



**Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali
UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE**



**LABORATORIO DI METODI E TECNICHE PER
L'INNOVAZIONE**

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

**STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET
ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE**

Sommario.

Introduzione al presente lavoro.....	3
1 - Materie prime disponibili sull'Appennino Tosco-Emiliano.....	4
2 - La filiera di produzione del pellet: fasi tipo e parametri di processo.	6
2.1 - Descrizione della filiera.....	6
2.2 – Consumi energetici e analisi di costo dell'attuale processo.....	9
3 – Normative di prodotto.....	11
4 – Analisi delle tecnologie impiegate nella filiera di produzione del pellet di qualità.....	12
4.1 – Cippatrici e trituratori.....	12
4.1.1 – Cippatrici.....	13
4.1.2 – Trituratori.....	19
4.1.2.1- Macchine per la triturazione primaria.....	19
4.1.2.2- Macchine per la triturazione secondaria.....	23
4.1.3 – Macchine combinate.....	25
4.1.4 – Grafici e tabelle di confronto tra le varie tipologie di macchine.....	26
4.2 - Essiccatori.....	30
4.2.1 - Essiccatori a tamburo rotante.....	30
4.2.2 - Essiccatori a letto fluido.....	31
4.2.3 - Essiccazione meccanica.....	31
4.2.4 - Essiccatori a cella.....	32
4.2.5 - Essiccatori sottovuoto.....	32
4.3 - Cubettatrici.....	33
4.3.1 - Classificazione, tipologie costruttive e parametri operativi.....	34
4.3.2 - Analisi comparativa della caratteristica di funzionamento.....	42
5 – Considerazioni sulle tecnologie impiegate nell'attuale processo e opportunità di innovazione.....	45
Fonti.....	47

Introduzione al presente lavoro.

Il presente lavoro mostra i risultati ottenuti dall'analisi dello stato dell'arte delle attuali tecnologie impiegate nella produzione del pellet di qualità al fine di:

1. caratterizzare la filiera di produzione del pellet dal punto di vista operativo;
2. individuare eventuali carenze e/o mancanze del processo attuale;
3. individuare le opportunità di innovazione offerte;

Il lavoro si è articolato nelle seguenti fasi:

1. Ricerca delle tipologie e delle quantità di materia prima disponibile per la produzione del pellet di legna, nella zona dell'Appennino Tosco-Emiliano;
2. Studio della filiera tipo di produzione del pellet di qualità sulla base della materia prima disponibile, cercando le informazioni disponibili sugli impianti attualmente realizzati e funzionanti. Caratterizzazione delle singole fasi del processo dal punto di vista dei parametri operativi e dei consumi energetici, valutazione dei costi di produzione;
3. Ricerca delle normative riguardanti le caratteristiche del prodotto pellet di legna;
4. Studio e descrizione delle tecnologie e delle macchine attualmente impiegate nella filiera e analisi critica delle caratteristiche di funzionamento. Classificazione delle varie tipologie di macchine e identificazione dei parametri di lavoro (potenze installate, produzioni orarie, pesi e dimensioni, ove disponibili);
5. Analisi critica del processo alla luce dei risultati delle fasi precedenti ed identificazione delle opportunità di innovazione;

Le fonti considerate nel presente studio per la ricerca delle informazioni sono state riportate in fondo alla presente relazione. In allegato, infine, si riporta anche il testo della raccomandazione del CTI sulle caratteristiche chimiche e fisiche del pellet di qualità.

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

1 - Materie prime disponibili sull'Appennino Tosco-Emiliano.

Una stima delle quantità e una classificazione della materia prima disponibile nell'area dell'Appennino Tosco-Emiliano per la produzione del pellet di qualità è presentata nel prospetto seguente (fonte COSEA):

Produzione Pellet di qualità (6mm)						
Provenienza	Essenze	Modalità Conferimento	Tempistica Conferimento	Umidità	Quantità di partenza	Stima a 10 anni
Legno vergine proveniente dal recupero di scarti di falegnameria, recupero pallet e altro materiale di recupero non contaminato	Pino, Abete, Pioppo	10% sottoforma di segatura, il restante in tronchi e pezzi del diametro medio 20cm	Suddiviso equamente nell'arco dei 12 mesi	10%	5000 T/anno	6000 T/anno
Legno vergine proveniente dalla gestione forestale	65% (Abeti, Pini) 35% (Faggi, Quercie e altre latifoglie)	Conferito sottoforma di cippato	Conferito nei mesi non vegetativi (novembre-febbraio)	35-50%	25000 T/anno	50000 T/anno
Legname proveniente dalla gestione del verde urbano (Grosse potature)	Platani, ippocastani, tigli e in parte minore conifere	Conferito sottoforma di grossi tronchi e rami	Conferito il 60% nel periodo febbraio aprile, il restante settembre - novembre	45-50%	2000 T/Anno	10000 T/anno

Il volume totale di materia prima disponibile è stimata intorno alle 32000 t/anno delle quali una elevata percentuale fornita sottoforma di cippato umido nei mesi che vanno da novembre a febbraio. La quota parte di materia prima direttamente pellettizzabile fornita sottoforma di segatura a bassa umidità è invece decisamente trascurabile rispetto al volume totale disponibile. In proiezione su dieci anni, si può osservare che mentre la materia prima derivante da scarti di falegnameria è destinata a rimanere costante, la produzione derivante dallo sfruttamento forestale e dal verde urbano è prevista aumentare in maniera considerevole.

Andando a considerare la quantità di materia prima disponibile nei primi anni di sfruttamento boschivo e considerando una percentuale di umidità tra il 40 e il 50 % si può ricavare un volume di pellet che in peso risulta di:

18000 t/anno

con un potere calorifico inferiore di circa 18 MJ/kg. La quantità annuale di potenziale termico disponibile per le utenze risulta pertanto di:

324000 MJ/anno

considerando che per ciascuna unità abitativa (di seguito U.A.) la potenza termica installata è di circa 24 kW e supponendo, nella peggiore delle ipotesi, che tale potenza venga utilizzata costantemente per quattro ore giornaliere nei mesi da novembre a marzo (ovvero 140 gg/anno), l'energia consumata risulta:

13500 kWh per U.A.

Operando le opportune conversioni delle grandezze termiche, si può ricavare una stima approssimata del bacino di utenza che può essere soddisfatto da energia termica prodotta dalla combustione del pellet di qualità, ovvero:

6600 U.A.

Tale potenzialità, verosimilmente, risulta essere decisamente interessante per le realtà urbane dell'Appennino Tosco-Emiliano soprattutto in prospettiva futura visto che le stime a dieci anni prevedono una quantità di materia prima disponibile circa doppia rispetto a quella iniziale. Dal punto di vista economico considerando il prezzo di vendita attuale del pellet che risulta di 135 €/T, il volume di fatturato derivante dallo sfruttamento della filiera risulterebbe di:

2,430 M€/anno

Vista la quantità di materia disponibile sottoforma di cippato ad elevata umidità, un problema assolutamente non trascurabile è costituito dal suo stoccaggio poiché:

1. è necessario un volume notevole, stimabile in 75000 m³;
2. il tempo di permanenza del cippato potrebbe favorirne la fermentazione con un conseguente decadimento delle caratteristiche fisiche per cui bisognerebbe prevedere sistemi di controllo e abbattimento dell'umidità;

Questo suggerisce di processare e trasformare immediatamente la materia disponibile in pellet in modo da diminuire lo spazio necessario allo stoccaggio passando da 75000 a 30000 m³ ed evitare così il processo di fermentazione.

2 - La filiera di produzione del pellet: fasi tipo e parametri di processo.

Nel presente capitolo verrà sinteticamente descritta la filiera di produzione dei pellet di qualità nelle singole fasi cercando, ove possibile, di caratterizzarle dal punto di vista dei parametri di processo in ingresso e in uscita. Vi è comunque da sottolineare il fatto che in Italia non si trovano ancora realtà produttive che sfruttano i cascami delle puliture forestali, la maggior parte del pellet prodotto deriva dalla trasformazione degli scarti delle industrie del legno (falegnamerie, segherie, etc.) che è materia prima direttamente impiegabile nelle macchine cubettatrici attualmente in commercio, questo è dovuto ovviamente ad un mercato ancora in divenire. Impianti di produzione che realizzano il processo di trasformazione relativo all'intera filiera sono presenti in Austria, Germania, Svezia e Norvegia dove vi è un elevato volume di materia prima disponibile sotto forma di biomassa forestale e realtà di mercato ormai ampiamente sviluppate rispetto a quella italiana. Dallo studio delle quantità disponibili sull'Appennino Tosco-Emiliano, riportato nel capitolo precedente, si evince che la materia disponibile durante l'anno vegetativo può essere conferita sotto forma di:

1. 2% segatura con dimensioni medie di 2-3 mm e umidità del 10-12%;
2. 80% cippato con dimensioni medie 20 X 20 X 40 mm e umidità del 50%;
3. 18% tronchi o pezzi con dimensioni medie di 20 cm e più, e umidità del 50%;

Essendo le caratteristiche del pellet di qualità ben definite da normativa in particolare in termini di umidità residua che non deve superare il 10% (espressa in peso relativamente al legno anidro) e potere calorifico inferiore che deve essere maggiore di 17 MJ/kg, appare evidente che la filiera di produzione non può che essere variegata in termini di fasi di trasformazione in funzione dello stato di fornitura del legno da elaborare. In particolare mentre la segatura può essere direttamente pellettizzata, il cippato ed i tronchi richiedono fasi preventive di scortecciatura, macinazione, raffinazione ed essiccazione che influiscono sui costi di processo ed in definitiva sul costo finale del prodotto. Infatti da studi condotti dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali [1] è stato dimostrato che l'indice di redditività di una filiera di produzione del pellet di qualità è sensibilmente dipendente dal grado di umidità contenuto nella materia prima di partenza poiché è il parametro che influisce negativamente sulla potenza assorbita in ciascuna delle fasi del processo di trasformazione, tra tutte le fasi della filiera, però, l'essiccazione è quella che risente maggiormente del grado di umidità in termini di potenza specifica assorbita. La conclusione dello studio citato dimostra che la convenienza attuale è di partire da materiale secco triturato (ovvero segatura) in modo tale da evitare i costi sia della triturazione sia della necessaria essiccazione, l'opportunità di partire da cascami di bosco può divenire conveniente dal momento in cui si adottino processi senza essiccazione "tradizionale".

Proprio per la varietà qualitativa del materiale di partenza è difficile poter caratterizzare in maniera univoca il processo tecnologico di produzione del pellet dal punto di vista delle fasi e dei parametri, si farà pertanto riferimento alla situazione più sfavorevole ovvero il caso in cui si debba partire da materiale di esbosco di cui al punto 3.

2.1 - Descrizione della filiera.

In base alle considerazioni fatte in premessa, le fasi tipo di una filiera di produzione del pellet di qualità a partire da cascami di bosco sono le seguenti:

1. Cippatura;
2. Deferrizzazione;
3. Essiccazione;
4. Triturazione;

5. Condizionamento;
6. Cubettatura;
7. Raffreddamento e vagliatura;
8. Insacchettatura;

Di seguito viene fornita una ampia descrizione delle singole fasi con riferimento ai parametri di processo e ai consumi specifici medi ove noti, in figura 1 è presentato un diagramma della filiera con le trasformazioni che il materiale subisce in ciascuna lavorazione.

Cippatura: Questa fase trae il nome dal tipo di prodotto che si ottiene in uscita costituito da “chips” di legna le cui dimensioni risultano, indicativamente, di 40 X 20 X 10 mm anche se la pezzatura del semilavorato in uscita varia in funzione del tipo di cippatrice. L’elevata percentuale di umidità del materiale in ingresso può portare a malfunzionamenti nelle macchine che utilizzano una griglia di vagliatura all’uscita poiché se la mesh della griglia è molto fine si possono creare intasamenti con un aumento della potenza assorbita. Di solito la cippatura del materiale di esbosco viene eseguita in luogo al fine di poter aumentare la quantità di legna trasportabile a parità di volume di carico, occorre però che il cippato venga essiccato e lavorato il prima possibile al fine di evitare l’innesco del processo di fermentazione biologica che avviene tanto più velocemente quanto più alto è il grado di umidità. Le macchine attualmente presenti sul mercato arrivano fino ad una produzione giornaliera di 50 ton, indicativamente la potenza specifica richiesta nell’operazione di cippatura è stimabile in 15 kWh per tonnellata di materiale cippato. La percentuale di umidità del legno non diminuisce in maniera significativa a seguito della lavorazione meccanica che subisce.

Deferizzazione: Al fine di evitare problemi tecnici nelle macchine a valle della filiera il cippato prodotto viene depurato dalle parti ferrose che vi possono essere a seguito delle operazioni di esbosco. Tipicamente la deferizzazione avviene mediante l’uso di magneti in grado di separare le particelle ferrose se presenti.

Essiccazione: La fase di essiccazione riduce l’umidità del cippato da quella iniziale fino ad un valore in uscita del 12% e una temperatura di circa 100 °C anche se questo valore è molto aleatorio. La collocazione di questo processo immediatamente dopo la cippatura è dovuta ai seguenti motivi:

1. Eliminare la possibilità di inizio della fermentazione della biomassa a seguito dell’acqua in essa contenuta;
2. Ottenere un materiale che possa essere triturato con le tecnologie attualmente a disposizione le quali non tollerano per il buon funzionamento elevati gradi di umidità;
3. Portare l’umidità in uscita ai valori richiesti per la cubettatura;

L’essiccazione del cippato avviene mediante la classica deumidificazione termica ad aria calda poiché le tecnologie di triturazione e cubettatura attualmente utilizzate non consentono una disidratazione drastica della materia prima. La capacità di evaporazione dell’impianto in termini di portata di acqua estratta dalla materia prima dipende da:

1. pezzatura del materiale trattato;
2. temperatura dell’aria in ingresso;
3. temperatura dell’aria in uscita;
4. coefficiente di scambio globale;
5. portata d’aria calda;
6. portata di materiale;
7. umidità dell’aria in ingresso;
8. umidità del materiale in ingresso;

Dal punto di vista dell'energia richiesta non si trovano stime precise e, soprattutto, generalizzabili comunque un valore indicativo della potenza necessaria alla essiccazione è riportato in [2] dove il consumo riferito alla tecnologia attuale è di 1 MWh per tonnellata d'acqua evaporata, vi è da dire che questo valore è abbastanza consolidato in letteratura. Inoltre la temperatura dell'aria in ingresso non deve eccedere i 200 °C al fine di non perdere le sostanze più volatili contenute nel legno che sono anche quelle che contribuiscono al potere calorifico finale del prodotto, tale valore pone un limite alla capacità di evaporazione.

Triturazione: Questa fase è una successiva triturazione del cippato che viene ridotto a dimensioni massime dell'ordine dei 2.5 mm affinché possa essere pellettizzato. Le macchine impiegate sono molto simili alle cippatrici a tamburo ma hanno dei vagli con griglie decisamente più fitte, per questo motivo sono soggette ad inceppamenti qualora l'umidità del materiale superi un livello stimabile intorno al 15%. La potenza specifica installata è dello stesso ordine di grandezza delle cippatrici a tamburo quindi 15 kWh per tonnellata di materiale tritato.

Condizionamento: Questa fase non è detto che sia sempre presente. In essa il materiale viene additivato con sostanze grasse di origine vegetale (tipo melasso, amidi etc.) per favorire il processo di estrusione e compattazione nella successiva fase di cubettatura. La potenza per il condizionamento è relativa all'azionamento del mescolatore ed è trascurabile rispetto a quella richiesta dalle altre fasi della filiera.

Gli additivi utilizzati aumentano il potere calorifico inferiore del prodotto ma fanno aumentare anche il costo del pellet, in Italia attualmente non sono utilizzati e viene sfruttato il potere legante che deriva dalla trasformazione che la lignina subisce nella successiva fase di cubettatura. L'umidità rimane costante ed uguale a quella in uscita dalla triturazione anche se, essendo il particolato molto fine, in questa fase si può avere un aumento qualora esso non sia sufficientemente protetto.

Pelletizzazione: In questa fase il tritato di legna viene densificato conferendogli la forma del prodotto finale. Una dettagliata descrizione del processo verrà fornita in seguito comunque i parametri di processo che influiscono sulla cubettatura eseguita con le tecnologie attuali sono:

1. umidità in ingresso;
2. umidità in uscita imposta non maggiore del 10%;
3. essenza trattata;

Il valore dell'umidità all'ingresso della macchina non può essere superiore al 12% essenzialmente perché il prodotto sarebbe fuori normativa infatti la riduzione di umidità a seguito del processo è trascurabile e comunque tale da non farlo rientrare nei limiti consentiti (10%); la potenza assorbita nella pellettizzazione inoltre aumenta con il grado di umidità del materiale in ingresso poiché ne ostacola la compattazione essendo l'acqua incompressibile. Anche la potenza specifica è molto variabile poiché su di essa influisce non poco il tipo di essenza in lavorazione, in generale essenze dure richiedono potenze specifiche maggiori di quelle necessarie per i tipi di legno morbidi; un target di riferimento abbastanza consolidato in letteratura è 60 kWh/ton di pellet prodotta. Il materiale in uscita a seguito del processo di trasformazione che subisce con l'attuale tecnologia di cubettatura ha una temperatura di superficie di circa 80-90 °C per cui per poter essere insacchettato ha bisogno di un raffreddamento preventivo.

Raffreddamento e vagliatura: Il pellet in uscita dalla filiera viene raffreddato per ventilazione mediante il sistema di convogliamento alla insacchettatrice alla quale arriva ad una temperatura non superiore ai 20 °C. Al fine di separare l'aggregato dal materiale in polvere che fatalmente può derivare dalla lavorazione, viene preventivamente eseguita una vagliatura a letto vibrante, la polvere

ottenuta viene immessa nuovamente nel processo. Grazie alla compattazione subita e alle caratteristiche fisiche conferite, il prodotto non è più sensibile all'umidità ambiente per cui non sono necessari particolari accorgimenti.

Insacchettatura: Il pellet viene stoccato in “big-bag” ovvero sacchi con una capacità di circa 15 kg di prodotto. Tali sacchi sono pronti per essere distribuiti all'utenze.

2.2 – Consumi energetici e analisi di costo dell'attuale processo.

Avendo caratterizzato le varie fasi della filiera dal punto di vista della potenza specifica richiesta, si eseguirà in questo paragrafo una stima dei costi energetici richiesti per la produzione di una tonnellata di pellet riportati al suo contenuto energetico.

Considerando una tonnellata di prodotto, il contenuto energetico risulta di:

$$E = 5000 \text{ kWh/t}$$

la potenza impegnata da ciascuna fase risulta:

- cippatura: 15 kWh/t (elettrica) = 0.3% E
- essiccazione: 350 kWh/t (termica) = 7% E
- triturazione: 15 kWh/t (elettrica) = 0.3% E
- cubettatura: 60 kWh/t (elettrica) = 1.2% E

considerando che il costo dell'energia elettrica risulta di 0.18 €/kWh e utilizzando metano quale combustibile per l'essiccazione il cui costo è di 0.12 €/kWh, si hanno i seguenti costi:

- cippatura: 2.7 €/t;
- essiccazione: 42 €/t;
- triturazione: 2.7 €/t;
- cubettatura: 10.8 €/t;

il costo totale dell'energia impegnata risulta di 58.2 €/t.

Analizzando la ripartizione delle quantità energetiche rispetto al contenuto termico specifico del pellet e l'incidenza di ciascuna fase sul costo energetico totale, appare come dato dimostrato che la fase di essiccazione con deumidificazione termica risulta essere la criticità evidente del processo qualora si pensi di utilizzare cippato come materia prima di partenza; questo conferma le considerazioni fatte in premessa.

**STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET
ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE**

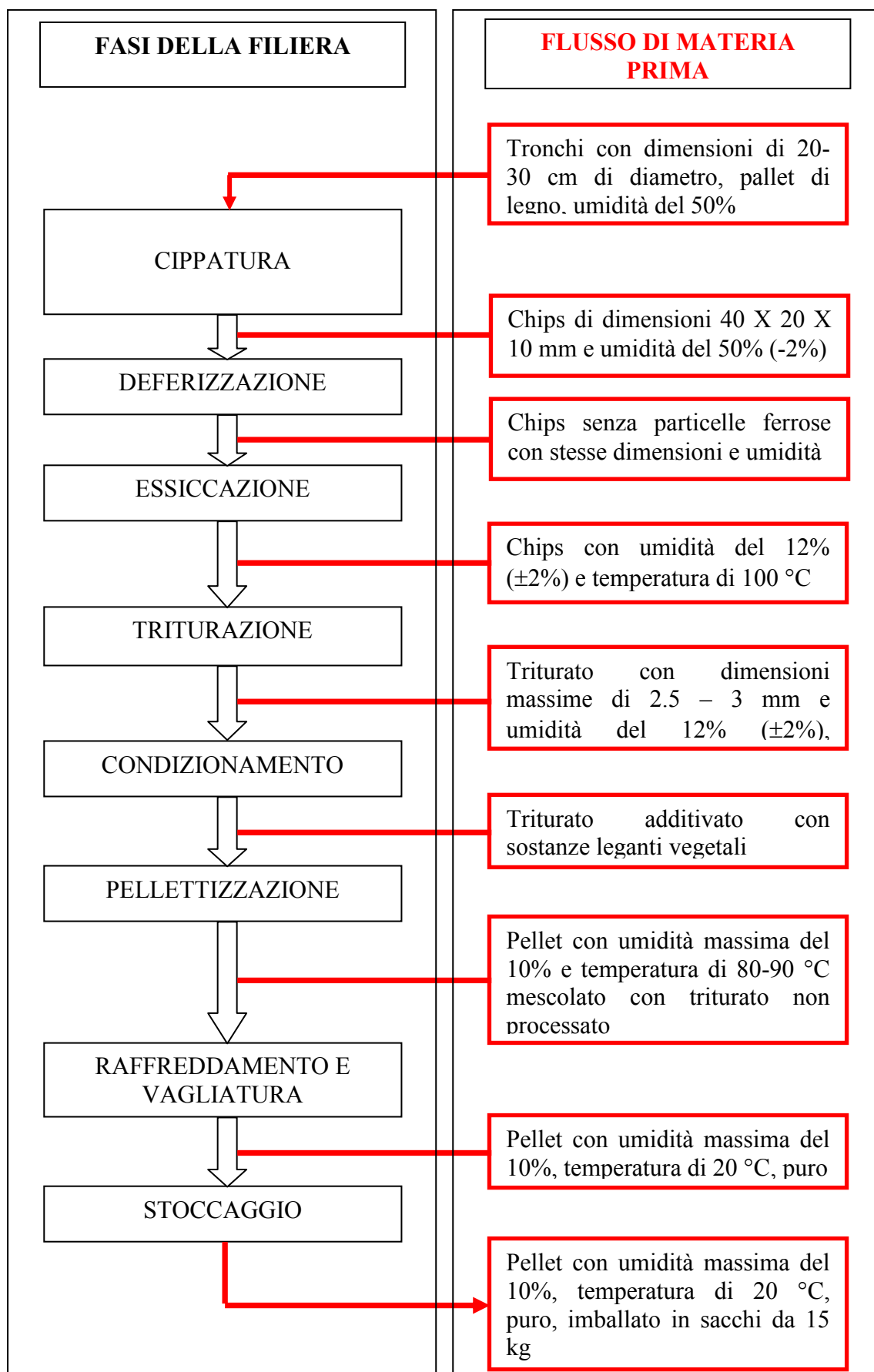


Figura 1: schema della filiera di produzione del pellet con le relative fasi e il flusso di materiale processato.

3 – Normative di prodotto.

Le normative che stabiliscono le caratteristiche chimiche e fisiche del pellet di legna ed i criteri da adottare per la loro determinazione non sono ancora state armonizzate a livello europeo anche perché fino ad oggi tale esigenza non era sentita. Come riferimento possono essere però considerate le normative in vigore nei paesi che risultano i maggiori produttori di pellet ed in particolare: Austria, Germania, Svezia e Stati Uniti.

La normativa che costituisce un punto di riferimento è senza dubbio quella austriaca ONÖRM M 7135 la quale definisce i requisiti sia dei pressati di legno (HP) che dei pressati di corteccia (RP) utilizzati come combustibili solidi e fornisce i criteri da seguire per la verifica di tali requisiti. Sia il pellet di legna sia quello derivante dalla corteccia sono classificati in tre categorie dimensionali: da quelli cosiddetti “minuti” impiegati in impianti di piccole e medie dimensioni con alimentazione automatica, fino ai bricchetti utilizzati nelle apparecchiature a caricamento manuale. Il pellet della categoria HP1 deve possedere le seguenti caratteristiche:

- diametro compreso tra 4 e 10 mm e lunghezza non superiore a cinque volte il diametro;
- peso specifico superiore a $1,12 \text{ kg/dm}^3$;
- umidità $< 10\%$;
- P.C.I. riferito allo stato anidro $> 18 \text{ MJ/kg}$;

La materia prima di partenza deve essere legno vergine privo di qualsiasi additivo chimico, possono essere invece impiegati “termoagglutinanti vegetali” chimicamente non modificati (in altre parole farine di frumento, segale, amido, etc.). E' prevista infine l'effettuazione di un test di sfregamento al fine di verificare la resistenza del pellet alle manipolazioni (sfarinamento). Dal punto di vista procedurale occorre che il fabbricante sia iscritto al registro dei produttori a norma, sottoponendo annualmente il pellet prodotto a un controllo effettuato da un ente certificato.

La normativa tedesca DIN 51731 prevede una classificazione in cinque categorie la quinta delle quali corrisponde alla classe HP1 austriaca per ciò che riguarda le dimensioni limite del prodotto. Più restrittivi risultano i limiti ammessi per il contenuto di metalli pesanti potenzialmente tossici.

Anche la normativa svedese SS 1871120 non si discosta dalle precedenti, le categorie merceologiche sono tre classi individuate da tre differenti lunghezze del pellet. Dal punto di vista dei requisiti termici, tale normativa prevede un limite inferiore del P.C.I. più basso rispetto a quello richiesto dalla norma austriaca ed è di 17 MJ/kg .

In letteratura sono indicate come poco interessanti, rispetto a quelle fino a qui sinteticamente descritte, le normative statunitensi poiché decisamente molto più larghe come prescrizioni rispetto alle norme austriache. Tali normative classificano il pellet in due categorie differenti (premium e standard) in base al contenuto di cenere (1% e 3% rispettivamente).

Per quanto riguarda l'Italia, al momento, non esiste alcuna normativa dedicata al pellet quindi i produttori assumono come riferimento gli standard della normativa austriaca. Dal punto di vista delle caratteristiche merceologiche e delle emissioni derivanti dalla combustione sono da ritenersi valide le disposizioni contenute nel DPCM 8/3/2002, mentre per una vera e propria normativa nazionale occorre attendere l'entrata in vigore della raccomandazione del Comitato Termotecnico Italiano CTI-R 04/5 che comunque può tutt'ora essere presa come un buon riferimento. Tale raccomandazione, il cui testo è riportato in allegato, classifica il pellet in quattro categorie in base alla presenza o meno di additivi vegetali, in funzione delle dimensioni e della materia prima di origine. Queste categorie sono:

- **Cat A con e senza additivi:** diametro 6 mm o 8 mm, lunghezza compresa tra 1 e 5 o 4 volte il diametro, umidità $< 10\%$, P.C.I. $> 16.9 \text{ MJ/kg}$; materia di origine: tronchi di latifoglie, tronchi di conifere, legno non trattato derivante dall'industria del legno privo di

corteccia, legno non trattato post-consumo privo di corteccia; miscele delle categorie precedenti;

- **Cat B:** dimensioni e contenuto di umidità identici alla categoria precedente, P.C.I. > 16.2 MJ/kg; materia di origine: Biomassa legnosa non trattata, biomassa erbacea non trattata, frutti e semi non trattati, sansa di olive esausta, miscele e miscugli delle categorie precedenti;
- **Cat C:** diametro tra 10 e 25 mm, lunghezza compresa tra 1 e 4 volte il diametro, umidità <15%, nessuna prescrizione sul P.C.I. ma obbligo di indicarne il valore; materia di origine: le stesse indicate per la categoria B;

Come per la normativa austriaca, anche per quella italiana sono indicate le procedure per la verifica di questi requisiti di prodotto. Si può osservare che in tutte le normative attualmente in vigore non esistono limiti o prescrizioni sulla forma che il pellet deve avere a parte le dimensioni che devono essere rispettate.

A livello comunitario le commissioni normative stanno lavorando a prescrizioni volte ad uniformare le classi dimensionali come necessità primaria per lo sviluppo ordinato di un mercato sovranazionale delle stufe e dei bruciatori. A tale scopo il CEN ha istituito il CEN/TC 335 il quale sulla base di 24 norme di prodotto specifiche elaborerà un regolamento CE nel quale saranno uniformate sia le caratteristiche fisiche che quelle chimiche del pellet, più difficile appare la possibilità di poter dettare riferimenti e standard in merito alle materie prime di partenza e alla loro origine.

4 – Analisi delle tecnologie impiegate nella filiera di produzione del pellet di qualità.

Nel presente capitolo verranno presentati in forma critica, i risultati ottenuti dall'indagine di mercato sulle tecnologie adottate nelle macchine che sono impiegate nella filiera di produzione del pellet volta a caratterizzarle dal punto di vista delle caratteristiche di funzionamento e delle tipologie costruttive. In particolare si sono considerati:

1. Cippatori e triturator;
2. Essiccatori;
3. Cubettatrici;

Le informazioni sono state ricavate compiendo un'indagine sui cataloghi tecnici disponibili in rete oppure, ove necessario, direttamente richiesti ai costruttori, in modo da avere una provata certezza della fonte. Mentre per la cippatura, la triturazione e la cubettatura sono individuati in maniera univoca limiti e target di mercato, altrettanto non si può affermare per l'essiccazione nella quale la taglia e le caratteristiche di impianto sono riferite al caso particolare.

4.1 – Cippatrici e triturator.

La differenza tra le due tipologie di macchine consiste sostanzialmente nella pezzatura del prodotto che si ottiene alla fine della lavorazione. La cippatrice produce infatti i cosiddetti "chips" di legno, ovvero piccole scaglie di legno di dimensioni più o meno omogenee e standard attorno ai 40 X 20 X 10 mm che possono variare lievemente a seconda del tipo di cippatrice; nella categoria dei triturator invece il prodotto in uscita dipende da molte variabili, quali la pezzatura in ingresso, l'umidità del materiale in ingresso e la tipologia costruttiva. In questo caso, una volta scelta la tipologia di macchina trituratrice e le caratteristiche del materiale in ingresso, la variabile principale che determina le caratteristiche del prodotto in uscita è la pezzatura della polvere che si vuole ottenere: infatti se il trituratore è destinato ad una triturazione primaria la pezzatura in uscita sarà più o meno irregolare a seconda del dispositivo di taglio, ma comunque di dimensioni grossolane (riferite a quelle necessarie per la cubettatura) fino ad oltre 100 mm, mentre se il trituratore è

progettato o regolato per effettuare una triturazione finale, da esso ne uscirà una pezzatura più uniforme e di dimensioni sicuramente molto più ridotte. In generale, a seconda degli usi del triturato prodotto in uscita, le dimensioni che si possono ottenere a valle di un processo di triturazione vanno da polvere di legno (dell'ordine di grandezza di 1\10mm) fino al truciolo grossolano (con dimensioni di 5-10 mm). I concetti di triturazione primaria e secondaria verranno meglio descritti nel paragrafo dedicato alle macchine per la triturazione.

4.1.1 – Cippatrici.

Le macchine per la cippatura si possono classificare in installazione mobile o fissa a seconda dell'utilizzo a cui sono destinate e possono impiegare varie motorizzazioni:

- motore autonomo diesel o benzina per le macchine mobili più grandi;
- presa di forza del trattore per quelle mobili di dimensioni e potenze più modeste;
- elettrica per quelle fisse;

Le macchine mobili vengono usate per cippare in loco legname e ramaglie da puliture di sottobosco, verde cittadino o addirittura interi tronchi inutilizzati, mentre quelle fisse possono venire utilizzate sia per tronchi interi che per scarti di falegnameria, a seconda delle potenze installate e delle dimensioni.

Le cippatrici più comuni sono del tipo a disco oppure a tamburo, possono avere alimentazione del materiale automatica o manuale a seconda dei casi, frequentemente vengono utilizzati dei rulli idraulici che spingono il materiale verso le lame. Esistono anche cippatrici a vite (conica o cilindrica) le quali però sono poco utilizzate comunque, dai pochi dati a disposizione, sembrerebbe però che non abbiano particolari vantaggi rispetto alle altre tipologie di macchine.

Cippatrici a disco.

La cippatrice a disco sfrutta una serie di lame montate in direzione radiale su un disco rotante le quali tagliano il materiale. Le macchine mobili sono di potenze limitate e cippano rami o tronchi di dimensioni ridotte poichè gli ingombri della macchina devono consentirne il trasporto; macchine di dimensioni grandi (come ad esempio le Brucks) sono in grado di cippare anche grossi tronchi, ma sono realizzate in costruzione esclusivamente fissa.

In Italia, ma anche in altri paesi d'Europa, le cippatrici a disco sono le più diffuse e sono dedicate alla cippatura preferibilmente di fusti (normalmente fino ad un diametro massimo di 250-300 mm), ottenendo un cippato di dimensioni mediamente comprese tra gli 8-15 mm, con minori consumi rispetto alla equivalente macchina a tamburo. In figura 2 è presentata una macchina a disco in costruzione fissa mentre in figura 3 ne è presentata una versione mobile, con alimentazione a presa di forza dalla macchina operatrice.

Dal punto di vista costruttivo le cippatrici a disco sono macchine semplici, infatti il disco svolge sia la funzione principale di tagliare il legno, sia quella di provvedere alla sua espulsione. In questo tipo di macchine l'umidità del legno sembra non essere un problema data l'assenza di griglie di vagliatura soggette ad intasamenti. Questa semplicità si traduce nella possibilità di ottenere macchine con portate relativamente alte rispetto a quelle ottenibili con la cippatrice a tamburo (a parità di potenza); tutto questo si può notare osservando il grafico di figura 4, ottenuto dai dati riferiti esclusivamente a macchine mobili con motorizzazioni autonome diesel o benzina. Si osservi inoltre che la potenza specifica installata è di 15 kWh per tonnellata di materiale cippato.

Un limite operativo di queste macchine è la necessità di riaffilare le lame ogni 25-50 ore, esistono comunque sistemi brevettati come quello presentato nella figura 5 nel quale le lame sono dischi che possono essere girati ogni qual volta si perde l'affilatura, tale dispositivo consente di arrivare a 170 ore di funzionamento prima della sostituzione completa delle lame.

In tabella 1 sono stati riassunti i prezzi riferiti delle cippatrici a disco nonché le potenze installate e

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

le dimensioni del materiale in ingresso cippabile, è da notare come i costi (a parità di tipologia costruttiva) aumentino all'aumentare del peso della macchina, infatti dato il basso livello di tecnologia utilizzato essi dipendono molto dalla quantità di materiale impiegato nella costruzione.



Figura 2: cippatrice a disco in costruzione fissa.



Figura 3: cippatrice a disco in costruzione mobile alimentata con presa di forza (Pezzolato).

**STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET
ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE**

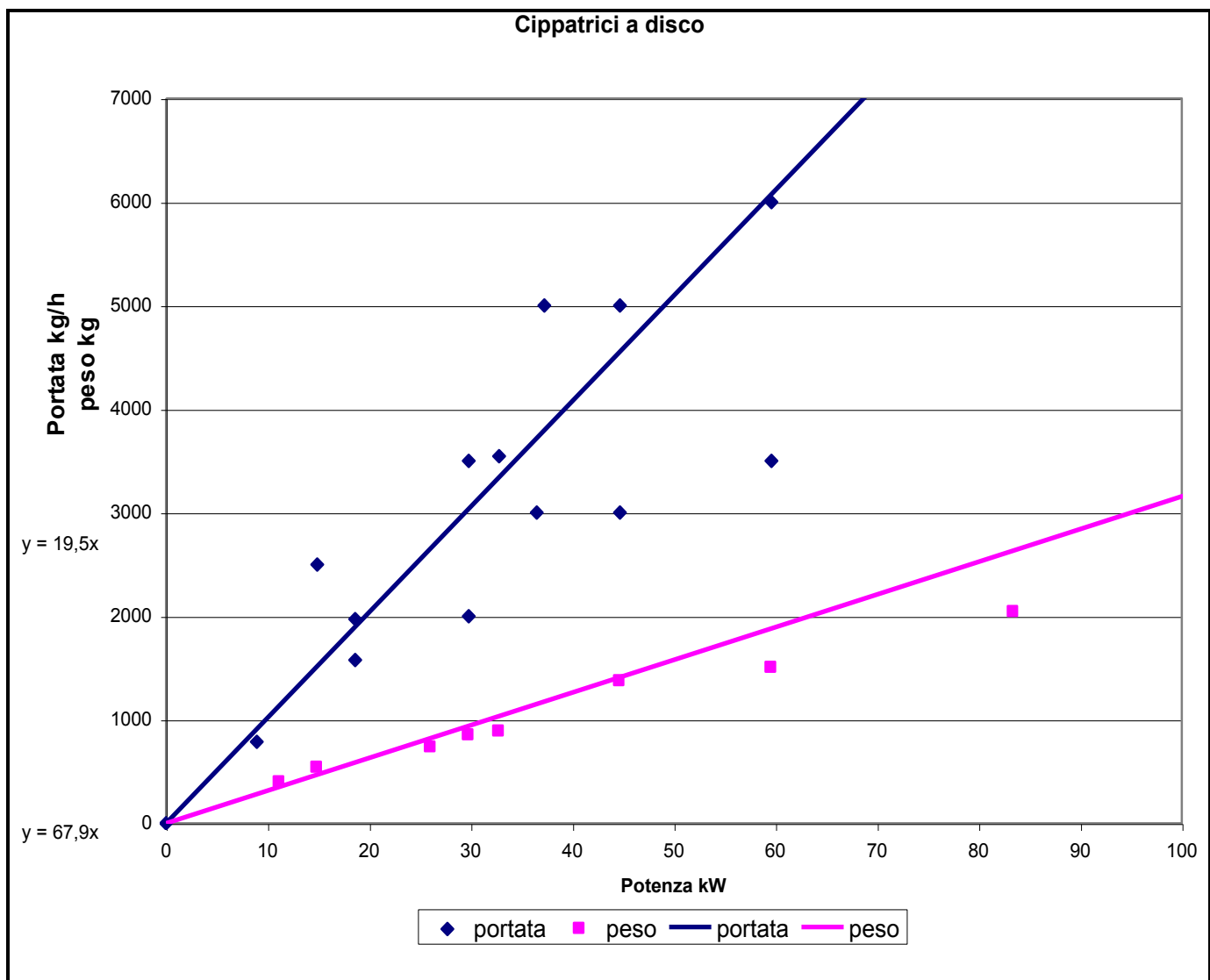


Figura 4: caratteristica di funzionamento delle cippatrici a disco e andamento dei pesi macchina in funzione della potenza installata.

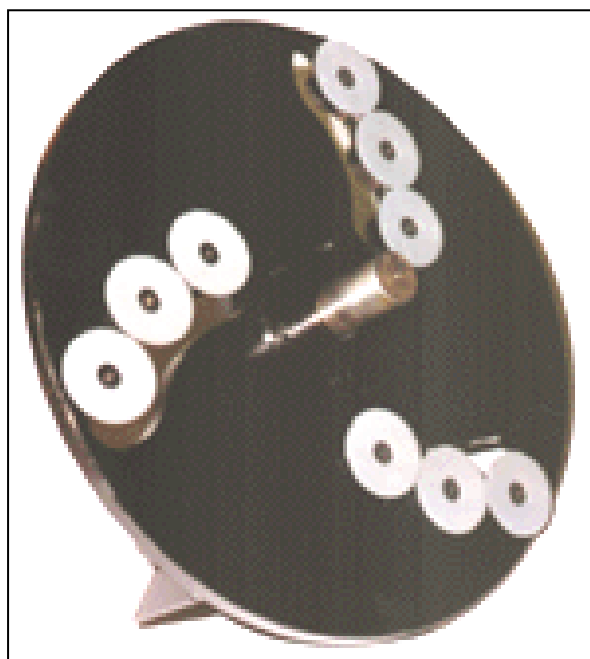


Figura 5: particolare del disco di una cippatrice con lame a disco girevoli.

Tabella 1: caratteristiche delle cippatrici a disco.

	Diametro cippabile (mm)	Potenza richiesta (KW)	Peso macchina (Kg)	Costo (euro)
Cippatrice mobile a disco con presa di forza	150	29	490	8900
	180	44	710	12000
	220	62	860	13500
Cippatrice mobile a disco con motore autonomo	150	27	730	17500
	190	37	1220	25000
	260	52	-	30000

Cippatrici a tamburo.

