eccedenza

La produzione di olio dell'impianto di spremitura che si prevede di installare nei 241 giorni è pari a 5.784 q mentre la quota vendibile è di 1.330 q/anno come calcolato in precedenza.

Quindi i ricavi derivanti dalla vendita dell'olio di soia sono pari a:

$$\begin{aligned}\text{Vendita olio} &= \text{quantità olio vendibile} * \text{prezzo olio} = 133 \text{ t/anno} * 1.107 \text{ €/t} = \\ &= \mathbf{147.231 \text{ €/anno}}\end{aligned}$$

Si ipotizza un incremento del prezzo di vendita del 5 % annuo come per l'olio di colza.

Ricavo vendita pannello di soia

Altro ingresso di denaro lo si ha dalla vendita del pannello. Il titolare dell'azienda di Rovigo ha fornito come dato di riferimento un prezzo di vendita del sottoprodotto pari a **480 €/t**. Nel caso della soia, a differenza degli altri vegetali, si ha che il sottoprodotto del processo vale di più della materia prima di partenza (400 €/t) in quanto tale residuo della spremitura è un concentrato di sostanze nutritive che lo rende un alimento di prestigio. Data la produttività dell'impianto di spremitura previsto nel caso studio (ogni 100 kg di output produttivo, 80 kg di pannello) si avrà:

$$\begin{aligned}\text{Vendita pannello} &= \text{quantità pannello} * \text{prezzo pannello} = \\ &= 0,8 \text{ t/h} * 24 \text{ h/gg} * 241 \text{ gg/anno} * 480 \text{ €/t} = \mathbf{2.221.056 \text{ €/anno}}\end{aligned}$$

Si ipotizza un incremento del prezzo di vendita del 5 % annuo come per l'olio.

Quota di ammortamento

A differenza della prima alternativa, in questo caso acquistando un impianto si deve tenere in considerazione anche l'ammortamento di tale apparecchiatura.

Per semplicità si suppone un ammortamento lineare, a quote costanti e pari a:

$$Q \text{ amm} = (I_0 - V_r) / N$$

Q amm = quota costante annuale di ammortamento;

I₀ = investimento iniziale per l'impianto;

V_r = valore residuo dell'impianto al termine del periodo di studio;

N = numero anni di studio.

Per semplificare il calcolo si suppone che l'impianto abbia una vita utile pari a 15 anni che viene presa come periodo di studio e che alla fine di tale periodo l'impianto non abbia alcun valore (ipotesi forzata ma utile al fine dell'analisi).

Quindi si ha:

$$Q_{amm} = (560.000 - 0) / 15 = 37.334 \text{ €}$$

10.3.7.3. Confronto tra le due alternative

La prima alternativa, ovvero la fornitura presso terzi di olio vegetale per il cogeneratore, prevede due uscite di denaro e nessun ingresso su base annuale:

- 444.212 € per la fornitura dell'olio di colza;
- 4.442 € per il trasporto dall'azienda produttrice all'azienda presa in esame.

Dato uno studio svolto su 15 anni tali quote devono tenere conto della variabilità dei prezzi che può esserci di anno in anno (per esempio un 5 % dei costi annuali di acquisto). L'aumento continuo di prezzo per l'acquisto dell'olio vegetale è molto probabile, è confermato dall'andamento positivo della domanda di questo tipo di combustibile oltre che dalla sempre maggiore rilevanza data alla produzione di energia elettrica e termica a partire da fonti rinnovabili.

La seconda alternativa ovvero l'autoproduzione di olio di soia mediante spremitura meccanica a freddo prevede sia uscite di cassa che ingressi.

In questo caso si è previsto un mutuo e si deve considerare l'ammortamento.

Quindi i rispettivi andamenti dei flussi di cassa sono osservabili nelle tabelle di figura 106 e 107, le quali prevedono:

1^A colonna: periodo di studio;

2^A colonna: flusso di cassa pre-imposte;

3^A colonna: valore della quota di ammortamento (prima alternativa: $Q_{amm} = 0$ in quanto non si hanno macchinari di alcun genere; seconda alternativa: Q_{amm} calcolato);

4^A colonna: imponibile ovvero flusso di cassa meno la quota di ammortamento;

5^A colonna: valore delle imposte ovvero il 40 % dell'imponibile;

6^A colonna: flusso di cassa post-imposte.

Nel periodo 0 viene messo l'eventuale investimento che viene compiuto dall'azienda, nel caso della prima alternativa non c'è, in quanto non si investe né in impianti né in altre apparecchiature, mentre nella seconda l'investimento è nullo in quanto tutto quello che viene fornito dalla banca viene speso per acquistare i macchinari, le apparecchiature e per l'installazione.

PRIMA ALTERNATIVA: FORNITURA DI OLIO DI COLZA					
t	BTCF	Qamm	Imponibile	Imposte	ATCF
0	0				
1	- 466.423 €	0	- 466.423 €	186.569 €	- 652.992 €
2	- 489.744 €	0	- 489.744 €	195.897 €	- 685.641 €
3	- 514.231 €	0	- 514.231 €	205.692 €	- 719.923 €
4	- 539.942 €	0	- 539.942 €	215.977 €	- 755.919 €
5	- 566.940 €	0	- 566.940 €	226.776 €	- 793.715 €
6	- 595.287 €	0	- 595.287 €	238.115 €	- 833.401 €
7	- 625.051 €	0	- 625.051 €	250.020 €	- 875.071 €
8	- 656.303 €	0	- 656.303 €	262.521 €	- 918.825 €
9	- 689.119 €	0	- 689.119 €	275.647 €	- 964.766 €
10	- 723.575 €	0	- 723.575 €	289.430 €	- 1.013.004 €
11	- 759.753 €	0	- 759.753 €	303.901 €	- 1.063.655 €
12	- 797.741 €	0	- 797.741 €	319.096 €	- 1.116.837 €
13	- 837.628 €	0	- 837.628 €	335.051 €	- 1.172.679 €
14	- 879.509 €	0	- 879.509 €	351.804 €	- 1.231.313 €
15	- 923.485 €	0	- 923.485 €	369.394 €	- 1.292.879 €

Figura 106: Tabella con flusso netto di cassa dell'alternativa 1

SECONDA ALTERNATIVA: AUTOPRODUZIONE DI OLIO DI SOIA					
t	BTCF	Qamm	Imponibile	Imposte	ATCF
0	0				
1	- 26.825 €	37.334 €	- 64.159 €	25.664 €	- 52.489 €
2	+ 97.440 €	37.334 €	+ 60.106 €	24.042 €	+ 73.398 €
3	+ 227.919 €	37.334 €	+ 190.585 €	76.234 €	+ 151.685 €
4	+ 364.921 €	37.334 €	+ 327.587 €	131.035 €	+ 233.886 €
5	+ 508.774 €	37.334 €	+ 471.440 €	188.576 €	+ 320.198 €
6	+ 659.819 €	37.334 €	+ 622.485 €	248.994 €	+ 410.825 €
7	+ 818.416 €	37.334 €	+ 781.082 €	312.433 €	+ 505.983 €
8	+ 984.944 €	37.334 €	+ 947.610 €	379.044 €	+ 605.900 €
9	+ 1.159.797 €	37.334 €	+ 1.122.463 €	448.985 €	+ 710.812 €
10	+ 1.343.394 €	37.334 €	+ 1.306.060 €	522.424 €	+ 820.970 €
11	+ 1.536.170 €	37.334 €	+ 1.498.836 €	599.534 €	+ 936.635 €
12	+ 1.738.585 €	37.334 €	+ 1.701.251 €	680.500 €	+ 1.058.084 €
13	+ 1.951.120 €	37.334 €	+ 1.913.786 €	765.515 €	+ 1.185.606 €
14	+ 2.174.283 €	37.334 €	+ 2.136.949 €	854.780 €	+ 1.319.503 €
15	+ 2.408.604 €	37.334 €	+ 2.371.270 €	948.508 €	+ 1.460.096 €

Figura 107: Tabella con flusso netto di cassa dell'alternativa 2

A questo punto si dovrebbe procedere con il calcolo del VAN attualizzando i valori dei flussi di cassa ed infine fare il confronto.

Appare però evidente che la seconda alternativa è più conveniente in quanto a parte il primo anno dove il flusso di cassa è negativo ma comunque dieci volte più piccolo di quello dell'alternativa 1, negli altri anni il flusso è positivo e via via crescente.

L'elevato introito generato dalla vendita del pannello di soia ripaga le spese.

In conclusione si può affermare che l'azienda Doni Silvano nel caso di installazione di un cogeneratore ad olio vegetale produrrà l'olio di soia per il suo funzionamento a partire da un impianto di spremitura meccanica a freddo realizzato in azienda.

10.3.8. I tre scenari

Chiarita la questione inerente all'olio vegetale si può affrontare l'analisi energetico-economica relativa all'installazione di un cogeneratore in azienda.

Saranno presi in esame tre possibili scenari che verranno confrontati con lo scenario 0, la situazione tradizionale ovvero un generatore di corrente per la produzione di energia elettrica e una caldaia per la produzione dell'energia termica per rispondere alle esigenze dell'impianto di essiccazione e di quello di termofioccatura.

I tre scenari sono i seguenti:

1.Cogeneratore a motore a gas naturale in autoconsumo: l'energia termica viene utilizzata per l'impianto di termofioccatura, l'energia elettrica invece per le utenze elettriche dell'impianto di essiccazione e di quello di termofioccatura e l'eventuale eccedenza venduta sul mercato elettrico.

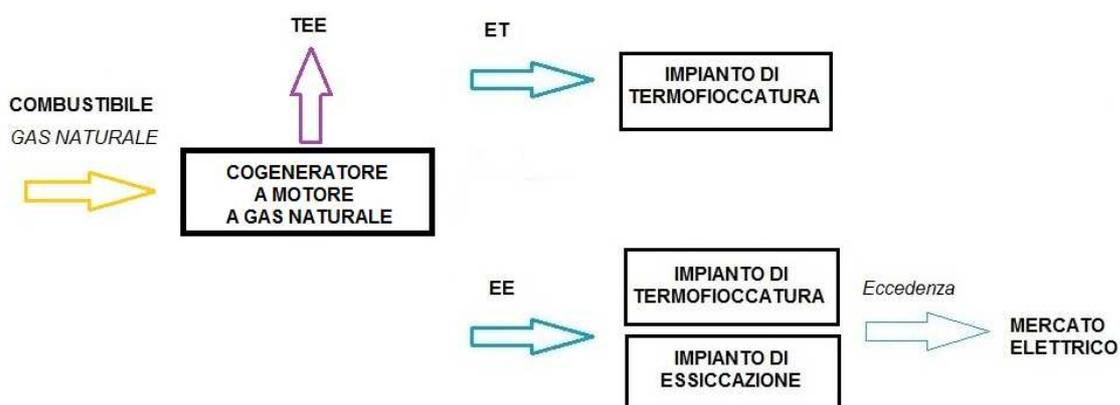


Figura 108: Flussi di materiale, energetici ed economici relativi allo scenario 1
(flussi di materiale in giallo, flussi energetici in azzurro e flussi economici in viola)

2.Cogeneratore a motore ad olio di soia in autoconsumo e vendita di certificati verdi: l'energia termica viene utilizzata per l'impianto di termofiocatura, l'energia elettrica invece per le utenze elettriche dell'impianto di essiccazione e di quello di termofiocatura e l'eventuale eccedenza venduta sul mercato elettrico; inoltre c'è un incentivo riconosciuto per la produzione di energia elettrica a partire da fonti rinnovabili con il rilascio dei certificati verdi.

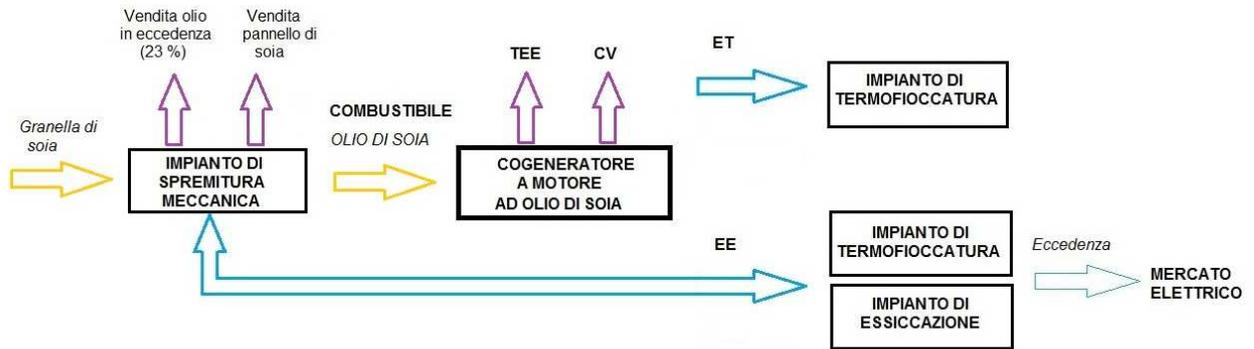


Figura 109: Flussi di materiale, energetici ed economici relativi allo scenario 2
(flussi di materiale in giallo, flussi energetici in azzurro e flussi economici in viola)

3.Cogeneratore a motore ad olio di soia in Tariffa onnicomprensiva: l'energia termica viene utilizzata per l'impianto di termofiocatura mentre l'energia elettrica viene venduta per intero secondo Tariffa onnicomprensiva (valida per impianti con potenza elettrica inferiore al megawatt) e si produce l'energia elettrica necessaria alle utenze con il generatore di corrente a gasolio presente in azienda in quanto vendere secondo tariffa onnicomprensiva solo l'energia eccedente non conviene, si perde il vantaggio derivato da questa agevolazione.

