



**Dipartimento di scienze e tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la
Natura e l'Energia**

**Corso di Dottorato di Ricerca in Scienze e tecnologie per la
gestione forestale e ambientale - (XXV CICLO)**

Titolo tesi di Dottorato di Ricerca

**Sminuzzato: aspetti tecnologici, requisiti qualitativi e innovazioni
tecniche. (s.s.d. AGR/06)**

Tesi di dottorato di:

Dott. Angelo Del Giudice

Coordinatore del corso

Prof. Rosanna Bellarosa

Firma

Tutore

Dott. Rodolfo Picchio

Firma.....

Co-tutore

Dott. Luigi Pari

Firma.....

28 Maggio 2013

Alla mia famiglia

Summary

Wood chips: technological aspects, qualitative requirements, and technological innovations.

In recent years, the wood chips has been largely used by power plants of different kinds as biofuel in order to produce heat or electricity. The use of wood chip represents today a valuable solution to valorize the residues coming from agricultural and forestry management, as well as for the utilization of worthless woody material that otherwise should be disposed.

When we talk about the energetic yield of the product, the fuel storability, and the market price, the aspects linked to wood chip quality assumes great importance. In this regard, a good particle size distribution and the right moisture content of the wood fuel determine the value of the product.

In particular, the particle size influences the typology of power plant that can utilize the fuel. For instance, the presence of over measured particles may determine problems in small and medium scale power plants. On the other hand, a product with particles too small may compromise the preservation of the fuel that can be easily degraded by microorganisms during storage, determining dry matter losses.

Among the technical innovations developed till now to improve the particle size characteristics of wood chips, there are those concerning the mechanical chipping systems. Working and improving these kind of systems may represent the most valuable way to improve one or more aspects related to the quality of this product. In this regard, the present research led to develop a new cutting device to be installed on existing machines for responding to the requirements of the market, producing chips of larger size with optimal characteristics for an efficient combustion.

Keywords: wood chip, qualitative requirements, chips size.

Riassunto

Sminuzzato: aspetti tecnologici, requisiti qualitativi e innovazioni tecniche.

Negli ultimi anni il legno sminuzzato è stato utilizzato sempre più come biocombustibile solido, in centrali elettriche, centrali di cogenerazione, negli impianti di riscaldamento di grandi dimensioni e in impianti di combustione di piccole dimensioni. L'utilizzo del legno sminuzzato risulta vantaggioso per la riqualificazione del materiale proveniente dalle foreste come i residui delle utilizzazioni forestali, delle operazioni colturali, degli alberi danneggiati dalle tempeste e dalla raccolta di materiale proveniente da impianti dedicati, che rappresentano le principali fonti di approvvigionamento di legno sminuzzato.

La qualità dello sminuzzato risulta decisiva dal punto di vista della resa energetica, della conservabilità, del tipo di impianto in grado di utilizzarlo e nella formazione del prezzo di mercato. Una buona ripartizione dimensionale e il giusto contenuto idrico rappresentano i parametri chiave per la corretta combustione dello sminuzzato in caldaie dedicate

La pezzatura in particolare condiziona la tipologia di impianto in grado di bruciarlo, e il modo in cui può essere immagazzinato. La presenza di particelle sovra misura può pregiudicare l'utilizzo nelle centrali di piccole e medie dimensioni; d'altra parte, uno sminuzzato con frazioni fini elevate, pregiudica la conservazione del prodotto e la sua resa energetica.

Tra le innovazioni tecniche per superare i limiti dimensionali dello sminuzzato, operando in particolare sugli aspetti tecnici relativi alla meccanizzazione oggi disponibile sul mercato, e sviluppando una serie di innovazioni tecnologiche in grado di migliorare uno o più aspetti legati alla filiera agro energetica. La ricerca ha sviluppato un nuovo dispositivo di taglio da poter installare sulle macchine operatrici, e cercare di rispondere così alle richieste di una pezzatura più grande delle scaglie di sminuzzato, e ottenere un prodotto dalle caratteristiche fisiche e merceologiche ottimali per una combustione efficiente.

Parole chiave: sminuzzato, requisiti qualitativi, pezzatura.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Dr. Rodolfo Picchio per i preziosi insegnamenti durante i tre anni di dottorato, per il tempo dedicatomi, la professionalità e per la capacità a dirimere i miei dubbi durante la stesura di questo lavoro.

La presente tesi è stata svolta sulla base dei dati raccolti nell'ambito del progetto di ricerca Suscace, finanziato dal Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (MIPAF) e coordinato dal Dr. Luigi Pari del CRA-ING di Monterotondo (RM) a cui va la mia più sentita gratitudine, per i consigli e per l'occasione offertami di lavorare insieme.

Desidero ringraziare di cuore tutti colleghi del CRA-ING per avermi supportato e sopportato, durante l'arco di questi tre anni. Tutti voi avete contribuito alla realizzazione di questa ricerca, quindi è anche un po' vostra!

Infine, desidero ringraziare con affetto la mia famiglia ed in particolare mia moglie Michela per essermi stata vicino e per avermi sostenuto in ogni momento.

Un infinito grazie a tutti.

Angelo Del giudice

SOMMARIO

INTRODUZIONE	9
OBIETTIVI DELLA RICERCA	11
STATO DELL'ARTE	12
LA BIOMASSA LIGNO-CELLULOSICA	12
Le fonti della biomassa ligno-cellulosica	14
La selvicoltura	15
L'agricoltura	15
La Manutenzione del verde urbano	16
Caratteristiche tecnologiche della biomassa ligno-cellulosica	18
La cellulosa	18
L'emicellulosa	18
La lignina	19
Caratteristiche chimico fisiche	19
Valorizzazione della biomassa ligno-cellulosica	24
Riscaldamento ed essiccamento del materiale	25
Pirolisi e Gassificazione	25
Combustione	26
IL LEGNO SMINUZZATO	28
Legno sminuzzato: vantaggi e svantaggi	29
Le macchine operatrici per la trasformazione della Biomassa in Biocombustibile	31
L'organo di taglio	32
Sminuzzatrici a disco	32
Sminuzzatrici a Tamburo	34
Sminuzzatrici a vite senza fine	37
La Potenza	38

L'allestimento.....	41
Macchine per la raccolta delle colture a turno breve (SRF).....	43
GLI STANDARD QUALITATIVI DEL LEGNO SMINUZZATO.....	46
La pezzatura	52
Il tenore idrico.....	54
Il contenuto di fibra e ceneri.....	55
Il potere calorifico	57
La massa volumica apparente.....	58
La dinamica della formazione del chip (cenni).....	61
<i>Geometria della scaglia</i>	65
Il rotore sperimentale CRA-ING	67
Il rotore CRA-ING di seconda generazione.....	70
I cantieri di raccolta.....	73
I campioni raccolti	75
Le caratteristiche tecniche rilevate degli impianti.....	75
Materiali e metodi per analisi di laboratorio	77
Analisi Granulometrica.....	77
Determinazione dell'umidità	78
Massa volumica apparente	80
Analisi dimensionale delle scaglie.....	82
RISULTATI E DISCUSSIONI.....	84
La caratterizzazione degli impianti.....	84
I risultati del rotore CRA I.....	87
La possibile influenza della specie legnosa	91
L'analisi dimensionale delle scaglie.....	95
I risultati del rotore di seconda generazione	99
CONCLUSIONI	106

Riferimenti normativi	108
BIBLIOGRAFIA.....	109

INTRODUZIONE

Le principali fonti primarie dalle quali si ricava attualmente energia sono i combustibili fossili quali gas, petrolio e carbone. Esse vengono impiegate sia direttamente, per i mezzi di trasporto e per il riscaldamento; sia indirettamente, nelle centrali termoelettriche per produrre energia.

L'attenzione sempre crescente per l'ambiente, la necessità di ridurre le sostanze inquinanti, i gas serra responsabili del riscaldamento globale e il bisogno di limitare la dipendenza energetica da paesi terzi, fanno sì che lo sfruttamento delle fonti di “energia rinnovabile” sia uno degli obiettivi principali della politica energetica di molti Paesi.

Nel 2008 la Commissione Europea ha stabilito obiettivi precisi sulla promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili da raggiungere entro il 2020, obiettivi sintetizzati con la sigla 20-20-20: aumento del 20% della produzione energetica da fonti rinnovabili, miglioramento del 20% dell'efficienza energetica e taglio del 20% delle emissioni di anidride carbonica.

Con il termine energie rinnovabili vengono definite quelle forme di energia generate da fonti che hanno la caratteristica di rigenerarsi o di non esaurirsi. L'impiego di tali fonti non pregiudica quindi le risorse naturali per le generazioni future permettendo così di raggiungere gli obiettivi descritti dal concetto di “sviluppo sostenibile”.

Tra le energie rinnovabili attualmente utilizzate le biomasse sono quelle che hanno il maggiore potenziale di espansione, rappresentando una materia prima potenzialmente utilizzabile per la produzione di vettori energetici solidi, liquidi e gassosi destinabili a entrambi i tipici mercati finali dell'energia termica e/o elettrica.

Le energie rinnovabili rappresentano un'esigenza sia per i paesi industrializzati, sia per quelli in via di sviluppo. I primi devono impegnarsi a perseguire, nel breve periodo, un uso maggiormente sostenibile delle risorse, una riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e dell'inquinamento atmosferico, una diversificazione del mercato energetico e una sicurezza nell'approvvigionamento dell'energia. Per i paesi in via di sviluppo, le energie rinnovabili rappresentano una concreta opportunità di sviluppo sostenibile e di accesso all'energia anche in corrispondenza di aree remote.

La biomassa rappresenta la prima fonte rinnovabile in Europa e la seconda in Italia, rispettivamente incide per oltre il 50% e per il 30%. Il principale utilizzo di questa fonte energetica è la produzione di energia termica (77%), attraverso la combustione (Mazzei et al. 2009).

Gran parte dell'interesse connesso a questa fonte energetica rinnovabile è poi da ricercarsi nelle ripercussioni che l'utilizzo della biomassa ligno-cellulosica può determinare a livello sia economico che sociale e territoriale. Vi è infatti una stretta interdipendenza fra biomassa e territorio: l'uso delle rispettive potenzialità può portare a notevoli benefici ad entrambi i sistemi. L'introduzione nell'uso del territorio di colture non alimentari innovative e la possibilità di usarle a fini energetici ed industriali potrebbe offrire un contributo alla rivalutazione dei terreni non più utilizzati per la produzione alimentare. Il sistema biomasse attinge al territorio la materia prima e al territorio ritorna gran parte delle uscite sia sottoforma di energia sia in sottoprodotti utili per il sistema agricolo.

Uno sviluppo importante nell'impiego delle biomasse legnose dovrebbe essere indirizzato verso quelle tipologie di materia prima attualmente inutilizzata, che possiedono un basso valore commerciale e quindi possono essere sfruttate senza arrecare grande disturbo ad eventuali altri settori commerciali. Questi materiali, che non è detto siano adatti alla produzione di legna da ardere, potrebbero essere trasformati in un altro combustibile legnoso: il "legno sminuzzato o cippato" da destinare prevalentemente alla trasformazione energetica.

Al fine di migliorare sia a livello qualitativo sia a livello quantitativo è importante la conoscenza dei processi attraverso i quali la biomassa grezza viene convertita in prodotti che meglio si prestano ad essere utilizzati e commercializzati. Infatti l'impiego delle fonti rinnovabili risulta sostenibile e conveniente solo quando i costi sostenuti per l'approvvigionamento e la trasformazione risultano inferiori ai ricavi ottenuti dalla loro vendita. È pertanto di fondamentale importanza comprendere e analizzare tutte le fasi del processo di trasformazione, al fine di individuare e proporre soluzioni valide per riuscire a sfruttare, con il massimo rendimento l'energia contenuta nella biomassa.

OBIETTIVI DELLA RICERCA

Con il presente lavoro è stato analizzato il processo di trasformazione della biomassa ligno-cellulosica in biocombustibile solido (legno sminuzzato). Al fine di determinare le principali caratteristiche fisiche e merceologiche e migliorare la qualità del prodotto attraverso le innovazioni tecnologiche.

Il processo di trasformazione delle biomasse legnose avviene attraverso un'operazione detta "sminuzzatura o cippatura", è rappresentata la lavorazione più efficace per valorizzare i residui di lavorazione.

Scopo della ricerca è di studiare i principali fattori capaci di influenzare il processo di sminuzzatura e la valutazione dei requisiti qualitativi del legno sminuzzato, in particolare:

- valutare le possibili cause correlate alla formazione dei "chips" quali: specie legnosa, età e organo di taglio;
- analisi dei requisiti qualitativi del prodotto, con particolare attenzione per la pezzatura, valutare gli aspetti tecnologici correlati alla specie utilizzata e all'età;
- analisi dimensionale delle scaglie prodotte dai diversi organi di taglio secondo le direzioni anatomiche del legno, all'interno della classe granulometrica più rappresentativa.

Le linee di raccolta attualmente utilizzate per le Short Rotation Forestry (SRF) prevedono diverse modalità di intervento e turni di ceduzione (annuale-biennale-quinquennale) facendo ricorso di frequente a cantieri non specifici. Per gli impianti annuali e biennali in particolare spesso si ricorre all'impiego di macchine che derivano dalla foraggicoltura. Il prodotto così ottenuto presenta caratteristiche dimensionali molto contenute e con una percentuale di frazioni fini molto elevate.

L'esigenza di assecondare le richieste dimensionali dello sminuzzato, prevalentemente indirizzate verso l'aumento di lunghezza e sezione, ha portato allo sviluppo di nuovi rotor da poter installare sulle medesime raccoglitrici; la ricerca ha ormai evidenziato come l'impiego di tali raccoglitrici su specie legnose richieda un parziale adeguamento dei gruppi trincianti per cercare di riuscire ad ottenere un prodotto idoneo alla successiva termovalorizzazione.

STATO DELL'ARTE

LA BIOMASSA LIGNO-CELLULOSICA

Tra le risorse naturali disponibili per soddisfare le necessità energetiche dell'umanità è di fondamentale importanza la biomassa, cioè la materia prima vegetale che costituisce in natura la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare.

L'articolo 2 comma 1 del D. Lgs. 28/2011 definisce come biomassa *“la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”*.

Gran parte dell'interesse del mondo economico è concentrato sulla produzione della biomassa legnosa di origine forestale, in particolare in Italia l'attenzione si concentra nell'area Alpina e Appenninica ricche di risorse forestali. Il marcato interesse verso le risorse forestali e l'utilizzo delle biomasse legnose per scopi energetici è stato favorito da alcune evoluzioni tra cui:

- l'introduzione di innovazioni di processo nell'organizzazione dei cantieri e della logistica delle utilizzazioni forestali (Cavalli, 2008);
- una meccanizzazione forestale che ha visto nuove innovazioni di prodotto e il miglioramento in termini di produttività ed ergonomia di molte macchine e attrezzature (Cavalli, 2008);
- la diffusione di impianti a biomasse ad alta efficienza nella produzione di energia termica ed elettrica, anche su piccola e media scala (Cavalli et al. 2007);

Negli ultimi anni però l'attenzione si è spostata nelle aree di pianura, dove si sono sviluppati arboreti specializzati per la produzione di biomassa legnosa, secondo il modello della corta rotazione, con tecniche colturali simili a quelle utilizzate per le colture agrarie (Buresti, Lattes, Mori, 2005), questi vengono definiti con il termine anglosassone Short Rotation Forestry di seguito indicati con l'acronimo “SRF” (Minotta, Muzzi, 2007; Canesin, 2010).

Alcuni Autori propongono la SRF come una forma di selvicoltura “a breve rotazione che prevede la gestione di cedui con densità d’impianto comprese tra 1.100 e 16.000 piante all’ettaro (Bisoffi, Facciotto, 2000) e turno da 1 a 5 anni, proporzionale alla densità d’impianto” (Facciotto, Mughini, 2003). La filiera delle biomasse legnose a scopi energetici, o filiera “Legno-Energia”, riveste oggi un ruolo di fondamentale importanza nell’ambito delle politiche delle energie rinnovabili. Basandosi su quanto il territorio locale può offrire secondo il principio della sostenibilità ambientale e della valorizzazione delle risorse forestali locali (Francescato, Antonini, 2004).

Per questo motivo, nel contesto nazionale, le biomasse legnose a fini energetici sono da sempre intimamente legate al territorio con un rapporto di interdipendenza e di reciproca valorizzazione (Francescato, 2002): da un lato il territorio fornisce le biomasse come materia prima, dall’altro la promozione di queste ultime contribuisce alla tutela e alla manutenzione dello stesso (ITABIA, 2002).