Le cippatrici a tamburo mobili partono da taglie dimensionali paragonabili a quelle a disco ma arrivano a portate di prodotto lavorato decisamente maggiori. In Italia (ed in Europa) le cippatrici a tamburo sono meno impiegate di quelle a disco perché a parità di diametro cippabile hanno un consumo di potenza maggiore. In questo tipo di macchine l'utensile è costituito da una schiera di lame montate su un tamburo rotante, la dimensione del cippato in uscita è determinata oltre che dal gioco tra lama e controlama anche dal tipo di mesh della griglia di vagliatura. Vi è quindi un parametro in più per poter regolare la finezza del prodotto in uscita, per contro però queste macchine, a causa del loro sistema di taglio, tendono a schiacciare ed a sfibrare il legno (quindi è preferibile usarle per legno duro e fibroso) e possono essere soggette ad intasamenti causati dalla ostruzione dei fori di passaggio della griglia di vagliatura in seguito alla "pasta" di triturato che si viene a creare per l'eventuale eccessivo livello di umidità del materiale trattato. Come quelle a disco, anche le cippatrici a tamburo sono eseguite sia in costruzione fissa che mobile. Queste ultime, a differenze delle cippatrici a disco mobili, con potenze adeguate, possono cippare anche tronchi di 80 cm di diametro grazie al sistema a tamburo che è decisamente meno ingombrante in direzione radiale rispetto al disco; d'altra parte, dal punto di vista costruttivo sono più complicate delle macchine a disco in quanto per espellere il cippato hanno bisogno di un dispositivo dedicato. Nelle attuali costruzioni esso è costituito da una coclea che spinge il cippato verso una ventola di estrazione in modo da essere proiettato all'interno di un tubo orientabile, oppure, semplicemente verso un nastro trasportatore. Uno schema costruttivo è visibile nella figura 6a dove è presentata una cippatrice a tamburo mobile montata su camion (Pezzolato) mentre in figura 6b è mostrata la griglia di vagliatura.

Tali caratteristiche fanno sì che la struttura complessivamente più complicata comporta un maggior peso della macchina ed un maggior consumo rispetto ad una cippatrice a disco di pari portata. Tutto questo lo si può notare dal grafico riportato in figura 7, la potenza specifica infatti sale a 17 kWh per tonnellata di prodotto cippato.

Dal punto di vista del prezzo di vendita purtroppo non si hanno informazioni precise, comunque a parità di portata e potenza installate, la cippatrice a tamburo data la maggior complessità costruttiva ha un costo maggiore della cippatrice a disco.

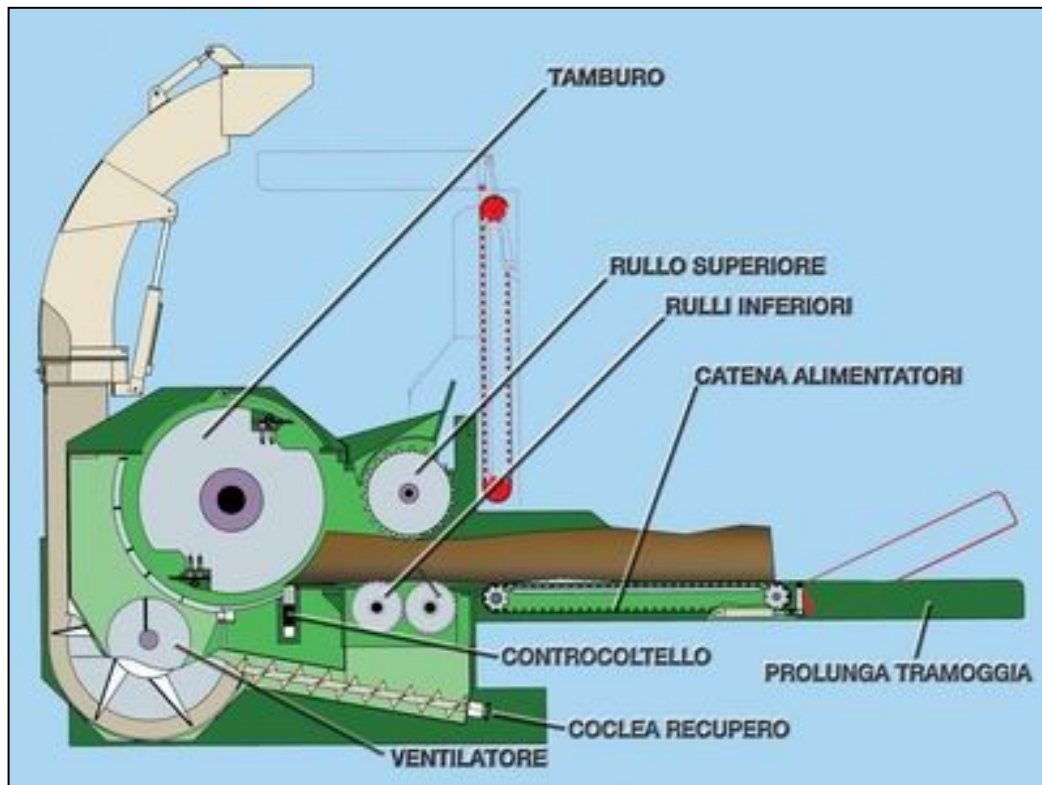


Figura 6a: schema classico di una cippatrice a tamburo.



Figura 6b: Griglia di vagliatura.

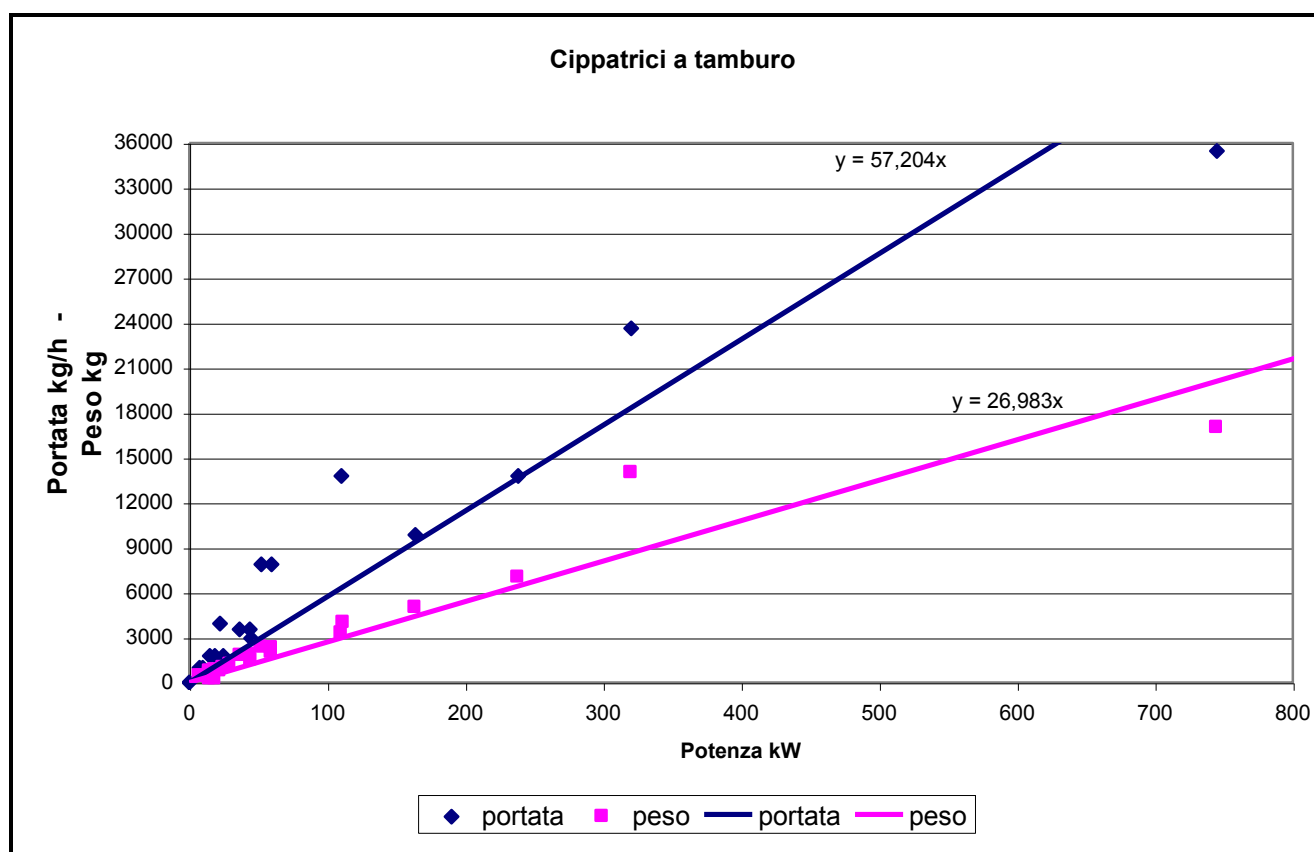


Figura 7: caratteristica di funzionamento e pesi macchina delle cippatrici a tamburo, in funzione della potenza installata.

Cippatrici a vite.

Data l'esistenza, si ritiene opportuno in questo stato dell'arte riportare anche questo tipo di cippatrici seppur non siano disponibili informazioni relative al loro funzionamento, alle caratteristiche costruttive e alle potenze installate che consentano di produrne un'ampia e approfondita descrizione.

In riferimento alla figura 8 si può intuire che la vite conica, nella rotazione tira a sè il materiale in ingresso e lo riduca in cippato. L'unico vantaggio rispetto alle altre macchine sembra essere solamente una maggiore omogeneità dimensionale del cippato, caratteristica poco interessante per le esigenze della filiera di produzione del pellet.



Figura 8: cippatrice a vite.

4.1.2 – Trituratori.

Le macchine per la triturazione possono essere classificate in due categorie:

- **triturazione primaria**
- **triturazione secondaria**

E' difficile dare una definizione di triturazione primaria o secondaria, perché questo dipende dalla destinazione del prodotto finale; possiamo indicativamente definire come triturazione primaria quella che produce una prima spezzettatura del cippato senza però portarlo a dimensioni tali da poter essere impiegato nelle lavorazioni di valle richiedendo, per questo, una successiva operazione di triturazione. Queste dimensioni dipendono dal modello e dalle dimensioni del trituttore secondario impiegato, ma di norma possiamo dire che la triturazione primaria produce pezzi più o meno irregolari dell'ordine del mezzo centimetro, a seconda del metodo di taglio, mentre con una triturazione secondaria si possono ottenere pezzature che vanno dal centimetro fino al decimo di millimetro (o inferiori). È importante, quindi, far notare che in alcuni casi non è tanto la pezzatura in uscita che determina se una macchina è un trituttore primario o secondario, quanto le lavorazioni di valle alle quali il prodotto in uscita è destinato. In generale bisogna sempre ricordare che apporre ad un trituttore l'etichetta di primario o di secondario, è una cosa relativa al campo di utilizzo in cui stiamo lavorando.

4.1.2.1- Macchine per la triturazione primaria.

A questa categoria appartengono diverse tipologie costruttive di macchine, sia fisse che mobili. Solo alcune sono adatte esclusivamente per la triturazione del legno, mentre la maggior parte hanno applicazione generale, ovvero operano su qualsiasi tipo di rifiuto (per esempio sia pneumatici che pallets). In tutti i trituttori che verranno elencati è presente una griglia intercambiabile in grado di determinare la pezzatura del prodotto in uscita; naturalmente più la griglia ha fori piccoli, più la produzione oraria tenderà a diminuire. Un altro modo di modificare la pezzatura in uscita è quella di agire sulle controlame oppure sugli alberi di supporto delle stesse a seconda del tipo di trituttore.

Trituratori monoalbero.

Questo tipo di trituttori è costituiti da un unico albero con taglienti riportati su sviluppi a elica. Vengono chiamati anche trituttori universali in quanto sono utilizzati sia per lo smaltimento di rifiuti organici che inorganici (dal legno ai cavi elettrici fino agli scarti di macellazione). E' prevista una griglia per determinare la dimensione del prodotto in uscita, inoltre l'alimentazione del materiale può avvenire sia per gravità, sia tramite una pressa idraulica che spinge i pezzi verso il rotore. Di solito il principio di funzionamento di tale macchina suggerisce di evitare la triturazione del legname fresco per problemi di impastamento del triturato sugli utensili riportati e intasamento della griglia di vagliatura, a meno di non utilizzare una macchina con utensili e griglie più grandi, a scapito però delle dimensioni del tritato. In queste macchine, si hanno regimi di rotazione molto bassi, attorno ai 60-70 giri/min.

Nella figura 9 è riportata un'immagine di questo tipo di trituttore, in questo caso dedicato alla macinazione di rifiuti, si osservi la disposizione a elica degli utensili.

In figura 10 è mostrato il grafico della caratteristica di funzionamento e del peso delle macchine di questo tipo presenti sul mercato. Si può osservare che la potenza specifica installata è decisamente inferiore rispetto alle cippatrici a tamburo ed è stimabile intorno a 6-7 kWh per tonnellata di materiale trattato. Da ricordare che tale consumo non può prescindere dalle dimensioni del materiale in ingresso.



Figura 9: trituratore monoalbero, particolare del tamburo portautensili.

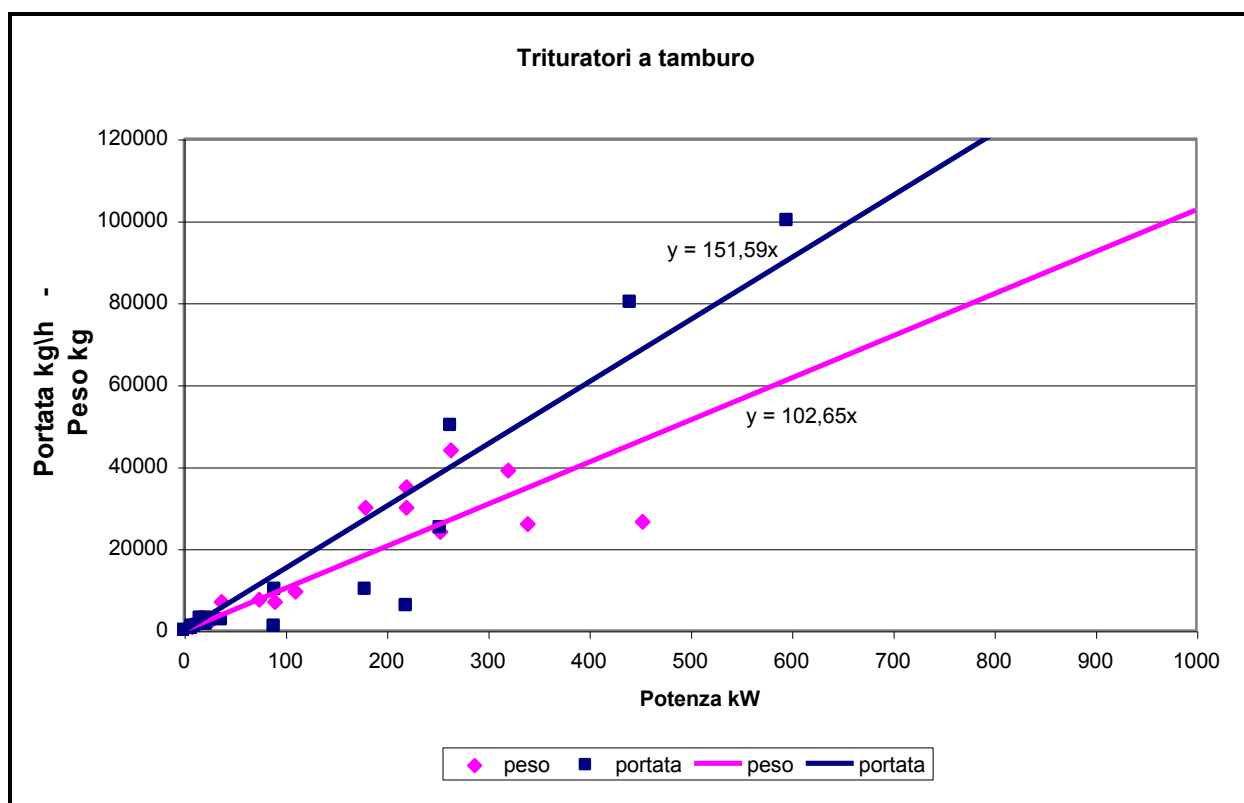


Figura 10: caratteristica di funzionamento e peso dei trituratori monoalbero.

Trituratori pluralbero.

I trituratori di questo tipo hanno da due a quattro alberi, quelli a due alberi possono avere rotori costruttivamente simili ai trituratori del tipo monoalbero (in tal caso vengono detti raffinatori ma sono usati prevalentemente nell'ambito dei rifiuti) o con più lame a disco dentato. Quelli a più di due alberi sono tutti di quest'ultimo tipo si veda la figura 11. E' da notare che sono macchine esclusivamente fisse. Sono utilizzati soprattutto per materiali inorganici ma sono adatte pure alla triturazione dei pallets e volendo anche del legno in genere, purchè di pezzatura non troppo

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

grossolana (tronchi di un diametro massimo di 20-30 cm). Hanno velocità di rotazione degli alberi dai 10 ai 40 giri/min a seconda se si tratta della coppia di alberi lenti o veloci, con coppie che vanno dai 3 a gli 80 Nm circa. Il problema dei multilama però risiede nel fatto che in base alla direzione di alimentazione del pezzo di legno fresco, a seconda di come le fibre si dispongono rispetto alle lame, esso può essere solamente sfibrato risultando in uscita un truciolo lungo alcuni cm. In figura 12 è presentata la caratteristica di funzionamento e l'andamento del peso in funzione della taglia per tali macchine.

Il costo di questo tipo di triturator per portate attorno ai 300 kg/h di legna asciutta si aggira tra i 25000 ed i 34000 euro, a seconda della finezza del prodotto in uscita che si vuole ottenere (la macchina per triturazione grossolana è più robusta e più pesante e costa di più, quindi come per le cippatrici, si può dire che il costo è funzione esclusivamente del peso della macchina).



Figura 11: lame a disco dentato di un trituttore plurialbero.

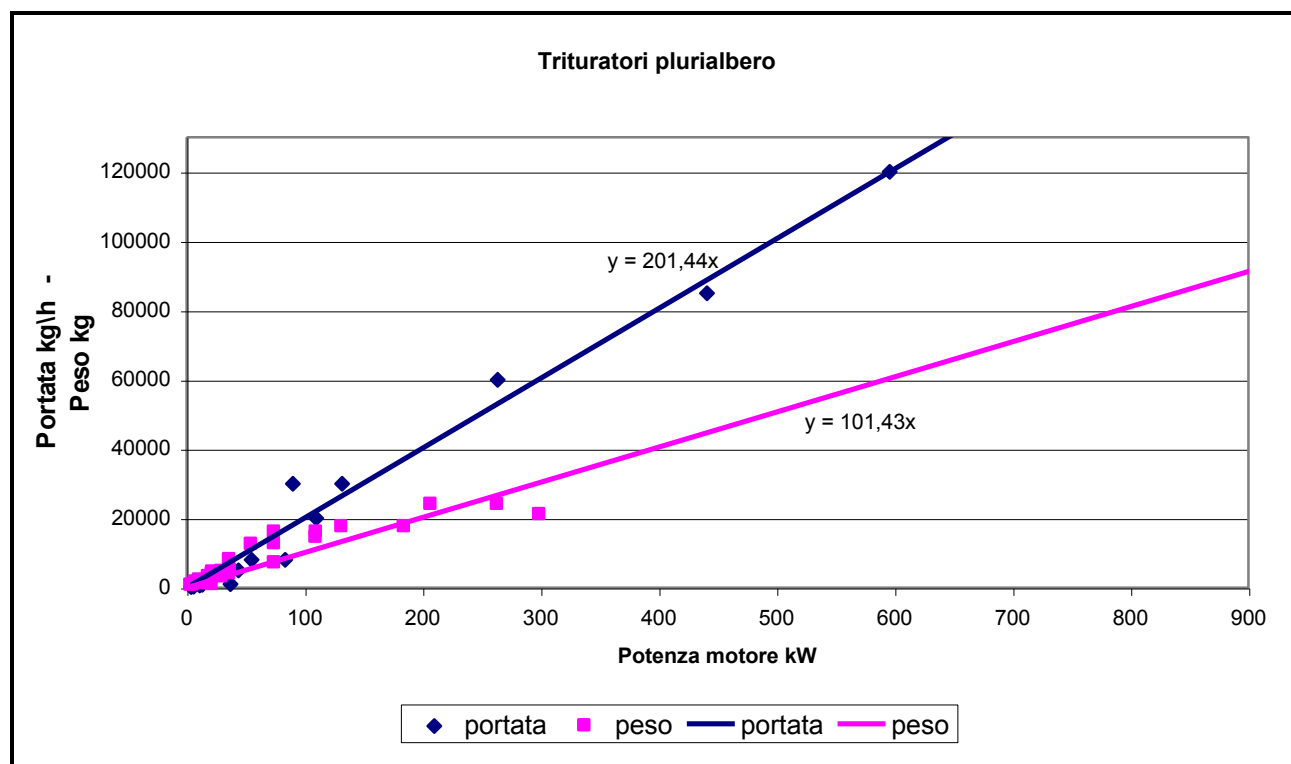


Figura 12: produzione oraria e peso dei triturator plurialbero in funzione della potenza installata.

Trituratori a coclea.