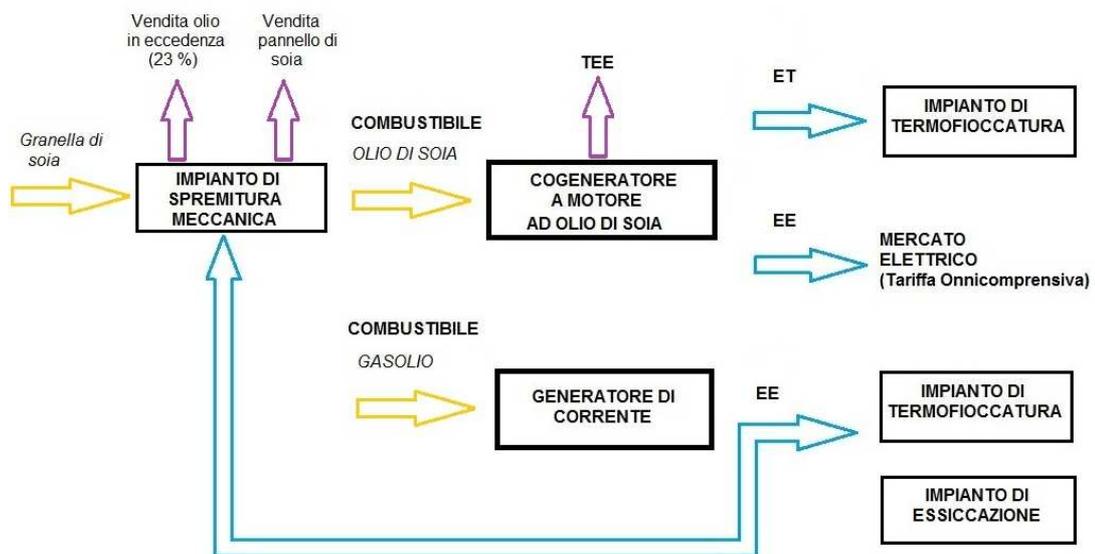


Figura 110: Flussi di materiale, energetici ed economici relativi allo scenario 3
(flussi di materiale in giallo, flussi energetici in azzurro e flussi economici in viola)

10.3.9. La valutazione tecnico-economica

La valutazione economica sarà effettuata con il metodo del Valore Attuale Netto (VAN) e del Payback (semplice e scontato).

Il metodo del VAN consiste nell'attualizzare i flussi di cassa generati da ricavi e risparmi al netto dei costi imputabili al sistema durante il periodo di vita dell'impianto, con un tasso d'interesse determinato (si assume in questo caso un tasso pari al 5 %).

Il periodo di studio è pari a 15 anni, vita utile dell'impianto di cogenerazione.

L'analisi è di tipo differenziale ovvero ogni scenario viene confrontato con lo scenario 0 ovvero con la soluzione tradizionale così facendo si determina se è conveniente per l'azienda installare un cogeneratore e, nel caso di risposta affermativa, quale tra le tre alternative è la più vantaggiosa dal punto di vista economico.

Nell'analisi si è tenuto conto dell'effetto dell'inflazione:

- inflazione media del 2 % annua su manutenzione del cogeneratore;
- tasso crescita costo miscela propano-butano pari al 5 % annuo;
- tasso crescita costo gasolio pari al 5 % annuo;
- tasso crescita costo gas naturale pari al 5 % annuo;
- tasso crescita prezzo di vendita olio di soia pari al 5 % annuo;
- tasso crescita prezzo di vendita pannello di soia pari al 5 % annuo;
- tasso crescita costo trasporto pari al 5 % annuo.

Per quanto riguarda la materia prima processata dall'impianto di spremitura meccanica, ovvero la soia, si ipotizza, visto l'andamento legato al mercato cerealicolo ma comunque abbastanza invariato negli ultimi anni, un prezzo costante pari a 40 €/q. Si è poi deciso, per agevolare l'analisi, di tralasciare la manutenzione straordinaria, prevista dopo 10 anni di utilizzo, sia dell'impianto di cogenerazione che di quello di spremitura meccanica.

Gli altri elementi considerati nella valutazione, come pure le ipotesi sostenute, verranno illustrati durante la presentazione dell'analisi realizzata.

Per ogni scenario si elencheranno le voci di risparmio e di costo aggiuntivo rispetto allo scenario 0 e ulteriori ricavi con le ipotesi attuate, si calcolerà il flusso di cassa, il VAN e il Payback.

10.3.9.1. Scenario 1: Cogeneratore a motore a gas naturale in autoconsumo

Voci di risparmio/ricavo:

1. Risparmio costo miscela per funzionamento dell'impianto di termofioccatatura;
2. Risparmio costo gasolio per funzionamento dell'impianto di essiccazione e di termofioccatatura;
3. Ricavo vendita energia elettrica in eccedenza;
4. Valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE).

1. Risparmio costo miscela per funzionamento dell'impianto di termofioccatatura

La quota di energia termica pari a 350 kW viene fornita dal cogeneratore e non più dalla caldaia a miscela quindi, scegliendo lo scenario 1, si risparmia il costo di fornitura della miscela propano-butano per la caldaia.

Il risparmio è pari a:

$$R = [Et / (PCI * \eta)] * p * (1 + r)^N$$

Dove:

Et = energia termica prodotta [kWh] =

Pt * h/anno = 350kWt * 24h/gg * 241
gg/anno = 2.024.400 kWh;

PCI = potere calorifico inferiore della miscela
propano-butano = 11.000 kcal/kg = 13,2
kWh/kg;

η = rendimento attuale della caldaia = 0,9;

p = prezzo della miscela = 0,7 €/kg (prezzo
attuale sostenuto dall'azienda);

r = tasso d'inflazione = 5 % (per ipotesi);

N = anno di analisi.

RISPARMIO COSTO MISCELA CALDAIA TERMOFIOCCATORE	
Anno 1	125.247 €
Anno 2	131.510 €
Anno 3	138.085 €
Anno 4	144.989 €
Anno 5	152.239 €
Anno 6	159.851 €
Anno 7	167.843 €
Anno 8	176.253 €
Anno 9	185.047 €
Anno 10	194.299 €
Anno 11	204.014 €
Anno 12	214.215 €
Anno 13	224.926 €
Anno 14	236.172 €
Anno 15	247.981 €

Figura 111: Tabella risparmio costo miscela

2. Risparmio costo gasolio per funzionamento dell'impianto di essiccazione e dell'impianto di termofioccatatura

La potenza fornita dalla rete non è sufficiente a soddisfare le esigenze dei due impianti di processo dell'azienda Doni Silvano quindi nello scenario 0 si userebbe un generatore di corrente da 300 kW di potenza nominale. Oggi invece è presente un modello da 150 kW in quanto l'impianto di termofioccatatura non è in funzione.

Con l'introduzione del cogeneratore la quota elettrica richiesta dai due impianti è fornita da questo apparecchio e non più dal generatore quindi si risparmia il costo di fornitura del gasolio.

Il risparmio è pari a:

$$R = [E_e / (PCI * \eta)] * p * (1 + r)^N$$

Dove:

E_e = energia elettrica prodotta [kWh] =
 $P_e * h/anno = (190 \text{ kWe} * 24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno}) + (95 \text{ kWe} * 24 \text{ h/gg} * 201 \text{ gg/anno})$
 = 640.680 kWh;

due richieste elettriche diverse in quanto per 40 giorni sono in funzione entrambi gli impianti di processo (ipotizzato il funzionamento al carico massimo) mentre per gli altri 201 solo l'impianto di termofiocatura;

PCI = potere calorifico inferiore del gasolio = 9.799 kcal/kg = 11.76 kWh/kg;

η = rendimento attuale del generatore di corrente = 0,4;

p = prezzo del gasolio = 1 €/kg (prezzo attuale sostenuto dall'azienda);

r = tasso d'inflazione = 5 % (per ipotesi);

N = anno di analisi.

RISPARMIO COSTO GASOLIO GENERATORE DI CORRENTE	
Anno 1	143.001 €
Anno 2	150.159 €
Anno 3	157.667 €
Anno 4	165.551 €
Anno 5	173.828 €
Anno 6	182.520 €
Anno 7	191.646 €
Anno 8	201.228 €
Anno 9	211.289 €
Anno 10	221.854 €
Anno 11	232.946 €
Anno 12	244.594 €
Anno 13	256.824 €
Anno 14	269.665 €
Anno 15	283.148 €

Figura 112: Risparmio costo gasolio

3. Ricavo vendita energia elettrica in eccedenza

La quota eccedente di energia elettrica prodotta dal cogeneratore viene ritirata da parte del GSE (Gestore dei Servizi Elettrici) seguendo le operazioni previste dal ritiro dedicato con prezzi medi di mercato. Sono state utilizzate le schede di riferimento che si trovano nel sito del GSE riferite ai mesi del 2010.

Per il nord Italia i prezzi medi per fascia oraria dei mesi di utilizzo del cogeneratore sono quelli riportati in figura 113:

NORD ITALIA, ANNO 2010			
MESE	F1	F2	F3
FEBBRAIO	69,16	63,49	48,61
MARZO	72,90	68,67	52,07
APRILE	65,30	67,80	49,42
MAGGIO	66,18	59,83	45,66
GIUGNO	70,74	62,84	44,12
SETTEMBRE	75,90	70,24	54,53
OTTOBRE	74,78	71,43	52,29
NOVEMBRE	72,83	68,12	49,85

Figura 113: Tabella prezzi medi di mercato del ritiro dedicato dell'anno 2010 (valori in €/MWh)

Le fasce orarie coprono i seguenti archi temporali:

F1: 8.00 – 19.00 da Lunedì a Venerdì;

F2: 7.00 - 8.00 e 19.00 - 23.00 da Lunedì a Venerdì, 7.00 - 23.00 di Sabato;

F3: 23.00 – 7.00 da Lunedì a Sabato, Domenica e Festivi.

Per ogni mese si sono calcolate le ore per ogni fascia e poi sommate per trovare le ore totali annuali per fascia. Ovviamente i calcoli sono semplificati rispetto alla realtà dei fatti.

Si riporta a titolo d'esempio il mese di Febbraio:

F1: (20 giorni * 11 h/gg);

F2: (4 sabati * 16 h/gg) + (20 giorni * 5 h/gg);

F3: (4 domeniche * 24 h/gg) + (20 giorni * 8 h/gg).

Complessivamente le ore per i diversi mesi delle diverse fasce orarie sono:

$$\begin{aligned} \text{F1: } 1 \text{ mese} * (20*11) + 4 \text{ mesi} * (22*11) + 3 \text{ mesi} * (23*11) = \\ = 1.947 \text{ h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{F2: } 1 \text{ mese} * [(4*16)+(20*5)] + 4 \text{ mesi} * [(4*16) + (22*5)] + 3 \text{ mesi} * [(4*16) + (23*5)] = \\ = 1.397 \text{ h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{F3: } 1 \text{ mese} * [(4*24)+(20*8)] + 4 \text{ mesi} * [(4*24) + (22*8)] + 3 \text{ mesi} * [(4*24) + (23*8)] = \\ = 2.184 \text{ h} \end{aligned}$$

Considerando il valore delle fasce nei diversi mesi si ha che:

$$\begin{aligned} \text{F1: } [69,16*(20*11)] + [(65,30+70,74+75,90+72,83)*(22*11)] + [(72,90+66,18+74,78) * \\ (23*11)] = 15.215,2 + 68.914,34 + 54.106,58 = 138.236,12 \text{ €/MW} \end{aligned}$$

$$F2: [63,49 * [(4 * 16) + (20 * 5)] + [(67,80 + 62,84 + 70,24 + 68,12) * [(4 * 16) + (22 * 5)] + [(68,67 + 59,83 + 71,43) * [(4 * 16) + (23 * 5)]] = 10.412,36 + 46.806 + 35.787,47 = 93.005,83 \text{ €/MW}$$

$$F3: [48,61 * [(4 * 24) + (20 * 8)] + [(49,42 + 44,12 + 54,53 + 49,85) * [(4 * 24) + (22 * 8)] + [(52,07 + 45,66 + 52,29) * [(4 * 24) + (23 * 8)]] = 12.444,16 + 53.834,24 + 42.005,6 = 108.284 \text{ €/MW}$$

Altra questione da considerare è il fatto che la richiesta di energia elettrica è diversa nei 241 giorni di funzionamento del cogeneratore. Infatti nel mese di Settembre e metà di Ottobre la richiesta è pari a 190 kWe mentre nel resto dei mesi è di 95 kWe in quanto nei mesi di Settembre ed Ottobre è in funzione anche l'impianto di essiccazione.

Per tenere conto di ciò ma mantenendo il conteggio semplice, si considera che per 1/6 dei giorni di funzionamento la richiesta elettrica è stata la metà di quella del resto del periodo (40 giorni su 241).