L’organizzazione e il coordinamento della filiera Legno-Energia sono aspetti di base per il successo della stessa: infatti, uno dei limiti più evidenti che in passato ha frenato lo sviluppo di un impiego razionale delle risorse legnose a fini energetici è stato proprio l’assenza di una strutturazione completa delle filiere e il mancato coordinamento tra la logistica degli approvvigionamenti (Cicarese et al. 2003), la commercializzazione e l’impiego finale della biomassa. Va detto inoltre che la filiera di approvvigionamento di biomassa per scopi energetici, è connessa alla domanda da parte delle centrali che ne fanno utilizzo e alla reperibilità di materiale nel territorio circostante.

Pertanto, occorre sviluppare conoscenze tecniche appropriate, che consentano la messa in opera di filiere locali di approvvigionamento, gestite da aziende del luogo e capaci di attingere alle risorse abbondantemente disponibili sul territorio, su una base di sostenibilità economica ed ambientale (Spinelli, Magagnotti, 2007b).

Le fonti della biomassa ligno-cellulosica

Nella filiera legno-energia, la raccolta del materiale rappresenta una fase economicamente rilevante. Il basso valore unitario del prodotto impone la scelta di una meccanizzazione adeguata, che garantisca una produttività oraria elevata e permetta di contenere il costo dell'operazione.

Le politiche energetiche tendono a stimolare l'impiego di risorse rinnovabili decentrate e con impatti ambientali non negativi (AA.VV., 1997a; 1997b). Le biomasse legnose rispondono a tali requisiti, la localizzazione di queste risorse in aree rurali svantaggiate comporta uno stretto legame tra la valorizzazione delle biomasse legnose e le politiche di sviluppo delle aree marginali (Drigo *et al.* 2007).

Quindi le possibili fonti di biomassa legnosa sono strettamente correlate al contesto economico produttivo di un paese, nonché alla realtà territoriale e alle caratteristiche geografiche dell'area considerata (Fiorese, 2007). Nel contesto italiano le fonti di biomassa ligno-cellulosica disponibili sono principalmente le seguenti: la selvicoltura, l'agricoltura e la manutenzione del verde urbano.

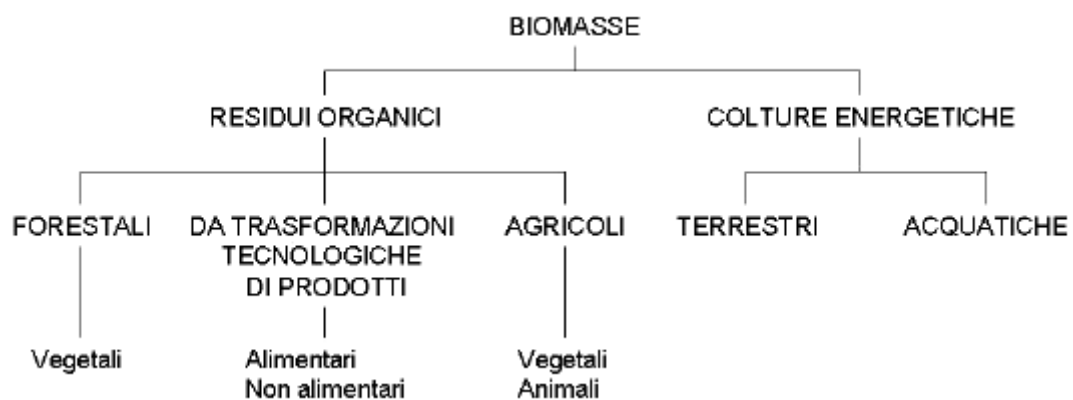


Figura 1: Schema delle diverse tipologie di biomasse e loro provenienza (Fiorese, 2007).

La selvicoltura

La gestione ordinaria e straordinaria dei boschi costituisce la principale fonte di combustibili legnosi. Il prodotto principale ritraibile dalle foreste è il legno, utilizzato nell'industria delle costruzioni, dei mobili, della carta e della pasta di cellulosa e per la produzione di energia, generalmente sotto forma di legna da ardere.

Con l'aumento della richiesta da parte del settore energetico è divenuto possibile ad oggi recuperare parte della frazione legnosa solitamente lasciata in foresta. Offrendo una grande varietà di materie prime, che possono essere prodotte dai residui di utilizzazione dove rappresentano mediamente il 20-25% del volume totale (Spinelli, Verani, 2000), dai diradamenti, dagli interventi fitosanitari e da piantagioni forestali strutturate sul modello della corta rotazione (SRF).

Parte di questi sono pressoché non raccogliibili da un punto di vista tecnologico (ad esempio le radici) o comunque di scarso o nullo interesse (ad esempio le foglie); la parte rimanente è, invece, frequentemente lasciata in bosco e costituisce un pericoloso innesco per gli incendi, dolosi o meno, e per tale motivo è una pratica generalmente vietata o disincentivata.

I proprietari boschivi e i gestori di centrali hanno un interesse comune nello sfruttamento della risorsa forestale: i primi vedrebbero migliorata la sostenibilità economica della selvicoltura, mentre i secondi potrebbero risolvere i problemi di approvvigionamento, che crescono ogni giorno con il numero di centrali operanti sullo stesso territorio (Spinelli, Secknus, 2005). Purtroppo, la convergenza di interessi non implica l'automatica attualizzazione di questo potenziale, poiché lo sviluppo della filiera foresta legno-energia è abbastanza complesso, e i benefici potenziali sono tanti e a vantaggio di tutti.

L'agricoltura

Il problema principale della valorizzazione energetica delle biomasse è quello dell'approvvigionamento. Una possibile soluzione al problema è incentrata sul settore agricolo: ogni anno le aziende agricole si ritrovano il problema di smaltire, a proprie spese, tonnellate di scarti di potatura (Cotana, Cavalaglio, 2008).

Le biomasse legnose provenienti dall'agricoltura sono costituite dai residui colturali ovvero da tutte quelle parti della pianta che non riguardano il “prodotto principale” generalmente destinato ad usi alimentari. Normalmente, derivano dalle operazioni di taglio a fine ciclo colturale per le colture annuali e dalle operazioni di potatura effettuate con varia periodicità sulle colture poliennali. Il potenziale di biomasse ligno-cellulosiche nell'agricoltura italiana è costituito principalmente da potature di vite, olivo e frutteto, che generalmente sono trinciati e poi interrati, o direttamente bruciati a bordo campo, contravvenendo alla normativa italiana sui rifiuti, costituendo inoltre un costo aggiuntivo per l'agricoltore, oltre al rischio di propagazione di agenti patogeni e malattie nelle piante (Cotana, Cavalaglio, 2008; Cavalaglio *et al.* 2007).

La quantità dei residui colturali recuperabili e, quindi, la stima della disponibilità territoriale di biomassa dipende da numerosi fattori, quali l'estensione delle superfici coltivate, la produttività delle colture, le caratteristiche agronomiche della coltura, la modalità di raccolta, le condizioni di operatività, la stagionalità della raccolta, lo stoccaggio del sottoprodotto, l'organizzazione aziendale e i possibili utilizzi del sottoprodotto.

Il recupero delle biomasse residuali rappresenta pertanto un'opportunità per valorizzare le colture tipiche italiane, come uliveti e vigneti che, occupando diversi milioni di ettari, contribuirebbero ai fabbisogni energetici di molte aziende agricole, che acquisirebbero inoltre un ulteriore valore aggiunto di tipo ambientale.

La Manutenzione del verde urbano

Un fattore importante da tenere in considerazione nell'utilizzo energetico dei biocombustibili ligno-cellulosici è la disponibilità temporale di essi nell'arco delle stagioni.

Per quanto riguarda la produzione di biomassa proveniente dalle potature di alberature o fasce frangivento questa avviene, in linea di massima, durante tutto l'anno. La periodica manutenzione del verde in ambiente urbano e lungo la rete stradale, statale, provinciale e comunale genera una notevole quantità di residuo legnoso solitamente considerato,

secondo il Decreto Ronchi D.lgs. 22/97, un “rifiuto”. Dove nella maggior parte dei casi viene portato in discarica e smaltito con un costo.

Legalmente risulta possibile impiegare questi residui, a tutti gli effetti costituiti da materiale ligno-cellulosico, per finalità alternative alla discarica, come l’impiego energetico, la produzione di compost o anche di materiale per florovivaismo. Ogni pianta d’alto fusto in filare, con turno di potatura quindicennale, può produrre una quantità media annua di 200-250 kg di legno destinabile ad uso energetico (AA. VV., 2003).

I cantieri di manutenzione del verde urbano e peri-urbano rappresentano quindi un’ingente risorsa di biomassa legnosa che viene spesso lasciata ai margini stradali per poi essere raccolta e portata in discarica, od utilizzata comunque in maniera non appropriata.

Caratteristiche tecnologiche della biomassa ligno-cellulosica

Dal punto di vista energetico, le biomasse possono essere considerate come energia solare radiante trasformata dalle piante in energia chimica e stoccata sotto forma di molecole complesse (polimeri) ad alto contenuto energetico. I principali polimeri delle biomasse legnose sono la cellulosa, l'emicellulosa e la lignina.

La cellulosa

È il componente più abbondante nel legno, arrivando a valori del 50% del peso secco. È un polisaccaride para-cristallino chimicamente stabile, non è solubile in acqua ma si idrata facilmente (è infatti da ciò che prende origine l'igroscopicità del legno).

La struttura base è una lunga macromolecola che le conferisce una forte resistenza meccanica a trazione longitudinale, mentre scarsa o nulla è la sua resistenza a compressione assiale (Nardi Berti, 1994). È costituita essenzialmente da cellobiosio polimerizzato (dato dall'unione di due molecole di glucosio), che si può approssimativamente considerare l'unità elementare della cellulosa. La polimerizzazione del cellobiosio origina delle catene regolarmente ordinate nello spazio, affiancate fra loro in modo da formare fasci filiformi, nei quali, a zone più compatte dette micelle cristalline si alternano zone ove le catene sono più libere dette amorfe (Berti, 2007).

Questo insieme dà luogo alle fibrille elementari. Le fibrille elementari si uniscono fra loro dando luogo a filamenti piatti, detti microfibrille le quali, a loro volta, si uniscono formando le macrofibrille. (Giordano, 1981).

L'emicellulosa

Sono dei polisaccaridi amorfi presenti per il 20-30% del peso anidro, derivanti dall'aggregazione di zuccheri in particolare: mannosio, xilosio, arabinosio, glucosio, galattosio e ramnosio e alcuni acidi, diversamente dalla cellulosa composta solo di glucosio possono essere costituite da molecole di diverso tipo.

I vari polimeri prendono il nome proprio dai monomeri che li originano e la loro composizione cambia fra conifere e latifoglie, ma anche tra specie diverse. Il grado di

polimerizzazione delle emicellulose è generalmente inferiore a quello della cellulosa e le catene non sono disposte tutte in modo tra loro parallelo, ma possono originarsi delle catene laterali disposte perpendicolarmente rispetto all'asse della catena principale.

Questo minor livello di organizzazione, caratterizzata da un maggior numero di ossidrili liberi di legarsi con altre molecole, rende le emicellulose più solubili e soprattutto più igroscopiche, dando un notevole contributo al comportamento viscoso del legno. (Giordano, 1981; Berti, 2007).

La lignina

È un polimero aromatico tridimensionale costituito da derivati del fenilpropano, presente indicativamente per il 26-30% nelle conifere e per il 20-25% nelle latifoglie.

E' una sostanza amorfa, rigida, a comportamento termoplastico e di composizione variabile, soprattutto tra le conifere e le latifoglie; viene definita “incrostante” poiché si depone fra le fibrille cellulosiche e fra le macromolecole pectiche ed emicellulosiche, conferendo così caratteristiche di rigidezza e resistenza a compressione. La distribuzione percentuale dei costituenti chimici è diversa nei diversi strati della parete cellulare. (Giordano, 1981; Berti, 2007).

Caratteristiche chimico fisiche

Oltre ai 3 componenti principali nel legno sono presenti numerosi altri composti organici, localizzati nel lume e nella parete cellulare, nonché alcuni composti inorganici, quali sali di calcio, magnesio, sodio, potassio e silicio, che solitamente in seguito alla combustione si ritrovano nelle ceneri.

In particolare, la percentuale dei composti inorganici varia in funzione di diversi fattori, ovvero terreno, specie arborea, organo della pianta, passando dallo 0,4% della base del tronco al 7% delle foglie e al 10% della corteccia. Per quanto riguarda la composizione chimica elementare (Tabella 1), il legno è costituito da carbonio dal 48 al 50,4%, ossigeno dal 41,2 al 45,2%, e da idrogeno dal 5 al 6,9% (Giordano, 1981).

Tabella 1: Composizione chimica elementare, espressa in percentuale su peso secco, allo stato puro e senza ceneri (Recchia, 2005)

<i>Specie</i>	<i>C [%]</i>	<i>H2 [%]</i>	<i>O2 [%]</i>	<i>N2 [%]</i>
Leccio	48,9	5,2	43,1	2,1
Roverella	49,4	6,1	44,5	2,0
Faggio	48,3	6,0	45,1	0,6
Betulla	48,9	6,2	43,9	1,0
Carpino	48,1	6,1	44,9	0,9
Ontano	49,2	6,2	44,6	0,7
Frassino	49,4	6,1	44,5	-
Pioppo nero	49,7	6,3	44,0	-
Tiglio	49,4	6,9	43,7	0,6
Pino silvestre	49,9	6,3	42,0	0,7
Abete rosso	50,2	6,2	41,4	0,6

A differenza di altri combustibili, quali ad esempio il carbone, il legno contiene basse quantità di azoto, tracce di zolfo ed altri elementi minerali che vanno a costituire le ceneri che oscillano dallo 0,5 al 1,5%, raggiungendo anche valori del 2% in alcune specie in particolare quelle tropicali (Giordano 1981).

Il contenuto energetico di un combustibile (potere calorifico) dipende dalla sua composizione chimica, difatti un elevato contenuto di carbonio e idrogeno ha come diretta conseguenza un potere calorifico elevato, mentre elevate presenze di ossigeno, azoto e ceneri hanno un effetto opposto (Pignatelli, Robertiello, 2007), limitando il valore energetico del legno.

Nel caso specifico delle biomasse, una parte dell'energia liberata nel processo di combustione viene consumata, 2,44 MJ/kg di acqua, per la vaporizzazione sia dell'acqua contenuta inizialmente nel combustibile (Francescato, Antonini, 2009), sia di quella che si forma per reazione dell'idrogeno con l'ossigeno atmosferico. Di conseguenza, il

contenuto energetico di un biocombustibile viene espresso dal Potere Calorifico Inferiore (PCI) che dipende direttamente, oltre che dalla composizione della biomassa, dal suo tenore di umidità (Richardson et al. 2002; Hellrigl 2004).

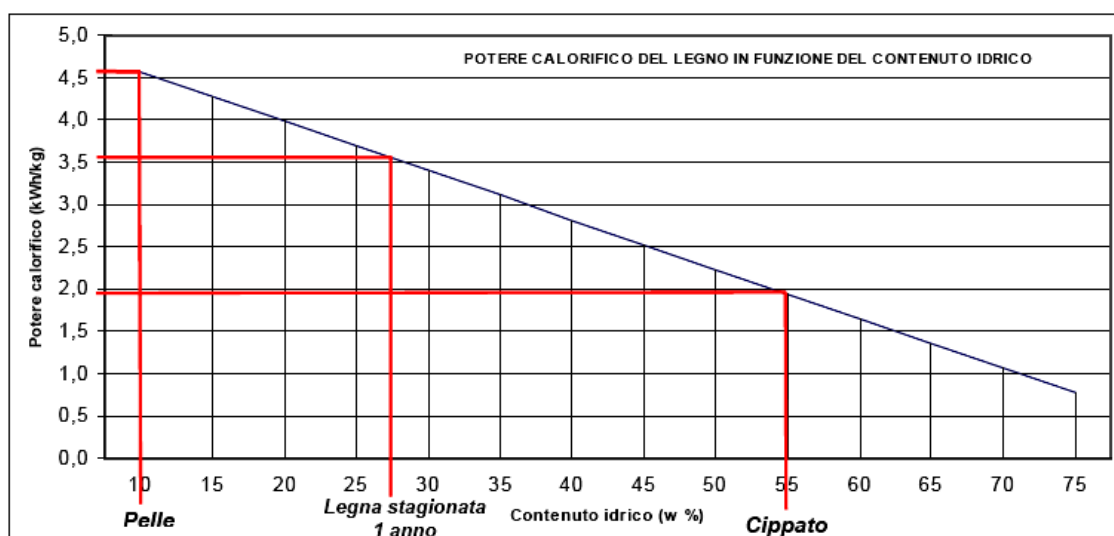


Figura 2: Variazione del potere calorifico inferiore in funzione del contenuto idrico di alcuni combustibili legnosi (Jonas, Haneder, 2001).

A parità di peso, il legno di conifere ha un potere calorifico maggiore rispetto a quello delle latifoglie, a causa della presenza di resine e a più elevate quantità di lignina. Nella Tabella 2 sono elencati i valori indicativi di potere calorifico per le due grandi categorie legnose quali conifere e latifoglie, con un contenuto di umidità del 12-15% riferita al peso anidro (Giordano 1981).