I trituratori a coclee sono costituiti da due coclee con uncini o lame riportati sul diametro esterno. I due tamburi sono paralleli ma le eliche delle coclee sono contrapposte in modo da spingere il materiale da una lama all'altra sul contropettine sfibratore. Queste macchine sono l'ideale per la triturazione di ceppi e grossi pezzi di legno fresco dato che hanno un regime di rotazione molto basso (intorno ai 40 giri/min), ma con queste pezzature in ingresso, anche con le griglie più piccole difficilmente si ottengono pezzature di output inferiori ai 10 cm in considerazione anche dell'umidità del materiale in ingresso. Sembrerebbe che tali macchine siano destinate però alle grandi potenze: la Ladurner ad esempio (una delle ditte leader del settore) produce macchine di questo tipo per un range di portate orarie che vanno dalle 60 alle 120 tonnellate con potenze del motore diesel autonomo rispettivamente da 340 a 600 CV. Non avendo a disposizione informazioni più precise sulle caratteristiche di ciascun modello non è possibile fornire i grafici di funzionamento per questa tipologia di macchine.

Trituratori a martelli.

I trituratori a martelli sono i più comuni e sono costituiti da un rotore con martelli (semplici pezzi metallici prismatici o uncinati) liberi di ruotare rispetto alla cerniera mediante la quale sono calettati sul diametro esterno del tamburo, come mostrato in figura 13. Ne esistono di tutte le taglie e si adattano bene alla triturazione di una vasta gamma di materiali tra cui anche il legno. In particolare essi sono molto utilizzati per i biotrituratori, in quanto permettono di introdurre in ingresso anche erbacce sporche di terra, o contenenti impurità solide, le quali usurerebbero troppo in fretta i trituratori a lame. Il numero e il peso dei martelli varia in funzione di ciò che si vuole tritare e delle potenze installate. Le caratteristiche sono tali che questi trituratori sono in grado di trattare materiale in ingresso costituito da legname anche di grossa pezzatura, si avvicinano infatti alle cippatrici a tamburo. Il problema di queste macchine è però quello di tritare materiale fresco perchè anche ammettendo di avere martelli molto pesanti, si avrà soprattutto uno sfibramento del legname, producendo trucioli di dimensioni irregolari.

In figura 14 sono riportate le caratteristiche di funzionamento per questo tipo di macchine.

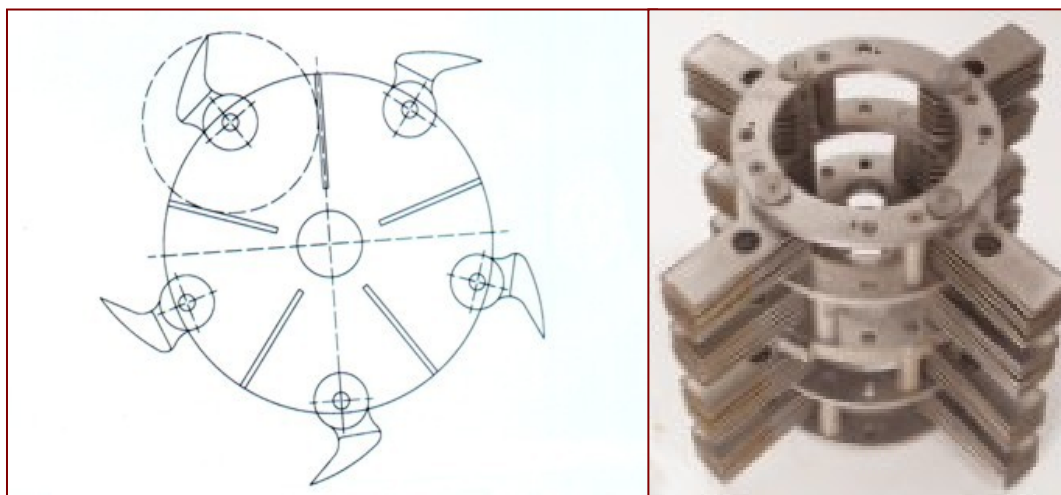


Figura 13: rotore e martelli di un trituratore a martelli, schema costruttivo e sua realizzazione.

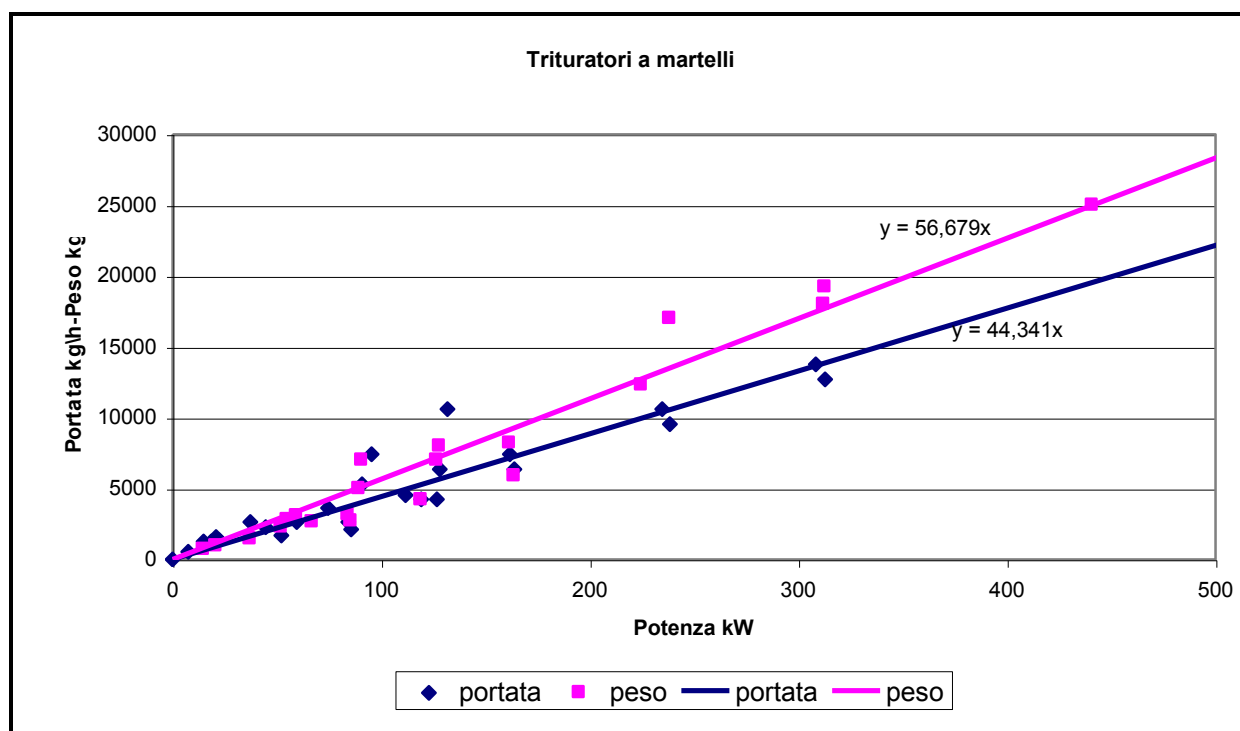


Figura 14: caratteristica dei trituratori a martelli, si osservi che la potenza specifica di queste macchine è uguale a quella delle cippatrici.

4.1.2.2- Macchine per la triturazione secondaria.

Questa categoria di macchine provvede alla seconda triturazione, ovvero porta il materiale a dimensioni più piccole, le quali variano a seconda della griglia, del tipo di macchina ma soprattutto in funzione del materiale in ingresso. Queste macchine vengono dette macinatori o mulini; facendo una ricerca su tali unità, ci si accorge che le tipologie di macchine per la triturazione secondaria sono le stesse dedicate a quella primaria, in special modo ricorrono spesso i tipi a lame o a martelli. I macinatori a martelli (i più usati in questo ambito) funzionano come i normali trituratori a martelli ma a differenza di essi hanno una griglia di vagliatura molto fine (fori di 8-12mm), velocità di rotazione esclusivamente alte (≥ 1500 giri/min) ed un elevato numero di martelli; inoltre, per favorire il passaggio del macinato dalla griglia, a volte viene utilizzato insufflamento di aria compressa. Tale tipo di macchina produce un macinato che diventa tanto più irregolare quanto più il legno è fibroso, comunque, se il materiale in ingresso non è eccessivamente umido, sono ben utilizzabili per la produzione di segatura per pellet.

I trituratori a lame (di cui una costruzione è presentata in figura 15) sono costituiti da un tamburo rotante (attorno ai 450 giri/min) munito di tre lame, le quali agiscono su una o due controlame (nella stessa maniera delle cippatrici a tamburo). Essi si prestano meglio alla riduzione del tritato di legno in segatura fine (dimensioni dell'ordine di 1mm). Anche per quelli a lame è prevista una griglia per non far passare e ritritare i trucioli troppo grandi, con la possibilità anche qui di soffiare aria compressa per evitare eventuali intasamenti.

Esistono però altri tipi di macinatori o mulini, che fino ad oggi non sono stati usati propriamente per il legno ma che magari, attraverso opportune modifiche, potrebbero risultare interessanti se si pensa di costruire una macchina innovativa, la quale riesca a sfruttare alcune delle proprietà di tali macchine. Una di queste tipologie è quella dei mulini centrifughi, usati per la polverizzazione della gomma o per prodotti di laboratorio.

Un altro tipo di macchina è la cosiddetta Grinder Mill della quale, in figura 17 se ne può capire

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

meglio il suo principio di funzionamento, intuendo come mai viene usata per qualsiasi materiale purché dovutamente asciutto e fragile.

Un'altra tipologia di macchina per la triturazione è la Diamond Rolls, il cui principio di funzionamento è mostrato in figura 18. Osservando tale figura è intuitivo capire la necessità di avere preventivamente essiccato il cippato, onde evitare impastamenti sulle dentature degli alberi.



Figura 15: costruzione di un tritratore a lame.

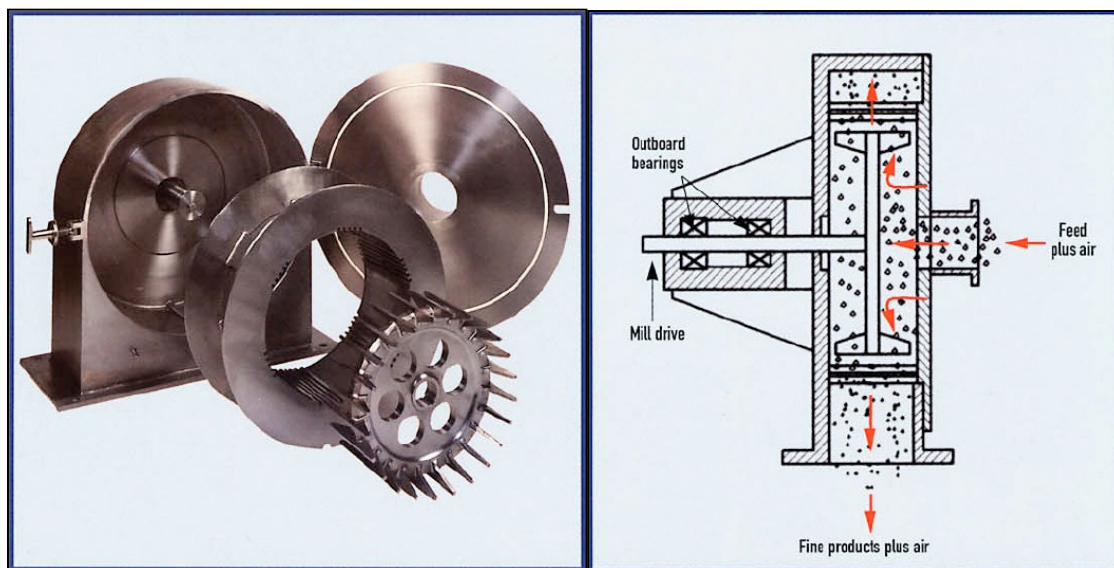


Figura 17: Grinder Mill: la macchina è costituita da una girante munita di coltelli disposti in direzione radiale, lo statore presenta una finestratura distribuita lungo tutto il mantello, le particelle di materiale vengono convogliate mediante un flusso d'aria che funge da mezzo di trasporto in direzione centrifuga, e forzate a passare tra i coltelli e la finestratura, sminuzzandosi.

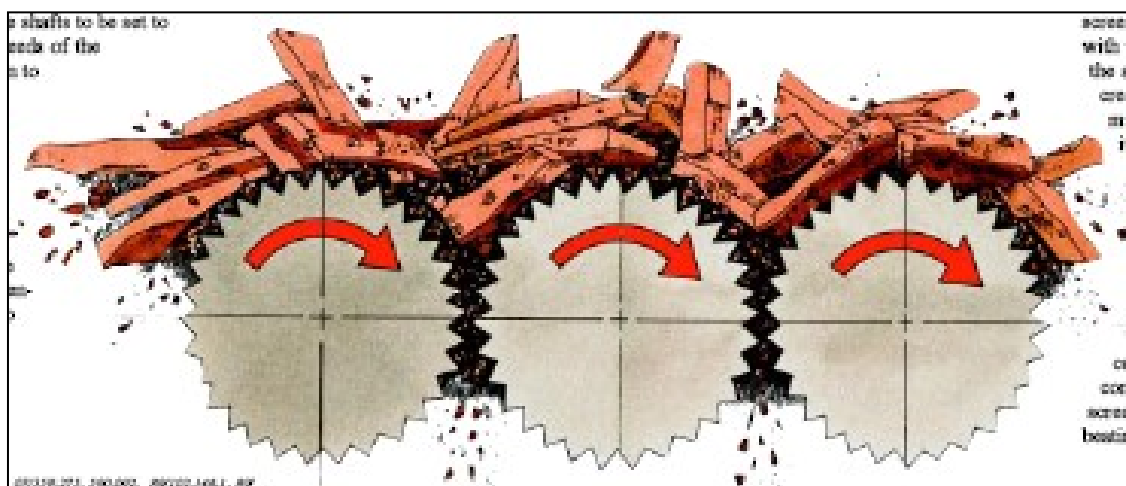


Figura 18: funzionamento del Diamond Rolls: il materiale viene posto sulla parte superiore di una serie di rulli zigrinati i quali lo triturano riducendolo in piccoli grani. L'efficienza dipende notevolmente dal livello di umidità del materiale in ingresso.

4.1.3 – Macchine combinate.

Si presenta, infine, un'altra tipologia di macchine dedicate alla triturazione del legno che sono di tipo combinato ovvero utilizzano un modulo cippatore e uno o più moduli di triturazione a seconda del grado di finezza che si vuole raggiungere sul materiale in uscita. Le macchine combinate mobili vengono chiamate Biotrituratori-Cippatori, infatti come si può intuire dal nome, hanno sia una cippatrice che un tritatore (il cippatore è di solito a tamburo o a disco mentre il tritatore è prevalentemente a martelli); di queste macchine ce ne sono di due tipi:

1. **con unica bocca d'ingresso**, ovvero il materiale passa sempre prima dalla cippatrice per poi andare alla triturazione. Sono macchine piccole, per lo più dedicate al giardinaggio (rami fino ad un diametro massimo di 10 cm);
2. **con bocche d'ingresso separate**, in modo da cippare i rami più grossi prima di essere tritati, e tritare direttamente la legna di pezzatura dello stesso ordine delle dimensioni del cippato;

Le macchine combinate fisse di solito sono costituite da due tritutori in cascata per effettuare prima e seconda macinazione. Dal punto di vista costruttivo in queste macchine si ha semplicemente la sovrapposizione di un trituttore primario con uno di quelli secondari. Un esempio è dato dalla macchina prodotta dalla ISVE, la quale monta un trituttore primario plurialbero a lame capace di tritare rami fino a 30 cm di diametro, e come trituttore secondario un mulino a tamburo con tre lame e due controlame. Questo apparato è capace di produrre segatura adatta alla produzione del pellet, ma non è adatto a lavorare legna fresca, dato che come per tutti i tritutori si possono avere impastamenti del tamburo ed intasamenti della griglia di vagliatura. Indicativamente tali macchine arrivano a portate di 300 kg/h con le griglie più fini (se si parla di legno asciutto), con velocità di rotazione degli alberi del primario di circa 30 giri/min, e di 450 giri/min per il secondario. I costi di tale macchina oscillano dai 25000 ai 60000 euro. In figura 19 è riportata la caratteristica di funzionamento e il peso in funzione della taglia della macchina.

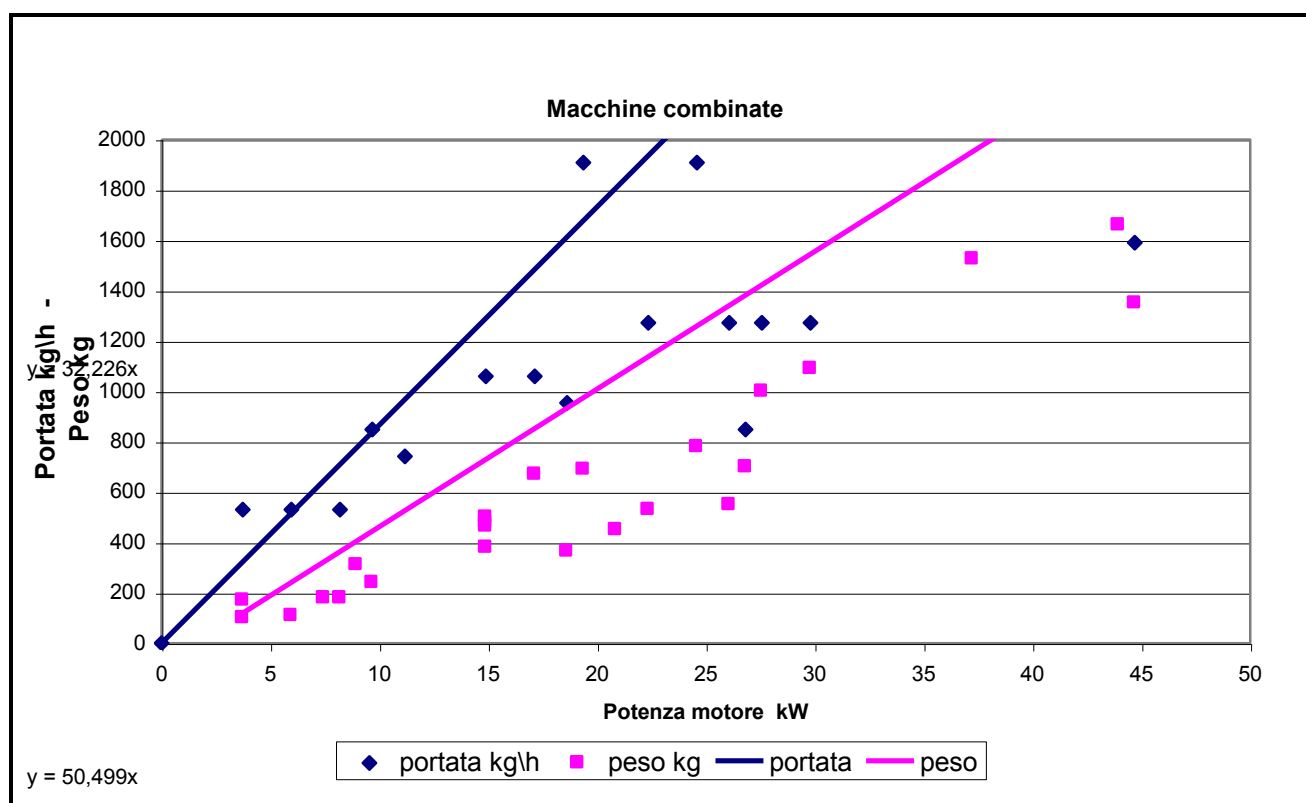


Figura 19: curva portata-potenza e pesi delle macchine combinate. La potenza specifica si aggira intorno a quella delle cippatrici.

4.1.4 – Grafici e tabelle di confronto tra le varie tipologie di macchine.

Di seguito sono riportati gli andamenti delle curve di portata in funzione della potenza installata delle macchine per la triturazione e la cippatura del legno. Come si è visto il confine tra cippatura e triturazione non può essere considerato così marcato e netto in ogni caso si può ritenere che la potenza specifica media necessaria allo sminuzzamento del materiale è di 15 kWh per tonnellata di materiale processato. Nella tabella 2 sono riassunte, in forma analitica, le curve approssimanti dei grafici mostrati nelle figure 20 e 21, le unità di misura sono kW per la potenza e kg/h per la portata. Il peso di ciascuna macchina risulta in kg. In tabella 3 sono presentate in forma sintetica le

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

informazioni raccolte sulle tipologie di macchine trattate in questo capitolo.