Ricordando che il cogeneratore ha potenza nominale pari a 320 kWe, il ricavo annuale è pari a:

$$R = [(0,320 - 0,190) * 1/6 * (F1 + F2 + F3)] + [(0,320 - 0,095) * 5/6 * (F1 + F2 + F3)] = [(0,320 - 0,190) * 1/6 * (138.236,12 + 93.005,83 + 108.284)] + [(0,320 - 0,095) * 5/6 * (138.236,12 + 93.005,83 + 108.284)] = 7.356 + 63.661 = \mathbf{71.017 \text{ €}}$$

Visto che il valore dell'energia ceduta varia di fascia oraria, mese e anno per semplicità, non conoscendo l'andamento futuro del mercato, si suppone che il ricavo calcolato valga per tutti 15 gli anni ipotizzando che le variazioni negative di prezzo siano compensate da quelle positive.

4. Valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE)

Per la valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica si sono presi come riferimento i prezzi medi ponderati riportati nel rapporto di monitoraggio semestrale riferito al primo semestre 2010 (Gennaio 2010-Giugno 2010): TEE I **92,38 €/TEE**, TEE II **91,79 €/TEE**. La soglia minima di risparmio necessaria per ottenere il rilascio dei TEE è pari a 100 tep per un impianto di questo tipo.

Per il calcolo del numero di certificati bianchi ottenibili si è fatto riferimento all'algoritmo della scheda 21 bis come ricordato in precedenza.

In questo caso si deve calcolare il numero di TEE conseguibili sia sulla base della quota di energia termica che di energia elettrica in quanto nessuna delle due viene

valorizzata in altro modo se non attraverso i Titoli di Efficienza Energetica. I certificati vengono valutati sul risparmio di energia primaria complessiva.

Ogni TEE è pari ad un tep di energia primaria risparmiata. I TEE I e i TEE II, il primo riferito alla produzione di energia elettrica e il secondo a quella di energia termica, si calcolano come:

$$\text{TEE I} = \text{IREmod} * [(\text{Epe} * \text{fe}) / (\eta_e * 1000)]$$

Dove:

- IREmod = IRE riferito al modello di cogeneratore, calcolato come: $(\text{Ep} - \text{Ec}) / \text{Ep}$

Con:

Ep = energia primaria complessiva = $\text{Ept} + \text{Epe}$ = energia primaria corrispondente all'energia termica fornita Et + energia primaria corrispondente all'energia elettrica prodotta Ee ;

Ec = energia primaria riferita al cogeneratore.

- fe = fattore di conversione MWhe – tep = 0,187 tep/MWhe;
- η_e = rendimento elettrico nel caso di produzione separata;
- il fattore 1000 è necessario per passare dai kWh ai MWh.

$$\text{TEE II} = \text{IREmod} * [(\text{Ept} * \text{ft}) / (\eta_t * 1000)]$$

Dove:

- IREmod = IRE riferito al modello di cogeneratore, calcolato come: $(\text{Ep} - \text{Ec}) / \text{Ep}$

Con:

Ep = energia primaria complessiva = $\text{Ept} + \text{Epe}$ = energia primaria corrispondente all'energia termica fornita Et + energia primaria corrispondente all'energia elettrica prodotta Ee ;

Ec = energia primaria riferita al cogeneratore.

- ft = fattore di conversione MWht– tep = 0,086 tep/MWht;
- η_t = rendimento termico nel caso di produzione separata;
- il fattore 1000 è necessario per passare dai kWh ai MWh.

Quindi nel caso studiato si ha che:

Ec

Il consumo orario di gas naturale per il funzionamento del cogeneratore è pari a circa 60 m³/h (il cogeneratore ha un funzionamento variabile in termini di energia elettrica fornita dovuto alle richieste non costanti da parte dei due impianti di processo, il valore utilizzato è un valore medio). Date 5.784 ore di funzionamento annuale (24 h/gg * 241 gg/anno), il consumo complessivo è pari a 347.040 m³.

Ricordando che il PCI del gas naturale è 9,59 kWh/m³, l'energia primaria riferita al cogeneratore è pari a:

$$E_c = \text{consumo annuale} * \text{PCI} = 347.040 * 9,59 = \mathbf{3.328.114 \text{ kWh}}$$

Epe

Energia primaria per produrre Ee:

$$E_{pe} = E_e / \eta_e = (P_e * \text{ore/anno}) / 0,4 = 640.680 / 0,4 = \mathbf{1.601.700 \text{ kWh}}$$

Ept

Energia primaria per produrre Et:

$$E_{pt} = E_t / \eta_t = (P_t * \text{ore/anno}) / 0,9 = 2.024.400 / 0,9 = \mathbf{2.249.333 \text{ kWh}}$$

Quindi:

$$\text{IREmod} = (E_{pt} + E_{pe} - E_c) / (E_{pt} + E_{pe}) = 522.919 / 3.851.033 = \mathbf{0,14}$$

$$\text{TEE I} = \text{IREmod} * [(E_{pe} * f_e) / (\eta_e * 1000)] = 0,14 * [(1.601.700 * 0,187) / (0,40 * 1000)] = \mathbf{105 \text{ tep}}$$

$$\text{TEE II} = \text{IREmod} * [(E_{pt} * f_t) / (\eta_t * 1000)] = 0,14 * [(2.249.333 * 0,086) / (0,90 * 1000)] = \mathbf{30 \text{ tep}}$$

La somma dei TEE I e TEE II è di 135, si supera la soglia minima di 100 tep.

Si ipotizza che il ricavo generato dalla vendita dei TEE sia costante negli anni supponendo che la variabilità negativa sia compensata da quella positiva.

Considerando che i certificati bianchi vengono rilasciati per i primi 10 anni di funzionamento dell'impianto si ha l'andamento illustrato in figura 114:

TEE		
ANNO	TEE I	TEE II
Anno 1	105*92,38 = 9.670 €	30 * 91,79 = 2.754 €
Anno 2	9.670 €	2.754 €
Anno 3	9.670 €	2.754 €
Anno 4	9.670 €	2.754 €
Anno 5	9.670 €	2.754 €
Anno 6	9.670 €	2.754 e
Anno 7	9.670 €	2.754 €
Anno 8	9.670 €	2.754 €
Anno 9	9.670 €	2.754 €
Anno 10	9.670 €	2.754 €
Anno 11/12/13/14/1 5	-	-

Figura 114: Tabella con andamento TEE I e II

Voci di costo:

1. Costo combustibile per l'impianto di cogenerazione;
2. Manutenzione ordinaria dell'impianto di cogenerazione;
3. Assicurazione dell'impianto di cogenerazione;
4. Imposte sulla produzione dell'energia elettrica.

1. Costo combustibile per l'impianto di cogenerazione

Si deve calcolare l'esborso annuale per la fornitura di combustibile per il cogeneratore, in questo caso gas naturale. E' prevista una defiscalizzazione su una quota del combustibile utilizzato. Si è stimato un costo medio specifico pari a 0,38 €/m³ e si è ipotizzato un effetto dell'inflazione del 5 %.

Il costo è pari a:

$$C = ((\text{consumo gas} - \text{quota defiscalizzata}) * \text{costo gas} + \text{quota defiscalizzata} * (\text{costo gas} - 12,498/1000 + 0,4493/1000)) * (1 + r)^N$$

Dove:

consumo gas = consumo orario per ore
annue di funzionamento = $60 \text{ m}^3/\text{h} * 24 \text{ h/gg} * 241 \text{ gg/anno} = 347.040 \text{ m}^3$;

quota defiscalizzata = $E_e * 0,258$ ($0,258 \text{ m}^3/\text{kWh prodotto}$) = 165.295 m^3 ;

costo gas = $0,38 \text{ €/m}^3$;

r = tasso d'inflazione, 5 %;

N = anno di studio.

Quindi:

$$C = ((347.040 - 165.295) * 0,38 + 165.295 * (0,38 - 12,498/1000 + 0,4493/1000)) * (1 + 0,05)^N = \mathbf{136.378 \text{ €}}$$

COSTO COMBUSTIBILE PER COGENERATORE	
Anno 1	136.378 €
Anno 2	143.197 €
Anno 3	150.357 €
Anno 4	157.874 €
Anno 5	165.768 €
Anno 6	174.056 €
Anno 7	182.759 €
Anno 8	191.897 €
Anno 9	201.492 €
Anno 10	211.567 €
Anno 11	222.145 €
Anno 12	233.252 €
Anno 13	244.915 €
Anno 14	257.161 €
Anno 15	270.019 €

Figura 115: Tabella con costo combustibile

2. Manutenzione ordinaria dell'impianto di cogenerazione

Si è ipotizzato un costo per la manutenzione pari a $0,02 \text{ €/kWh}$ e un tasso di inflazione pari al 2 %.

Il costo per la manutenzione viene calcolato come:

$$C = \text{costo specifico} * E_e * (1 + r)^N$$

Dove:

costo specifico = $0,02 \text{ €/kWh}$;

E_e = energia elettrica prodotta = $(190 * 24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno}) + (95 * 24 \text{ h/gg} * 201 \text{ gg/anno}) = 640.680 \text{ kWh}$

r = tasso di inflazione, 2 %;

N = anno di studio.

Quindi si ha:

$$C = 0,02 * 640.680 * (1 + 0,02)^N = \mathbf{13.070 \text{ €}}$$

COSTO MANUTENZIONE ORDINARIA	
Anno 1	13.452 €
Anno 2	13.331 €
Anno 3	13.598 €
Anno 4	13.870 €
Anno 5	14.148 €
Anno 6	14.431 €
Anno 7	14.719 €
Anno 8	15.014 €
Anno 9	15.314 €
Anno 10	15.620 €
Anno 11	15.933 €
Anno 12	16.251 €
Anno 13	16.576 €
Anno 14	16.908 €
Anno 15	17.246 €

Figura 116: Tabella con costo manutenzione ordinaria

3. Assicurazione dell'impianto di cogenerazione

Si è ipotizzato un costo annuale costante pari allo 0,5 % dell'investimento iniziale per l'acquisto del cogeneratore.

Sapendo che generalmente un impianto di cogenerazione a gas naturale di media taglia ha un costo di circa 1200 €/kWe, si suppone un investimento di circa 390.000 €. Quindi la quota di assicurazione annuale è di **1.920 €**, costante nei 15 anni di analisi.

4. Imposte sulla produzione di energia elettrica

È prevista un'imposta sulla produzione di energia elettrica sia da fonte non rinnovabile che rinnovabile pari a 0,0124 €/kWhe.

Data una produzione di energia elettrica di 640.680 kWhe all'anno, la quota da pagare è pari a **7.944 €**, costante nei 15 anni di studio.

Quindi il risparmio netto operativo nell'arco di periodo studiato è riportato in figura 117. L'apporto dato dalle diverse voci di risparmio/ricavo e di costo sono visibili nei grafici di figure 118 e 119.

RISPARMIO NETTO OPERATIVO			
ANNO	RICAVI	COSTI	RISPARMIO NETTO OPERATIVO
Anno 1	351.689 €	159.694 €	+ 191.995 €
Anno 2	365.110 €	166.392 €	+ 198.718 €
Anno 3	379.193 €	173.819 €	+ 205.374 €
Anno 4	393.981 €	181.608 €	+ 212.373 €
Anno 5	409.508 €	189.780 €	+ 219.728 €
Anno 6	425.812 €	198.351 €	+ 227.461 €
Anno 7	442.930 €	207.342 €	+ 235.588 €
Anno 8	460.922 €	216.775 €	+ 244.147 €
Anno 9	479.777 €	226.670 €	+ 253.107 €
Anno 10	499.594 €	237.051 €	+ 262.543 €
Anno 11	507.977 €	247.942 €	+ 260.035 €
Anno 12	529.826 €	259.367 €	+ 270.459 €
Anno 13	552.767 €	271.355 €	+ 281.412 €
Anno 14	576.854 €	283.933 €	+ 292.921 €
Anno 15	602.146 €	297.129 €	+ 305.017 €

Figura 117: Tabella risparmio netto operativo dei 15 anni di studio dello scenario 1