Tabella 2: Valori PCI al 12-15% di umidità riferita al peso anidro (Giordano, 1981)

<i>Tipologia legno</i>	<i>PCI [MJ/kg]</i>
Abete rosso	15,49-15,90
Pino silvestre	15,49-15,90
Faggio	13,81-14,23
Pioppo	14,86-15,28
Quercia	14,65-15,07
Robinia	14,23-14,65

Un altro parametro interessante direttamente correlato alla composizione chimica e alle tipologie di legame tra atomi e molecole del legno, è la volatilità, data dalla quantità di materiale volatile presente nel legno ed espressa in percentuale sul peso secco. Rispetto ad altri materiali la volatilità del legno è molto elevata e varia dal 75% all'85% (Recchia, 2005).

Le caratteristiche fisiche del legno che influenzano i processi di conversione energetica sono l'umidità e il peso specifico. In particolare, l'umidità assume una significativa importanza perché, oltre ad agire sui meccanismi di combustione, condiziona le caratteristiche chimiche del legno e il suo peso specifico. La quantità d'acqua nel legno è estremamente variabile: al momento del taglio può assumere valori diversi in funzione della specie, dell'età, della diversa parte della pianta e della stagione (Giordano, 1981).

Solitamente è possibile riscontrare valori più bassi di umidità nelle latifoglie rispetto alle conifere, nelle parti basse rispetto alle parti alte della pianta, durante l'estate rispetto all'inverno. L'umidità esprime la quantità di acqua, libera e legata, presente nel legno, espressa come percentuale sia sul peso secco (W) sia sul peso fresco (w) del legno, ovvero:

$$W [\%] = (M_i - M_a) / M_a \times 100;$$

$$w [\%] = (M_i - M_a) / M_i \times 100;$$

dove M_i è la massa del legno tal quale e M_a è la massa del legno allo stato secco.

Tabella 3: Contenuto medio di legno e di corteccia in alcune specie forestali (Recchia, 2005)

<i>Specie</i>	<i>Umidità [%]</i>
Pino silvestre	51,2
Abete rosso	40,5
Acero rosso	46,8
Cerro	40,8

Un terzo elemento che influisce in modo significativo sul contenuto energetico dei biocombustibili solidi è la densità, cioè la massa di materiale per unità di volume occupato, che dipende sia dalla massa specifica “interna”, cioè calcolata senza tenere conto dei “vuoti” fra le particelle di materiale, sia dalla pezzatura nel caso del legno o, nel caso di residui agricoli (Streheler, 1988; Richardson et *al.*, 2002).

Come l'umidità, la massa volumica è in relazione con alcune variabili che non consentono una determinazione univoca nemmeno all'interno di una singola specie. Difatti questo può dipendere, oltre che dalla specie, dalla parte dell'albero da cui è tratto il campione, dall'ambiente in cui l'albero è cresciuto, dall'umidità contenuta, dalla presenza di nodi e dalla fittezza degli anelli.

Valorizzazione della biomassa ligno-cellulosica

I processi di conversione termochimica delle biomasse si basano sull'azione termica per attivare una serie di reazioni chimico-fisiche che hanno come risultato finale la trasformazione dell'energia chimica intrinseca alla biomassa in energia termica, conseguente alla rottura dei legami chimici che uniscono gli atomi di carbonio a quelli di idrogeno, portando alla formazione di biossido di carbonio e acqua.

Generalmente, i combustibili da biomassa devono essere caratterizzati da un contenuto di umidità inferiore al 30% e da un rapporto carbonio/azoto maggiore di 30 (Pignatelli, Robertiello, 2007). Quando la biomassa viene immessa in una camera di combustione subisce inizialmente una essiccazione; successivamente, man mano che la temperatura aumenta, si hanno processi di pirolisi/gassificazione e, infine, di combustione.

Da un punto di vista temporale, il grafico 1 mostra in termini qualitativi il processo di combustione di piccole particelle di biomassa; quando le particelle aumentano di dimensione si crea un certo grado di sovrapposizione tra le diverse fasi, all'estremo, nel caso di caldaie a pezzi di legna, vi è un elevato grado di sovrapposizione tra fasi.

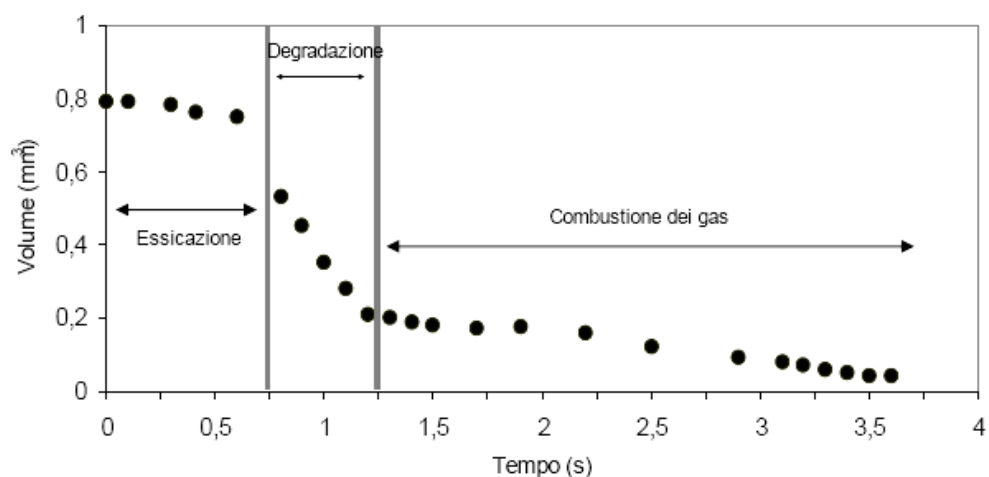


Figura 3: Il processo di combustione in tre fasi distinte (Francescato, 2009)

Riscaldamento ed essiccamento del materiale

Il legno a contatto con il calore si riscalda ed inizia a perdere l'acqua contenuta nei propri tessuti. Questa prima fase, che implica fenomeni reversibili e che potremmo definire preliminare, comporta un innalzamento della temperatura interna del legno non superiore a 70°C; continuando l'apporto di calore, quando la maggior parte dell'acqua è evaporata, inizia ad aumentare anche la temperatura del legno superando i 100°C. È a questo punto che si innescano reazioni irreversibili nelle porzioni superficiali del legno e che corrispondono all'inizio della pirolisi (Berti, 2007).

In questa prima fase il contenuto idrico del legno è uno dei parametri qualitativi più importanti dei combustibili legnosi, difatti il legno “fresco” richiede un quantitativo di energia per far evaporare l'acqua in esso contenuta che porta la temperatura della camera di combustione al di sotto del livello minimo richiesto per sostenere la combustione. Se il combustibile legnoso all'interno delle caldaie ha un contenuto idrico superiore al 60%, il processo di combustione non può essere mantenuto (Francescato, 2009).

Il rendimento termico del processo (rapporto tra il calore prodotto dalla caldaia e il contenuto energetico del combustibile) decresce con l'aumentare del contenuto idrico del legno, un fenomeno che, negli impianti di maggiore potenza, può essere parzialmente compensato installando un'unità di condensazione.

A temperature comprese tra 150 e 200°C invece iniziano fenomeni che provocano l'imbrunimento dei tessuti legnosi, formazione di vapore d'acqua, di anidride carbonica e di altri gas tra i quali l'ossido di carbonio.

Pirolisi e Gassificazione

La pirolisi è un processo di decomposizione termica della biomassa, avviene a temperature elevate (300-700 °C) in assenza di ossigeno (Pignatelli, Robertiello, 2007), porta all'evaporazione della componente volatile della biomassa. In termini ponderali questa componente rappresenta oltre il 75% del legno, perciò si può dire che la sua combustione significa principalmente la combustione dei gas che lo compongono (Francescato, 2009).

Il composto volatile della biomassa iniziale, consiste in una frazione gassosa, una frazione condensabile, una frazione carboniosa e, infine, fumo.

La velocità di evaporazione dei gas aumenta con l'aumentare della temperatura e i primi componenti del legno ad essere degradati sono le emicellulose e successivamente la cellulosa. I legni duri (faggio, robinia) contengono più emicellulose rispetto ai legni teneri (abeti) quindi la perdita di peso che avviene durante la fase di decomposizione del legno dei primi è più precoce rispetto ai secondi.

Il processo progredisce verso l'interno e sulla superficie, divenuta di color bruno cupo, la temperatura aumenta rapidamente raggiungendo circa 450°C, accompagnata dall'abbondante emissione di gas combustibili e vapori quali: ossido di carbonio, metano, formaldeide, acido acetico, acido formico, metanolo, idrogeno. Continua, anche se in misura minore, la produzione di anidride carbonica e vapore d'acqua (Berti, 2007).

Tuttavia, una certa perdita di peso del legno si ha ancora tra i 400 e i 500 °C dovuto alla degradazione della lignina, la quale si decompone durante tutto il processo di evaporazione ma la maggior parte della sua degradazione avviene alle più alte temperature.

Combustione

Consiste nella completa ossidazione dei gas, una fase che inizia tra i 500 e i 600 °C e si protrae fino ai 1000 °C circa. Nel range 800-900 °C il carbone solido è combusto e con lui anche il catrame. La mancanza di adeguate condizioni, causa la combustione incompleta del legno e quindi aumentano le emissioni nocive. La combustione incompleta è causata principalmente dalle seguenti condizioni negative:

- inadeguata mescolanza tra aria e combustibile nella camera di combustione,
- una carenza complessiva di ossigeno disponibile
- temperatura di combustione troppo bassa
- tempi di permanenza troppo corti

Quindi la qualità della combustione è legata a tre fattori fondamentali: Tempo, Temperatura e Turbolenza.

I tre parametri sono fortemente connessi tra loro. È importante un adeguato tempo di permanenza del combustibile sul focolare, dei fumi caldi nella seconda zona di combustione e negli scambiatori. La temperatura deve raggiungere livelli sufficientemente elevati per consentire di completare le varie fasi della combustione specie quella di ossidazione dei gas. Infine è fondamentale un sufficiente apporto d'aria nelle varie zone e fasi della combustione attraverso gli apporti di aria primaria, secondaria ed eventualmente terziaria.

La combustione è completa, almeno teoricamente, quando tutte le parti del combustibile hanno reagito con l'ossigeno. Diversamente, se non viene apportata aria a sufficienza, parte dell'energia contenuta nel combustibile rimane nei co-prodotti della combustione, come ad esempio l'ossido di carbonio e si ha così una combustione incompleta.

La quantità di aria teoricamente richiesta è la quantità di aria necessaria a produrre un processo di combustione completo. Il rapporto tra la quantità di aria teorica e quella reale è chiamata rapporto d'aria in eccesso (λ), tale fattore per il legno varia tra 1,25 e 1,4 che in altri termini significa un surplus d'aria tra il 25 e il 40% (Francescato, 2009).

La combustione completa è naturalmente solo un concetto teorico, specie nei combustibili solidi quale è il legno, in quanto è problematico raggiungere un corretto grado di mescolanza tra aria e combustibile in un periodo di tempo così limitato. La combustione incompleta dà luogo ad una incompleta combustione dei gas e un aumento di incombusti sia organici che inorganici, questo si traduce in un aumento del contenuto di CO e polveri nei fumi esausti.

Negli ultimi trent'anni vi è stato un graduale aumento dell'efficienza riscontrata nelle caldaie a legno che ha portato a una sostanziale riduzione dell'emissione di CO e delle altre emissioni nocive (polveri, composti organici volatili, ossidi di azoto e di zolfo).

Naturalmente la combustione è influenzata fortemente dalla qualità del combustibile, in funzione della tipologia di caldaia. In linea generale, tanto maggiore è l'uniformità della pezzatura e del contenuto idrico nel combustibile legnoso e tanto migliore sarà la combustione (Francescato, 2009).

IL LEGNO SMINUZZATO

Negli ultimi anni il legno sminuzzato o cippato è stato utilizzato sempre più come biocombustibile solido, viene impiegato nelle centrali elettriche, in centrali di cogenerazione, negli impianti di riscaldamento di grandi dimensioni e in impianti di combustione di piccole dimensioni. L'utilizzo del legno sminuzzato risulta vantaggioso per la riqualificazione del materiale di scarto proveniente dalle foreste come i residui delle utilizzazioni forestali, i residui delle operazioni colturali quali diradamento e potatura, gli alberi danneggiati dalle tempeste e dalla raccolta di materiale proveniente da impianti dedicati, la quale rappresentano le principali fonti di approvvigionamento per legno sminuzzato (Pouët, 2007). Promuovendo inoltre lo sviluppo di una filiera funzionale sia da un punto di vista economico e sia da un punto di vista tecnico, attraverso lo sviluppo di tecnologie che facilitano le operazioni di raccolta, diminuendo così il costo di produzione dell'energia rinnovabile (Martin, Weber, 2006).

I combustibili legnosi per fini energetici sono caratterizzati da un'estrema eterogeneità per composizione, misura e forma, passando dalla polvere di legno alla segatura, dai trucioli alle ramaglie e ai tronchi. Al momento di destinarli alla conversione energetica, essi richiedono trattamenti che sono variabili a seconda delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale in questione e del tipo di impianto di utilizzazione.

Il fine di queste operazioni è ottenere un combustibile a più elevata qualità energetica e maggiore facilità d'impiego, che renda la dendroenergia il più comparabile possibile con gli altri combustibili convenzionali. Per rendere omogenea la composizione dei materiali legnosi viene solitamente effettuata un'operazione meccanica detta "sminuzzatura", che riduce gli assortimenti legnosi di diversa misura in scaglie di piccole dimensioni, detti "chip".

In questo modo è agevolata la movimentazione della biomassa e l'alimentazione degli impianti. La dimensione dei chip varia con le tecniche di taglio, e deve essere omogenea ed ecompatibile con il sistema di alimentazione dell'impianto, 40 mm di lunghezza, 20 mm di larghezza e 10 mm di spessore (Hellrigl, 2001.)

La geometria, la dimensione, la densità sono caratteristiche importanti se i chip sono destinati all'industria del legno mentre l'omogeneità è il parametro più importante se i chip sono destinati alla combustione.

Come detto, la sminuzzatura permette l'utilizzo di quel materiale legnoso di basso o nullo valore commerciale difficile da smaltire e da gestire, fornendo inoltre una valida alternativa possibile per l'utilizzazione di materiale legnoso senza mercato. La sminuzzatura resta comunque il sistema più diffuso per trattare ramaglie e cimali (Spinelli, Verani, 2000) e piante che non possono produrre altri assortimenti (Spinelli, Hartsough, 2001).

Ovviamente, la qualità del legno sminuzzato è paragonabile a quella del materiale di partenza (Spinelli, Hartsough, 2001): spesso un alto contenuto di corteccia e di foglie è indice di una qualità scadente del prodotto. Difatti la qualità dello sminuzzato è uno dei fattori sul quale sempre di più viene stabilito il prezzo di vendita (Spinelli, Secknus 2005).

Per questo motivo cresce l'importanza di poter valutare a priori le caratteristiche del prodotto che si andrà ad ottenere, in modo da pianificare e indirizzare le operazioni di approvvigionamento di sminuzzato verso una logistica di filiera efficace e remunerativa.

Legno sminuzzato: vantaggi e svantaggi

La sminuzzatura ha il merito di rendere simile ad un fluido il prodotto che viene trasformato da residuo grossolano e disforme in scaglie omogenee, idonee ad alimentare gli impianti di riscaldamento automatici. Tutto ciò è possibile quando si ottiene un prodotto senza scaglie sovra misura che potrebbero bloccare i dispositivi di alimentazione degli impianti.