Tabella 2: espressioni analitiche delle caratteristiche di funzionamento delle macchine per la cippatura e la triturazione del legno (potenza in kW, portata in kg/h e peso delle macchine in kg)

	Cippatrici a disco	Cippatrici a tamburo	Trituratori cippatori	Trituratori a martelli	Trituratori monoalbero	Trituratori pluralbero
Funzione peso	$y=19,5x$	$y=27x$	$y=32,2x$	$y=44,3x$	$y=102,7x$	$y=101,4x$
Funzione portata	$y=67,9x$	$y=57,2x$	$y=50,5x$	$y=56,7x$	$y=151,6x$	$y=201,4x$

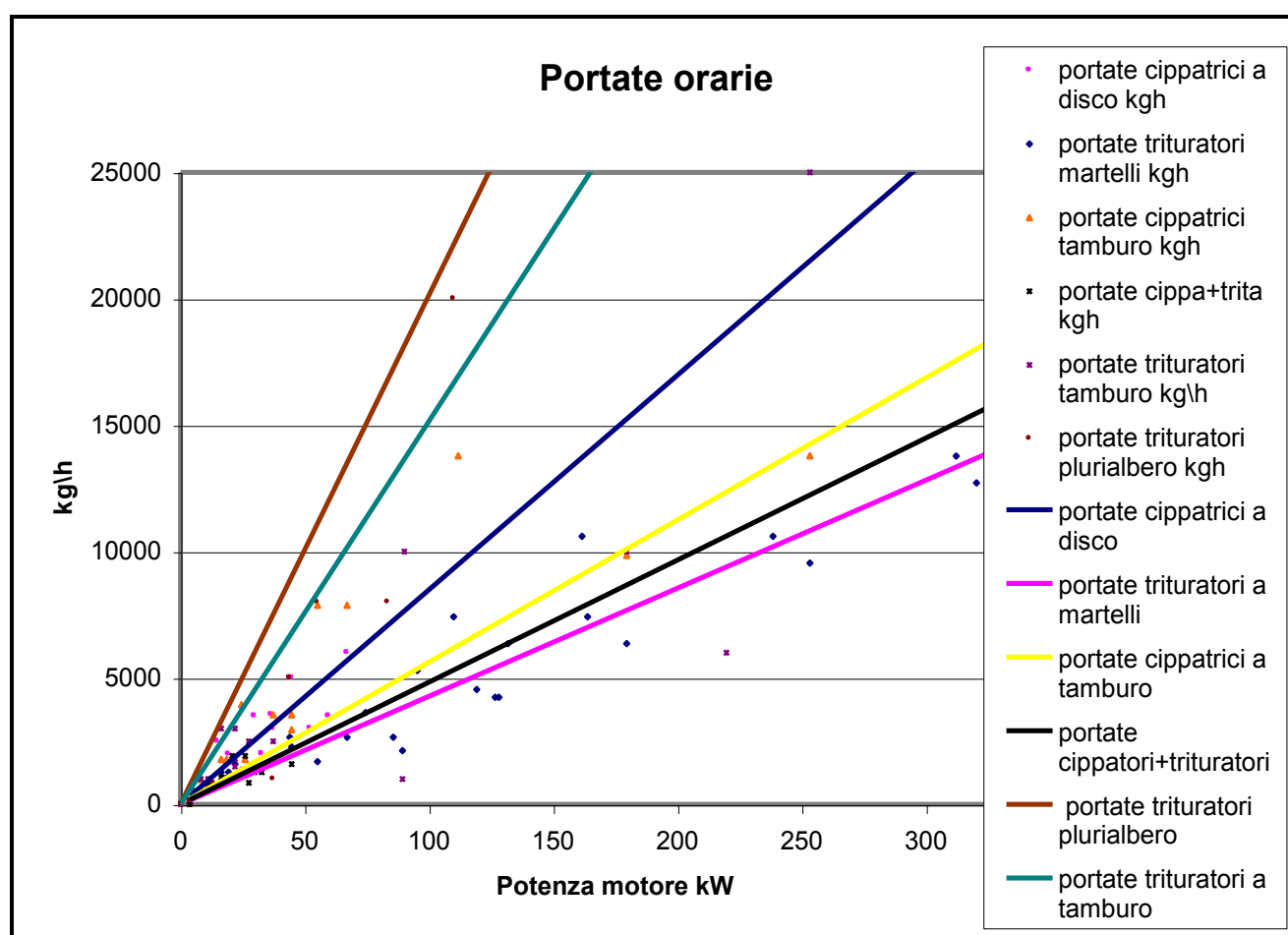


Figura 20: curve potenza-portata delle macchine per la cippatura e la triturazione del legno presenti sul mercato.

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

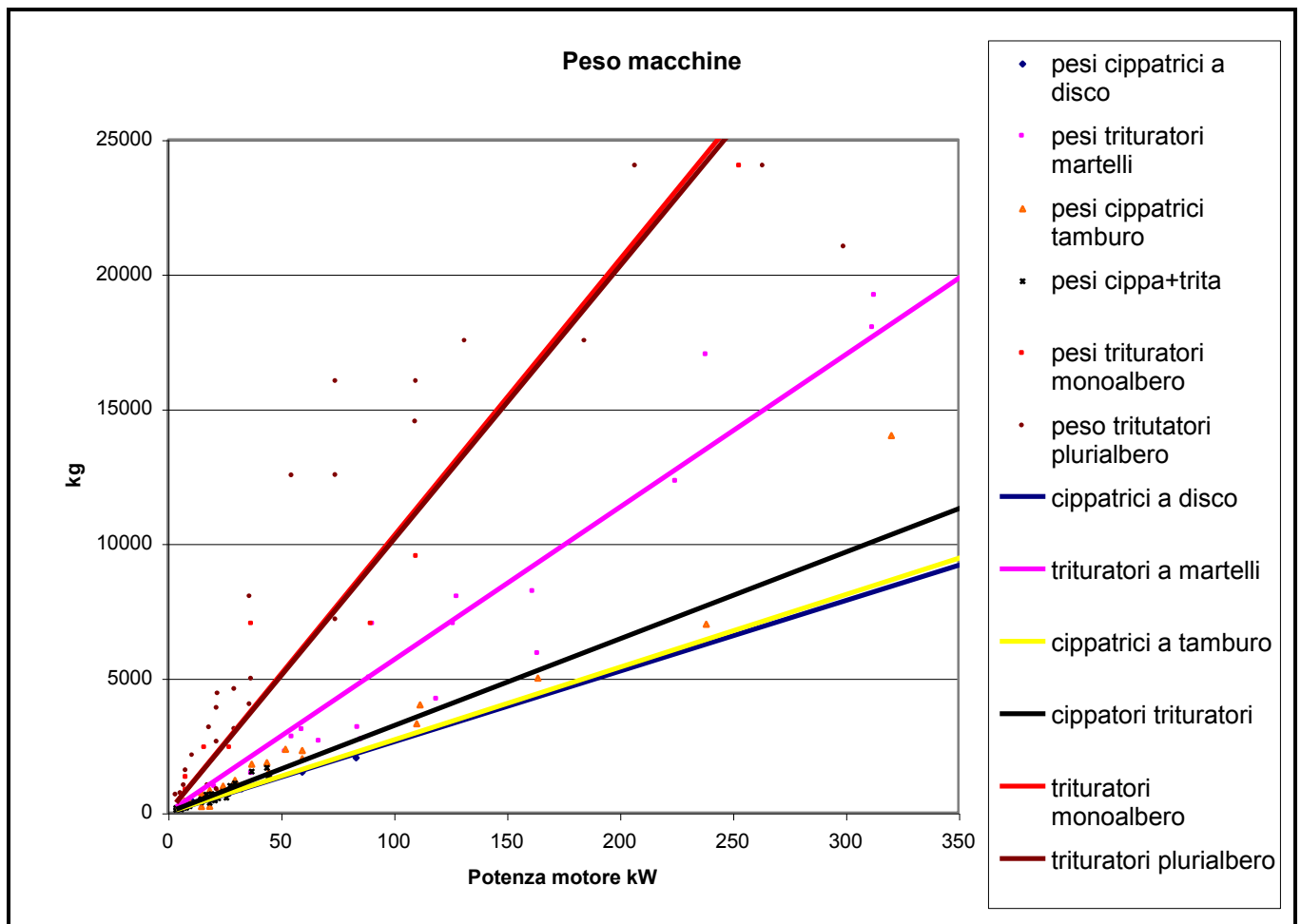


Figura 21: peso delle installazioni in funzione della taglia.

**STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET
ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE**

Tabella 3: riassunto delle caratteristiche delle macchine per la triturazione e la cippatura.

Tipologia	funzionamento	Materiale in ingresso	Materiale in uscita	Portata (kg/h)	Peso (kg)	Potenza (kw)	Produttori
Trituratori primari	Monoalbero	Legno, plastica, pneumatici, rsu, rifiuti ingombranti (mobili, elettrodomestici ...)	pezzatura dal centimetro fino oltre alla decina di cm.	Da poche centinaia fino a 100000	Dagli 800 fino ai 44000	Dagli 8 fino ai 600	Ladurner, Reinbold, Angelo Tanfoglio, Lindner, Vecoplan, Bano Tecnoimpianti
	Plurialbero (a lame)	Carta, plastica, metallo, pneumatici, pallets, rifiuti ingombranti	pezzatura dal centimetro fino oltre alla decina di cm.	Dai 100 ai 120000	Dai 600 ai 24000	Dai 3 ai 600	Sant'Andrea, Reinbold, Satrind, Isve, Lindner, Mayfran
	A coclee	Ceppi di legno, grossi tronchi	Attorno ai dieci cm con griglia piccola	Dai 60000 ai 120000	Da 19000 a 26000	Da 160 a 320	Ladurner
	A martelli (sono omessi i dati riferiti ai triturator per metallo)	Ramaglia, potature legno, pallets, scarti legnosi di spessore limitato.	Pezzatura sfibrata con dimensioni mezzo centimetro alla decina di cm	Dai 500 ai 14000	Dai 700 ai 25000	Dai 5 ai 300 circa	Gandini, Caravaggi, Greentechnik, Pezzolato, Peruzzo
Trituratori secondari (classici)	A lame	Pezzature dal cm alla decina di cm di legno, plastica	Pezzature dal mm ai 5 mm	Dai 200 ai 600	-	5 o 11	Isve
	A martelli	Pezzature dal cm alla decina di cm di legno, plastica, materiali duri.	Da pezzature inferiori al decimo di mm ai 5 mm a seconda del materiale	-	-	Da 7 a 200	Backwards Engineering
Cippatrici	A disco	Per quelle mobili si arriva fino a rami di 25 cm di diametro, per quelle fisse si arriva agli 80 cm	Cippato attorno agli 8-16 mm	Dagli 800 ai 6000	Dai 400 ai 2000	Fino a 60	Peruzzo, Pezzolato, Greenmech, Gandini, Greentechnik, Caravaggi, Woodchuk, Acrowood
	A tamburo	Per legname più fibroso. Sia mobili che fisse possono cippare rami piccoli e tronchi fino agli 80 cm di diametro	Cippato attorno ai 15-35 mm	Dai 1000 ai 60000	Dai 400 ai 20000	dagli 8 ai 1000	Peruzzo, Pezzolato, Gandini, Greentechnik, Caravaggi, Vkb, Bearcat
	A vite	Rami da 10 a 30 cm di diametro	Cippato tra i 16 ed i 45 mm	Da 400 a 38000	Da 130 a 6500	Da 15 a 500	Laimet

4.2 - Essiccatori.

Nel presente capitolo verrà effettuata una rassegna delle tipologie di essiccatori disponibili sul mercato per la deumidificazione del legname. Vi è da dire che purtroppo non sono disponibili informazioni precise sulle potenze installate e le relative capacità di evaporazione poiché, a differenza delle macchine cippatrici e pellettizzatrici, non esistono modelli di serie per i quali poter dedurre le caratteristiche da catalogo, i produttori infatti adattano e progettano questi impianti sulla base del caso particolare che si trovano ad affrontare. Dalla ricerca condotta è risultato che, in generale, non esistono tecnologie di essiccazione appositamente progettate per le esigenze della filiera di produzione del pellet di legna quindi gli essiccatori utilizzati sono quelli che sfruttano il principio della deumidificazione termodinamica tradizionale ovvero utilizzano aria calda, secca, per far evaporare la massa d'acqua contenuta nel materiale processato.

Le tipologie di essiccatori più frequentemente impiegate nella filiera di produzione del pellet sono:

1. essiccatori a tamburo rotante;
2. essiccatori a letto fluido;

La ricerca effettuata ha comunque messo in evidenza che sta nascendo un certo interesse per lo studio di sistemi di essiccazione dedicati al riciclaggio di biomassa basati su energia meccanica che sono in grado di deumidificare in maniera molto spinta il materiale e, contemporaneamente, di provvedere alla sua triturazione, qui ne verrà presentata una tipologia. C'è da dire, però, che in concreto non si hanno riscontri oggettivi sull'efficacia e il reale funzionamento di tali sistemi.

Nonostante non si abbiano informazioni sul loro impiego negli impianti di produzione del pellet, si è ritenuto interessante presentare anche altre tipologie di essiccazione del legno attualmente disponibili sul mercato che si basano sempre su una deumidificazione termodinamica che, però, non avviene mediante aria calda, esse sono:

- essiccazione a cella;
- essiccazione sotto vuoto;

Nel seguito verranno sinteticamente descritte le tecnologie di essiccazione appena riassunte e, ove disponibili, verranno presentati i parametri caratteristici di funzionamento. Dal punto di vista dei costi, non vi è alcuna informazione relativa ai prezzi di vendita di questi impianti né tanto meno ai costi di esercizio.

4.2.1 - Essiccatori a tamburo rotante.

Questi essiccatori dispongono di una tecnologia che sposta il materiale in essiccazione attraverso il tamburo tramite una corrente aerea creata da un ventilatore. La rotazione del ventilatore e quella del tamburo avvengono alla stessa frequenza: mentre il tamburo ruota, il prodotto viene fatto attraversare più volte da aria calda. La gamma di portata d'acqua evaporata è indicativamente compresa tra 450 a 27000 kg/h. Il combustibile impiegato può essere di qualunque natura: gassoso, liquido oppure solido. Proprio quest'ultima tipologia sembra la più interessante e vantaggiosa infatti si possono utilizzare molti materiali alternativi (biomasse, carbone di legna, mais, muschio di torba essiccato, chips di legno essiccate, concimi organici, carta, segatura, rasature, etc.), che riducono i costi di esercizio rispetto all'impiego di combustibili tradizionali.

Nelle installazioni moderne il processo e la regolazione dei parametri di funzionamento del forno avviene in automatico mediante sistemi di controllo automatizzati. In particolare i sensori di umidità computerizzati mantengono la temperatura di essiccazione al livello corretto per mantenere costante il livello di umidità del prodotto in uscita.

4.2.2 - Essiccatori a letto fluido.

Questo tipo di essiccatori sono particolarmente indicati per il trattamento di materiale in forma granulare o in polvere. Il materiale è adagiato su un letto in movimento continuo attraversato in direzione perpendicolare alla giacitura dello strato in essiccazione, da una corrente fluida di aria calda che ne produce l'essiccazione. In alcune costruzioni il letto è dotato di moto di vibrazione in grado di agitare il materiale per favorirne la deumidificazione. Non si hanno informazioni relativamente alle capacità di evaporazione di questi sistemi né, tanto meno, le potenze termiche installate; rispetto ai tradizionali forni rotanti le temperature di esercizio, a parità di portata d'acqua evaporata, sono però più basse grazie alla pezzatura fine del materiale in essiccazione.

4.2.3 - Essiccazione meccanica.

La ricerca di informazioni in rete ha portato ad identificare una tecnologia brevettata di proprietà della First American Scientific Corp., chiamata KDS Micronex. Tale tecnologia permette di trasformare un'ampia gamma di biomasse in una polvere fine con caratteristiche di combustione eccellenti combinando le fasi di essiccazione e di triturazione. In figura 22 è riportato lo schema del processo brevemente descritto nel seguito:

1. Il materiale in ingresso, che può contenere fino all' 80% di umidità, viene lasciato cadere nella gola del KDS MicronexT attraverso una valvola che impedisce all'aria di tornare indietro e quindi espellere il materiale.
2. Il materiale passa in una camera toroidale dove cade su catene rotanti ed è soggetto a accelerazioni centrifughe elevate. Le catene ruotano con una velocità periferica di circa 640km/h. Il materiale è triturato nel momento in cui impatta ripetutamente con le catene e con appositi piatti posti sulle pareti del mantello. L'acqua a causa dei ripetuti impatti si polverizza e viene quindi estratta dal materiale. Quando si è raggiunta un'appropriata riduzione della dimensione delle particelle di materiale, il flusso aereo nel toro solleva le particelle verso il classificatore. Poiché parte dell'acqua viene rimossa tramite processo meccanico, l'energia consumata è minore rispetto ai tradizionali essiccatori e risulta di 1200-3000 kJ per kg di acqua rimosso, inferiore al calore latente di vaporizzazione. Non è utilizzata nessuna fonte di energia termica, soltanto energia elettrica per l'alimentazione del dispositivo di rotazione delle catene e del sistema di circolazione forzata dell'aria.
3. Il classificatore seleziona il materiale triturato e può essere adattato in base alla dimensione delle particelle richieste. La polvere avente la corretta granulometria attraversa il classificatore mentre le particelle più grandi sono costrette a cadere nella camera toroidale e a subire di nuovo il processo.
4. Il materiale finito è convogliato pneumaticamente fuori dalla macchina in un ciclone dove la polvere ottenuta viene separata dalla corrente d'aria.
5. L'aria che in ingresso al ciclone contiene vapore e goccioline di acqua lascia quest'ultimo dall'alto e torna nella camera toroidale. Il vapore e le goccioline di acqua lasciano la camera attraverso dei fori appositi.
6. Le basi della camera toroidale si aprono facilmente per la manutenzione. La sostituzione delle catene può essere fatta in meno di dieci minuti.

La macchina KDS combina la tecnologia di un essiccatore convenzionale e di un tritatore. Gli essiccatori assorbono da 3550 a 9000 kJ di calore per rimuovere un kg di acqua. Al contrario, il KDS ha bisogno di soli 1200 a 3000 kJ di energia elettrica per rimuovere un kg di acqua. Quindi il KDS è più economico da utilizzare. Inoltre il costo di esercizio del KDS dipende dai prezzi dell'elettricità che risultano più stabili dei prezzi del metano o dei combustibili in generale.

L'energia spesa per essiccare con il metodo KDS è paragonabile a quella spesa per tritare il

materiale con un mulino a pale o a martelli convenzionali.



Figura 22: schema di impianto di un essiccatore – tritizzatore KDS Micronex. Il sistema di essiccazione presentato risulta essere decisamente vantaggioso rispetto ai metodi tradizionali.

4.2.4 - Essiccatori a cella.

Questa tecnologia di essiccazione è impiegata per il legname in tavole o grossi pezzi collocati in apposite celle nelle quali la temperatura si mantiene costante. L'aria umida viene estratta mediante un sistema a serrande, un ventilatore provvede al ricambio con aria secca scaldata mediante scambiatori di calore ad acqua calda oppure a vapore. Questi essiccatori possono arrivare fino ad una capacità di evaporazione di 200 m^3 , non si conoscono le potenze termiche installate.

4.2.5 - Essiccatori sottovuoto.

L'essiccazione con l'impiego del vuoto permette lo sfruttamento di due principi fisici naturali:

1. la riduzione di pressione (creazione del vuoto) determina la trasformazione dell'acqua contenuta nel legno in vapore a basse temperature (45°C a -700 mmHg);
2. il vapore d'acqua si muove sempre dalle zone calde verso quelle fredde.

Il primo principio garantisce una rapida rimozione del vapore acqueo a partire dal centro della massa legnosa ed una drastica riduzione dei fabbisogni di energia termica, essendo l'operazione eseguita a basse temperature.

Il secondo principio permette di controllare e regolare, istante per istante, la quantità di umidità che viene asportata dal legno operando sulla temperatura dei condensatori.

La sinergia dei due processi consente l'abbattimento dell'umidità del legno in maniera uniforme e senza generare tensioni nella struttura. Considerando l'alta tecnologia applicata a queste macchine e la possibilità di regolare con precisione ciascuna fase del processo, l'essiccazione sottovuoto si presta molto bene per stabilizzare definitivamente il contenuto percentuale di umidità del legno. Anche in questo caso non si conoscono dati relativamente alla capacità di evaporazione oraria degli impianti.

4.3 - Cubettatrici.