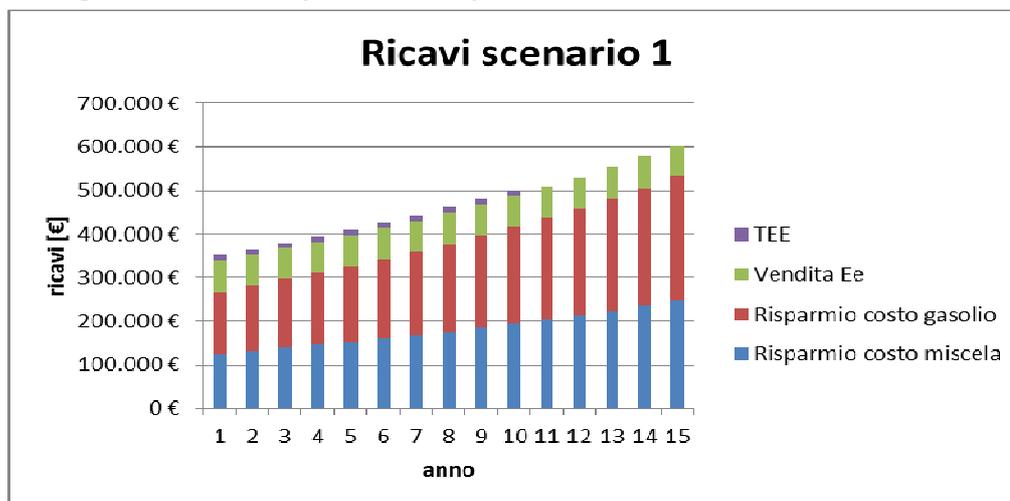
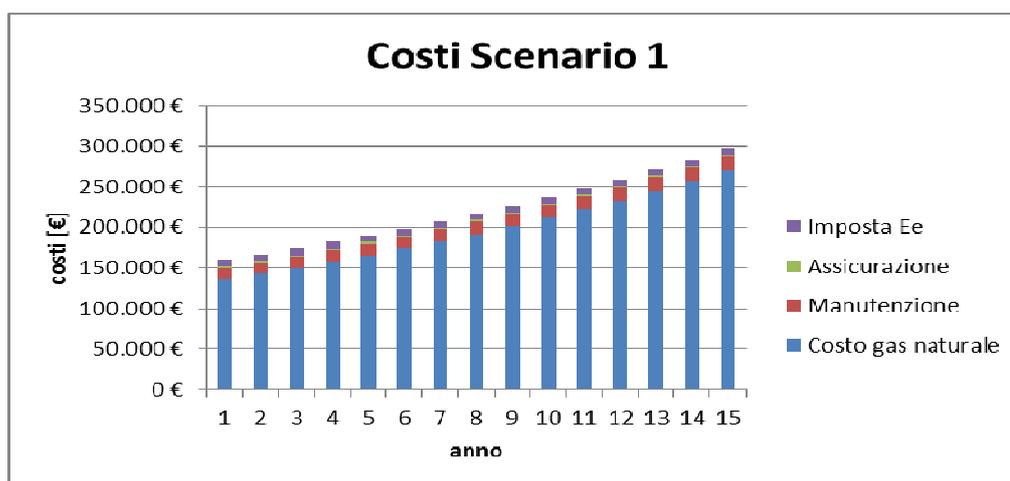


Figura 118 e 119: Istogrammi con voci che compongono i ricavi e i costi relativi allo scenario 1



Rata per il finanziamento

Si suppone che l'azienda Doni Silvano richieda un finanziamento pari al valore dell'investimento stimato per l'acquisto e l'installazione del cogeneratore comprensivo delle opere di adeguamento impiantistiche di 390.000 €.

In questo caso per agevolare il calcolo relativo agli oneri finanziari si riporta la rata su base annuale. Dato l'investimento di 390.000 €, ipotizzato un tasso di interesse del 3,5 % e una durata del mutuo di 15 anni, si ottiene una rata annuale pari a **33.658 €**.

L'ammortamento

Dato l'acquisto di un impianto è necessario valutare l'ammortamento. Per semplicità si considera un ammortamento lineare a quote costanti calcolate come:

$$Q \text{ amm} = (I_0 - V_r) / N$$

Dove:

Q amm = quota costante annuale di ammortamento;

I₀ = investimento iniziale per l'impianto;

V_r = valore residuo dell'impianto al termine del periodo di studio;

N = numero anni di studio.

Per semplificare il calcolo si suppone che l'impianto abbia una vita utile pari a 15 anni, pari al periodo di studio, e che alla fine di tale periodo l'impianto non abbia alcun valore (ipotesi forzata ma utile al fine dell'analisi).

Quindi:

$$Q \text{ amm} = (390.000 - 0) / 15 = \mathbf{26.000 \text{ €}}$$

Infine vanno considerate le imposte che si pongono pari al 40 % per ipotesi.

L'andamento complessivo dello scenario 1 è quello illustrato in figura 120 che presenta:

1^A colonna: periodo di studio;

2^A colonna: flusso di cassa pre-imposte in cui è stata detratta la rata del mutuo;

3^A colonna: valore della quota di ammortamento;

4^A colonna: imponibile ovvero flusso di cassa meno la quota di ammortamento;

5^A colonna: valore delle imposte ovvero il 40 % dell'imponibile;

6^A colonna: flusso di cassa post-imposte.

L'investimento iniziale viene coperto interamente dal mutuo quindi nel periodo 0 si ha 0 come flusso di cassa in quanto la quota introita dalla banca la si spende per acquistare il cogeneratore.

t	BTCF	Qamm	Imponibile	Imposte	ATCF
0	lo = 0				
1	+ 158.337 €	26.000 €	132.337 €	52.935 €	+ 105.402 €
2	+ 165.060 €	26.000 €	139.060 €	55.624 €	+ 109.436 €
3	+ 171.716 €	26.000 €	145.716 €	58.286 €	+ 113.430 €
4	+ 178.715 €	26.000 €	152.715 €	61.086 €	+ 117.629 €
5	+ 186.070 €	26.000 €	160.070 €	64.028 €	+ 122.042 €
6	+ 193.803 €	26.000 €	167.803 €	67.121 €	+ 126.682 €
7	+ 201.930 €	26.000 €	175.930 €	70.372 €	+ 131.558 €
8	+ 210.489 €	26.000 €	184.489 €	73.796 €	+ 136.693 €
9	+ 219.449 €	26.000 €	193.449 €	77.380 €	+ 142.069 €
10	+ 228.885 €	26.000 €	202.885 €	81.154 €	+ 147.731 €
11	+ 226.377 €	26.000 €	200.377 €	80.151 €	+ 146.226 €
12	+ 236.801 €	26.000 €	210.801 €	84.320 €	+ 152.481 €
13	+ 247.754 €	26.000 €	221.754 €	88.702 €	+ 159.052 €
14	+ 259.263 €	26.000 €	233.263 €	93.305 €	+ 165.958 €
15	+ 271.359 €	26.000 €	245.359 €	98.144 €	+ 173.215 €

Figura 120: Tabella calcolo flussi di cassa post imposte dello scenario 1

Si trova infine il VAN seguendo la tabella illustrata in figura 121 (tasso = 5 %):

t	Flusso di cassa netto	Flusso di cassa attualizzato	VAN
0	0	0	0
1	+ 105.402 €	+ 100.383 €	+ 100.383 €
2	+ 109.436 €	+ 99.262 €	+ 199.645 €
3	+ 113.430 €	+ 97.985 €	+ 297.630 €
4	+ 117.629 €	+ 96.774 €	+ 394.404 €
5	+ 122.042 €	+ 95.623 €	+ 490.027 €
6	+ 126.682 €	+ 94.532 €	+ 584.559 €
7	+ 131.558 €	+ 93.496 €	+ 678.055 €
8	+ 136.693 €	+ 92.519 €	+ 770.574 €
9	+ 142.069 €	+ 91.579 €	+ 862.153 €
10	+ 147.731 €	+ 90.694 €	+ 952.847 €
11	+ 146.226 €	+ 85.495 €	+ 1.038.342 €
12	+ 152.481 €	+ 84.907 €	+ 1.123.249 €
13	+ 159.052 €	+ 84.349 €	+ 1.207.598 €
14	+ 165.958 €	+ 83.820 €	+ 1.291.418 €
15	+ 173.215 €	+ 83.320 €	+ 1.374.738 €

Figura 121: Tabella con calcolo del VAN relativo allo scenario 1

Il flusso di cassa attualizzato è stato calcolato come:

$$\text{flusso attualizzato} = \text{flusso netto} / (1 + r)^N$$

Dove:

r = tasso di attualizzazione, 5 %;

N = periodo di studio.

Mentre il VAN è la somma cumulata dei flussi di cassa attualizzati.

Quindi lo scenario 1 ovvero l'installazione di un cogeneratore a gas con la vendita dell'energia elettrica in eccedenza comporta fin dal primo anno un flusso di cassa positivo che incrementa anno dopo anno arrivando dopo 15 anni ad un VAN pari a **+ 1.347.738 €**

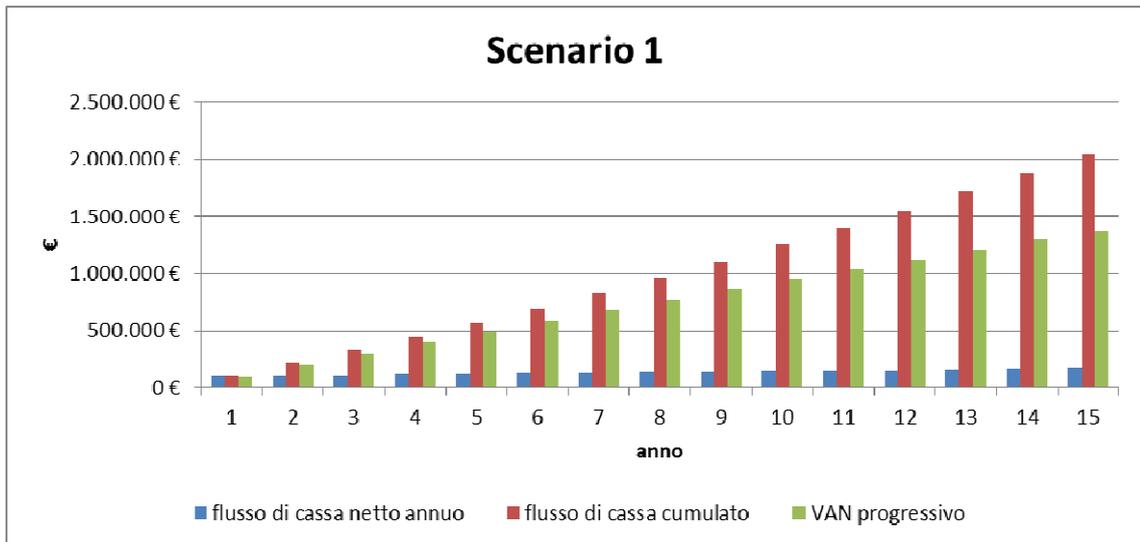


Figura 122: Flusso di cassa annuale e cumulato e VAN progressivo, scenario 1

10.3.9.2. Scenario 2: Cogeneratore a motore ad olio di soia in autoconsumo e vendita di Certificati Verdi

Il secondo e terzo scenario prevedono l'installazione di un cogeneratore a motore ad olio vegetale. Nel paragrafo 10.3.7. è stato realizzato il confronto tra la scelta di fornitura esterna del combustibile e l'autoproduzione. E' emerso come sia molto più conveniente economicamente produrre olio di soia in azienda mediante un impianto di spremitura meccanica a freddo. Quindi nell'analisi energetico-economica inerente a questi due scenari si dovrà tenere conto dei costi e dei ricavi generati dalla scelta di autoprodurre il combustibile.

L'impianto di spremitura meccanica a freddo può funzionare per 300 giorni all'anno ovvero tutto l'anno escluse le festività. Visto però che il confronto viene realizzato per valutare la soluzione di cogenerazione si deve considerare come periodo di studio ovvero l'anno per l'analisi economica, i 241 giorni di funzionamento del cogeneratore. Gli altri circa 60 giorni di possibile funzionamento dell'impianto di spremitura meccanica con i loro costi e ricavi non entrano a far parte delle voci di valutazione. Infatti in questo periodo le richieste energetiche non sarebbero soddisfatte dal cogeneratore ma da un generatore di corrente e tutti gli incentivi legati alla scelta del cogeneratore verrebbero meno. Nel caso risulti l'alternativa vincente o lo scenario 2 o il 3 l'azienda avrà annualmente l'esborso aggiuntivo per il funzionamento dell'impianto di spremitura meccanica e il costo per il trasporto dell'olio venduto ma anche gli introiti generati dalla vendita dell'olio e del pannello di soia prodotti. Ciò però non è influente sulla determinazione della scelta economicamente più vantaggiosa tra i tre scenari.

Voci di risparmio/ricavo:

1. Risparmio costo miscela per funzionamento dell'impianto di termofioccatatura;
2. Risparmio costo gasolio per funzionamento dell'impianto di essiccazione e di termofioccatatura;
3. Ricavo vendita energia elettrica in eccedenza;
4. Valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE);
5. Valorizzazione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile con Certificati Verdi (CV);
6. Ricavo vendita olio di soia in eccedenza;
7. Ricavo vendita pannello di soia.

1. Risparmio costo miscela per funzionamento dell'impianto di termofioccatatura

Come nel primo scenario anche in questo secondo caso, con l'introduzione del cogeneratore, la quota di energia termica pari a 350 kW non viene più fornita dalla caldaia quindi si risparmia il costo di fornitura della miscela propano-butano per il suo funzionamento. La formula utilizzata e i calcoli sottostanti sono i medesimi di quelli dello scenario 1 quindi l'andamento del risparmio nei 15 anni di studio è quello riportato in tabella di figura 111.

2. Risparmio costo gasolio per funzionamento dell'impianto di essiccazione e dell'impianto di termofioccatatura

Come per la prima voce dei risparmi/ricavi dello scenario 2 anche in questo caso l'analisi è la medesima sostenuta nello scenario 1 in quanto il cogeneratore fornisce

l'energia elettrica necessaria al funzionamento dell'impianto di essiccazione e di quello di termofiocatura e quindi si deve considerare il risparmio del costo di fornitura del gasolio del generatore di corrente che non viene più utilizzato. Il risparmio stimato nei 15 anni di analisi è osservabile nella tabella di figura 112.