La sminuzzatura presenta alcuni vantaggi sostanziali (www.aiel.cia.it):

- aumenta la superficie esposta del legno in modo da accelerare le reazioni chimiche come la combustione, in particolare lo sminuzzato brucia meglio del tronchetto con un conseguente sviluppo positivo dell'efficienza degli impianti e riduzione delle emissioni gassose. Inoltre gli impianti a sminuzzato possono utilizzare specie legnose spesso rifiutate da altri utenti tradizionali a causa della grande produzione di fuliggine;

- riduce il materiale, grossolano e disforme, in scaglie omogenee rendendolo più idoneo per l'alimentazione automatica degli impianti di riscaldamento per uso civile;
- la ridotta dimensione delle scaglie consente di recuperare una maggiore quantità di biomassa disponibile che non può essere trasformata in alcun assortimento convenzionale: cimali e ramaglie sono costituiti da una percentuale molto bassa di legna da ardere, ma possono essere completamente sminuzzati, permettendo di recuperare il 15-30 % in peso di biomassa e risolvendo il problema dei residui di utilizzazione;
- consente di ridurre il volume apparente degli scarti forestali più ingombranti come cimali, ramaglie e radici: lo sminuzzato ha una densità apparente di circa 320 kg/m^3 , mentre la densità dei residui forestali raramente supera i $150\text{-}170 \text{ kg/m}^3$;

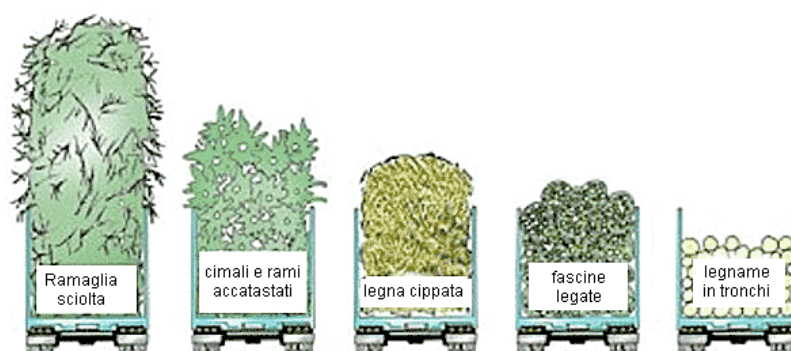


Figura 4: volume apparente e ingombro a parità di peso dei diversi prodotti forestali.

Logicamente la sminuzzatura presenta anche svantaggi (www.aiel.cia.it)

- il legno sminuzzato fresco è soggetto al fenomeno impropriamente definito “fermentazione” che sviluppa calore e provoca una riduzione della biomassa del 2-4% al mese, causato dal metabolismo di microorganismi che proliferano all’interno del combustibile;
- la necessità di utilizzare macchinari e attrezzature specializzate che possono essere caratterizzati da elevati costi e consumi di carburante, questo soprattutto per quanto riguarda la produzione di sminuzzato forestale (costo sminuzzatura va da 5

a oltre 20 euro/tonnellata); lo sminuzzato prodotto da residui e scarti di segheria (considerati “rifiuti”) è, invece, molto competitivo ed economico;

- la presenza di scaglie con dimensioni irregolari e non omogenee favorisce la strutturazione dello sminuzzato e può provocare intasamento in prossimità dello scarico di silos o altri contenitori, inoltre i pezzi sovra misura causano il blocco meccanico nei dispositivi di alimentazione dei piccoli impianti.

Le macchine operatrici per la trasformazione della Biomassa in Biocombustibile

Le sminuzzatrici o cippatrici sono macchine impiegate per ridurre il materiale legnoso in scaglie (“chips” in inglese) di forma pressoché parallelepipedica (Picchio et al. 2012). Sicuramente il termine più usato nel nostro paese per identificare queste macchine è cippatrice che deriva dall’inglese “chipper” (Baldini 1986).

Il processo di sminuzzatura deve essere distinto da quello di triturazione o frantumazione del legno, che si basa principalmente su un’azione di percussione (Spinelli, 1995), sfibratura o impatto violento. Benché i diversi tipi di sminuzzatrice si distinguano per l’impiego di organi di taglio differenti: sminuzzatrici a “disco” a “tamburo” e “a vite senza fine o coclea”, tutte effettuano un’azione di taglio, utilizzando degli attrezzi taglienti detti coltelli.

Il taglio, pur essendo più efficiente dello schiacciamento e pur impiegando meglio la potenza disponibile, richiede organi taglienti che sono certamente più delicati dei semplici martelli. Pertanto le sminuzzatrici richiedono più manutenzione e hanno qualche difficoltà quando devono lavorare materiale contaminato da terra, sassi o metallo, che usurano rapidamente i coltelli.

Sono delle macchine che basano la loro azione su principi molto semplici, benché il grado di sofisticazione può essere anche molto elevato, con l’automazione di molte funzioni. In commercio esistono diverse tipologie di sminuzzatrici che si differenziano per organi di taglio, potenza e allestimento.

La tipologia di base è dotata di una struttura di supporto, un organo di taglio, un sistema di alimentazione e uno di espulsione, più o meno complessi. La macchina può essere equipaggiata anche con un motore autonomo o utilizzare quello di un altro mezzo.

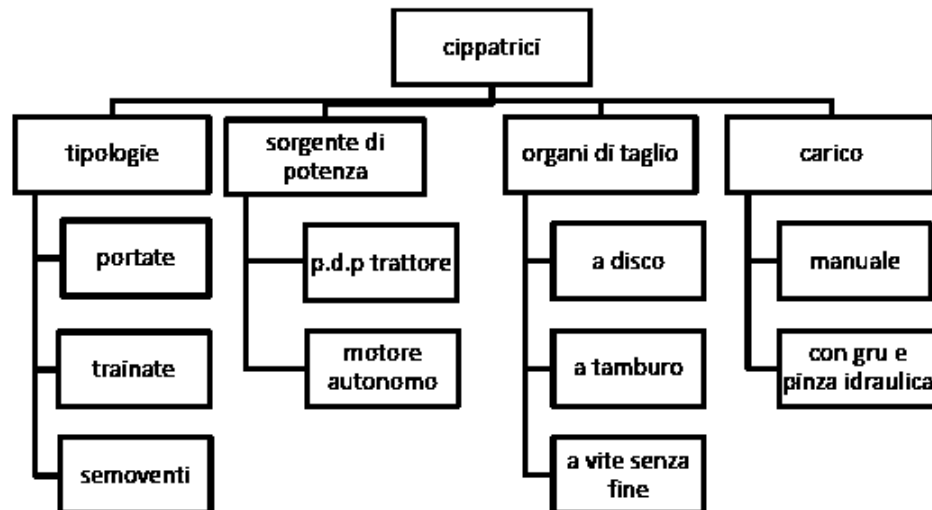


Figura 5: caratteristiche distintive dei diversi modelli di sminuzzatrici (Fonte: Magagnotti, 2012).

L'organo di taglio

Sminuzzatrici a disco

Una sminuzzatrice a disco è progettata per aggredire il legname in direzione obliqua (a becco di flauto) rispetto all'andamento della fibra del materiale legnoso sottoposto a sminuzzatura o cippatura (Spinelli, 2007c). Staccando scaglie di legno più o meno sottili, che è funzione dell'angolo di inclinazione che la lama ha rispetto al piano del disco.

In questo caso l'organo di taglio è costituito da un pesante volano con diametro variabile da 65 a 200 cm su cui sono montati da 2 a 4 coltelli in posizione radiale (Figura 6); il disco ruota intorno ad un'asse orizzontale o inclinato di 40-45° rispetto al terreno (Picchio et al. 2012). Il legname, in corso di sminuzzatura, è inoltre sorretto, nella direzione opposta a quella di taglio, da un contro coltello avente la funzione di "incudine" che va a coadiuvare l'azione dei coltelli.

La sporgenza dei coltelli e quella dell'incudine possono essere regolate manualmente per variare le dimensioni delle scaglie che vanno da 0,3 a 4,5 cm (Bidini, 2008), in base al materiale di partenza utilizzato (fusto o ramaglia). Generalmente una volta formate le scaglie vengono indirizzate verso il collo d'oca per essere espulse attraverso una ventola montata dietro l'organo di taglio. Le sminuzzatrici a disco invece non possono rimettere

in circolazione il prodotto una volta che è stato tagliato, perché le scaglie cadono dall'altra parte del disco, quindi l'espulsione avviene grazie a delle alette metalliche solidali al disco poste dalla parte opposta a quella dove sporgono le lame, che fungono da ventole in grado di espellere il prodotto attraverso il collo d'oca (Spinelli, 1995; Picchio et al. 2012).



Figura 6: sminuzzatrice a disco

Una maggiore omogeneità del prodotto è ottenuta installando dei “dispositivi di raffinazione” (Figura 7) o uno speciale “pettine” subito dopo i coltelli o all’inizio del collo d’oca: essenzialmente questi dispositivi servono a tagliare nuovamente il legno sminuzzato troppo grossolano gettato contro di essi e rendere il prodotto più omogeneo.



Figura 7: frangipezzi finale o vaglio

Tali dispositivi non hanno alcun effetto sullo spessore dello sminuzzato perché non sono in grado di recidere le fibre, ma riducono solo la lunghezza e la larghezza delle scaglie garantendo appunto una certa omogeneità del prodotto (Spinelli, 2007a).

Sminuzzatrici a Tamburo

Nelle sminuzzatrici a tamburo, l'organo di taglio è costituito da un pesante cilindro di acciaio detto "tamburo", ruotante intorno al proprio asse longitudinale sul cui mantello sono montati dei coltelli in numero variabile. I coltelli risultano incassati sulla superficie esterna del cilindro e la loro sporgenza è regolabile per variare la dimensione delle scaglie. L'azione di taglio in questo caso è tangenziale rispetto all'asse del materiale introdotto e alle fibre (Baldini, 1986), il legno così lavorato viene trasformato in scaglie più o meno omogenee (Figura 8).



Figura 8: legno sminuzzato prodotto da una sminuzzatrice a tamburo

Il diametro del tamburo varia da un minimo di 30 cm, fino a 150 cm, per crescere ulteriormente come il numero di coltelli nei modelli più pesanti (Picchio *et al.* 2012).

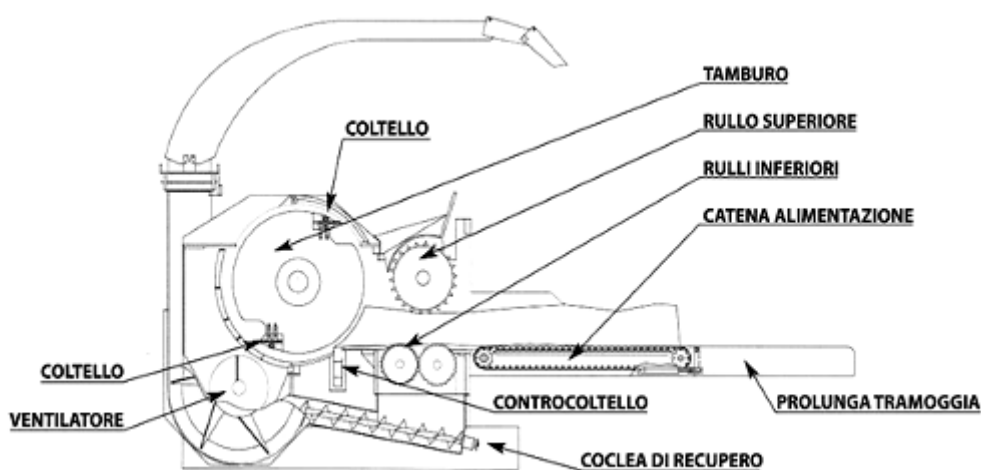


Figura 9: schema di allestimento di una sminuzzatrice a tamburo

A differenza delle sminuzzatrici a disco gli organi di alimentazione delle sminuzzatrici a tamburo spingono il materiale legnoso perpendicolarmente all'asse di rotazione del tamburo, sono macchine più grandi e potenti e possono lavorare pezzi di legno o fusti che

abbiano un diametro massimo pari a $\frac{1}{3}$ di quello del tamburo (Baldini, 1986). Sono dotate di dispositivo elettronico No Stress che ne regola l'alimentazione in funzione della potenza a disposizione.

Nella figura 9 è illustrato lo schema di una sminuzzatrice a tamburo, in cui è possibile distinguere:

- Sistema di alimentazione: strutturato per permettere una facile alimentazione con mezzi meccanici, è composto da una catena di alimentazione in acciaio ribaltabile idraulicamente per il trasporto, un rullo superiore e doppi rulli inferiori per favorire la lavorazione di piccoli pezzi e scarti di falegnameria.
- Organo sminuzzatore: è rappresentato da un tamburo, che monta due coltelli.
- Sistema di espulsione: il prodotto viene spinto da una coclea verso il ventilatore per essere espulso attraverso il collo d'oca, regolabile idraulicamente.

Per quanto riguarda i dispositivi di raffinazione (Figura 10), a differenza di quelle a disco le sminuzzatrici a tamburo usano invece delle griglie poste presso l'organo tagliente, tra la camera del tamburo e il sistema di espulsione. Le scaglie sopra misura vengono trattenute all'interno della camera del tamburo fino a che non sono state ridotte nelle dimensioni prefissate.

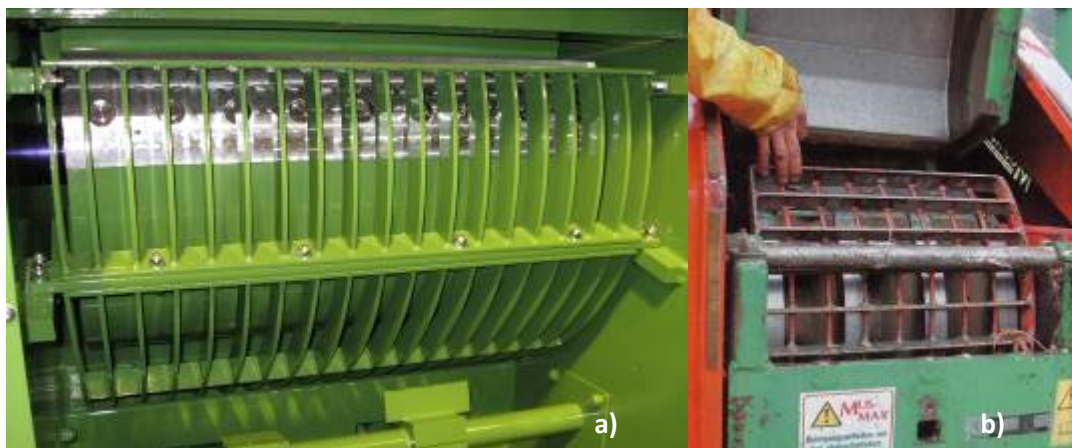


Figura 10: dispositivi di raffinazione di una sminuzzatrice a tamburo; maglia larga (a), maglia stretta (b)

In base alle esigenze dell'utenza finale, possono essere montate griglie di diverse misure, per produrre sminuzzato più o meno fine. Ovviamente, la presenza delle griglie costituisce un ostacolo al flusso dello sminuzzato e tende a “soffocare” la sminuzzatrice, abbassandone la produttività.

Prove scientifiche hanno dimostrato che il passaggio da una griglia “aperta” (6 x 50 cm) ad una stretta (4 x 4 cm) determina un calo di produttività di circa il 25% (Spinelli, Magagnotti, 2007a).

Sminuzzatrici a vite senza fine

Nelle sminuzzatrici a vite senza fine l'organo di taglio è costituito da una grossa vite conica a sezione decrescente con i bordi taglienti che ruota su un asse orizzontale (Figura 11).

Tale meccanismo non consente alcuna regolazione poiché lo strumento di taglio è un pezzo unico e il prodotto che si ottiene è di dimensioni piuttosto grandi (scaglie fino a 8 cm), pertanto la dimensione delle scaglie può essere cambiata solo cambiando l'organo di taglio (Spinelli, Magagnotti, 2005), per questi motivi non è un sistema molto utilizzato.



Figura 11: particolare dell'organo di taglio

Il legno sminuzzato prodotto da questa macchina (Figura 12) è molto regolare e assolutamente privo di particelle sottomisura, ma potrebbe rivelarsi troppo grande per alcuni impianti di conversione (Spinelli et al. 2004b).



Figura 12: legno sminuzzato prodotto da una sminuzzatrice a vite senza fine

Nel caso delle sminuzzatrici a vite senza fine mancano organi specifici di trascinamento o di alimentazione perché è la vite stessa che provvede anche a tirarsi il legname durante l'operazione di sminuzzatura (Baldini, 1986; Spinelli, 1995; Picchio et al. 2012).

La Potenza

Le sminuzzatrici oltre che per l'organo di taglio sono distinte anche dalla potenza richiesta (Spinelli, 1995), in tre categorie piccole, medie e grandi. La potenza viene trasmessa all'organo di taglio tramite cinghie o catene, ed è derivata dall'albero cardanico munito di frizione per evitare danni al motore durante i frequenti sbalzi nella resistenza offerta dalla macchina.

- *sminuzzatrici di piccola potenza*: possono essere applicate all'attacco a tre punti del trattore o carrellate, mosse dalla presa di potenza o da un motore elettrico indipendente, necessitano di circa 25-50 kW lavorando pezzi con diametro massimo di 20 cm con una produttività potenziale 2-10 t/h.

- *sminuzzatrici di media potenza*: possono essere allestite anche su rimorchi mono o bi-asse, ed essere azionate dalla presa di potenza del trattore o da motore indipendente endotermico con potenza compresa tra i 50 e i 110 kW. Lavorano pezzi con diametro massimo di 35 cm con una produttività potenziale di 5-20 t/h.
- *sminuzzatrici di elevata potenza*: allestite quasi esclusivamente su rimorchi a due o più assi, su autocarri o su forwaeder. In alcuni casi possono essere azionate da motore idraulici azionati dal motore del mezzo che le ospita ma generalmente presentano un motore endotermico con potenza >110 kW; lavorano diametri fino a 60 cm raramente oltre e hanno produttività potenziali maggiori di 15 t/h con picchi che possono superare le 40 t/h (Picchio et al. 2012).