Prima di passare alla descrizione della tecnologia attualmente impiegata per la produzione del pellet di legna, è opportuno richiamare in breve quelle che sono le caratteristiche del combustibile solido attualmente presente sul mercato. Il pellet di legna ha dimensioni di 6 – 8 mm di diametro e una lunghezza pari a circa 5 volte il diametro stesso, la forma attualmente commercializzata è cilindrica anche se non risulta da alcuna normativa che essa debba essere necessariamente tale. Il materiale di partenza è segatura o, più in generale, polvere di legna avente una pezzatura massima di circa 3 mm contenente una percentuale di umidità (in peso rispetto alla legna anidra) non superiore al 12-15%. Il pellet prodotto deve contenere una percentuale di umidità compresa tra l'8 e il 12% e una densità (valutata rispetto al "metro cubo riversato") di circa 6 volte il materiale di partenza (quindi considerando che un metro cubo di segatura ha una densità di circa 100 – 200 kg/m³, un metro cubo di pellet risulta avere un peso di 600 – 1200 kg). Dal punto di vista meccanico, il pellet si presenta come un aggregato compatto avente una elevata resistenza alla scalfittura conferita, in primo luogo, dal fatto che la polvere viene compressa fino a eliminare completamente la porosità tipica del legno, in seconda istanza dallo strato "bachelizzato" che si crea sulla superficie a seguito delle trasformazioni che la lignina subisce durante il processo di pellettizzazione (tale strato protegge dall'usura ed impedisce lo "sfarimento" ovvero la perdita della polvere).

Le caratteristiche del prodotto appena descritte sono molto simili a quelle di altre tipologie di pellet (ad esempio quelli di mangime) per la produzione dei quali viene sfruttato il processo dell'estrusione come tecnologia principe: questo è bastato a giustificare l'impiego della stessa tecnologia per la cubettatura del legno. Vi è da dire, poi, che su questa scelta ha influito, senza dubbio, il fatto che l'estrusione è un processo tecnologico implementabile in maniera più o meno "continua" garantendo, perciò, una capacità produttiva flessibile e facilmente regolabile sulla base della disponibilità di materia prima, della sua natura e della domanda di mercato.

L'effetto legante che si genera nel pellet è da ricercare nell'otturazione dei micropori presenti nelle particelle di legno (densificazione) che si serrano fra loro a seguito dello stato di compressione idrostatico a cui la polvere è sottoposta durante il processo di estrusione. Si capisce che se il contenuto d'acqua è tale da otturare parzialmente o del tutto tali cavità, la compattazione del materiale non può avvenire visto che l'acqua è incompressibile e difficile da evacuare all'interno del foro calibrato.

Dal punto di vista meccanico il processo di compattazione avviene grazie all'azione di pressatura che si genera nel forzare il passaggio della materia prima, attraverso un foro calibrato avente il diametro del pellet da produrre e una lunghezza ben determinata (dipendente dal tipo di essenza, si veda in seguito). La pressione che si sviluppa durante la lavorazione è dell'ordine delle 200 atm ed essendo il foro passante per ovvi motivi, la reazione alla forza di compattazione deriva, istante per istante, dalla forza di attrito risultante che si oppone al moto di scorrimento del pellet all'interno del tratto calibrato. In letteratura si trova che tale forza risulta dalla seguente relazione:

$$F_a \equiv \mu \cdot p_s \cdot d \cdot l \text{ (fonte Amandus Kahl)}$$

nella quale:

μ : coefficiente d'attrito;

p_s : pressione specifica che si sviluppa nel tratto calibrato;

d : diametro del foro;

l : lunghezza del tratto calibrato;

Per quanto detto, risulta evidente che la forza di attrito è necessaria alla compattazione poiché è, al minimo, la forza di compattazione stessa. Si può, inoltre, osservare che, a parità delle altre condizioni, l'intensità di tale forza è dipendente dalla lunghezza del tratto calibrato che, perciò, non può prescindere dal tipo di essenza da compattare. In generale si è trovato che per essenze più dure (rovere, faggio, etc.) il tratto calibrato è più corto rispetto a quello utilizzato per le essenze più morbide (pino, abete, etc.) e questo dipende dal fatto che il legno più duro è meno poroso per cui si compatta in lunghezze più brevi. Il calore che si sviluppa a seguito dell'attrito sulla superficie del foro, invece, serve a trasformare la lignina contenuta nelle particelle a contatto con la superficie del foro, nella tipica pellicola protettiva superficiale che conferisce le caratteristiche di lucidità, di resistenza all'usura e di protezione dallo sfarinamento al prodotto. La temperatura che la superficie del foro raggiunge durante la lavorazione è dell'ordine dei 100°C, mentre il pellet in uscita ha una temperatura di superficie di circa 80 °C.

Di seguito saranno descritte le esecuzioni costruttive del processo di estrusione nelle attuali macchine in commercio, successivamente per alcune di esse saranno riportate le caratteristiche di potenza e portata ove disponibili da catalogo. Le fonti considerate nel presente studio sono riportate alla fine della sezione.

4.3.1 - Classificazione, tipologie costruttive e parametri operativi.

L'estrusione del pellet nelle macchine cubettatrici presenti sul mercato avviene sfruttando l'azione di pressatura che un treno di rulli esercita su una filiera avente una serie di fori calibrati del diametro pari a quello del pellet secondo lo schema riportato. La filiera può essere cilindrica o piana, ruotante o fissa a seconda se i rulli pressori sono trascinati oppure direttamente movimentati. Dal punto di vista costruttivo le macchine attuali possono essere classificate in:

- A. Macchine a filiera cilindrica con asse orizzontale.
- B. Macchine a filiera piana con asse verticale.

Queste macchine a loro volta possono essere classificate in:

- 1. Macchine con distanza rulli-filiera fissa in esercizio.
- 2. Macchine con distanza rulli-filiera variabile in esercizio.

Di seguito verrà fornita una descrizione dettagliata e un'analisi critica delle caratteristiche costruttive e di esercizio di ciascuna tipologia di macchina. In tabella sono riportate le dimensioni degli organi principali, le potenze installate e le produzioni orarie medie delle macchine in commercio ove disponibili da catalogo.

Macchine a filiera cilindrica con asse orizzontale:

1. Macchine con distanza rulli-filiera fissa in esercizio.

In queste macchine la filiera è costituita da un mantello cilindrico di spessore opportuno (realizzato in acciaio speciale legato al cromo) avente due o più schiere di fori ricavati sulla superficie, disposti in direzione radiale. La forma di tali fori nelle macchine considerate è cilindrica per tutto lo spessore del mantello. Sulla parte esterna della filiera sono montati dei coltelli fissi, la cui distanza dalla filiera può essere regolata manualmente, che operano il taglio a misura del pellet in uscita.

I rulli pressori (realizzati in acciaio da tempra superficiale al carbonio o legato al cromo-manganese) sono posti nella parte interna della filiera, esistono però alcuni schemi costruttivi nei quali i rulli agiscono sulla superficie esterna, in ogni caso essi sono calettati folli sui relativi assi per mezzo di cuscinetti a rulli conici schermati, solitamente montati a O (in questa maniera è possibile regolare il gioco di montaggio). La direzione di estrusione va dall'interno verso l'esterno della

filiera se i rulli sono montati internamente viceversa, se lo schema è a rulli esterni; il loro numero varia da due a tre. In figura 23 è mostrato uno schema di una cubettatrice della tipologia appena descritta, nella figura 24 è presentata l'immagine di una filiera e di un rullo pressore. La distanza tra l'asse dei rulli e la filiera è fissa durante il funzionamento ed è tale per cui essi sono posti in contatto sulla filiera ma senza precarico (in altre parole sono appoggiati e non forzati); tale regolazione viene effettuata manualmente mediante un dispositivo ad eccentrico sul quale l'asse di ciascun rullo è montato. Durante l'esercizio, nella maggior parte delle costruzioni attuali, tale distanza rimane fissa (fatte salve alcune eccezioni di cui si parlerà nel seguito) per cui uno schema rigido di assemblaggio come quello appena descritto produce sovraccarichi notevoli sui rulli e sui relativi cuscinetti ogni qual volta il materiale da pellettizzare non è omogeneo sia come distribuzione che come durezza. Infatti accumuli di materiale all'ingresso dei fori e/o particelle più dure, possono insinuarsi tra la superficie del rullo e quella della filiera inducendo deformazioni sugli assi di calettamento e quindi carichi sui cuscinetti che possono superare quelli nominali, inoltre una siffatta costruzione non è esente da possibili impuntamenti. Attualmente alcuni produttori implementano sistemi di protezione contro i sovraccarichi in grado di bloccare la macchina mediante sistemi di tipo idraulico oppure, più semplicemente, meccanico utilizzando organi di frizione che sconnettono la trasmissione del moto dal motore all'albero sul quale è calettata la flangia porta filiera. Proprio per questo motivo la trasmissione motore - albero porta filiera non è mai rigida quanto piuttosto a cinghia poli-V con uno o due stadi di riduzione, in funzione delle dimensioni della macchina. La cuscinetteria (intendendo cuscinetti dei rulli pressori e supporti dell'albero porta filiera), in generale, non è lubrificata mediante circuiti ad olio, la lubrificazione avviene più frequentemente per ingrassaggio mentre la lubrificazione forzata viene offerta in alcuni casi come opzionale.

L'alimentazione del materiale all'interno della filiera (oppure all'esterno a seconda di dove sono montati i rulli) avviene grazie ad una coclea movimentata da un motore ausiliario: regolando il regime di rotazione si regola la portata di materiale da pellettizzare. Allo scarico è posto un raffreddatore che porta la temperatura del pellet in uscita da 80 a 20 °C per la successiva fase di imballaggio. Nella maggior parte delle macchine attuali non esiste un vero e proprio sistema di controllo in grado di regolare la portata di materiale in funzione dell'umidità e della potenza assorbita dalla rete elettrica, in molti casi la messa a punto avviene manualmente in esercizio diminuendo o aumentando il regime di rotazione della coclea fino a quando la corrente assorbita dalla rete non raggiunge il valore minimo. Va da sé che la produttività della macchina non è costante ma funzione delle caratteristiche fisiche dell'essenza che viene pellettizzata al momento (in particolare durezza e contenuto d'acqua), la variazione sulla portata nominale può essere anche del 10%, lo stesso discorso può essere fatto per la potenza minima di pellettizzazione effettivamente richiesta alla rete. A monte della coclea di alimentazione vi è la possibilità di montare un apparato condizionatore qualora si voglia additivare il materiale in lavorazione con melasso o grassi naturali, tale dispositivo è fornito come opzionale. In figura 25 è presentato uno schema tipo del sistema di alimentazione del materiale completo di condizionatore.

Nelle prime esecuzioni costruttive queste macchine presentavano (e alcune presentano tutt'oggi) problemi all'avviamento a causa dell'adesione del materiale presente nei fori per effetto del raffreddamento della lignina. Adesso il problema è stato risolto mediante iniezione di olio vegetale sulla filiera prima dell'arresto della macchina, in questa maniera all'interno dei fori rimane materiale impregnato di lubrificante, questo però comporta un costo aggiuntivo a seguito dell'acquisto di additivi vegetali. L'avviamento della macchina avviene a vuoto permanendo a basso regime di rotazione per circa 10 minuti in modo tale da scaldare la filiera per attrito e portare in temperatura le superficie dei fori provocando lo scollamento del materiale ivi rimasto dopo l'arresto della macchina.

Il principio di trasmissione del moto dalla filiera ai rulli è abbastanza complesso non è una rotazione pura ma può esservi anche una componente di strisciamento dovuta al fatto che il contatto tra rullo e

filiera in casi particolari può venir meno oppure vi possono essere impuntamenti. Il fatto che il rullo venga appoggiato alla filiera comporta una non trascurabile usura di quest'ultima (si veda gli accorgimenti per la regolazione delle filiere suggeriti da [9]) senza dubbio, quindi, una parte della potenza assorbita dalla rete viene persa in calore (la filiera in queste macchine si scalda fino a raggiungere mediamente una temperatura di 90°C circa, i rulli da esperienze condotte da [5] possono raggiungere i 140°C). Alcuni costruttori al fine di limitare le temperature di esercizio hanno implementato circuiti di raffreddamento a liquido dei rulli pressori. Il fatto che la segatura possa insinuarsi tra rullo e filiera peggiora ulteriormente la situazione poiché agisce come materiale di frizione che produce un aumento del coefficiente d'attrito (da 0.3 acciaio-acciaio a 0.5-0.6 acciaio-legna) e quindi un aumento dell'usura e della potenza persa in calore. Tale evenienza può accadere qualora il gioco di montaggio dei cuscinetti a rulli non sia regolato a dovere oppure nel caso in cui il materiale contenga particelle più dure come spiegato in precedenza. D'altra parte la rotazione del rullo favorisce l'alimentazione del materiale nei fori infatti esso si trova ad essere spinto verso la filiera con un vettore velocità avente direzione tangente al rullo e quindi con una componente in direzione dell'asse dei fori (ovvero radiale).

Le potenze installate vanno da un minimo di 20 kW (per portate nominali di 200 kg/h) fino a 400-500 kW per impianti di grossa produzione ovvero portate nominali di 7000 kg/h, in questo caso solitamente la macchina monta due unità propulsive.

I tempi di manutenzione per questa tipologia di macchine risultano abbastanza ridotti infatti delle indagini effettuate i tempi di sostituzione della filiera vanno da un minimo di 1000 a un massimo di 3000 ore di funzionamento mentre il gruppo rulli (ovvero rulli e relativi cuscinetti) vengono sostituiti ogni 500 – 1000 ore di esercizio. I prezzi di vendita vanno da un minimo di 30 k€ per una macchina con portata nominale di 300 kg/h a un massimo che può raggiungere i 120 k€ per portate nominali di 1200 kg/h, esclusi i dispositivi accessori menzionati.

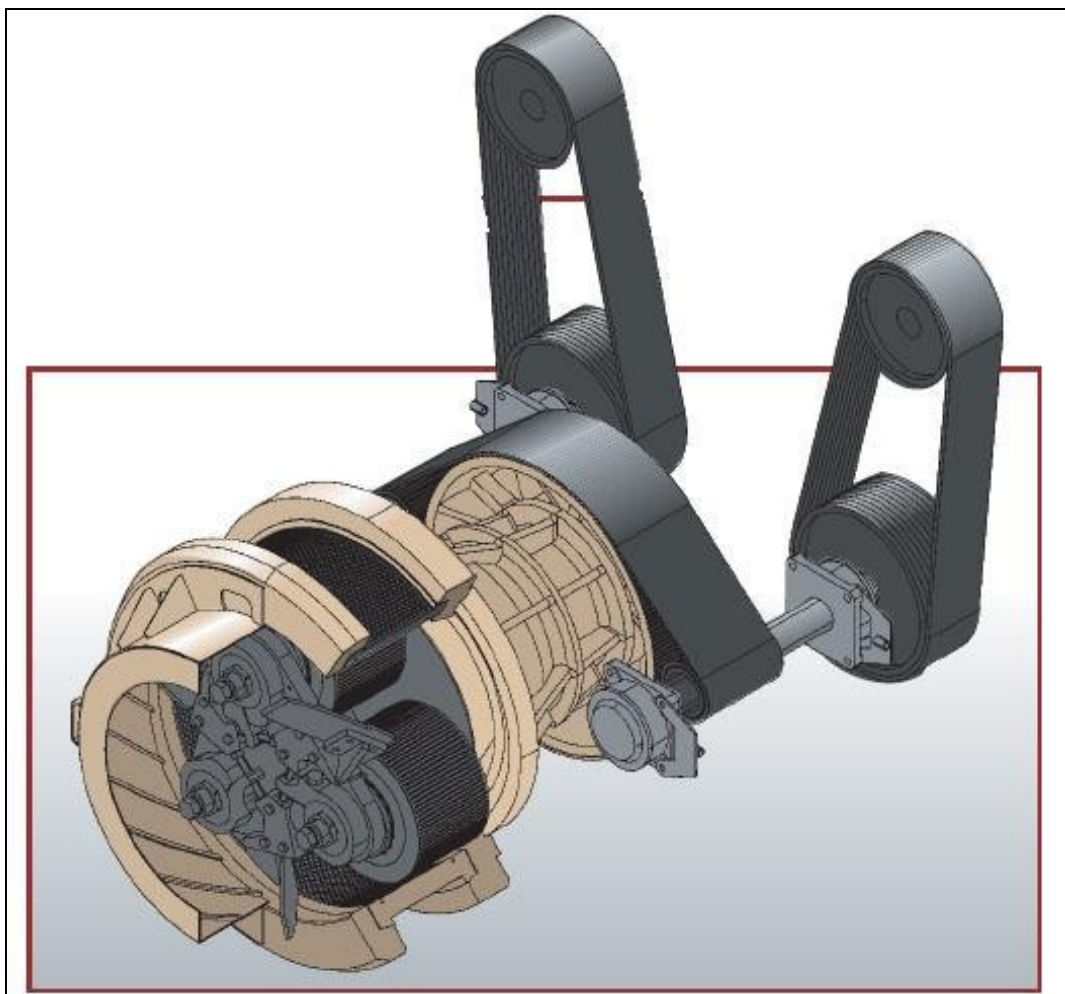


Figura 23: schema tipo di una macchina cubettatrice a filiera cilindrica con asse orizzontale della Bliss Industries. In questo caso la macchina monta due unità propulsive ed ha due stadi di riduzione con trasmissione a cinghia. La puleggia condotta è calettata sulla flangia che porta la filiera, all'interno della quale vi è la camera di cubettatura. Si noti i rulli pressori, in questo caso tre, che sono calettati su un dispositivo a eccentrico per la regolazione della distanza dalla filiera.

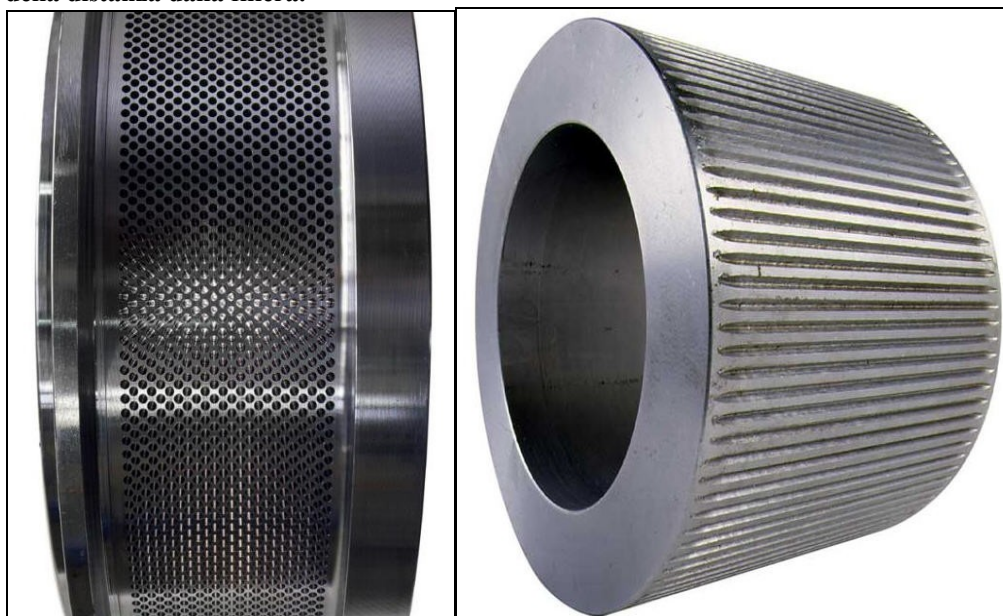


Figura 24: a sinistra è presentata l'immagine di una filiera per la cubettatura del pellet, a destra un'esecuzione di una camicia di un rullo pressore (La Meccanica).