3. Ricavo vendita energia elettrica in eccedenza

In questo caso il cogeneratore deve rispondere ad ulteriori richieste di energia elettrica rispetto allo scenario 1, dovute all'impianto di spremitura meccanica. Tali richieste sono esattamente pari a :

- 80 kWe per il funzionamento dell'estrusore;
- 50 kWe per il funzionamento dell'impianto di spremitura meccanica vero e proprio.

Queste vanno ad aggiungersi a quelle dell'impianto di essiccazione e a quelle dell'impianto di termofiocatura.

Inoltre i tre impianti di processo hanno durata di funzionamento diversa uno dall'altro:

- impianto di essiccazione: 40 gg/anno;
- impianto di termofiocatura: 241 gg/anno;
- impianto di spremitura meccanica a freddo: 300 gg/anno.

Tutto ciò va tenuto in considerazione nel calcolo di Ee ovvero dell'energia elettrica prodotta dal cogeneratore per valutare quindi l'eccedenza vendibile annualmente.

Visto che il confronto tra gli scenari ha il fine di valutare quale soluzione di cogenerazione e scelte di incentivazione ad essa collegate sia la migliore dal punto di vista economico, per lo studio si deve prendere come base temporale di riferimento i 241 giorni di funzionamento dell'impianto di termofiocatura ovvero quando il cogeneratore è in funzione. Quindi anche per l'analisi dell'impianto di spremitura si considereranno unicamente 241 giorni.

L'eccedenza vendibile è quindi pari a:

$$\begin{aligned} R &= (320 - 320) * 24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno} + \\ &\quad (320 - 225) * 24 \text{ h/gg} * 201 \text{ gg/anno} \\ &= \mathbf{458.280 \text{ kWhe/anno}} \end{aligned}$$

Tale quota eccedente di energia elettrica prodotta dal cogeneratore viene ritirata da parte del GSE (Gestore dei Servizi Elettrici) seguendo le operazioni previste dal ritiro dedicato con prezzi minimi garantiti in quanto si produce energia a partire da fonte rinnovabile. Sono stati utilizzati per l'analisi i valori riferiti ad impianti di potenza inferiore al megawatt aggiornati all'anno 2010.

Visto che si vende una quantità inferiore ai 500.000 kWh/anno, con riferimento alla tabella del 2010, il prezzo è di **101,8 €/MWh**

Quindi il ricavo che si ottiene dalla vendita è pari a:

$$R = 458,28 * 101,8 = \mathbf{46.653 \text{ €}}$$

Visto che il valore dell'energia ceduta varia di anno in anno, non conoscendo l'andamento futuro del prezzo, si suppone che il ricavo calcolato per l'anno 1 valga per tutti e 15 gli anni.

4. Valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE)

In questo caso si deve calcolare il numero di TEE conseguibili solo sulla base della quota di energia termica in quanto la quota elettrica viene valorizzata attraverso il rilascio dei Certificati Verdi. I certificati vengono valutati sul risparmio di energia primaria riferito alla parte termica. Si devono considerare quindi solo i TEE II, quelli riferiti all'energia termica, calcolati come:

$$\text{TEE II} = \text{IREmod} * [(\text{Ept} * \text{ft}) / (\eta_t * 1000)]$$

Dove:

- IREmod = IRE riferito al modello di cogeneratore, calcolato come: $(\text{Ept} - \text{Ec}) / \text{Ept}$

Con:

Ept = energia primaria corrispondente all'energia termica fornita;

Ec = energia primaria riferita al cogeneratore.

- ft = fattore di conversione MWht- tep = 0,086 tep/MWht;
- η_t = rendimento termico nel caso di produzione separata;
- il fattore 1000 è necessario per passare dai kWh ai MWh.

Quindi nel caso studiato si ha che: **Ec = 0** in quanto si tratta di fonte rinnovabile.

Ept

Energia primaria per produrre Et:

$$\text{Ept} = \text{Et} / \eta_t = (\text{Pt} * \text{ore/anno}) / 0,9 = 2.024.400 / 0,9 = \mathbf{2.249.333 \text{ kWh}}$$

Quindi:

$$\text{IREmod} = (\text{Ept} - \text{Ec}) / \text{Ept} = (2.249.333 - 0) / 2.249.333 = \mathbf{1}$$

$$\text{TEE II} = \text{IREmod} * [(\text{Ept} * \text{ft}) / (\eta\text{t} * 1000)] = 1 * [(2.249.333 * 0,086) / (0,90 * 1000)] =$$

215 tep

La soglia minima è superata quindi, dato un costo unitario pari a **91,79 €/TEE**, il ricavo dalla vendita dei certificati bianchi è pari a :

$$R = 215 \text{ TEE} * 91,79 \text{ €/TEE} = \mathbf{19.735 \text{ €}}$$

Si ipotizza che il ricavo generato dalla vendita dei TEE II sia costante negli anni supponendo che la variabilità negativa sia compensata da quella positiva.

Considerando che i certificati bianchi vengono rilasciati per i primi 10 anni di funzionamento dell'impianto si ha l'andamento illustrato in figura 123:

ANNO	TEE II
Anno 1	19.735 €
Anno 2	19.735 €
Anno 3	19.735 €
Anno 4	19.735 €
Anno 5	19.735 €
Anno 6	19.735 €
Anno 7	19.735 €
Anno 8	19.735 €
Anno 9	19.735 €
Anno 10	19.735 €
Anno 11	-
Anno 12	-
Anno 13	-
Anno 14	-
Anno 15	-

Figura 123: Tabella con andamento TEE II

5. Valorizzazione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile con Certificati Verdi (CV)

I Certificati Verdi (CV) costituiscono una forma di incentivazione della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

La quantità di energia prodotta è pari a:

$$E_e = (320 * 24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno}) + (225 * 24 \text{ h/gg} * 201 \text{ gg/anno}) = \mathbf{1.392.600 \text{ kWh}}$$

Sono richiesti 320 kWe nei 40 giorni di funzionamento dell'impianto di essiccazione perché tutti e tre gli impianti di processo aziendali sono in funzione mentre negli altri 201 giorni solo l'impianto di termofiocatura e di spremitura meccanica sono in attività. Il valore assunto dai CV varia durante l'anno e viene aggiornato nel sito del Mercato Elettrico. In questa analisi è stato utilizzato il prezzo medio ponderato del 2010 pari a **84,18 €/MWh**

Quindi il ricavo generato dalla vendita dei CV è pari a:

$$R = 1.392,6 \text{ MWh} * 84,18 \text{ €/MWh} = \mathbf{117.229 \text{ €}}$$

Visto che il prezzo varia con il mercato, si prende questo ricavo per l'intera durata dello studio supponendo che la variabilità negativa sia compensata da quella positiva.

I CV a differenza dei TEE vengono rilasciati per i primi 15 anni di funzionamento dell'impianto quindi nel caso esaminato per l'intero periodo di analisi.

6. Ricavo vendita olio di soia in eccedenza

La produzione nei 241 giorni in termini di olio dell'impianto di spremitura che si prevede di installare è pari a 5.784 q come calcolato nel paragrafo 10.3.7. nella sezione dedicata alla valutazione dell'autoproduzione dell'olio di soia. La quota vendibile è pari al 23 %, ovvero:

$$\text{Quantità vendibile olio} = 23\% * (1 \text{ q/h} * 24 \text{ h/gg} * 241 \text{ gg/anno}) = \mathbf{1.330 \text{ q}}$$

Quindi i ricavi derivanti dalla vendita dell'olio di soia sono pari a:

$$\begin{aligned} \text{Vendita olio} &= \text{quantità olio vendibile} * \text{prezzo olio} = 133 \text{ t/anno} * 1.107 \text{ €/t} = \\ &= \mathbf{147.231 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Visto l'andamento positivo del mercato della produzione di biocombustibile dovuta alla domanda sempre maggiore si suppone un tasso di incremento del prezzo dell'olio pari al 5 % annuo.

Il ricavo quindi nei 15 anni è quello illustrato in figura 124:

RICAVO VENDITA OLIO DI SOIA ECCEDENTE	
Anno 1	154.593 €
Anno 2	162.322 €
Anno 3	170.438 €
Anno 4	178.960 €
Anno 5	187.908 €
Anno 6	197.304 €
Anno 7	207.169 €
Anno 8	217.527 €
Anno 9	228.404 €
Anno 10	239.824 €
Anno 11	251.815 €
Anno 12	264.406 €
Anno 13	277.626 €
Anno 14	291.507 €
Anno 15	306.083 €

Figura 124: Tabella ricavo vendita olio di soia eccedente

7. Ricavo vendita pannello di soia

L'impianto di spremitura meccanica a freddo che è a monte del cogeneratore produce 800 kg di pannello ogni ora. Tale sottoprodotto ha un valore sul mercato molto elevato, pari a 480 €/t.

Quindi il ricavo generato da questa vendita nei 241 giorni di studio è pari a:

$$\begin{aligned} \text{Vendita pannello} &= \text{quantità pannello} * \text{prezzo pannello} = \\ &= 0,8 \text{ t/h} * 24 \text{ h/gg} * 241 \text{ gg/anno} * 480 \text{ €/t} = \mathbf{2.221.056 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Supponendo come per l'olio un tasso di incremento del prezzo pari al 5 % annuo si ottiene un ricavo per i 15 anni di studio pari a:

RICAVO VENDITA PANNELLO DI SOIA	
Anno 1	2.332.109 €
Anno 2	2.448.714 €
Anno 3	2.571.150 €
Anno 4	2.699.707 €
Anno 5	2.834.693 €
Anno 6	2.976.427 €
Anno 7	3.125.249 €
Anno 8	3.281.511 €
Anno 9	3.445.587 €
Anno 10	3.617.866 €
Anno 11	3.798.759 €
Anno 12	3.988.697 €
Anno 13	4.188.132 €
Anno 14	4.397.539 €
Anno 15	4.617.416 €

Figura 125: Tabella ricavi vendita pannello di soia

Voci di costo:

1. Costo materia prima per l'impianto di spremitura;
2. Costo di funzionamento dell'impianto di spremitura;
3. Manutenzione ordinaria dell'impianto di spremitura;
4. Assicurazione dell'impianto di spremitura;
5. Costo trasporto olio di soia presso fornitore;
6. Manutenzione ordinaria dell'impianto di cogenerazione;
7. Assicurazione dell'impianto di cogenerazione;
8. Imposte sulla produzione dell'energia elettrica.

1. Costo materia prima per l'impianto di spremitura

L'impianto di spremitura meccanica a freddo che produce il combustibile per il cogeneratore tratta 1 t/h di seme di soia.

L'azienda Doni Silvano acquista dai coltivatori il prodotto raccolto al prezzo di mercato che negli ultimi anni si aggira intorno ai 40 €/q.

Quindi presi i 241 giorni di studio e un costo del seme di soia pari a 40 €/q, la spesa sostenuta per la materia prima è di:

$$\text{Costo materia prima} = 1 \text{ t/h} * 24 \text{ h/gg} * 241 \text{ gg/anno} * 400 \text{ €/t} = \mathbf{2.313.600 \text{ €}}$$

Si suppone che la contenuta variabilità del prezzo del seme di soia si mantenga anche negli anni successivi e quindi la spesa sia la medesima per i 15 anni di analisi.

2. Costo di funzionamento dell'impianto di spremitura

Come è stato descritto in precedenza, sulla base dei dati raccolti dall'intervista al titolare dell'azienda di Rovigo che realizza la spremitura meccanica di diversi oli vegetali, un impianto di spremitura da 1 t/h di seme trattato ha i seguenti costi di funzionamento comprensivi di spesa energetica e manodopera:

- 10 €/t di seme trattato per l'estrusore;
- 15 €/t di seme trattato per l'impianto di spremitura meccanica vero e proprio.

Quindi nei 241 giorni di studio, data una produttività di 5.784 t di seme, la spesa per il funzionamento dell'impianto di spremitura meccanica a freddo è pari a:

$$\text{Costo funzionamento} = 25 \text{ €/t} * 5.784 \text{ t} = \mathbf{144.600 \text{ €}}$$

Tale esborso lo si considera costante nel periodo di studio.

3. Manutenzione ordinaria dell'impianto di spremitura

Si ipotizza che il costo per la manutenzione ordinaria dell'impianto di spremitura meccanica a freddo sia pari al 0,5% del valore d'acquisto dell'impianto e costante nel periodo di studio.

$$\text{Costo manutenzione} = 0,5 \% * \text{valore d'acquisto} = 0,5 \% * 560.000 \text{ €} = \mathbf{2.800 \text{ €/anno}}$$

4. Assicurazione dell'impianto di spremitura

Si ipotizza anche in questo caso che l'uscita di denaro relativa all'assicurazione sia pari allo 0,5 % del valore d'acquisto dell'impianto e costante nei 15 anni di analisi.

$$\text{Uscita assicurazione} = 0,5 \% * \text{valore d'acquisto} = 0,5 \% * 560.000 \text{ €} = \mathbf{2.800 \text{ €/anno}}$$

5. Costo trasporto olio di soia presso fornitore

Si suppone che il prezzo di 1107 €/t per l'olio da parte del fornitore sia franco arrivo, ovvero si deve decurtare da esso la quota relativa al trasporto.