Tabella 4: Potenze minime, indicative, richieste in funzione del tipo di materiale da sminuzzare (Baldini 1986).

Tipo di macchine	Diametro max	Tipo di legno	Stagionatura	Potenza min. CV
Piccole	15	Tenero	fresco	57
			stagionato	63
		Duro	fresco	63
			stagionato	69
Medie	20	Tenero	fresco	95
			stagionato	105
		Duro	fresco	105
			stagionato	115
Grandi	30	Tenero	fresco	200
			stagionato	220
		Duro	fresco	220
			stagionato	243

La potenza richiesta dalle cippatrici varia con il materiale da sminuzzare, specie legnosa, diametro e tenore idrico (Spinelli, 2000, Neri, 2007), seconda la formula:

$$\underline{P = D \times d \times n \times K}$$

dove:

P: è la potenza necessaria in Hp

D: è il diametro massimo in cm

d: è il coefficiente di densità (pari a 1 per le specie di legno tenero e 1,1 per quelle di legno duro)

n: è il numero di scanalature della P.d.P.

K: è il coefficiente di forza che varia da 2 a 7, salendo di un punto ogni 5 cm di diametro del materiale da sminuzzare a partire da 5 cm.

Tab. 5: variazione coefficiente K in funzione del diametro (Baldini 1986).

<i>D (cm)</i>	<i>5</i>	<i>10</i>	<i>15</i>	<i>20</i>	<i>25</i>	<i>30</i>
<i>K</i>	2	3	4	5	6	7

L'allestimento

La sminuzzatrice può essere azionata in vari modi, da un mezzo esterno (trattore) o con motore autonomo. La soluzione più semplice, economica e flessibile è quella che prevede l'azionamento dalla presa di potenza del trattore: si ottiene un collegamento agile, che consente di effettuare la sminuzzatura direttamente in campo (Figura 13).



Figura 13: sminuzzatrice alimentata da pinza idraulica, azionata dalla presa di potenza del trattore

Il limite principale di tale allestimento è quello della potenza massima dei motori dei trattori che è insufficiente ad azionare le sminuzzatrici industriali.

Le sminuzzatrici con motore autonomo invece possono essere trainate (Figura 14a) o semoventi (Figura 14b). Nel primo caso la sminuzzatrice, dotata di motore proprio, è montata su un telaio a ruote e può essere equipaggiata con elevatore a braccio idraulico con pinza. Lo svantaggio principale di questo sistema è la scarsa mobilità e perciò sono utilizzate preferibilmente in piazzale. Per contro consente di utilizzare il trattore anche per altri lavori.



Figura 14: sminuzzatrici trainate a); sminuzzatrici semoventi b)

Una sminuzzatrice semovente può essere allestita su un mezzo stradale o su un veicolo fuoristrada, in grado di percorrere le strade forestali camionabili. La maggior parte delle ditte specializzate adotta la versione semovente, e, in un'unica unità hanno sminuzzatrice, motore e caricatore montati su un mezzo di trasporto. La scarsa flessibilità di utilizzo, possono solo eseguire la sminuzzatura, viene controbilanciata da un minor costo totale e da un minor spazio richiesto.

Esistono anche versioni nate dalla combinazione di un forwarder e una sminuzzatrice: il chipforwarder (Figura 15). Sul pianale del forwarder viene montata la sminuzzatrice con motore autonomo e un cassone ribaltabile per lo sminuzzato, generalmente di 15-17 m³. Questa versione permette una straordinaria mobilità, tipica dei forwarder, e può sminuzzare direttamente in bosco senza altri mezzi di esbosco.



Figura 15: combinazione sminuzzatrice forwarder

Macchine per la raccolta delle colture a turno breve (SRF)

La diversa densità degli impianti (file singole o binate, spaziatura tra le file e lungo le file) e le diverse dimensioni raggiunte dalle piante a fine turno impongono l'impiego di macchine diverse e specializzate, appositamente adattate a ognuno dei contesti presi in esame, vale a dire colture caratterizzate da un modulo annuale, biennale o poliennale. Nei cantieri finora allestiti su coltivazioni di pioppo da biomassa il sistema di lavoro utilizzato prevede l'impiego di macchine falciatrinciacaricatrici, generalmente impiegate per la raccolta del mais o del foraggio, adattate alla raccolta delle biomasse legnose. Le modifiche eseguite sulle falciatrinciacaricatrici attualmente impegnate nella raccolta delle SRF riguardano principalmente l'adeguamento dell'organo di taglio e la sostituzione della testata di raccolta. L'adozione di sistemi di lavoro fondati su macchine specializzate e altamente produttive si pone come una delle priorità nella creazione di una filiera Legno-Energia incentrata su una logica moderna e razionale. Questo al fine di massimizzare la produttività delle diverse operazioni, in modo tale da contenere i tempi e i costi di lavoro, soprattutto alla luce del basso valore che caratterizza il prodotto finale nel mercato delle biomasse legnose.

- La falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar (Figura 16) è una delle semoventi maggiormente impiegate nella raccolta delle SRF di pioppo e il suo utilizzo garantisce, oltre ad un'elevata affidabilità in campo, il raggiungimento di prestazioni operative interessanti. Con un unico passaggio tale macchina è in grado di tagliare le piante, e convogliarle verso il proprio tamburo trinciante e sminuzzarle.



Figura 16: falciatrinciacaricatrice CLAAS JAGUAR

Macchine di questo genere possiedono due grandi qualità: da una parte la grande versatilità e flessibilità di impiego, dall'altra un'elevata velocità d'azione che comporta una notevole capacità produttiva. La dotazione di un'attrezzatura di tale tipo può risultare sicuramente conveniente per le ditte contoterziste, che possono operare in modo efficace e polivalente nella raccolta sia dei tradizionali seminativi sia delle coltivazioni di biomassa legnosa.

- Altra categoria di macchine impiegate in questo contesto è rappresentata dalle falciatrinciacaricatrici semiportate e dalle trinciacaricatrici portate impiegate per la raccolta delle piante da terra, preventivamente disposte in andana nell'interfila. La falciatrinciacaricatrice, della ditta Spapperi, deriva da una sminuzzatrice a disco appositamente modificata, montando due dischi taglienti circolari davanti la bocca di alimentazione (Figura 17a) effettuando contemporaneamente sia l'abbattimento e sia la sminuzzatura.



Figura 17: falciatrinciacaricatrice Spapperi mod. RT a); trinciacaricatrice Jordan RH 25 b);

I due dischi ruotano assieme a due rulli a martelli flottanti che convogliano i fusti tagliati nella sminuzzatrice. La macchina operatrice viene azionata dalla presa di potenza di un trattore agricolo piuttosto potente (almeno 110-130 kW), preferibilmente a guida retroversa.

Si tratta in ogni caso di un'opzione particolarmente valida per aziende agricole medio-piccole, che non possono fare grossi investimenti e che mettono a dimora superfici di SRF poco estese, o per ditte contoterziste che si propongono di operare su scala locale.

La trinciacaricatrice Jordan RH 25, deriva da una sminuzzatrice forestale a disco Jensen, modificata attraverso l'applicazione di un dispositivo rotativo per la raccolta automatica del materiale da sminuzzare (Figura 17b). Il dispositivo grazie alla sua rotazione solleva da terra i calci delle piante disposte in andana, convogliandole in due rulli verticali anch'essi rotanti favorendo l'inserimento del materiale legnoso nella la bocca di alimentazione. Questa trinciacaricatrice in genere viene montata sulla presa di potenza di trattori muniti di retro guida con potenza da 130 a 300 CV.

GLI STANDARD QUALITATIVI DEL LEGNO SMINUZZATO

Gli standard qualitativi prevedono che i biocombustibili debbano essere classificati in base a natura e origine, tipologia e proprietà del prodotto commerciale. La classificazione basata sulla natura e sull'origine dei biocombustibili solidi si articola su quattro livelli successivi, a partire dalle seguenti categorie principali (Tabella 6):

- a) biomasse legnose;
- b) biomasse erbacee;
- c) frutti;
- d) miscele e commistioni;

intendendo come miscela la mescolanza intenzionale di prodotti di diversa natura e come commistione quella non intenzionale o accidentale. Deve essere anche indicato se una miscela o un miscuglio contengono materiale trattato chimicamente. Una miscela o un miscuglio di materiale trattato e materiale non trattato deve essere classificata come materiale trattato.

Il secondo livello descrive combustibili di diversa origine all'interno dei suddetti gruppi principali, indicando se la biomassa è un prodotto delle attività colturali o forestali, un sottoprodotto, un residuo industriale o legno a fine vita, vergine o trattato.

La Tabella 6 ha infine un terzo ed un quarto livello che divide i gruppi di biomassa in ulteriori sottogruppi. Lo scopo della Tabella 6 è quello di dare la possibilità di differenziare e specificare un biocombustibile in relazione alla sua origine con il maggiore e necessario dettaglio possibile.

Con riferimento alla classificazione del CTI, oggetto della presente analisi è lo studio dei biocombustibili solidi derivanti dai cedui (di pioppo) a breve rotazione (SRF), prodotti e commercializzati sotto forma di sminuzzato di legno con dimensione tipica variabile tra 5 e 100 mm ottenuto tramite taglio con strumenti affilati (CTI, 2003).

Tabella 6 Classificazione dei biocombustibili solidi in base a natura e provenienza (CTI, 2003)

Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Biomassa legnosa	Biomassa legnosa da arboricoltura e selvicoltura	Alberi e arbusti interi	Legno di latifoglie Legno di conifere Ceduo a turno di rotazione breve Arbusti
		Tronchi	Latifoglie Conifere Miscele e miscugli
		Residui di potatura	Fresco/verde (incluse foglie e aghi secco Miscele e miscugli
		Ceppaie	Latifoglie Conifere Ceduo a turno breve Arbusti
		Corteccia da scortecciatrice industriale	
		Biomassa legnosa da gestione del territorio	
	Sottoprodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno	Residui di legno non trattato	Legno privo di corteccia Corteccia (da operazioni industriali) Miscele e miscugli
		Residui legno trattato	Legno privo di corteccia Corteccia (da operazioni industriali) Miscele e miscugli
		Scarti fibrosi dell'industria della carta e della cellulosa	
	Legno post-consumo	Legno non trattato	Legno privo di corteccia Corteccia (da operazioni industriali) Miscele e miscugli
		Legno trattato	Legno privo di corteccia Corteccia (da operazioni industriali) Miscele e miscugli
		Miscele e miscugli	
		Miscele e miscugli	

La classificazione, basata sulle tipologie del prodotto commercializzato e le relative proprietà prende in esame le forme più comuni di tali materiali, in accordo con l'elenco riportato in tabella 7 (CTI 2003).

Tabella 7: principali tipologie commerciali dei biocombustibili solidi (fonte CTI 2003)

<i>Biocombustibile</i>	<i>Dimensioni (diametro o volume)</i>	<i>Metodo di preparazione</i>
Bricchette	Ø>25 mm	compressione in una pressa a pistone
Pellet	Ø<25 mm	estrusione
Agglomerati sferoidali	Ø>50 mm	centrifugazione
Combustibile in polvere	<1 mm	macinatura
Segatura	1-5 mm	taglio con strumenti affilati
Cippato	5-100 mm	taglio con strumenti affilati
Scaglie	varia	frantumazione con strumenti non affilati
Ciocchi/tronchetti/tondelli	100-1000 mm	taglio con strumenti affilati
Tondo lungo	>500 mm	taglio con strumenti affilati
Balle	1,1 m ³	compressione in parallelepipedi
Balloni	3,7 m ³	compressione in parallelepipedi
Rotoballe	2,1 m ³	compressione in cilindri
Miniroballe	0,8 m ³	compressione in cilindri
Fascine	varia	allineamento e legatura
Tronchi virtuali	5,6 m ³	compressione in cilindri
Corteccia	varia	residui di scortecciamento degli alberi
Paglia sminuzzata	10-200 mm	taglio durante la raccolta
Semi o granella	varia	essiccazione
Gusci e noccioli	5-15 mm	nessuna preparazione

La standardizzazione di tutti questi prodotti richiede, per ciascuno di essi, la determinazione di una serie di proprietà che, se ricadono entro i valori limite prefissati, consentiranno di assegnare al prodotto in esame una particolare categoria o classe di qualità.

La definizione degli standard minimi per la valutazione della qualità dello sminuzzato sono regolati a livello europeo e nazionale dalle norme EN e dalle specifiche tecniche TS, periodicamente aggiornate da parte del Comitato Europeo di Standardizzazione (CEN) e dall'Ente Italiano di Unificazione (UNI) in collaborazione con il Comitato Termotecnico Italiano (CTI).

La valutazione di tali standard, dettati dalla Norma Europea UNI EN 14961: 2010, risulta necessaria per arrivare ad una strutturazione di un mercato trasparente in cui la commercializzazione sia attuata sulla base della proprietà intrinseche del prodotto (Cavalli et al. 2011). Assumendo un ruolo fondamentale nella contrattazione tra domanda e offerta, permettendo di specificare il contenuto energetico del combustibile, sulla base della qualità determinata (Grigolato, Hellrigl, 2009).

Secondo la Norma UNI EN 14961: 2010, il legno sminuzzato è un biocombustibile legnoso che si ricava dal processo di “sminuzzatura” delle biomasse legnose, tale pratica consiste nella riduzione del legno in frammenti irregolari, detti “chips”, lunghi dagli 8 ai 60 mm, ad opera di una macchina detta sminuzzatrice o cippatrice. Tale strumento consente una chiara ed univoca classificazione del prodotto in differenti categorie qualitative, secondo le sue caratteristiche fisiche e chimiche valutate prima del conferimento all'utilizzatore finale (Cavalli et al. 2011).

La “qualità” dello sminuzzato è uno degli aspetti essenziali nella produzione di biomassa: per una corretta sostenibilità della filiera legno energia è infatti necessario conoscere gli standard qualitativi da utilizzare per la determinazione della qualità del prodotto (Negrin, 2009). Inoltre ha un'enorme importanza ai fini commerciali perché determina la resa energetica del prodotto, la sua conservabilità e il tipo di impianto in grado di utilizzarlo, inoltre la qualità gioca un ruolo determinante da un punto di vista economico essendo decisiva nella formazione del prezzo da attribuire allo sminuzzato (Spinelli et al. 2004b).

Per caratterizzare la maggiore o minore “qualità” di una partita di sminuzzato si devono considerare le condizioni di origine del materiale (Emer et *al.* 2011) la specie legnosa ed in particolar modo la pezzatura della scaglie, il tenore idrico e il contenuto di fibra e ceneri, (Zanuttini et *al.* 1998; Secknus, 2007; Brand et *al.* 2011).

A queste vanno aggiunte ulteriori specificazioni a carattere informativo, che contribuiscono a una puntuale identificazione del prodotto, relative a potere calorifico inferiore (MJ/kg o kWh/kg), densità (kg/m³) alla ricezione, (Tabella 8) oltre che dal suo grado di contaminazione cioè l’eventuale presenza di sassi o altri corpi estranei.

Una buona qualità è raggiunta quando la maggior parte delle scaglie ricade nella classe di dimensioni medie, e il contenuto in rametti e polvere è ridotto al minimo o è del tutto assente (Spinelli, Magagnotti, 2007a).

La qualità del legno sminuzzato, come detto, è funzione del materiale di partenza spesso però un alto contenuto di corteccia e di foglie è indice di una qualità scadente del prodotto. Per questo motivo cresce l’importanza di poter valutare a priori le caratteristiche del prodotto che si andrà ad ottenere, in modo da pianificare e indirizzare le operazioni di approvvigionamento di sminuzzato verso una logistica di filiera efficace e remunerativa.

Gli elementi chiave per la determinazione qualitativa del combustibile sminuzzato sono: il contenuto idrico e la distribuzione granulometrica. Il contenuto idrico è il fattore che influenza maggiormente il potere calorifico del combustibile e quindi la sua resa nel processo di combustione. La distribuzione granulometrica riveste un ruolo chiave sia nella fluidità dell’alimentazione delle caldaie, sia nell’efficienza del processo di combustione (Cavalli et *al.* 2011).