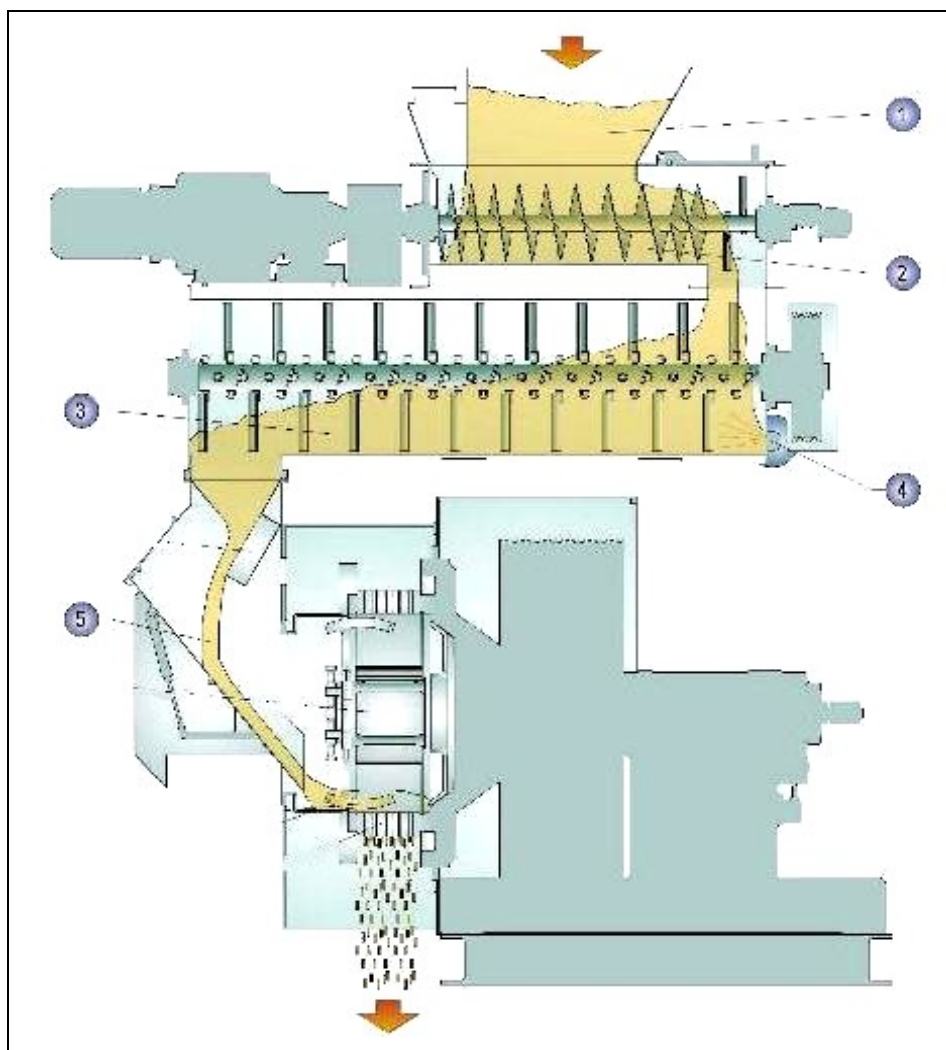


Figura 25: sistema di alimentazione di una cubettatrice con trafilatura cilindrica ad asse orizzontale completa di condizionatore. Il materiale entra da una tramoggia di carico 1 e attraverso la coclea 2 viene spinto nel condizionatore a palette 3 e ivi mescolato insieme all'additivo inserito tramite il dispositivo 4. All'uscita del condizionatore il materiale attraverso il canale 5 arriva nella camera di cubettatura della macchina.

2. Macchine con distanza rulli-filiera variabile in esercizio.

Questa tipologia di macchine a filiera cilindrica orizzontale differisce da quella precedentemente descritta nel fatto che lo schema di montaggio dei rulli pressori non è costituito da elementi rigidi ma da elementi elastici. Nei brevetti Kahl è presentato un sistema di regolazione della distanza tra rulli e filiera che impiega un pistone idraulico che agisce sull'asse di ciascun rullo e lo tiene premuto contro la filiera. Il titolare di tale brevetto pur avendo presentato un embodiment per le macchine a filiera cilindrica ad asse orizzontale non lo ha implementato, invece l'azienda O.M.A. s.r.l. produce una macchina che utilizza tale schema, così come la Van Aarsen Industries della quale in figura 26 è presentata un'immagine. La macchina prodotta dalla O.M.A. utilizza un singolo rullo pressore il quale è calettato direttamente sullo stelo di un pistone idraulico in luogo del tradizionale sistema ad eccentrico. Tale pistone è comandato da un circuito oleodinamico nel quale è inserita una valvola limitatrice di pressione tarata alla pressione nominale di esercizio: ogni qual volta si verificano sovraccarichi sul rullo pressore, tale valvola si apre e mette in scarico una certa portata del fluido di lavoro: in questa maniera il pistone funziona come un ammortizzatore. Ad una ispezione visiva degli organi di cubettatura si è evidenziato lo stesso tipo di usura del rullo che è stato riscontrato nelle macchine a schema rigido, comunque è innegabile che i cuscinetti che sopportano i rulli in questa maniera vengono preservati e possono durare più a lungo.

L'impiego di un pistone idraulico consente inoltre di regolare in ogni istante sia la distanza tra i rulli e la filiera, sia la pressione di pressatura in funzione del tipo di essenza che si sta pellettizzando. La macchina in oggetto presenta poi sia un sistema di regolazione automatico della portata a potenza costante, sia un sistema di prevenzione dei problemi di inceppamento allo start dovuti al materiale rimasto nei fori della filiera. Il sistema di regolazione della portata è costituito da un motore oleodinamico che comanda la coclea di alimentazione del materiale nella filiera, il quale viene controllato mediante PLC: la velocità di rotazione del motore e quindi la portata di materiale, è determinata dalla potenza assorbita dalla rete che è impostata come costante. E' evidente che anche per questa macchina la produzione oraria dipende dal tipo di essenza e dal grado di umidità del materiale in ingresso. L'alimentazione del materiale inizia soltanto dopo che la filiera ha raggiunto la temperatura nominale di esercizio che è di circa 70-80 °C come avviene nelle macchine [4]. Il sistema di lubrificazione della filiera è anch'esso comandato dal PLC: ogni qualvolta si aziona il comando di start o di stop, sulla filiera viene immesso olio vegetale (di solito olio di mais) allo scopo di mantenere lubrificato il materiale che rimane all'interno dei fori e quindi evitare l'adesione alle pareti, questo sistema consente di risolvere i problemi di avviamento delle macchine tradizionali e permette quindi di installare potenze minori.

Per questa macchina il produttore fornisce due tipologie di filiere: una per essenze dure e una dedicata alla pellettizzazione di essenze morbide: la differenza consiste nella lunghezza del tratto cilindrico calibrato, per le essenze dure è di 33 mm mentre per quelle morbide è di 36 mm. Anche il disegno della sezione del foro differisce rispetto ad una filiera tradizionale in quanto al fine di favorire l'estrazione del pellet, all'uscita si trova un tratto conico.

La produzione oraria nominale della macchina è di circa 180 kg/h per una potenza installata di 11 kW, il costo è di circa 30 k€.

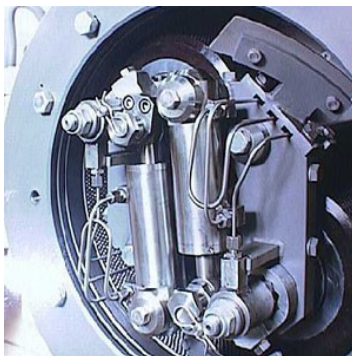


Figura 26: la regolazione dei rulli idraulica implementata nelle macchine cubettatrici prodotte dalle Van Aarsen International.

Macchine a filiera piana con asse verticale.

L'azienda leader nella produzione di questo tipo di macchine è la Amandus Kahl, essa adotta il sistema di regolazione della distanza rulli-filiera presentato nella serie di brevetti di loro proprietà, denominato DISTAMAT messo a disposizione del cliente come opzionale; una sezione della macchina è presentata in figura 27.

Dal punto di vista costruttivo questi tipi di macchine differiscono notevolmente dalle precedenti perché hanno un'architettura che si sviluppa in direzione verticale e la filiera è una piastra piana di forma circolare sulla cui superficie sono ricavati i fori per l'estrusione del pellet. Tale filiera non è dotata di alcun moto e rimane in posizione fissa durante la lavorazione, il moto che produce la pellettizzazione del materiale è fornito invece direttamente ai rulli pressori il cui numero varia da un minimo di tre fino a cinque unità. Come nelle macchine con filiera cilindrica ad asse orizzontale, i rulli sono calettati folli sui relativi assi, essi, a loro volta, sono collegati al dispositivo di regolazione della distanza rulli-filiera di cui verrà fornita una descrizione nel seguito. Come per le macchine a filiera cilindrica, il calettamento dei rulli pressori sui relativi assi avviene utilizzando cuscinetti a

rulli montati ad O ed aventi opportuna schermatura al fine di evitare l'ingresso del materiale in lavorazione; la cuscinetteria è lubrificata mediante un sistema a circolazione forzata di olio. In riferimento alla figura 27, si può osservare che la catena di trasmissione del moto all'albero sul quale è calettato il dispositivo di regolazione e trascinamento dei rulli, è rigida poiché sfrutta un singolo stadio di riduzione a vite senza fine. Data l'architettura della macchina, l'albero di trasmissione passa all'interno della filiera mentre i coltelli che operano il taglio del pellet a misura sono posti sotto la filiera e posti in rotazione dall'albero stesso.

Il sistema di distribuzione del materiale non sfrutta l'azione di una coclea di alimentazione bensì avviene semplicemente per gravità attraverso un carter, opportunamente sagomato, posto sulla parte superiore della macchina non è perciò necessario un motore aggiuntivo per la movimentazione del sistema di alimentazione.

Il dispositivo DISTAMAT, di cui uno schema è fornito nella figura 28, può essere richiesto sulla macchina essendo disponibile come optional. Tale sistema è integrato in un dispositivo di regolazione e controllo automatico dell'intero processo di cubettatura in funzione del tipo di materiale e delle potenze richieste dalla macchina durante la cubettatura. La costruzione è realizzata calettando gli assi che portano i rulli su un manicotto coassiale con l'albero stesso e ad esso solidale nella rotazione, il quale è in grado di traslare in direzione verticale (avvicinando o allontanando i rulli dalla filiera). Tale manicotto porta sulla parte superiore una camera entro la quale fluisce olio in pressione che ne produce la traslazione. Nella parte inferiore tale manicotto è sospeso su un sistema di molle a tazza di supporto che sono coassiali con l'albero motore ed hanno il compito di sorreggerlo durante il moto di rotazione. La mandata del martinetto idraulico è collegata al circuito oleodinamico di comando il quale è controllato dal pc che regola l'intero processo di pellettizzazione. Tipicamente, da indagini effettuate, la distanza tra rulli e filiera è mantenuta intorno a 0.2-0.3 mm durante il funzionamento.

La possibilità di avere un sistema di regolazione automatico dell'intero processo consente di ottimizzare il funzionamento della pressa in funzione dell'essenza che deve essere pellettizzata riducendo i costi di esercizio (in termini di potenza assorbita dalla rete e personale da dedicare alla regolazione della macchina). Dal punto di vista del funzionamento il fatto di avere uno schema di calettamento non rigido consente di preservare il gruppo rulli e cuscinetti da eventuali sovraccarichi aumentandone la durata.

Rispetto alla macchina a filiera cilindrica con asse orizzontale, la macchina a filiera piana presenta il vantaggio di non avere i rulli trascinati durante il moto per via indiretta ma sono direttamente movimentati e quindi a un numero minore di organi in moto relativo. Comunque uno strisciamento relativo delle superficie tra rullo e filiera vi è a causa del fatto che il rullo ha forma cilindrica. La possibilità di poter controllare la regolazione della distanza rulli – filiera durante la lavorazione, consente di non avere mai il contatto diretto tra questi due organi ciò riduce di conseguenza l'usura sia dei rulli che della filiera, questo è dimostrato dai tempi di sostituzione di questi componenti che sono: 3000 e 4500 ore rispettivamente, quindi più alti rispetto alla media.

Senza dubbio l'architettura di questo tipo di macchina è decisamente più complessa rispetto ad una macchina a filiera cilindrica orizzontale inoltre la soluzione tecnica scelta per la realizzazione del sistema di regolazione della distanza tra rulli e filiera non è tra le più semplici, tutto ciò si ripercuote sul prezzo di vendita, infatti a parità di produzione oraria il costo di una macchina simile è circa il doppio del costo di una macchina a filiera cilindrica orizzontale (considerando una produzione oraria di 200 kg/h, il prezzo è di 60 k€ contro 30 k€). Dal punto di vista degli ingombri, lo sviluppo in direzione verticale consente, a parità di portata, di avere dimensioni di ingombro più contenute rispetto alle macchine con filiera ad asse orizzontale.

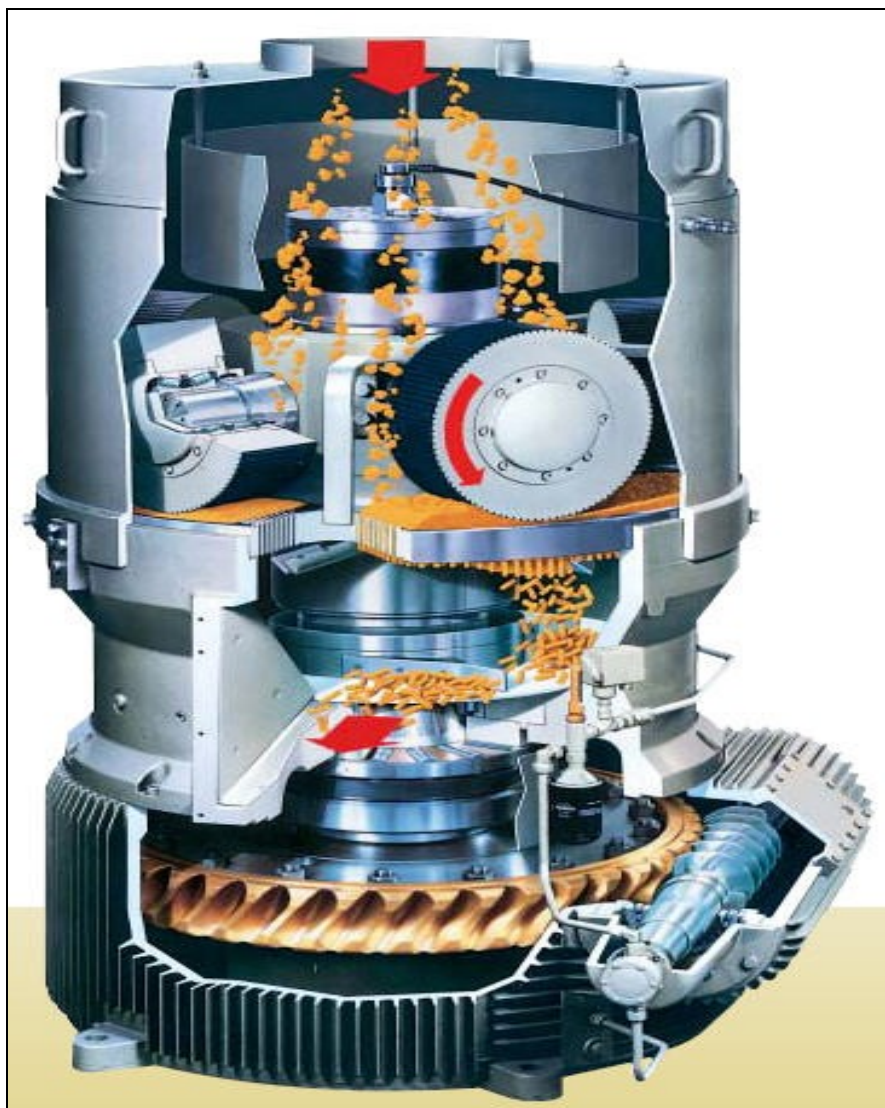


Figura 27: uno schema in sezione di una cubettatrice con filiera piana ad asse verticale munita del dispositivo di regolazione della distanza rulli – filiera in esercizio, prodotta dall'azienda Amandus Kahl. Il materiale entra per gravità dall'alto e si ferma sulla filiera essendo uniformemente distribuito mediante opportune spatole rotanti solidalmente ai rulli pressori. Essi sono calettati sui relativi assi mediante cuscinetti a rulli conici, tali assi sono collegati al manicotto del dispositivo di regolazione della distanza rulli – filiera che viene trascinato in rotazione dall'albero motore. Sotto la filiera sono posti i coltelli per il taglio a misura del pellet che sono solidali all'albero di trasmissione. Si noti, infine, la catena di trasmissione con vite senza fine.

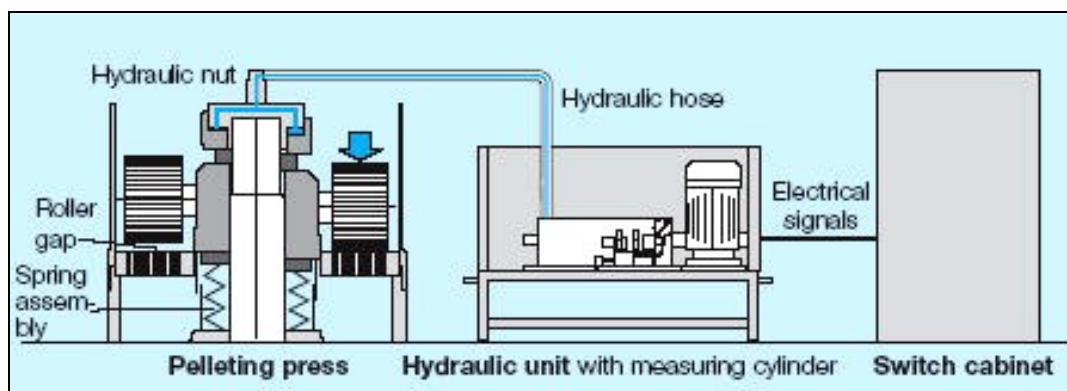


Figura 28: schema di funzionamento del dispositivo Distamat, brevettato Kahl. Si osserva il manicotto sul quali gli assi dei rulli sono calettati, supportato in basso da un pacco di molle a tazza e collegato sulla parte superiore alla camera in cui viene immesso l'olio in pressione. E' presentato anche lo schema di comando e controllo.

4.3.2 - Analisi comparativa della caratteristica di funzionamento.

Sulla base dell'analisi tecnica condotta sulle macchine cubettatrici disponibili sul mercato, verrà adesso presentato uno studio che mette a confronto le varie tipologie di macchine in funzione della produzione oraria di pellet dichiarata. L'indagine è stata condotta esclusivamente su dati provenienti da fonti ufficiali ovvero dedotti direttamente dai cataloghi dei produttori di queste macchine. Il campione pertanto risulta limitato a cinque fonti ovvero poiché non è stato possibile ottenere informazioni certe da tutti i produttori considerati nel presente studio. La caratteristica a confronto in funzione della produzione oraria nominale, è la potenza nominale installata. La scelta è caduta su tale parametro poiché considerando la potenza installata a parità di produzione oraria si può individuare quale tipologia di macchina può essere presa come target di mercato. Riportando tale andamento in forma di grafico in figura 29 si può osservare che la macchina con trafilatura piana orizzontale, a parità del volume di produzione, risulta essere quella che dal punto di vista energetico è più conveniente infatti, ragionando in termini di potenza specifica, è quella che possiede il fattore più basso infatti impiega circa 50 kWh per tonnellata prodotta.

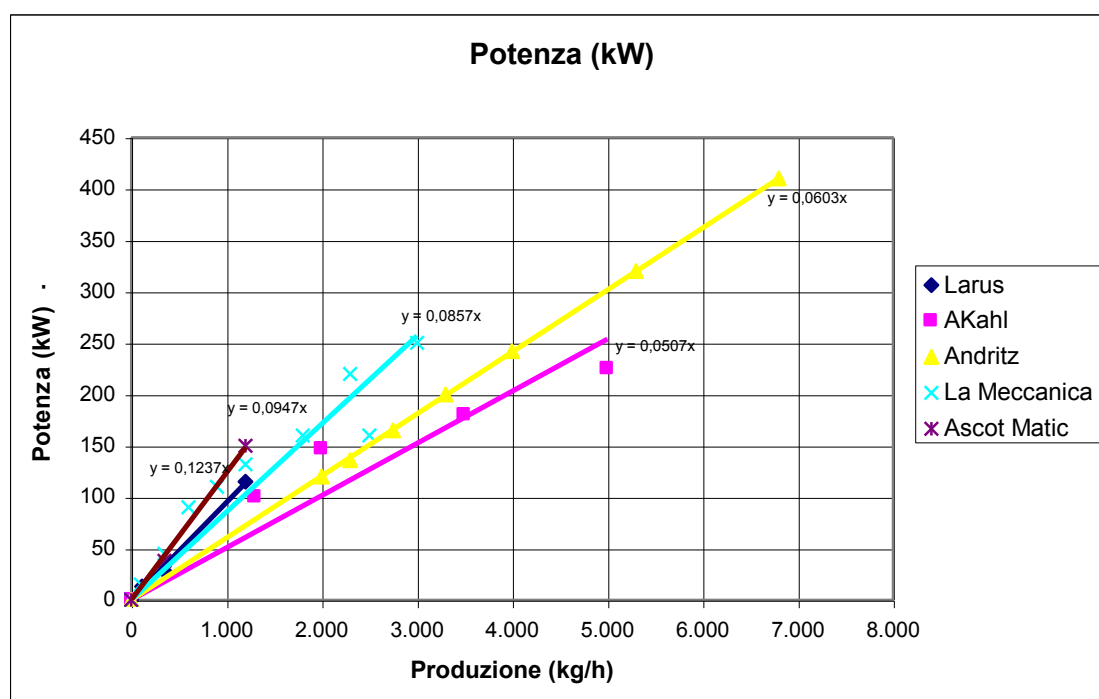


Figura 29: potenza di pellettizzazione installata in funzione della produzione oraria nominale: si osserva che le macchine a trafilatura piana (A. Kahl) hanno, a parità di portata, potenza specifica più bassa.

Poiché la produzione oraria è direttamente correlata alla velocità media di estrusione, alla superficie forata della filiera e al numero di fori, si ritiene opportuno, a titolo puramente indicativo, riportare gli andamenti della portata in funzione dell'area della superficie di filiera e del diametro (figure 30 e 31). Questi grafici possono risultare utili per dedurre dimensioni di massima ed ingombri delle macchine attuali in funzione della loro taglia produttiva.