Data la quantità di olio prodotto in eccedenza nei 241 giorni di studio, 1.330 q, e un costo specifico per il trasporto pari a 1 €/q, la spesa è pari a:

$$\begin{aligned} \text{Costo trasporto} &= \text{costo specifico} * \text{quantità trasportata} = \\ &= 1 \text{ €/q} * 1.330 \text{ q/anno} = \mathbf{1.330 \text{ €/anno}} \end{aligned}$$

Si suppone un incremento del costo del trasporto pari al 5 %, quindi nei 15 anni si ha che:

COSTO TRASPORTO OLIO	
Anno 1	1.397 €
Anno 2	1.466 €
Anno 3	1.540 €
Anno 4	1.617 €
Anno 5	1.697 €
Anno 6	1.782 €
Anno 7	1.871 €
Anno 8	1.965 €
Anno 9	2.063 €
Anno 10	2.166 €
Anno 11	2.275 €
Anno 12	2.388 €
Anno 13	2.508 €
Anno 14	2.633 €
Anno 15	2.765 €

Figura 126: Tabella costo trasporto olio di soia presso fornitore

6. Manutenzione ordinaria dell'impianto di cogenerazione

Si è ipotizzato un costo per la manutenzione pari a 0,02 €/kWhe e un tasso di inflazione pari al 2 %.

Il costo per la manutenzione viene calcolato come:

$$C = \text{costo specifico} * Ee * (1 + r)^N$$

Dove:

costo specifico = 0,02 €/kWhe;

$Ee = \text{energia elettrica prodotta} = (320 * 24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno}) + (225 * 24 \text{ h/gg} * 201 \text{ gg/anno})$
 $= 1.392.600 \text{ kWhe}$

r = tasso di inflazione, 2 %;

N = anno di studio.

COSTO MANUTENZIONE COGENERATORE	
Anno 1	28.409 €
Anno 2	28.977 €
Anno 3	29.557 €
Anno 4	30.148 €
Anno 5	30.751 €
Anno 6	31.366 €
Anno 7	31.993 €
Anno 8	32.633 €
Anno 9	33.286 €
Anno 10	33.951 €
Anno 11	34.630 €
Anno 12	35.323 €
Anno 13	36.030 €
Anno 14	36.750 €
Anno 15	37.485 €

Figura 127: Tabella andamento costo manutenzione ordinaria cogeneratore

7. Assicurazione dell'impianto di cogenerazione

Si è ipotizzato un costo annuale costante pari allo 0,5 % dell'investimento iniziale per l'acquisto e l'installazione del cogeneratore.

Sapendo che generalmente un impianto di cogenerazione di media taglia ha un costo di circa 1200 €/kWe, si suppone un investimento di 390.000 €.

Quindi la quota di assicurazione annuale è di **1.920 €**, costante nei 15 anni di analisi.

8. Imposte sulla produzione di energia elettrica

E' prevista un'imposta sulla produzione di energia elettrica sia da non rinnovabile che rinnovabile pari a 0,0124 €/kWhe.

Data una produzione di energia elettrica di 1.392.600 kWhe all'anno, la quota da pagare è pari a **17.268 €**, costante nei 15 anni di studio.

Quindi il risparmio netto operativo nell'arco di periodo studiato è riportato in figura 128:

RISPARMIO NETTO OPERATIVO			
ANNO	RICAVI	COSTI	RISPARMIO NETTO OPERATIVO
Anno 1	2.938.567 €	2.512.794 €	+ 425.773 €
Anno 2	3.076.322 €	2.513.431 €	+ 562.891 €
Anno 3	3.220.957 €	2.514.085 €	+ 706.872 €
Anno 4	3.372.824 €	2.514.753 €	+ 858.071 €
Anno 5	3.532.285 €	2.515.436 €	+ 1.016.849 €
Anno 6	3.699.719 €	2.516.136 €	+ 1.183.583 €
Anno 7	3.875.524 €	2.516.852 €	+ 1.358.672 €
Anno 8	4.060.136 €	2.517.586 €	+ 1.542.550 €
Anno 9	4.253.944 €	2.518.337 €	+ 1.735.607 €
Anno 10	4.457.460 €	2.519.105 €	+ 1.938.355 €
Anno 11	4.651.416 €	2.519.893 €	+ 2.131.523 €
Anno 12	4.875.794 €	2.520.699 €	+ 2.355.095 €
Anno 13	5.111.390 €	2.521.526 €	+ 2.589.864 €
Anno 14	5.358.765 €	2.522.371 €	+ 2.836.394 €
Anno 15	5.618.510 €	2.523.238 €	+ 3.095.272 €

Figura 128: Tabella risparmio netto operativo dei 15 anni di studio dello scenario 2

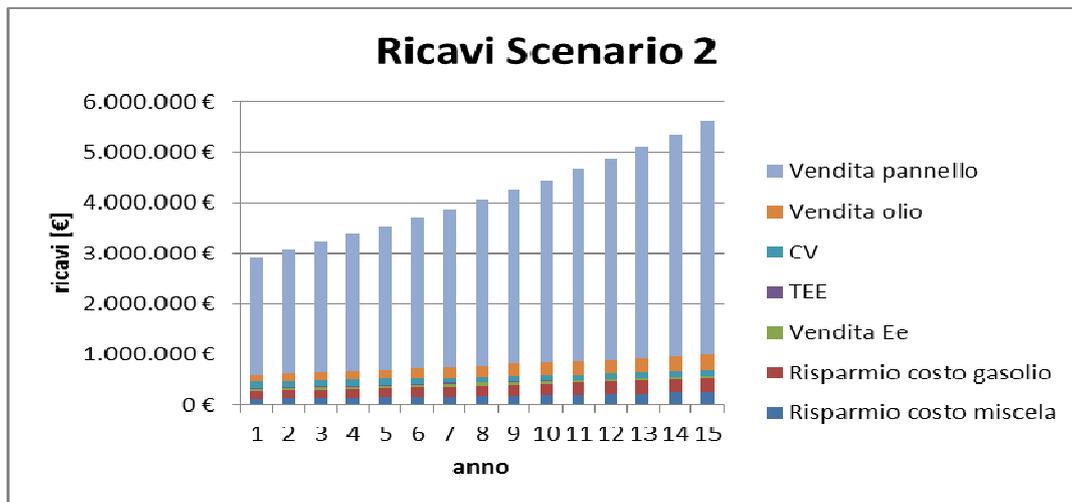
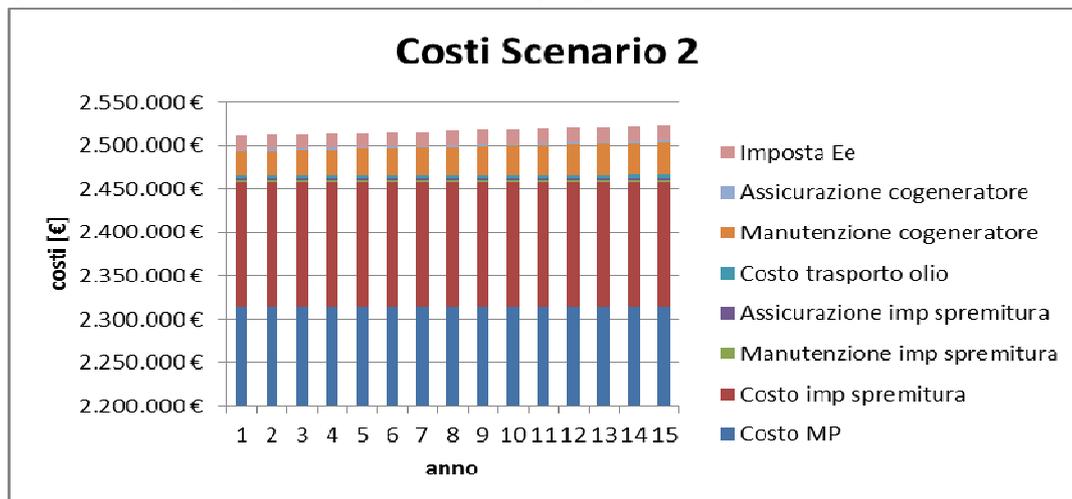


Figura 129 e 130: Istogrammi con le voci che compongono i ricavi e i costi dello scenario 2



Rata per il finanziamento

Si suppone che l'azienda Doni Silvano richieda un finanziamento pari al valore dell'investimento stimato per l'acquisto e l'installazione del cogeneratore e l'acquisto e l'installazione dell'impianto di spremitura meccanica pari ad una somma totale di 950.000 €.

Dato l'investimento di 950.000 € , ipotizzato un tasso di interesse del 3,5 % e una durata del mutuo di 15 anni, si ottiene una rata annuale pari a **81.988 €**

L'ammortamento

Come per lo scenario 1 anche in questo caso, per semplicità, si considera un ammortamento lineare a quote costanti.

$$Q \text{ amm cogeneratore} = (390.000 - 0) / 15 = \mathbf{26.000 \text{ €}}$$

$$Q \text{ amm impianto spremitura} = (560.000 - 0) / 15 = \mathbf{37.334 \text{ €}}$$

Infine vanno considerate le imposte che si pongono pari al 40 % per ipotesi.

L'andamento complessivo dello scenario 2 è quello illustrato in figura 131.

L'investimento iniziale viene coperto interamente dal mutuo quindi nel periodo 0 si ha 0 come flusso di cassa in quanto la quota introita dalla banca la si spende per acquistare il cogeneratore.

t	BTCF	Qamm	Imponibile	Imposte	ATCF
0	Io = 0				
1	+ 425.773 €	63.334 €	+ 362.439 €	144.976 €	+ 280.797 €
2	+ 562.891 €	63.334 €	+ 499.557 €	199.823 €	+ 363.068 €
3	+ 706.872 €	63.334 €	+ 643.538 €	257.415 €	+ 449.457 €
4	+ 858.071 €	63.334 €	+ 794.737 €	317.895 €	+ 540.176 €
5	+ 1.016.849 €	63.334 €	+ 953.515 €	381.406 €	+ 635.443 €
6	+ 1.183.583 €	63.334 €	+ 1.120.249 €	448.100 €	+ 735.483 €
7	+ 1.358.672 €	63.334 €	+ 1.295.338 €	518.135 €	+ 840.537 €
8	+ 1.542.550 €	63.334 €	+ 1.479.216 €	591.686 €	+ 950.864 €
9	+ 1.735.607 €	63.334 €	+ 1.672.273 €	668.909 €	+ 1.066.698 €
10	+ 1.938.355 €	63.334 €	+ 1.875.021 €	750.008 €	+ 1.188.347 €
11	+ 2.131.523 €	63.334 €	+ 2.068.189 €	827.276 €	+ 1.304.247 €
12	+ 2.355.095 €	63.334 €	+ 2.291.761 €	916.704 €	+ 1.438.391 €
13	+ 2.589.864 €	63.334 €	+ 2.526.530 €	1.010.612 €	+ 1.579.252 €
14	+ 2.836.394 €	63.334 €	+ 2.773.060 €	1.109.224 €	+ 1.727.170 €
15	+ 3.095.272 €	63.334 €	+ 3.031.938 €	1.212.775 €	+ 1.882.497 €

Figura 131: Tabella calcolo flussi di cassa post imposte dello scenario 2

Si trova infine il VAN seguendo la tabella illustrata in figura 132 con un tasso di attualizzazione posto al 5 %:

t	Flusso di cassa netto	Flusso di cassa attualizzato	VAN
0	0	0	0
1	+ 280.797 €	+ 267.426 €	+ 267.426 €
2	+ 363.068 €	+ 329.314 €	+ 596.740 €
3	+ 449.457 €	+ 388.258 €	+ 984.998 €
4	+ 540.176 €	+ 444.404 €	+ 1.429.402 €
5	+ 635.443 €	+ 497.886 €	+ 1.927.288 €
6	+ 735.483 €	+ 548.829 €	+ 2.476.117 €
7	+ 840.537 €	+ 597.354 €	+ 3.073.471 €
8	+ 950.864 €	+ 643.582 €	+ 3.717.323 €
9	+ 1.066.698 €	+ 687.603 €	+ 4.404.926 €
10	+ 1.188.347 €	+ 729.542 €	+ 5.134.468 €
11	+ 1.304.247 €	+ 762.566 €	+ 5.897.034 €
12	+ 1.438.391 €	+ 800.950 €	+ 6.697.984 €
13	+ 1.579.252 €	+ 837.511 €	+ 7.535.495 €
14	+ 1.727.170 €	+ 872.338 €	+ 8.407.833 €
15	+ 1.882.497 €	+ 905.513 €	+ 9.313.346 €

Figura 132: Tabella con calcolo del VAN relativo allo scenario 2

Quindi lo scenario 2 ovvero l'installazione di un cogeneratore ad olio di soia con la vendita dei certificati verdi comporta fin dal primo anno un flusso di cassa positivo che incrementa anno dopo anno arrivando dopo 15 anni ad un VAN pari a

+ 9.313.346 € 7 volte superiore al VAN relativo allo scenario 1, la scelta sarà quindi tra lo scenario 2 e 3.