Tabella 8: Specifiche e proprietà tecniche del legno sminuzzato dettate dalla Norma UNI EN 14961:2010

Master table			
Origin: According to 6.1 and Table 1.		Woody biomass (1)	
Traded Form		Wood chips	
Dimensions (mm) CEN/TS 15149-1, CEN/TS 15149-2			
	Main fraction (minimum 75 w-%), mm ^a	Fines fraction, w-% (< 3,15 mm)	Coarse fraction, (w-%), max. length of particle, mm
P16A ^c	3,15 ≤ P ≤ 16 mm	≤ 12 %	≤ 3 % > 16 mm and all < 31,5 mm
P16B ^c	3,15 ≤ P ≤ 16 mm	≤ 12 %	≤ 3 % > 45 mm and all < 120 mm
P45A ^c	8 ≤ P ≤ 45 mm	≤ 8 % ^b	≤ 6 % > 63 mm and maximum 3,5 % > 100 mm, all < 120 mm
P45B ^c	8 ≤ P ≤ 45 mm ^b	≤ 8 % ^b	≤ 6 % > 63 mm and maximum 3,5 % > 100 mm, all < 350 mm
P63 ^c	8 ≤ P ≤ 63 mm ^b	≤ 6 % ^b	≤ 6 % > 100 mm, all < 350 mm
P100 ^c	16 ≤ P ≤ 100 mm ^b	≤ 4 % ^b	≤ 6 % > 200 mm, all < 350 mm
Moisture, M (w-% as received) EN 14774-1, EN 14774-2			
M10	≤ 10 %		
M15	≤ 15 %		
M20	≤ 20 %		
M25	≤ 25 %		
M30	≤ 30 %		
M35	≤ 35 %		
M40	≤ 40 %		
M45	≤ 45 %		
M50	≤ 50 %		
M55	≤ 55 %		
M55+	> 55 % (maximum value to be stated)		
Ash, A (w-% of dry basis) EN 14775			
A0.5	≤ 0,5 %		
A0.7	≤ 0,7 %		
A1.0	≤ 1,0 %		
A1.5	≤ 1,5 %		
A2.0	≤ 2,0 %		
A3.0	≤ 3,0 %		
A5.0	≤ 5,0 %		
A7.0	≤ 7,0 %		
A10.0	≤ 10,0 %		
A10.0+	> 10,0 % (maximum value to be stated)		
Nitrogen, N (w-% of dry basis) CEN/TS 15104			
N0.3	≤ 0,3 %		Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2) Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)
N0.5	≤ 0,5 %		
N1.0	≤ 1,0 %		
N2.0	≤ 2,0 %		
N3.0	≤ 3,0 %		
N3.0+	> 3,0 % (maximum value to be stated)		
Chlorine, Cl (w-% of dry basis) CEN/TS 15289			
Cl0.02	≤ 0,02 %		Normative: Chemically treated biomass (1.2.2; 1.3.2) Informative: All fuels that are not chemically treated (see the exceptions above)
Cl0.03	≤ 0,03 %		
Cl0.07	≤ 0,07 %		
Cl0.10	≤ 0,10 %		
Cl0.10+	> 0,10 % (maximum value to be stated)		
Net calorific value, Q (MJ/kg or kWh/kg as received) or energy density, E (MJ/ m ³ loose or kWh/m ³ loose) EN 14918			
Minimum value to be stated			
Bulk density (BD) as received (kg/m ³) EN 15103			
BD150	≥ 150		Recommended to be stated if traded by volume basis
BD200	≥ 200		
BD250	≥ 250		
BD300	≥ 300		
BD350	≥ 350		
BD400	≥ 400		
BD450	≥ 450		
BD450+	> 450 (minimum value to be stated)		
Ash melting behaviour (°C) CEN/TS 15370-1		Deformation temperature, DT should be stated	

La pezzatura

La distribuzione dimensionale dei chips, insieme al contenuto di umidità, è uno dei principali parametri da prendere in considerazione nella definizione della qualità della biomassa (Suadicane, Gamborg 1999; Paulrud, Nilsson 2004; Hartmann et al. 2006; Cavalli et al. 2011), essendo in grado di influenzare il contenuto energetico (Wu et al. 2011), il comportamento in fase di stoccaggio incidendo sulla conservazione del prodotto (Nellist, 1995) e il trattamento finale all'impianto di trasformazione (Nati et al. 2010; Spinelli et al. 2012).

Una buona ripartizione dimensionale rappresenta uno dei parametri chiave per la corretta combustione dello sminuzzato in caldaie dedicate (Hartmann et al. 2001). La pezzatura condiziona la tipologia di impianto, e il modo in cui può essere stoccato il prodotto. In particolare la presenza di scaglie troppo grandi può creare problemi di tipo meccanico in impianti di piccole e medie dimensioni.

Tabella 9: classi dimensionali del legno sminuzzato secondo la specifica UNI CEN/TS 15149: 2006

Classi dimensionali (mm)	Composizione granulometrica percentuale		
	Frazione principale >80%	Frazione fine <5%	Frazione grossolana <1%
P16	$3,15 \leq P \leq 16$	<1 mm	> 45 mm e tutto < 85 mm
P45	$3,15 \leq P \leq 45$	<1 mm	> 63 mm
P63	$3,15 \leq P \leq 63$	<1 mm	>100 mm
P100	$3,15 \leq P \leq 100$	<1 mm	>200 mm

In realtà sono le particelle appartenenti alle classi dimensionali estreme che creano i maggiori problemi: le scaglie sovra misura possono intasare i sistemi di alimentazione degli impianti di piccole e medie dimensioni (Jensen et al. 2004) mentre la porzione più fine rende difficile la conservabilità del materiale e produce più cenere

La dimensione delle scaglie legnose oltre che dal tipo di sminuzzatrice (Spinelli et al. 2004a; Spinelli et al. 2005), dipende dal tipo di materiale ligneo a disposizione, rami o

fusto, dalla specie legnosa dalla regolazione e stato delle lame (Kofman, 2006) e dal tipo di griglia o dispositivo di calibrazione utilizzato (Jensen et al. 2004; Alakangas et al. 2005b).

- *il tipo di materiale*: se alimentate con tronchi sramati, le sminuzzatrici ben progettate producono una miscela di sminuzzato di piccole e medie dimensioni: la dominanza di una singola classe (almeno l'80% del peso) è molto difficile da ottenere su scala commerciale, anche usando il miglior materiale di partenza, come i tronchi sramati (Spinelli, Magagnotti, 2007a). Sminuzzando piante intere o ramaglie invece questi risultati potrebbero cambiare, e la qualità del sminuzzato potrebbe ridursi, in seguito ad un prevedibile aumento della percentuale di particelle sovra misura e di polvere.
- *la specie legnosa*: può influenzare le dimensioni delle scaglie, studi recenti dimostrano che lo sminuzzato prodotto da alcune latifoglie contiene una percentuale più elevata di particelle di piccole dimensioni, indipendentemente dal tipo di sminuzzatrice. Questo può essere messo in relazione con il legno più duro, che è “digerito” più lentamente dalla cippatrice e quindi produce scaglie più piccole (Spinelli, Magagnotti, 2007a).
- *l'usura dei coltelli*: condiziona sia la qualità dello sminuzzato che la produttività della sminuzzatrice (Nati et al. 2008). Come un coltello perde l'affilatura, la sminuzzatrice tenderà a frantumare il legname piuttosto che a tagliarlo, producendo una maggior quantità di polvere e di particelle sovra misura. Allo stesso tempo, il legno avanzerà più lentamente entro la sminuzzatrice, con il risultato di una pezzatura generalmente più piccola. La tendenza alla formazione di scaglie sovra misure può essere determinata dalla presenza, nel materiale di origine, di rami flessibili, una caratteristica che si riscontra soprattutto nelle latifoglie (Alakangas, 2005a; Kofman, 2006). Ciò spiegherebbe perché nel pioppo si constata la progressiva presenza di chip oltre i 100 mm man mano che le lame si usurano: i coltelli da un certo punto in poi diventano meno efficienti nel tagliare le parti più elastiche del materiale e ciò potrebbe anche spiegare perché si osserva una notevole perdita di produttività oraria nel corso della sminuzzatura (Nati et al. 2008).

- *dispositivi raffinatori*: la maggior parte delle sminuzzatrici possono essere dotate di particolari dispositivi, che agevolano la produzione di un materiale regolare. Diversi tipi sono usati nelle sminuzzatrici a disco e in quelle a tamburo. Tali dispositivi servono a tagliare nuovamente il sminuzzato troppo grossolano in tal modo le scaglie sovra misura vengono trattenute fino a che non sono state ridotte nelle dimensioni prefissate ed ottenere così un prodotto omogeneo. In base alle esigenze dell'utenza finale, possono essere montate griglie di diverse misure, per produrre sminuzzato più o meno fine.

Il tenore idrico

Il contenuto di umidità è il parametro qualitativo più importante poiché determina il potere calorifico e la capacità di conservazione dello sminuzzato (Negrin, 2009). Le piante appena tagliate hanno un contenuto di umidità vicino al 50%, e la stagionatura naturale è il sistema più pratico per ridurlo a valori accettabili. Se il sito è adatto e la stagione favorevole, il legname stoccato può perdere circa il 10-15% di umidità in 3 o 4 mesi (Spinelli, Magagnotti, 2007a; Spinelli, 2008).

Con questo metodo però è difficile garantire un abbattimento del contenuto di umidità sotto il 40%: neanche un aumento del tempo di stoccaggio può assicurare il risultato, anzi il legno stoccato troppo a lungo rischia di marcire e di diventare ancora più umido (Spinelli, 2008). Naturalmente il tenore idrico rappresenta un fattore chiave per la corretta gestione della combustione negli impianti (Nyström, Dahlquist, 2003).

Generalmente le conifere tendono ad essere più umide delle latifoglie, con eccezione del pioppo e delle salicacee (Nord-Larsen et al., 2011), anche le diverse parti della pianta evidenziano un differente contenuto di umidità, che decresce dal basso verso l'alto. Questo si può spiegare con il gradiente di concentrazione dell'umidità necessario per pompare l'acqua dal terreno e condurla nei rami e nelle foglie. Ad influenzare il contenuto di umidità è anche l'epoca di taglio e l'andamento stagionale.

Lo sminuzzato si conserva male: nei cumuli spesso si sviluppano funghi e batteri la cui attività causa una perdita di sostanza secca che oscilla mensilmente tra il 2 e il 4% della massa totale (Kofman, 2006; Spinelli, Magagnotti, 2007a), infatti i microrganismi si nutrono di biomassa, e l'aumento di calore del cumulo è il risultato tangibile della loro respirazione. La temperatura all'interno di un cumulo di sminuzzato proveniente da

residui forestali aumenta infatti molto rapidamente nel giro di una settimana (Nurmi, 1999); nel caso di materiale molto umido si può osservare che il cumulo comincia a “fumare” già dopo poche ore.

La temperatura raggiunta dallo sminuzzato accumulato sembra essere influenzata anche dalle dimensioni delle scaglie: a parità di condizioni, cumuli di scaglie di dimensioni medie di 8 mm raggiungono temperature di 60° C, mentre se le scaglie hanno una dimensione media di 70 mm la temperatura arriva solo a 30 ° C (Thörnqvist, 1984). Questo perché l'attività microbica è attiva soprattutto sulla superficie delle scaglie: minore la pezzatura, maggiore è la superficie specifica e quindi più esteso e rapido l'attacco microbico (Wihersaari, 2005).

Il contenuto di fibra e ceneri

Il contenuto di fibra indica la quantità di legno presente nello sminuzzato e influenza il potere calorifico, la conservabilità e il contenuto di ceneri. In linea di principio, il maggior contenuto di fibra si ottiene da tronchi privi di rami, ad eccezione del materiale da segheria. Da studi effettuati (Figura 18) è emerso che il contenuto di fibra nello sminuzzato si aggira mediamente sull'80%, e scende al 70% per le ramaglie di latifoglie (Spinelli, Magagnotti, 2007a).

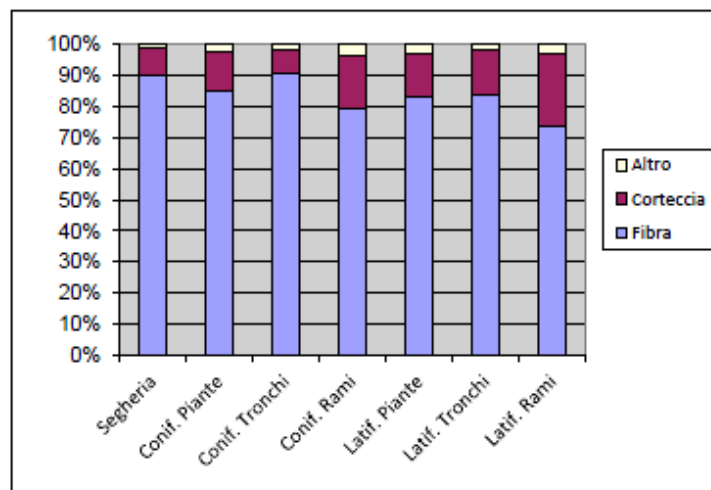


Figura 18: contenuto di fibra nel legno sminuzzato ottenuto da materiale diverso (Magagnotti, 2012).

In realtà non sempre un'alta percentuale di fibra garantisce un elevato potere calorifico perché foglie e corteccia possono avere un potere calorifico maggiore a quello della fibra. Per contro però, esse contengono una quantità superiore di ceneri (Hakkila, 1989) e di nutrienti che possono creare problemi di conservazione.

Il legno mediamente è costituito per il 99% in peso sulla sostanza secca, da cellulosa, emicellulosa e lignina, per il restante 1% da componenti di origine minerale che la pianta ha assorbito dal terreno attraverso le radici (AA.VV., 2004).

Nella frazione ossidata queste sostanze minerali costituiscono la frazione principale (85-95%) delle ceneri. L'altra componente (5-15%) delle ceneri è rappresentata dai cosiddetti incombusti costituiti da materia organica che ha subito solo una parziale combustione. Nello specifico, il contenuto di ceneri cambia a seconda della tipologia di pianta e dalle parti della pianta prese in considerazione (Tabella 10). Soprattutto le caratteristiche delle ceneri cambiano a seconda delle condizioni del terreno, del deposito di metalli pesanti e dei fertilizzanti utilizzati.

Tabella 10: Contenuto di ceneri per tipo di biocombustibile legnoso (Vesterinen, 2003)

<i>Combustibile legnoso</i>	<i>Contenuto di ceneri in peso sulla sostanza secca (%)</i>
Legna da ardere in tronchetti	1,2
Cippato da albero (fusto,rami aghi,...): pino	0,6
Cippato da albero (fusto,rami aghi,...): misto	0,5
Cippato da betulla	0,4-0,6
Cippato da residui forestali	1,3
Cippato da ceppi di albero	0,5
Segatura, con corteccia	1,1
Segatura, pino, senza corteccia	0,08
Truciolo da pialla	0,4
Corteccia di pino	1,7
Corteccia di abete	2,3-2,8
Corteccia di betulla	1,6

Il potere calorifico

Il potere calorifico di un combustibile, espresso in J/kg, è l'energia termica massima sviluppabile dalla sua completa ossidazione, misurata alle condizioni di riferimento. Si distingue tra potere calorifico superiore (PCS) e potere calorifico inferiore (PCI) a seconda dello stato fisico dell'acqua presente nei prodotti di combustione (AA.VV., 2011).

- Il potere calorifico superiore: nel prodotto della combustione considera come prodotto del calore anche quello che deriva dalla condensazione del vapore acqueo (Hellrigl, 2004).
- Il potere calorifico inferiore: tutta l'acqua prodotta e/o liberata nei processi della combustione è considerata allo stato di vapore (Hellrigl, 2004), condizione tipica di funzionamento dei generatori di calore alimentati a biomassa di tipo tradizionale.

Per il legno il potere calorifico dipende da diversi fattori che influenzano il contenuto energetico:

1. il tipo di legno
2. il tenore idrico
3. la massa volumica apparente
4. lo stoccaggio prima dell'utilizzo

Con la diminuzione di umidità aumenta il potere calorifico del legno in quanto l'acqua che evapora diminuisce con ogni kg di legno. Maggiore è l'umidità del legno, più energia necessita l'essiccazione e meno energia utile è disponibile. Inoltre la temperatura di combustione e l'efficienza vengono abbassate e attraverso una combustione incompleta possono sorgere problemi di emissione.

Pertanto legna da ardere, sminuzzato di legno e altri materiali combustibili dovrebbero essere bruciati solo allo stato secco, con un tenore idrico del 15-20% il che implica un corretto stoccaggio. L'essiccazione del legno può ridurre sensibilmente il consumo di carburante e porta un risparmio di circa del 20-30%.

Sono attualmente disponibili sul mercato alcuni modelli di caldaie a biomassa a condensazione, in cui una parte del vapor d'acqua presente nei prodotti della combustione viene condensato in uno scambiatore di calore a condensazione, e nei quali quindi è possibile recuperare dai fumi una quota aggiuntiva di energia termica.

Tale modalità di recupero aggiuntivo è possibile però solo a patto di produrre un fluido termovettore a bassa temperatura e quindi di avere un'utenza termica in grado di utilizzarlo e ponendo particolare attenzione ai problemi di corrosione dovuti al passaggio dei fumi caldi negli scambiatori di calore a condensazione.