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

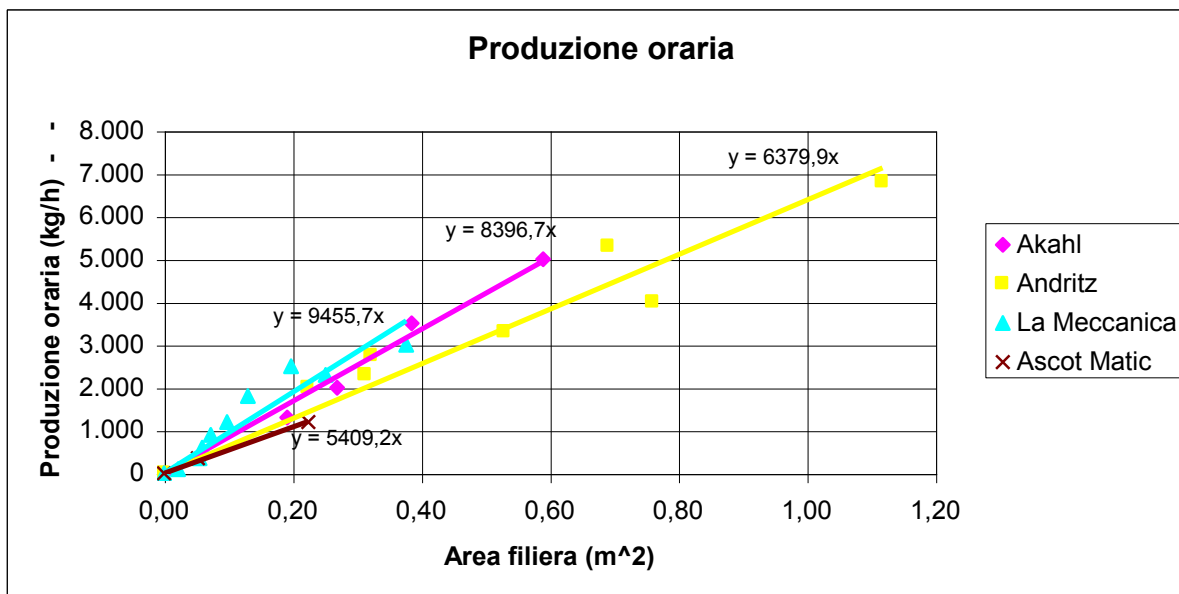


Figura 30: andamento della produzione oraria in funzione della superficie di filiera.

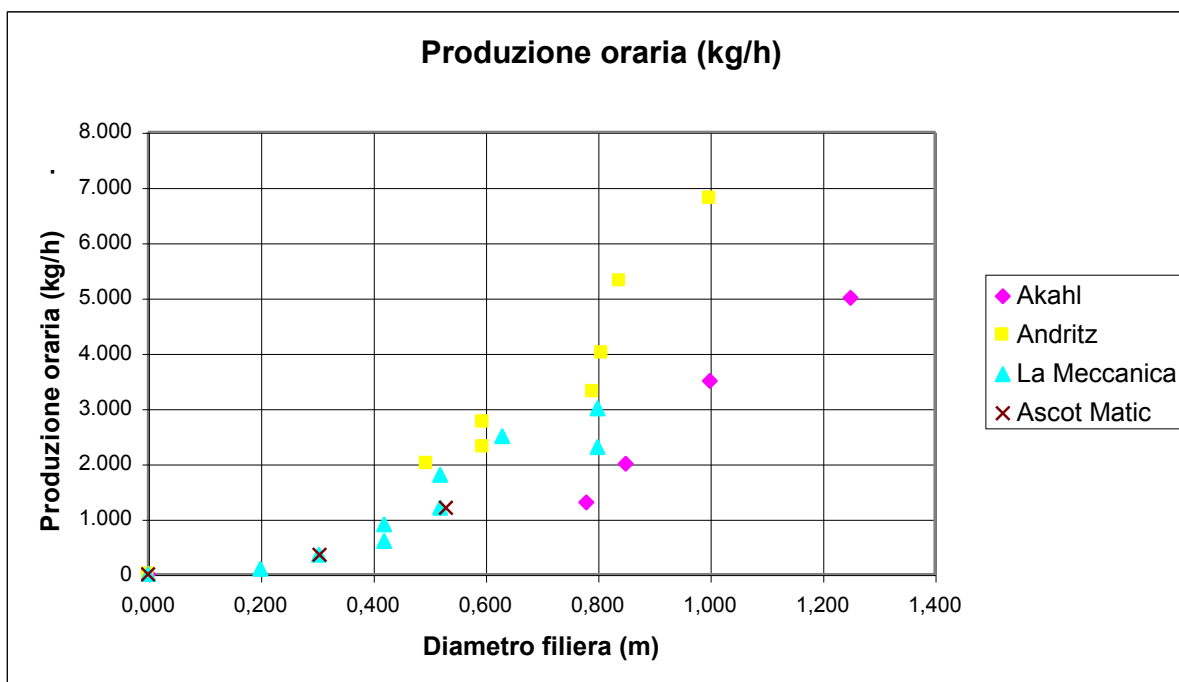


Figura 31: produzione oraria in funzione del diametro di filiera.

Dalla Tabella 4 delle caratteristiche si evince infine che il numero di rulli impiegato non influisce sulla produzione oraria della macchina. Purtroppo non si hanno informazioni complete sulla velocità di rotazione della filiera nelle macchine ad asse verticale. In ogni caso si è constatato che tale velocità non varia con la portata della macchina ma anzi rimane costante (dell'ordine di 100-200 rpm), si deduce pertanto che le taglie produttive sono determinate dalla variazione delle dimensioni della filiera.

**STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET
ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE**

Tabella 4: riassunto delle caratteristiche di funzionamento e dimensionali delle macchine.

Produttore	Produzione media(kg/h)	Potenza media(kW)	Area filiera(m²)	Diametro filiera(m)	Diametro rulli (m)	N° rulli	Peso
Larus							
Sinte 1000	115,00	13,00	ND	0,343	0,122	2	1500
Sinte 2500	350,00	28,00	ND	0,480	0,182	2	2100
Sinte 4500	1.200,00	115,00	ND	0,720	0,250	2	8000
Amandous Kahl							
38-780	1.300,00	100,00	0,1916	0,780	0,28 o 0,35	da 3 a 5	3000
37-850	2.000,00	147,00	0,2695	0,850	0,350	da 3 a 5	4600
39-1000	3.500,00	180,00	0,3850	1,000	0,450	da 3 a 5	5400
45-1250	5.000,00	225,00	0,5900	1,250	0,450	da 4 a 5	9000
Andritz							
600	2.000,00	120,00	0,2246	0,496	0,248	2	ND
600 e 800	2.300,00	136,00	0,3130	0,596	0,298	2	ND
1200	2.750,00	165,00	0,3227	0,596	0,298	2	ND
1600	3.300,00	200,00	0,5296	0,792	0,396	2	ND
2000	4.000,00	242,00	0,7603	0,808	0,404	2	ND
2400	5.300,00	320,00	0,6912	0,840	0,420	2	ND
3000	6.800,00	410,00	1,1180	1,000	0,500	2	ND
La Meccanica							
CLM200	100,00	15,00	0,0220	0,200	0,096	2	ND
CLM304	350,00	45,00	0,0554	0,304	0,150	2	ND
CLM 420	600,00	90,00	0,0593	0,420	0,206	2	ND
CLM 420	900,00	110,00	0,0725	0,420	0,206	2	ND
CLM 520	1.200,00	132,00	0,0980	0,520	0,250	2	ND
CLM 520	1.800,00	160,00	0,1306	0,520	0,250	2	ND
CLM 630	2.500,00	160,00	0,1978	0,630	0,310	2	ND
CLM 800	2.300,00	220,00	0,2512	0,800	0,395	2	ND
CLM 800	3.000,00	250,00	0,3768	0,800	0,395	2	ND
Ascot Matic							
Pelletmatic 55	350,00	38,00	0,0527	0,305	0,150	2	2000
Pelletmatic 135	1.200,00	150,00	0,2247	0,530	0,255	2	8500

5 – Considerazioni sulle tecnologie impiegate nell'attuale processo e opportunità di innovazione.

Dopo aver presentato nel dettaglio le tecnologie impiegate nella filiera di produzione del pellet di qualità si ritiene opportuno compiere una sintesi finale di quelli che possono essere considerati i limiti dell'attuale processo in modo tale da poter individuare eventuali colli di bottiglia da rimuovere e, in definitiva, le fonti di possibile innovazione.

La cippatura è una fase che risente molto del livello di umidità della materia prima lavorata specialmente se si utilizzano cippatrici a tamburo che impiegano una griglia di vagliatura del cippato. Tale problema non si verifica nelle cippatrici a disco poichè non utilizzano la griglia di pezzatura, però, per contro, queste ultime presentano una spiccata tendenza alla rapida usura delle lame che devono essere sostituite dopo pochissime ore di funzionamento. La fase di triturazione sia primaria che secondaria, soffre, ancor più della cippatura, della presenza di umidità nel materiale, infatti l'elevata finezza delle particelle di legno unita all'acqua presente nel cippato può portare a intasamenti del tritatore e impastamenti degli organi che operano la lavorazione. D'altra parte questo è inevitabile quando si lavora materiale fresco con le tecnologie di triturazione attualmente impiegate le quali non sono in grado di produrre una disidratazione meccanica del materiale. Come si è visto questa è una delle cause che determina l'impiego dell'essiccazione termica tra la fase di cippatura e la successiva triturazione quando il materiale di partenza presenta umidità superiore al 20 % in peso.

La fase di essiccazione sembra essere, in assoluto, la criticità dell'attuale processo di produzione sulla quale vi è l'esigenza primaria di innovare se si vuole avere la pretesa di produrre pellet competitivo a partire da legna umida. Si è dimostrato che in termini energetici l'essiccazione mediante la deumidificazione termodinamica risulta altamente sconsigliata a causa dell'elevata richiesta energetica dovuta sia all'elevato volume di acqua da asportare, sia allo scarso rendimento termico dei forni oggi disponibili. Tutto questo si traduce in costi di esercizio che incidono per un 70% sul costo di produzione totale del pellet. Alla luce di tali considerazioni si aprono alcune possibili vie di intervento in alternativa alla essiccazione tradizionale:

1. essiccazione naturale;
2. essiccazione meccanica;
3. deumidificazione mediante ultrasuoni;
4. impiego dei gas di scarico del tritatore e della cippatrice;

L'essiccazione naturale richiede lo stoccaggio della materia prima umida in ambienti di grande volume con atmosfera controllata e continuo ricambio d'aria. Inoltre tale processo avviene in tempi che hanno una scala di diversi ordini di grandezza più grande rispetto ad una essiccazione tradizionale quindi visto l'elevata portata di acqua da asportare e la modesta velocità di deumidificazione non si può escludere a priori l'insorgere della fermentazione durante lo stoccaggio con conseguente deterioramento di una parte della materia prima. Ammesso che tali problemi non sussistano, non si può comunque trascurare in seconda istanza l'elevato volume occorrente per la giacitura e l'organizzazione del cippato il quale occupa uno spazio netto stimato in 75000 m³.

Sembra invece più percorribile la strada dell'essiccazione meccanica della quale un esempio in fase di studio e sperimentazione è stato descritto nel capitolo 4, poichè in questa maniera la materia prima può essere immediatamente deumidificata e tritata in un processo di produzione continuo.

La deumidificazione ad ultrasuoni può essere una valida alternativa della quale verificarne l'applicabilità al caso specifico poichè impiegata con successo in altri processi industriali. Il principio di funzionamento consiste nel far evaporare l'acqua all'interno del mezzo per effetto del riscaldamento locale indotto nel materiale (circa 4000 K) a seguito del passaggio delle onde di pressione ultrasonore.

Infine, come descritto nel capitolo relativo, i tritatori e le cippatrici attualmente in commercio

STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE

possono essere dotate di motorizzazione endotermica, per cui una via ulteriore di intervento da verificare consiste nell'impiego dell'energia termica contenuta nei gas di scarico al fine di provocare un'essiccazione, seppur parziale, del cippato.

Eseguendo un bilancio energetico in base ai consumi dichiarati per la tecnologia Micronex (supponendola funzionante), si osserva che la potenza elettrica necessaria per la fase di triturazione ed essiccazione del cippato è circa un terzo della richiesta termica di un processo convenzionale per cui i costi di produzione dell'intera filiera considerando, per una tonnellata di pellet, risulterebbero:

- cippatura: 15 kWh ovvero 2.7 €;
- essiccazione e triturazione: 120 kWh ovvero 21.6 €;
- cubettatura: 60 kWh ovvero 10.8 €

Il costo totale dell'energia impegnata risulta quindi di 35.1 € per tonnellata prodotta ovvero circa la metà del costo odierno.

L'analisi della efficacia della tecnologia di cubettatura attualmente impiegata deve essere condotta da due punti di vista differenti. Dal punto di vista della rispondenza del prodotto ai requisiti previsti dalle normative vigenti la tecnologia di estrusione oggi utilizzata è senza dubbio efficace ovvero si riesce ad ottenere un pellet rispondente agli standard qualitativi. La stessa affermazione non può essere fatta se si considera l'efficienza del processo di cubettatura in termini energetici. Infatti la scelta dell'estrusione come tecnologia eletta per la produzione del pellet di legna è stata fatta esclusivamente sulla opportunità della similitudine di forma del prodotto finale con il pellet di altro materiale (come ad esempio quello dell'industria mangimistica) senza una valutazione a monte volta ad accertare se fosse la tecnologia migliore dal punto di vista energetico.

Come ampiamente descritto nel capitolo 4, la compattazione della polvere nei fori della filiera avviene grazie alla forza d'attrito che si genera sulla superficie di interfaccia, la scelta di utilizzare l'attrito come principio di lavoro su una sostanza come il legno risulta discutibile dal punto di vista energetico. Inoltre non è detto che la forza di attrito che si genera sia tutta necessaria per la compattazione per cui è probabile che l'azione netta sufficiente a comprimere il materiale sia, in realtà, minore.

Dal punto di vista dell'esercizio, le macchine per la cubettatura del legno presentano le seguenti problematiche:

- produzione oraria non costante e fortemente dipendente dall'essenza lavorata;
- potenza installata maggiore di quella mediamente impiegata durante la lavorazione;
- usura accelerata del gruppo cuscinetti – rulli;
- usura accelerata della filiera;
- in alcune costruzioni problemi all'avviamento per inceppamento del materiale nei fori della filiera;

Attualmente lo sviluppo mirato di queste macchine per adattare alla lavorazione della polvere di legna, ha portato a superare, almeno in parte, alcune problematiche relative agli inceppamenti nei transitori di avviamento, impiegando una preventiva lubrificazione della filiera con oli vegetali, rimangono tutt'ora i problemi relativi all'usura accelerata e alla produzione non costante. Mediante un'analisi RCA (Root Conflict Analysis) del processo di cubettatura si sono individuate le seguenti linee di intervento:

1. Migliorare la lubrificazione e isolare gli organi rotanti dalla polvere di legna elaborata;
2. Eseguire uno screening accurato e una selezione del materiale in lavorazione all'origine in maniera da renderlo il più possibile uniforme;
3. Creare una distribuzione del materiale uniforme sulla filiera con uno spessore controllato e costante (ad esempio utilizzando racle e raschiatori per spalmare il materiale sulla filiera e

- asportare quello in eccesso);
4. Modificare il disegno della filiera per creare canali di sfogo e favorire l'inserimento della segatura nei fori (filiera a nido d'ape, fori di sfiato nelle zone piene tra un foro ed un altro, fori inclinati nella direzione della componente di velocità tangenziale ai rulli);
 5. Miglioramento del controllo automatico del processo in funzione dell'umidità del materiale in ingresso;
 6. Modifica locale delle proprietà fisiche della segatura compressa nel foro a fine processo per provocarne una facile espulsione al riavvio della macchina.
 7. Il processo di estrusione in sé è da rimettere in discussione;
 8. Passare a forme del pellet differenti da quella cilindrica in modo da poter valutare l'impiego altre tecnologie, differenti dall'estrusione come lo stampaggio o la laminazione;

Alla luce delle considerazioni effettuate e delle linee di intervento individuate si giunge alle conclusioni di cui al paragrafo seguente.

6 - Conclusioni.

L'analisi dello stato dell'arte effettuata nel presente lavoro ha messo in evidenza che la criticità del processo di produzione del pellet di qualità, a partire da cippato umido, risiede nella tecnologia utilizzata nella fase di essiccazione. Dal punto di vista energetico l'attuale processo di deumidificazione impegna una potenza termica pari a circa l'80% della potenza totale richiesta per la produzione di una tonnellata di pellet (350 kWh su un totale di 440 kWh). In termini di costo poiché trattasi di energia fornita da combustibile, si è dimostrato che l'essiccazione termica incide per circa il 70% sul costo totale di produzione (42 €/t rispetto ad un costo totale dell'energia impiegata di 58.2 €/t). Ipotizzando di utilizzare come combustibile solido una parte del cippato disponibile, si avrebbe da un lato un risparmio nei costi di esercizio dall'altro una perdita stimabile intorno al 7% del contenuto energetico del prodotto finale. Adottando, invece, un sistema di essiccazione, ad esempio, di tipo meccanico con contemporanea triturazione, si è valutato che la richiesta energetica per questa fase subirebbe un drastico abbattimento (2/3 circa) rispetto al sistema tradizionale, con una notevole contrazione del costo totale di processo (da gli attuali 58.2 €/t a 35.1 €/t circa). Un altro aspetto non trascurabile, riguardo l'opportunità di adottare sistemi di deumidificazione senza combustione, è rappresentato dal valore aggiunto conferito al pellet a seguito dell'impiego di un processo di produzione con emissioni in atmosfera decisamente ridotte rispetto a quelle del processo attuale e quindi con un impatto ambientale minore. Lo studio di sistemi di essiccazione alternativi che siano in grado di ridurre la richiesta di energia necessaria per questa fase rappresenta, senza dubbio, l'esigenza primaria di innovazione dell'attuale filiera, qualora si voglia produrre pellet di legna a partire da cippato umido.

Alla luce di quanto appena affermato, lo studio di nuovi sistemi di cubettatura non appare come esigenza sentita nel processo attuale. Infatti il pellet ottenuto con la tecnica di estrusione in uso, risponde in pieno agli attuali standard qualitativi e, anche se il sistema adottato è in assoluto di bassa efficienza energetica, la richiesta di potenza per questa fase non supera il 14% della potenza totale dell'attuale processo ed è perciò decisamente inferiore a quella richiesta per la fase di essiccazione. Si conclude, quindi, che lo studio di un sistema alternativo alla cubettatura tradizionale potrebbe essere giustificato se e soltanto se l'essiccazione tradizionale venisse sostituita con un sistema a basso consumo poiché in tale circostanza la richiesta energetica per la cubettatura potrebbe divenire non più trascurabile rispetto a quella richiesta per l'intero processo.

Fonti.

1. "Energia dall'agricoltura – Pellet – Allegato 3: analisi tecnico economica di una filiera", anno 2000, Attività PROBIO 2000, Regione Lombardia, C.T.I., MiPAF.

**STATO DELL'ARTE DELLE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI PELLET
ED INDIVIDUAZIONE DELLE OPPORTUNITÀ DI INNOVAZIONE**

2. “Il pellet: notizie e informazioni sulla produzione e l’impiego”, Bernardo Hellrigl, Aula Magna, n°3, periodico di Scienze Forestali, 2004.
3. Alakangas, E., Paju, P., “Wood pellets in Finland – technology, economy and market”. OPET Report 5. Jyväskylä VTT Processes, 85 pp.
4. Manuale di uso e manutenzione Larus SINTE 1000.
5. Bliss Industries - www.bliss-industries.com
6. Larus impianti – www.pellet.it
7. Andritz Sprout Matador – www.andritz.com
8. Brevetti Kahl DE3813081, DE3806945
9. OMA srl. – www.oma-srl.com
10. Amandus Kahl – www.akahl.de
11. La Meccanica – www.lameccanica.com
12. Ascot Matic – www.ascot-matic.com
13. FBP – www.fbp.se
14. CPM - www.cpmroskamp.com
15. Mabrik – www.mabrik.com
16. Costruzioni Nazzareno – www.nazzareno.it
17. Salmatec GmbH – www.salmatec-gmbh.de
18. Van Aarsen International – www.aarsen.com
19. Ladurner – www.ladurner.it
20. Pezzolato – www.pezzolato.it
21. Meccanica Gandini – www.gandinimeccanica.it
22. Peruzzo – www.peruzzo.it
23. Angelo Tanfoglio – www.angelotanfoglio.it
24. Vecoplan – www.vecoplan.com
25. ISVE – www.isve.com
26. Caravaggi – www.caravaggi.it