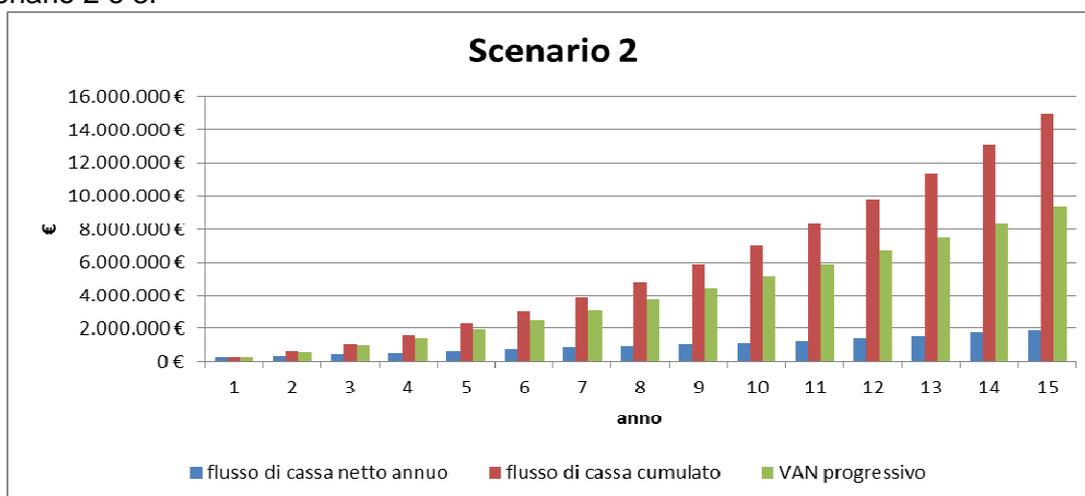


Figura 133: Flusso di cassa netto e cumulato e VAN progressivo, scenario 2

10.3.9.3. Scenario 3: Cogeneratore a motore ad olio di soia in Tariffa onnicomprensiva

Questo ultimo scenario prevede lo stesso tipo di tecnologia dello scenario 2 ovvero un cogeneratore ad olio di soia per rispondere alle richieste dell'impianto di essiccazione e di quello di termofiocatura presenti nell'azienda Doni Silvano. Il combustibile per il suo funzionamento lo si ottiene tramite il processo di spremitura meccanica a freddo svolto in azienda.

Per quanto riguarda ricavi e costi la situazione è molto simile allo scenario 2. La sostanziale differenza sta nella valorizzazione dell'energia elettrica con Tariffa onnicomprensiva invece dei Certificati Verdi.

La scelta della Tariffa onnicomprensiva è vantaggiosa se la quota di energia elettrica da fonte rinnovabile venduta è importante. Per tale ragione si è deciso di propendere per vendere tutta l'energia prodotta dal cogeneratore secondo la tariffa e mantenere il generatore di corrente attualmente presente per coprire le richieste elettriche degli impianti aziendali. Essendo un'analisi di tipo differenziale rispetto allo scenario 0 non appare tra i costi l'uscita di denaro per il gasolio per il generatore ma solo il costo relativo al funzionamento dell'impianto di spremitura che comprende anche la spesa per l'energia elettrica. Questo perché sia nello scenario 0 che in questo è presente il costo per la produzione di energia elettrica per l'impianto di essiccazione e quello di termofiocatura.

Infine si ricorda che, come nello scenario 2, anche in questo caso l'analisi è basata sui 241 giorni di funzionamento del cogeneratore anche se l'impianto di spremitura meccanica a freddo può lavorare per 300 giorni all'anno.

Voci di risparmio/ricavo:

1. Risparmio costo miscela per funzionamento dell'impianto di termofiocatura;
2. Valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE);
3. Valorizzazione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile con Tariffa onnicomprensiva;
4. Ricavo vendita olio di soia in eccedenza;
5. Ricavo vendita pannello di soia.

1. Risparmio costo miscela per funzionamento dell'impianto di termofiocatura

I calcoli sottostanti questa prima voce di risparmio sono i medesimi dei due scenari precedenti. L'andamento è quello illustrato in figura 111.

2. Valorizzazione dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE)

Il calcolo del numero di TEE conseguibili e del ricavo derivante dalla vendita degli stessi è lo stesso dello scenario 2. Come nel caso precedente si deve considerare solo la quota di energia termica in quanto quella di energia elettrica viene valorizzata mediante la Tariffa Onnicomprensiva. Si devono considerare quindi solo i TEE II, quelli riferiti all'energia termica. L'ingresso di denaro relativo della durata di 10 anni è pari a **19.735 €**

3. Valorizzazione dell'energia elettrica da fonte rinnovabile con Tariffa onnicomprensiva

La Tariffa onnicomprensiva consiste nell'erogazione di un beneficio monetario, corrisposto per ogni kWh netto di energia elettrica immesso in rete.

Le tariffe possono essere aggiornate ogni 3 anni, con decreto del ministro dello Sviluppo economico. Attualmente la tariffa relativa agli oli vegetali puri tracciabili è pari a **28 c€/kWh**

La quantità di energia prodotta è pari a:

$$E_e = (320 * 24 \text{ h/gg} * 40 \text{ gg/anno}) + (225 * 24 \text{ h/gg} * 201 \text{ gg/anno}) = \mathbf{1.392.600 \text{ kWh}}$$

Si forniscono 320 kWh nei 40 giorni di funzionamento dell'impianto di essiccazione perché tutti e tre gli impianti di processo aziendali sono in funzione mentre negli altri 201 giorni solo l'impianto di termofiocatura e di spremitura meccanica sono in attività. Quindi il ricavo è pari a:

$$R = 1.392.600 \text{ kWh} * 28 \text{ c€/kWh} = \mathbf{389.928 \text{ €}}$$

Non sapendo se e come la tariffa subirà variazioni in futuro, si ipotizza la costanza del valore appena calcolato per i 15 anni di studio.

4. Ricavo vendita olio di soia in eccedenza

Il ricavo generato dalla vendita dell'olio di soia non utilizzato dal cogeneratore è il medesimo trovato nello scenario 2 in quanto la produzione dell'impianto di spremitura è la stessa come pure il prezzo di vendita al fornitore. L'andamento di tale voce è osservabile in figura 124.

5. Ricavo vendita pannello di soia

Come per l'olio anche il ricavo generato derivante dalla vendita del pannello di soia prodotto dall'impianto di spremitura meccanica è uguale a quello calcolato nello scenario 2, visibile in figura 125.

Voci di costo:

1. Costo materia prima per l'impianto di spremitura;
2. Costo di funzionamento dell'impianto di spremitura;
3. Manutenzione ordinaria dell'impianto di spremitura;
4. Assicurazione dell'impianto di spremitura;
5. Manutenzione ordinaria dell'impianto di cogenerazione;
6. Assicurazione dell'impianto di cogenerazione;
7. Imposte per la produzione di energia elettrica.

L'analisi dei costi è pari pari quella riferita allo scenario 2 quindi si è deciso di non riportarla.

Quindi il risparmio netto operativo nell'arco di periodo studiato è riportato in figura 134:

RISPARMIO NETTO OPERATIVO			
ANNO	RICAVI	COSTI	RISPARMIO NETTO OPERATIVO
Anno 1	3.021.612 €	2.512.794 €	+ 508.818 €
Anno 2	3.152.209 €	2.513.431 €	+ 638.778 €
Anno 3	3.289.336 €	2.514.085 €	+ 775.251 €
Anno 4	3.433.319 €	2.514.753 €	+ 918.566 €
Anno 5	3.584.503 €	2.515.436 €	+ 1.069.067 €
Anno 6	3.743.245 €	2.516.136 €	+ 1.227.109 €
Anno 7	3.909.924 €	2.516.852 €	+ 1.393.072 €
Anno 8	4.084.954 €	2.517.586 €	+ 1.567.368 €
Anno 9	4.268.701 €	2.518.337 €	+ 1.750.364 €
Anno 10	4.461.652 €	2.519.105 €	+ 1.942.547 €
Anno 11	4.664.251 €	2.519.893 €	+ 2.144.358 €
Anno 12	4.876.981 €	2.520.699 €	+ 2.356.282 €
Anno 13	5.100.347 €	2.521.526 €	+ 2.578.821 €
Anno 14	5.334.881 €	2.522.371 €	+ 2.812.510 €
Anno 15	5.581.143 €	2.523.238 €	+ 3.057.905 €

Figura 134: Tabella risparmio netto operativo dei 15 anni di studio dello scenario 3

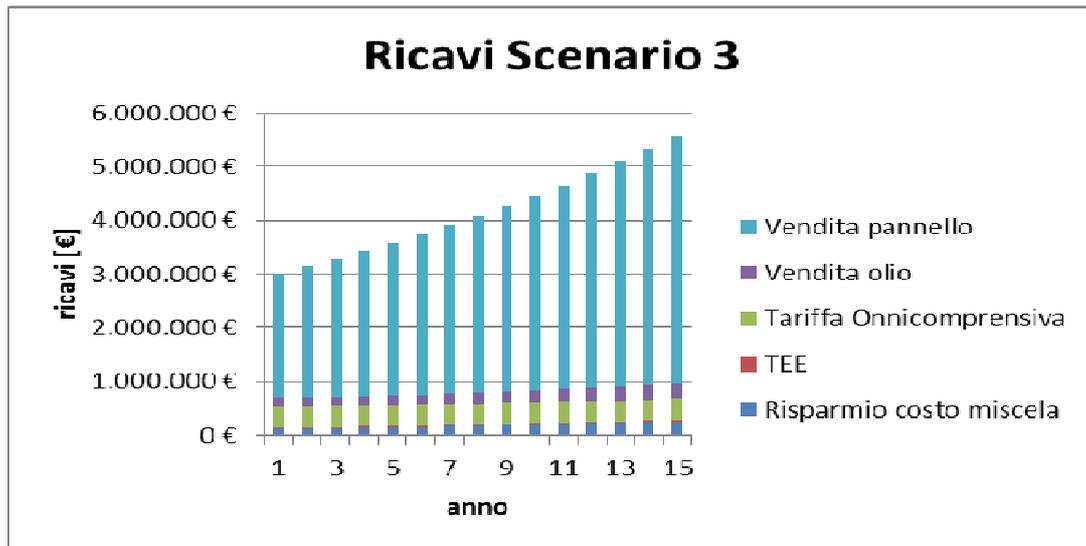


Figura 135: Istogramma con voci che compongono i ricavi relativi allo scenario 3

L'istogramma relativo ai costi dello scenario 3 è il medesimo dello scenario 2, quindi è osservabile in figura 130.

Rata per il finanziamento

Si suppone che l'azienda Doni Silvano richieda un finanziamento pari al valore dell'investimento stimato per l'acquisto e l'installazione del cogeneratore e l'acquisto e l'installazione dell'impianto di spremitura meccanica pari ad una somma totale di 950.000 €.

Dato l'investimento di 950.000 € , ipotizzato un tasso di interesse del 3,5 % e una durata del mutuo di 15 anni, si ottiene una rata annuale pari a **81.988 €**

L'ammortamento

Dato l'acquisto di due impianti è necessario valutare l'ammortamento.

$$Q \text{ amm cogeneratore} = (390.000 - 0) / 15 = \mathbf{26.000 \text{ €}}$$

$$Q \text{ amm impianto spremitura} = (560.000 - 0) / 15 = \mathbf{37.334 \text{ €}}$$

Infine vanno considerate le imposte che si pongono pari al 40 % per ipotesi.

L'andamento complessivo dello scenario 3 è quello illustrato in figura 136. L'investimento iniziale viene coperto interamente dal mutuo quindi nel periodo 0 si ha 0 come flusso di cassa in quanto la quota introita dalla banca la si spende per acquistare il cogeneratore.

t	BTCF	Qamm	Imponibile	Imposte	ATCF
0	lo = 0				
1	+ 426.830 €	63.334 €	+ 363.496 €	145.398 €	+ 281.432 €
2	+ 556.790 €	63.334 €	+ 493.456 €	197.382 €	+ 359.408 €
3	+ 693.263 €	63.334 €	+ 629.929 €	251.972 €	+ 441.291 €
4	+ 836.578 €	63.334 €	+ 773.244 €	309.298 €	+ 527.280 €
5	+ 987.079 €	63.334 €	+ 923.745 €	369.498 €	+ 617.581 €
6	+ 1.145.121 €	63.334 €	+ 1.081.787 €	432.715 €	+ 712.406 €
7	+ 1.311.084 €	63.334 €	+ 1.247.750 €	499.100 €	+ 811.984 €
8	+ 1.485.380 €	63.334 €	+ 1.422.046 €	568.818 €	+ 916.562 €
9	+ 1.668.376 €	63.334 €	+ 1.605.042 €	642.017 €	+ 1.026.359 €
10	+ 1.860.559 €	63.334 €	+ 1.797.225 €	718.890 €	+ 1.141.669 €
11	+ 2.062.370 €	63.334 €	+ 1.999.036 €	799.614 €	+ 1.262.756 €
12	+ 2.274.294 €	63.334 €	+ 2.210.960 €	884.384 €	+ 1.389.910 €
13	+ 2.496.833 €	63.334 €	+ 2.433.499 €	973.400 €	+ 1.523.433 €
14	+ 2.730.522 €	63.334 €	+ 2.667.188 €	1.066.875 €	+ 1.663.647 €
15	+ 2.975.917 €	63.334 €	+ 2.912.583 €	1.165.033 €	+ 1.810.884 €