Tabella 11: Valori medi del potere calorifico dei combustibili legnosi (Fonte AA.VV., 2011)

Tipologia	Contenuto idrico (%)	Potere calorifico inferiore	
		(MJ/kg)	kWh/kg)
Legno anidro	0	18,5	5,14
Pellet di legno	10	16,9	4,6
Tronchetti di legno	20	14,4	4
Cippato di legno	30	12,2	3,4

La massa volumica apparente

Lo sminuzzato può essere considerato quasi alla stregua di un liquido e quindi non avere proprio volume, ma quello del contenitore che lo racchiude. Per tale motivo si parla, nel caso dello sminuzzato, di “massa volumica apparente”. Essa esprime la massa del cippato in rapporto al volume del silos, rimorchio, locale, ecc. che lo contiene. Il volume è così costituito dalla somma del volume delle singole particelle legnose più gli spazi vuoti tra esse, per tale motivo si usa la dizione apparente e soprattutto per non confondere tale valore con quello della massa volumica della specie legnosa da cui è stato ottenuto lo sminuzzato, evidentemente superiore (Figura 19).

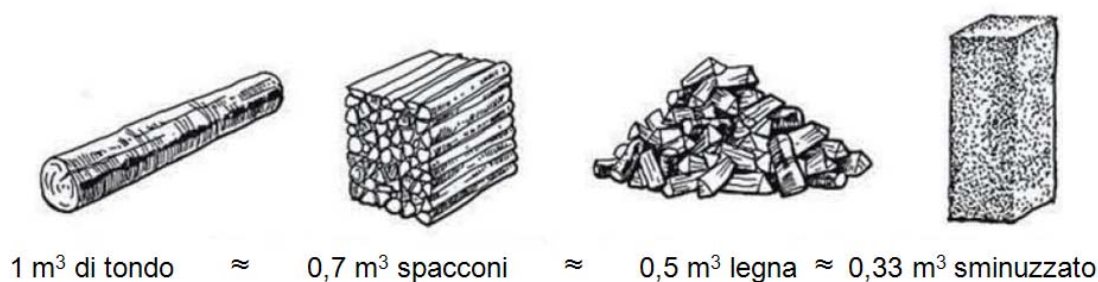


Figura 19: la massa sterica dei principali biocombustibili solidi rispetto ad 1 m³ di legno tondo (AA.VV., 2009).

L'unità di misura comunemente usata è il kg/m³. La massa volumica apparente dipende sia dalla massa volumica delle particelle che compongono lo sminuzzato, sia dalle loro dimensioni, che influenzano il grado di costipazione del cumulo. Per legname fresco di taglio, la densità dello sminuzzato ottenuto può variare fra 150 e 450 kg/m³. I valori inferiori si riscontrano nel caso di legno dolce come pioppo, abete, pino strobo e di scaglie di grandi dimensioni; quelli più elevati sono tipici del legno duro (faggio, quercia, carpino) e di scaglie minute.

La densità varia anche in funzione dell'umidità del materiale legnoso: ad esempio sminuzzato di pino strobo fresco di taglio, composto da scaglie della lunghezza di 20 mm e avente umidità media del 180% (rif. al peso anidro), ha una densità media pari a 310 kg/m³, che si riduce a circa 150 kg/m³ quando l'umidità del materiale raggiunge un valore prossimo al 30% (www.biomasse.basilicata.it).

I rapporti di conversione tra legna tal quale (intesa come tondo), tronchetti e cippato dipendono dalla specie legnosa, ovvero dalla massa volumica e dal contenuto idrico. A titolo di esempio, per il faggio con contenuto idrico 35% si ha che 1 m³ tondo corrisponde a circa 0,59 m³ di tronchetti e a circa 0,33 m³ di sminuzzato (AA.VV., 2009).

L'INNOVAZIONE TECNICA PROPOSTA

La distribuzione delle dimensioni delle particelle dipende da diverse variabili: dato che il processo di sminuzzatura avviene per taglio, le dimensioni delle scaglie possono essere controllate variando la velocità di rotazione dei dispositivi di taglio, il posizionamento dei coltelli, la velocità di alimentazione. Tali caratteristiche dipendono dalla tipologia della sminuzzatrice, a disco o a tamburo, e dai limiti insiti nella progettazione della macchina. In genere, al crescere della lunghezza delle scaglie prodotte aumentano anche la larghezza e lo spessore, anche se in modo non proporzionale.

La distribuzione dimensionale dello sminuzzato è riconosciuta come uno dei parametri più importanti per garantire un'efficiente combustione. Le dimensioni delle scaglie influenzano il buon andamento dello stoccaggio, l'efficienza della conversione energetica e le emissioni ambientali (Nati *et al.*, 2010).

Una calibratura uniforme del materiale garantisce il regolare funzionamento dei sistemi di alimentazione delle caldaie, in quanto scaglie eccessivamente grandi tendono a inarcarsi o piegarsi ostruendo il regolare flusso di alimentazione. Inoltre, i diversi tipi di caldaia possono essere alimentati solo con cippato in possesso di ben determinate caratteristiche granulometriche allo scopo di evitare un aumento dei costi di manutenzione ed una riduzione delle prestazioni del generatore con conseguente aumento dei costi energetici.

Le modifiche eseguite sulle trincia raccogliatrici semoventi attualmente impegnate nella raccolta delle SRF riguardano la riduzione del numero dei coltelli sul tamburo trinciante e la sostituzione della testata di raccolta. Nell'ultimo decennio sono già state svolte diverse esperienze con rotor commerciali e con altri appositamente progettati per lo scopo, ma che alla luce della necessità di mantenimento della struttura principale della falciatrinciaticaricatrice (sistema di alimentazione, telaio e supporti rotore, contro lama, ecc.) non hanno potuto fornire sufficienti informazioni relative alla dinamica di funzionamento ed alle effettive cause che portano alla formazione del chip.

L'aspetto che maggiormente determina la richiesta di maggiori informazioni sul processo di sminuzzatura e sugli elementi che contribuiscono alla sua valutazione riguarda l'elevata frazione fine del prodotto ottenuto e la generale eccessiva frantumazione delle

frazioni restanti che per la successiva valorizzazione sarebbe auspicabile fossero di maggiori dimensioni.

La falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar è una delle macchine maggiormente impiegate nella raccolta delle SRF di pioppo e il suo utilizzo garantisce, un'elevata affidabilità in campo, realizzando prestazioni operative interessanti, comprese tra 0,76 e 1,20 ha/h (Pari et al. 2009a). Tuttavia lo sminuzzato prodotto dalla raccoglitrice, risulta caratterizzato da una ridotta pezzatura e ciò si ripercuote negativamente sulla conservazione del cippato in fase di stoccaggio (Pari et al. 2008) e sulla qualità energetica finale del prodotto. Tale problematica risulta riconducibile al dispositivo di sminuzzatura che la macchina equipaggia di serie, concepito per operare essenzialmente su colture erbacee.

Al fine di incrementare la pezzatura delle scaglie, Il Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura–Unità di Ricerca per l'Ingegneria Agraria, in collaborazione con la Ditta Veneta Mais, ha progettato e realizzato un rotore sperimentale di nuova concezione in sostituzione del rotore di serie. Le prove condotte hanno evidenziato un generale miglioramento della pezzatura, ma anche la tendenza a concentrare gli incrementi dimensionali delle scaglie nella sola sezione longitudinale (Pari et al. 2009b, Pari et al. 2010).

I risultati ottenuti perciò hanno portato il CRA-ING allo sviluppo di un nuovo rotore sperimentale di II generazione, con l'obiettivo di incrementare le dimensioni delle scaglie anche nelle sezioni radiali e trasversali. I tre rotor sono stati messi a confronto sulla base di prove di raccolta sperimentali con lo scopo di descrivere le caratteristiche qualitative dello sminuzzato di pioppo ottenuto, documentando inoltre gli incrementi dimensionali prodotti sulle singole scaglie dal rotore di II generazione rispetto al rotore CRA di I generazione e al rotore di serie.

La dinamica della formazione del chip (cenni)

Nel settore sono stati condotti molti studi per capire durante il processo di sminuzzatura, le variabili che intervengono nella formazione del chip. Tale analisi risulta abbastanza complicata, poiché durante il processo di sminuzzatura del legno le variabili considerate

interagiscono tra loro in modo inaspettato, dovuto principalmente alle caratteristiche di eterogeneità, anisotropia, e igroscopicità del legno (Franz, 1958).

Inoltre il processo di formazione del chip dipende dalle proprietà meccaniche del legno, le più importanti sono la forza di scissione, la resistenza al taglio parallela alle fibre, e la resistenza a compressione parallela alla fibratura (McLauchlan, Lapointe, 1979; Twaddle, 1997).

Durante il processo di formazione del chip si sviluppano sollecitazioni di compressione nell'area adiacente alla superficie del coltello (area A, Fig. 20; McLauchlan, Lapointe, 1979). Le componenti di tali tensioni reagiscono con la forza di scissione del legno, e con la resistenza al taglio parallela alla fibratura causando la formazione del chip. Pertanto una maggiore resistenza alla compressione e una minore scissione del legno o minore resistenza al taglio, produrranno scaglie sottili.

Inoltre gli elementi cellulari sono connessi da forze di vario tipo ed intensità, legami covalenti in direzione longitudinale e legami secondari sul piano trasversale, questo comporta la formazione di piani con differenti caratteristiche meccaniche (Goli et al. 2004).

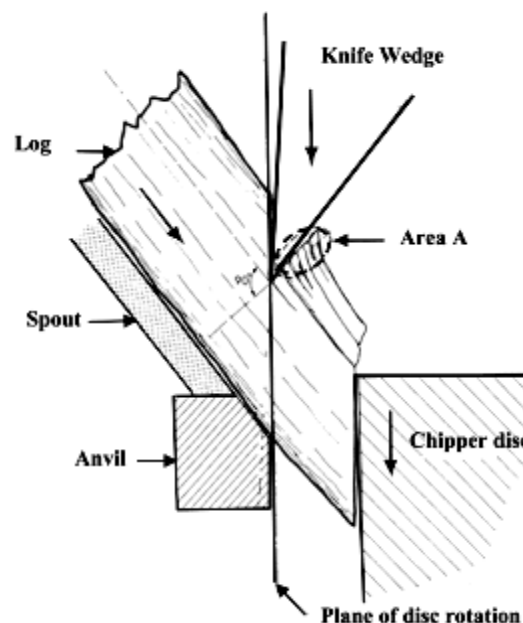


Figura 20: sollecitazioni di compressione nell'area "A" (Abdallah et al. 2011)

La resistenza al taglio è strettamente dipendente dall'orientazione degli elementi ed è quindi uno dei principali fattori che determina l'evoluzione del taglio. Il modo con cui evolverà poi il taglio a causa della resistenza che oppone il legno al tagliente prende il nome di modalità di scissione e dipende dall'interazione tra la resistenza al taglio e la reazione massima sostenibile dalle caratteristiche meccaniche della specie nella direzione di sollecitazione. La resistenza al taglio riguarda i singoli elementi cellulari e la loro disposizione nello spazio e quindi la tendenza del singolo elemento ad essere tagliato, la reazione nel suo complesso riguarda invece gruppi di elementi cellulari ed il loro comportamento meccanico (Goli et al.2004).

Durante la fase di taglio si verificano meccanismi di fessurazione che sono influenzati dall'attrito tra il legno e il tagliente (Figura 21a). Nella dinamica di taglio, la sezione tagliata dal coltello colpisce il porta coltello, il cambiamento di direzione dovuto al porta coltello produce tensioni di trazione perpendicolare alla venatura della fetta. Aumentando la velocità di taglio, la fetta colpisce con forza crescente il porta coltello, la trazione raggiunge il suo valore massimo che porta a una maggiore divisione della fetta e quindi un chip sottile (Abdallah et al. 2011).

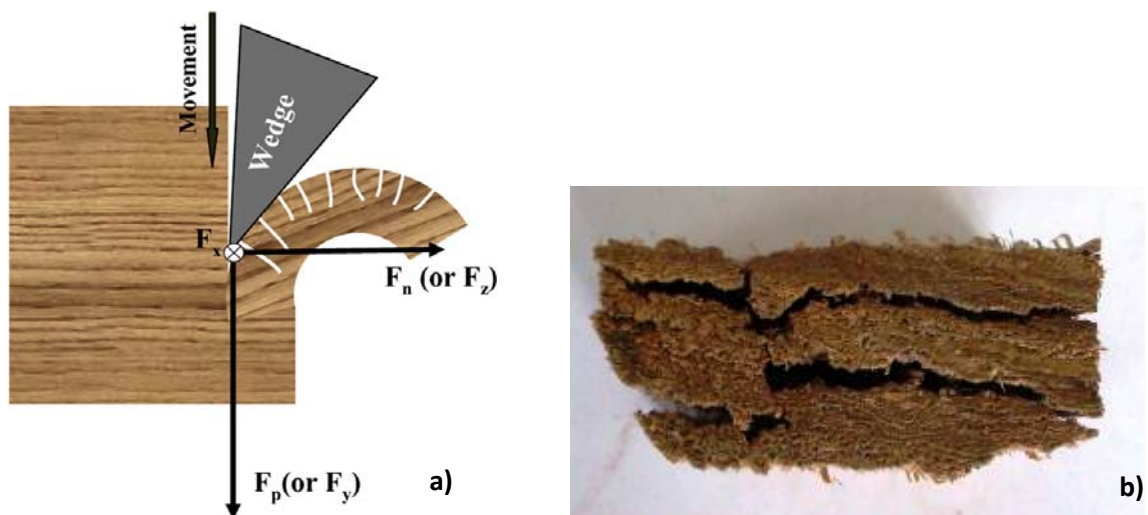


Figura 21: fessure durante il taglio e normali agenti (a), fessure delle scaglie dopo il taglio (b)

Questo può essere spiegato dal fatto che se l'attrito tra il legno e la faccia del coltello aumenta il numero e la profondità delle fessure sarà maggiore (Figura 21b), il coefficiente di attrito (μ) può essere calcolato dalla risultante delle forze normali, rispettivamente F_p e F_n come riportato nell'equazione (1).

$$[\mu = \tan[\arctan(F_n/F_p) + \gamma]] \quad (1)$$

A seguito della rotazione istantanea dell'organo di taglio, l'intensità delle forze F_p e F_n varia, di conseguenza varia il valore del coefficiente di attrito (μ). Il quale è funzione anche dalla velocità di taglio e del contenuto di umidità (McKenzie, 1968).

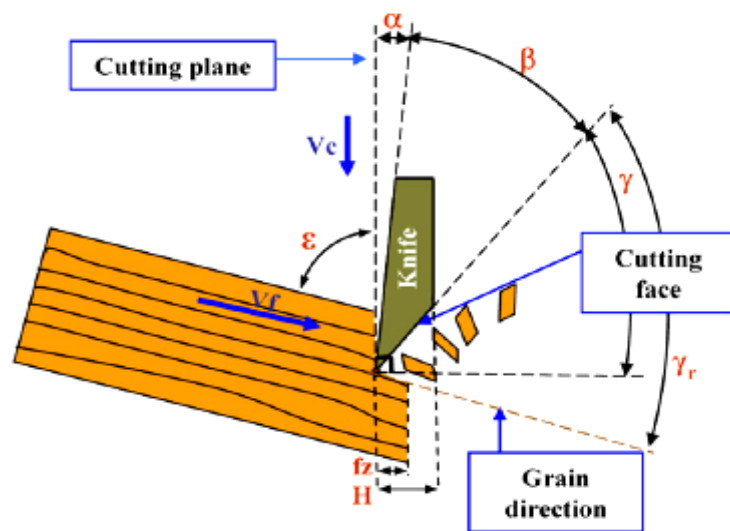


Figura 22: gli angoli di taglio (Abdallah et al. 2011)

Dall'equazione (1) si deduce che l'intensità dell'attrito varia al variare dell'angolo di taglio del tagliente. Per queste ragioni, si può ipotizzare che la variazione non lineare della distribuzione delle scaglie è dovuta all'effetto dell'attrito ed allo stesso tempo dalla formazione di fessure diffuse sulla fetta di legno. La mancanza di linearità sulla distribuzione delle scaglie è dovuta in parte anche al comportamento meccanico del legno ed in parte ai meccanismi che si innescano durante la formazione del chip.

Si può concludere pertanto che la formazione della scaglia e la distribuzione delle dimensioni sono influenzate dalle variazioni dell'angolo di taglio (γ) (Figura 22).

Diminuendo l'angolo di taglio aumenta lo spessore del truciolo (Buchanan, Duchinicki, 1963; Monico, Soule, 1979). All'aumentare della velocità di taglio invece si ha un incremento della percentuale di chip dalle piccole e fini dimensioni, in quanto le altre variabili restano costanti (Edelma, Stuart, 1992; Hartler 1986; Hernandez, Jacques 1997).