Figura 136: Tabella calcolo flussi di cassa post imposte dello scenario 3

Si trova infine il VAN seguendo la tabella illustrata in figura 137 con un tasso di attualizzazione posto al 5 %:

t	Flusso di cassa netto	Flusso di cassa attualizzato	VAN
0	0	0	0
1	+ 281.432 €	+ 268.030 €	+ 268.030 €
2	+ 359.408 €	+ 325.993 €	+ 594.023 €
3	+ 441.291 €	+ 381.204 €	+ 975.227 €
4	+ 527.280 €	+ 433.795 €	+ 1.409.022 €
5	+ 617.581 €	+ 483.891 €	+ 1.892.913 €
6	+ 712.406 €	+ 531.608 €	+ 2.424.521 €
7	+ 811.984 €	+ 577.062 €	+ 3.001.583 €
8	+ 916.562 €	+ 620.365 €	+ 3.621.948 €
9	+ 1.026.359 €	+ 661.600 €	+ 4.283.548 €
10	+ 1.141.669 €	+ 700.886 €	+ 4.984.434 €
11	+ 1.262.756 €	+ 738.307 €	+ 5.722.741 €
12	+ 1.389.910 €	+ 773.954 €	+ 6.496.695 €
13	+ 1.523.433 €	+ 807.909 €	+ 7.304.604 €
14	+ 1.663.647 €	+ 840.255 €	+ 8.144.859 €
15	+ 1.810.884 €	+ 871.066 €	+ 9.015.925 €

Figura 137: Tabella con calcolo del VAN relativo allo scenario 3

Quindi lo scenario 3 ovvero l'installazione di un cogeneratore ad olio di soia con la vendita dell'energia elettrica prodotta con Tariffa Onnicomprensiva fin dal primo anno presenta un flusso di cassa positivo che incrementa anno dopo anno arrivando dopo 15 anni ad un VAN pari a **+ 9.015.925 €**

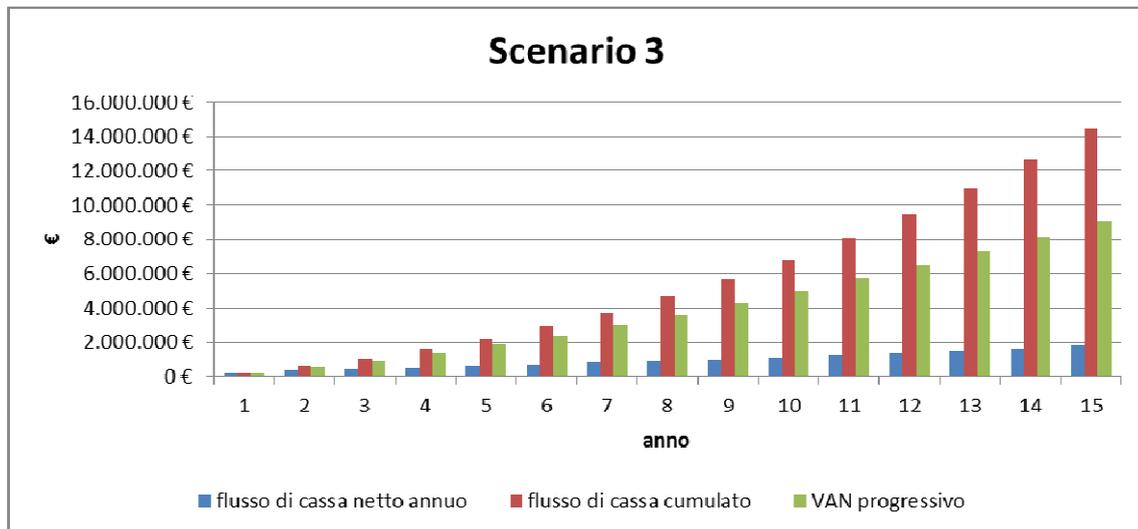


Figura 138: Flusso di cassa netto e cumulato e VAN progressivo, scenario 3

Ricordando che al quindicesimo anno di attività lo scenario 2, migliore rispetto al primo, aveva un VAN pari a **+ 9.313.346 €** sussiste una differenza tra il terzo e il secondo di **297.421 €** non elevatissima date le poche diversità tra le due alternative.

Entrambe le soluzioni sono molto buone dal punto di vista economico ma prevale anche se di poco il secondo scenario ovvero il cogeneratore ad olio di soia con vendita dei Certificati Verdi.

10.3.9.4. Confronto tra gli scenari

La valutazione tecnico-economica delle tre soluzioni di cogenerazione proposte ha permesso di stabilire la valenza di questo intervento e di quantificarne l'esito economico. Dopo aver analizzato in maniera dettagliata i tre scenari, mediante la tabella di figura 139, è possibile un confronto diretto e sintetico che mette in luce la soluzione più vantaggiosa per l'azienda Doni Silvano.

SCENARIO	VOCI DI RICAVO E DI COSTO	VAN 15 anni	PAYBACK
<p>Cogeneratore a motore a gas naturale con vendita energia elettrica in eccedenza</p>	<p>RISPARMI/RICAVI: 1.Risparmio costo miscela per impianto di termofiocatura 2.Risparmio costo gasolio per due impianti di processo 3.Ricavo vendita energia elettrica in eccedenza 4.Valorizzazione Titoli di Efficienza Energetica (TEE) COSTI: 1.Costo combustibile per impianto di cogenerazione 2.Manutenzione ordinaria impianto di cogenerazione 3.Assicurazione impianto di cogenerazione 4.Imposte sulla produzione di energia elettrica</p>	<p>+ 1.347.738 €</p>	<p>Già dal primo anno i ricavi sono maggiori dei costi</p>
<p>Cogeneratore a motore ad olio di soia con vendita energia elettrica in eccedenza e rilascio Certificati Verdi</p>	<p>RISPARMI/RICAVI: 1.Risparmio costo miscela per impianto di termofiocatura 2.Risparmio costo gasolio per due impianti di processo 3.Ricavo vendita energia elettrica in eccedenza 4.Valorizzazione Titoli di Efficienza Energetica (TEE) 5.Valorizzazione energia elettrica da fonte rinnovabile con Certificati Verdi (CV) 6.Ricavo vendita olio di soia in eccedenza 7.Ricavo vendita pannello di soia COSTI: 1.Costo materia prima impianto di spremitura 2.Costo di funzionamento impianto di spremitura 3.Manutenzione ordinaria</p>	<p>+ 9.313.346 €</p>	<p>Già dal primo anno i ricavi sono maggiori dei costi</p>

	<p>impianto di spremitura</p> <p>4.Assicurazione impianto di spremitura</p> <p>5.Costo trasporto olio di soia presso fornitore</p> <p>6.Manutenzione ordinaria impianto di cogenerazione</p> <p>7.Assicurazione impianto di cogenerazione</p> <p>8.Imposte sulla produzione di energia elettrica</p>		
<p>Cogeneratore a motore ad olio di soia con vendita di tutta l'energia elettrica con Tariffa onnicomprensiva</p>	<p>RISPARMI/RICAVI:</p> <p>1.Risparmio costo miscela per impianto di termofiocatura</p> <p>2.Valorizzazione Titoli di Efficienza Energetica (TEE)</p> <p>3.Valorizzazione energia elettrica da fonte rinnovabile con Tariffa onnicomprensiva</p> <p>4.Ricavo vendita olio di soia in eccedenza</p> <p>5.Ricavo vendita pannello di soia</p> <p>COSTI:</p> <p>1.Costo materia prima impianto di spremitura</p> <p>2.Costo di funzionamento impianto di spremitura</p> <p>3.Manutenzione ordinaria impianto di spremitura</p> <p>4.Assicurazione impianto di spremitura</p> <p>5.Costo trasporto olio di soia presso fornitore</p> <p>6.Manutenzione ordinaria impianto di cogenerazione</p> <p>7.Assicurazione impianto di cogenerazione</p> <p>8.Imposte sulla produzione di energia elettrica</p>	<p>+ 9.015.925 €</p>	<p>Già dal primo anno i ricavi sono maggiori dei costi</p>

Figura 139: Tabella riassuntiva dei tre scenari di cogenerazione

10.3.10. Conclusioni

Lo studio circa l'intervento di inserimento di uno scambiatore di calore per il recupero sull'aria in uscita dalla torre di essiccazione ha evidenziato come tale ipotesi non sia economicamente vantaggiosa visto l'investimento rilevante da sostenere per l'installazione del sistema di depolverazione e dell'unità di recupero. Il risparmio energetico ed economico generato, date le poche ore annuali di funzionamento dell'impianto, non rende ragionevole l'investimento.

L'analisi del secondo intervento ha invece dimostrato la fattibilità dell'applicazione cogenerativa; si sono prospettate tre soluzioni, la migliore delle quali dal punto di vista tecnico ed economico è l'installazione di un motore alternativo ad olio di soia da 320 kWe con vendita dei Certificati Verdi rilasciati per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile. Il relativo Valore Attuale Netto a 15 anni è superiore a parità di ritorno, anche se in realtà non ha molto senso parlare di ritorno in quanto tutte e tre le soluzioni già dal primo anno hanno un flusso di cassa positivo.

Osservando lo studio, appare evidente come la soluzione economicamente migliore permetta di coprire le richieste energetiche aziendali e avere un ritorno monetario importante e crescente nel tempo derivante dall'utilizzo del cogeneratore.

La possibilità di riavviare l'impianto di termofiocatura appare non solo fattibile ma anche conveniente.

Infine l'impianto di spremitura meccanica a freddo, potendo funzionare per l'intera durata dell'anno escluse le festività, può comportare ulteriori introiti generati dalla vendita dell'olio e del pannello di soia. Le spese sono ripagate dagli ingressi di denaro e il guadagno è importante in termini quantitativi soprattutto grazie all'elevato valore del pannello, superiore a quello della materia prima.

BIBLIOGRAFIA

- Bonacina C., Cavallini A., Mattarolo L., *Trasmissione del calore*, Padova, Italia: CLEUP Editore
- Cavallini A., Mattarolo L., *Termodinamica applicata*, Padova, Italia: CLEUP Editore
- Chiumenti R., Zoppello G., 1979, *Raccolta e conservazione del mais*, Verona, Italia: L'Informatore Agrario
- De Zanche C., 1985, Manuale della collana "Meccanizzazione Agricola" diretta da Pellizzi G. e Piccarolo P., *Impianti per l'essiccazione dei cereali*, Roma, Italia: REDA edizioni per l'agricoltura
- Madureri Ezio, 1995, *Storia della macinazione dei cereali, Volume II, Conservazione, essiccazione e pulitura*, Pinerolo, Italia: Chiriotti
- AA.VV., 1985, Test reference year try, *Data Sets for Computer Simulations of Solar Energy Systems and Energy Consumption in Buildings*, Commission of the European Communities, Directorate General XII for Science, Research and Development
- Lazzarin R., Dispense del corso di Gestione dell'Energia del corso di laurea magistrale in Ingegneria Gestionale, anno accademico 2008-2009
- Spiller C., Tesi di Laurea "Analisi energetica di un'azienda di confetture", Relatore: Prof. Lazzarin R., Correlatore: Ing. Busato F., a.a. 2004-2005
- Schede tecniche della torre di essiccazione dell'azienda Doni Silvano redatte dall'azienda fornitrice Minute
- Schede tecniche dell'impianto di essiccazione dell'azienda Doni Silvano riferite alle apparecchiature complementari redatte dall'azienda fornitrice Mulmix
- Schede tecniche dell'impianto di termofiocatura dell'azienda Doni Silvano redatte dall'azienda fornitrice Bocchi
- Sito dell'azienda fornitrice della torre di essiccazione, Minute – <http://www.officineminute.it>
Novembre 2010
- Wikipedia, L'enciclopedia libera – <http://it.wikipedia.org>
Ottobre/Novembre/Dicembre 2010, Gennaio/Febbraio 2011
- Mercato elettrico – <http://www.mercatoelettrico.org>
Gennaio/Febbraio 2011
- Autorità dell'energia – <http://www.autorita.energia.it>
Gennaio/Febbraio 2011

- Gestore dei Servizi Elettrici – <http://www.gse.it>
Gennaio/Febbraio 2011
- Savio srl – prodotti per la ventilazione e la deumidificazione –
<http://www.savioclima.it>
Dicembre 2010, Gennaio 2011
- Munters – prodotti per la ventilazione e la deumidificazione –
<http://www.munters.it>
Dicembre 2010, Gennaio 2011
- Ventilazione Industriale srl – prodotti per la ventilazione e la depolverazione –
<http://www.ventilazioneindustriale.it>
Dicembre 2010, Gennaio 2011
- Tecnofood Italia - impianti di termofiocatura – <http://www.tecnofooditalia.com>
15 Dicembre 2010
- Cmf Italia – impianti di termofiocatura – <http://www.cmf-italia.com>
15 Dicembre 2010
- Relazione tecnico-economica di un impianto di cogenerazione per l'azienda
Corallo redatta dall'azienda NCSI – <http://www.ncsi.it>
15 Gennaio 2011
- Caso studio di un impianto di cogenerazione ad olio vegetale redatta dall'ente
ENAMA – <http://www.progettobiomasse.it>
15 Gennaio 2011
- Brochure sui cogeneratori a motore ad olio vegetale redatta dall'azienda
Etabeta Energia – <http://www.etabetaenergia.com>
18 Gennaio 2011
- Documentazione relativa ai prodotti per la spremitura meccanica dei semi
vegetali realizzati dall'azienda Cecchetti – <http://www.crpa.it>
18 Gennaio 2011