Anche un elevato contenuto di umidità comporta la formazione di una scaglia sottile mentre la larghezza del chip tende ad essere maggiore. Non vi sono molti studi sulla larghezza del chip (Buchanan e Duchinicki, 1963), poiché viene influenzato da diversi fattori quali: le proprietà di resistenza del legno, il contenuto di umidità, la temperatura del legno, la velocità di taglio e l'angolo di taglio.

Geometria della scaglia

La geometria e la dimensione dei chips, dipendono dal tipo di sminuzzatrice impiegata e da parametri operativi quali velocità di rotazione dell'organo di taglio o velocità di avanzamento del materiale legnoso (Hellstrom, 2010). Le scaglie prodotte da un organo sminuzzatore hanno una forma pressoché parallelepipedica, di dimensioni, lunghezza (L), spessore (t) e larghezza (w), definite nella figura 23.

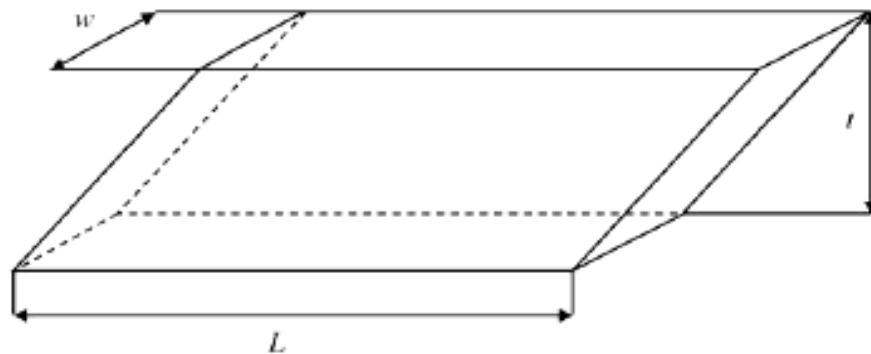


Figura 23: geometria scaglia, lunghezza (L), spessore (t), larghezza (w), (Hellstrom, 2010)

Presentano tipicamente una lunghezza compresa tra i 15 e i 50 mm, una larghezza pari a circa la metà della lunghezza e uno spessore variabile da un quinto a un decimo della lunghezza; pertanto una dimensione tipica è ad esempio 40 x 20 x 3mm.

Per gli stessi parametri di processo e geometria dell'utensile di sminuzzatura, il rapporto tra la lunghezza e lo spessore del chip è costante (Hartler, 1986; Kivimaa, Murto, 1949; Twaddle, 1997; Uhmeier, 1995).

Va sottolineato ancora una volta come la distribuzione dimensionale dello sminuzzato e ancor più la sua omogeneità sono parametri estremamente importanti ai fini dell'impiego negli impianti di riscaldamento ad alimentazione automatica, in quanto particelle disomogenee in dimensioni e forma possono causare inconvenienti nel funzionamento e blocchi del sistema di alimentazione della caldaia.

Il rotore sperimentale CRA-ING

Il rotore di serie (Figura 24) nella configurazione originale monta 24 portacoltelli sfalsati a “V”, 12 per parte, equamente distribuiti sul mantello del tamburo. Il tamburo, in acciaio, ha un peso di 195 kg, un diametro di 630 mm e una lunghezza 750 mm. I portacoltelli hanno una lunghezza di 340 mm e sono dotati di 5 asole ciascuno per il fissaggio e la regolazione dei coltelli. Questi ultimi presentano un angolo di taglio pari a 20°. Passando dalla trinciatura di colture erbacee alla trinciatura di colture arboree vengono smontati 12 dei 24 coltelli in modo da operare con 6 coltelli per parte. Tale operazione, tuttavia, non consente lo smontaggio dei portacoltelli che interagiscono in maniera passiva durante la fase di trinciatura.



Figura 24: rotore di serie CLAAS

Il rotore sperimentale (Figura 25) si differenzia da quello di serie per dimensioni, massa, numero di portacoltelli e coltelli, angolo di taglio.

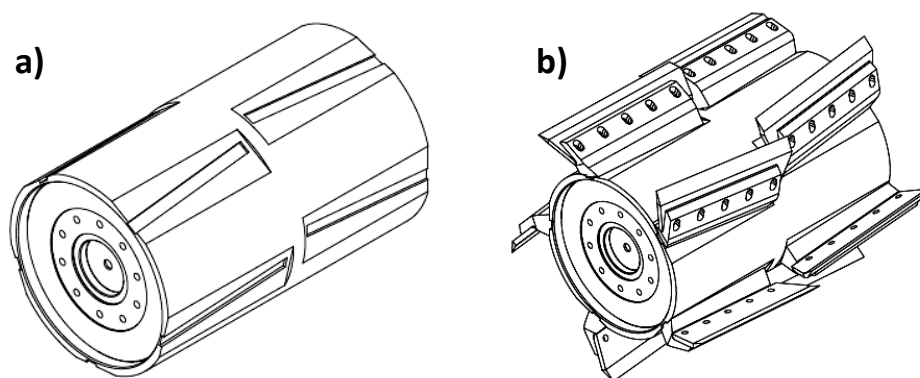


Figura 25; Tamburo rotore sperimentale; rotore CRA-ING (b)



Figura 26: rotore di I generazione nella camera di trinciantura della CLAAS JAGUAR

Il nuovo rotore (Figura 26) monta 10 portacoltelli fissi su un tamburo in acciaio del peso di 145 kg, con diametro e lunghezza pari rispettivamente a 403 mm e 670 mm. Sul tamburo, sono state eseguite 5 lavorazioni per lato distribuite in modo uniforme e simmetriche, al fine di permettere il corretto posizionamento dei portalama nella successiva fase di saldatura (Pari et al. 2009b; Pari et al. 2010).

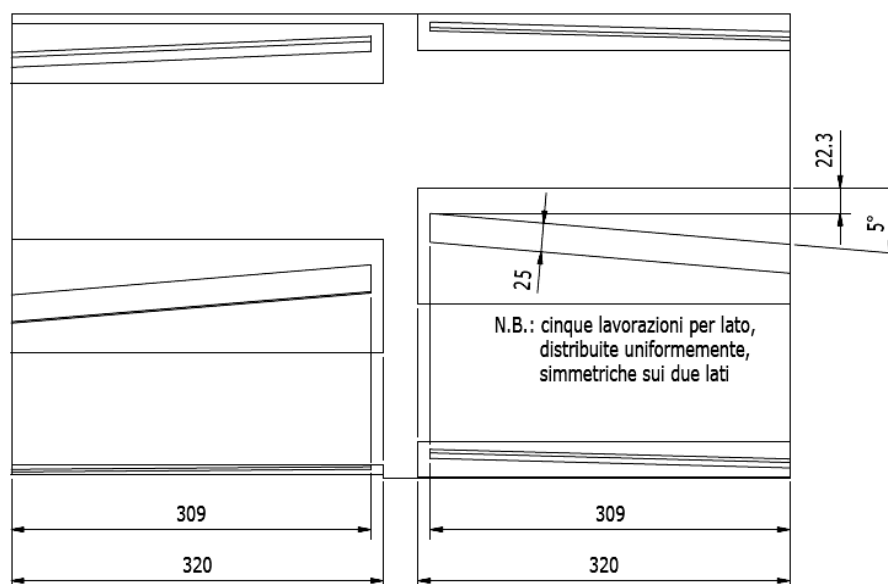


Figura 27: inclinazione delle lavorazioni rispetto alle generatrici del rotore

L'angolo di inclinazione delle lavorazioni rispetto alle generatrici del cilindro è di 5° , i portacoltelli hanno una lunghezza di 320 mm, dotati di 5 asole ciascuno per il fissaggio e la regolazione dei coltelli (Figura 27).

Le lame hanno una lunghezza pari a 380 mm con un angolo di taglio di $32,5^\circ$ (Figura 28), e sono dotate di una serie di 5 fori filettati che consentono il fissaggio sul portacoltello in corrispondenza delle asole (Pari et al. 2009b; Pari et al. 2010).

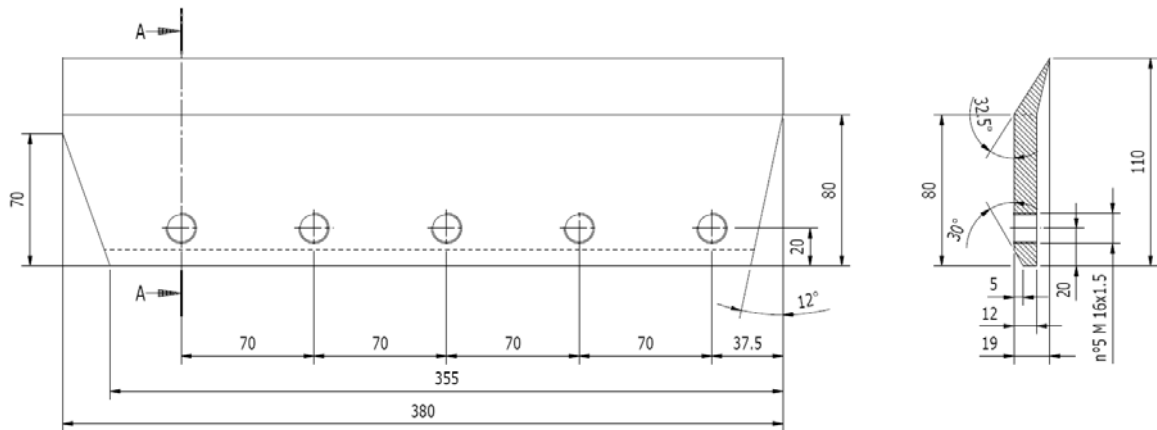


Figura 28: particolari costruttivi del coltello

Il rotore CRA-ING di seconda generazione

Il nuovo rotore analogamente alla versione precedente (rotore CRA I), monta 10 portacoltelli fissi saldati su un tamburo cavo in acciaio. I due rotori differiscono per massa complessiva, lunghezza e inclinazione dei portacoltelli, angolo di taglio e lunghezza dei coltelli.

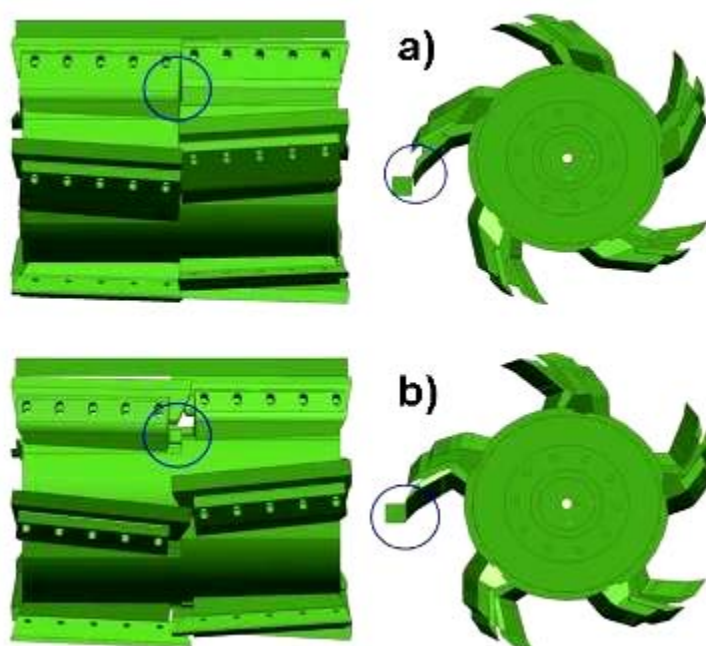


Figura 29: Rotore CRA-ING di seconda generazione (a) e di prima generazione (b). (Pari et al. 2013)

Nella figura 29 sono rappresentati i particolari costruttivi del rotore CRA-ING di seconda (a) e di prima generazione (b). Nelle aree cerchiare sono evidenziate la diversa configurazione dei portacoltelli e il diverso angolo di taglio dei coltelli nelle due versioni a confronto. Nella tabella 12 sono riportate invece le caratteristiche tecniche dei due rotori CRA a confronto.

Tabella 12: caratteristiche tecniche rotore di seconda generazione (Pari et al. 2013)

Caratteristiche	Unità	Rotore	
		CRA II	CRA I
Peso rotore	Kg	403	349
Diametro rotore ⁱ	mm	630	578
Lunghezza rotore	mm	720	701.5
Numero di portacoltelli	N.	10	10
Inclinazione portacoltelli	Gradi	15	30
Lunghezza portacoltelli	mm	340	320
Numero di coltelli	N.°	10	10
Angolo di taglio dei coltelli	Gradi	4	4.6
Lunghezza coltelli	mm	363	380

La massa del tamburo, comprensiva dei portacoltelli e dei coltelli, è stata incrementata da 349 kg a 403 kg, al fine di aumentarne l'inerzia durante la sminuzzatura, con evidenti vantaggi in termini di assorbimenti di potenza. I portacoltelli sono stati ridimensionati passando da 320 mm a 340 mm di lunghezza, in modo tale da distribuire in maniera più uniforme gli sforzi di taglio sul mantello del tamburo. Infine è stato variato l'angolo di taglio dei coltelli, da 4,6° a 4° per garantire un'azione di taglio più netta e una conseguente maggiore pezzatura delle scaglie. La lunghezza dei coltelli è stata infine ridotta da 380 mm a 363 mm. (Pari et al. 2013)



Figura 30: il rotore di seconda generazione allestito nella camera di trinciatura della CLAAS JAGUAR.

MATERIALI E METODI

Per le attività del Dottorato di ricerca, nell'arco del triennio, sono state realizzate delle prove comparative di sminuzzatura, che si proponevano di analizzare sia la variazione dimensionale dello sminuzzato dovuta al dispositivo di taglio e sia la variazione dimensionale dovuta alla possibile influenza attribuibile alla specie legnosa. Le prove comparative si sono svolte su impianti di pioppo in SRF al primo (R2F2) e secondo (R4F2) ciclo di taglio. Le prove sperimentali si sono svolte su 9 cantieri (Figura 31), dislocati tra tre province Italiane del nord-est: Padova, Treviso e Verona (Tabella 13). Oltre ai 9 cantieri di raccolta, come detto sopra, si è condotta un'ulteriore prova su specie forestali al fine di avere indicazioni sull'influenza della specie e sulla distribuzione dimensionale del prodotto ottenuto.



Figura 31: localizzazione dei cantieri

I cantieri di raccolta

I cantieri 1-2-3-4 prevedevano una serie di prove comparative di sminuzzatura volte ad evidenziare la diversa distribuzione dimensionale dello sminuzzato prodotto dal rotore di serie Claas e il rotore CRA I. Le prove di sminuzzatura sono state eseguite con due diverse falciatrinciacaricatrici, Claas Jaguar 890 e Claas Jaguar 860, la prima equipaggiata con rotore CRA-ING (CRA I) la seconda con rotore di serie Claas. Le macchine hanno operato entrambe con lo stesso regime di rotazione dell'apparato trinciante (1050 giri/min).

Per le diverse sessioni di sminuzzatura i coltelli erano stati affilati prima delle prove, per essere riaffilati secondo il giudizio dell'operatore. Dai cantieri di raccolta sono stati prelevati dei campioni di sminuzzato prodotto dai due rotori, trasportati in laboratorio sono stati analizzati e caratterizzati sulla base delle loro caratteristiche fisiche (umidità, pezzatura e densità apparente) secondo quanto prescritto dalla UNI EN 14961:2010.

Tab. 13: cantieri di raccolta

<i>Cantiere</i>	<i>Località</i>	<i>Provincia</i>	<i>Modello colturale</i>	<i>Clone</i>	<i>Rotore</i>
1-2	Arre	PD	R4F2	AF2	CLAAS/CRA I
3-4	Arre	PD	R2F2	AF2	CLAAS/CRA I
5-6	Musile di Piave	VR	R4F2	–	CLAAS/CRA I
7-8	Musile di Piave	VR	R2F2	AF2	CLAAS/CRA I
9	Cà Tron	TV	R4F2	AF2	CRA II

Come noto dalla letteratura la ripartizione dimensionale e l'omogeneità dello sminuzzato può essere influenzata da diverse variabili. Tra queste vi è anche la specie legnosa, al fine di valutare le possibili influenze attribuibili alla diversa specie sulla pezzatura dello sminuzzato si è condotta una prova sperimentale di sminuzzatura con piante forestali.

Le piante sono state prelevate da un cantiere di utilizzazioni forestali nella provincia di Viterbo e sminuzzate con i due rotorii oggetto d'indagine, il campione di piante era formato da cinque diverse specie: Acero, Cerro, Olmo, Robinia e Roverella, ogni specie contava 5 piante campione.

Il materiale è stato sminuzzato a macchine ferme inserendo le piante manualmente nella bocca di alimentazione delle due operatrici, per entrambe il regime di rotazione dell'apparato trinciante era lo stesso (1050 giri/min). Anche per questa prova sono stati prelevati dei campioni di sminuzzato e caratterizzati in laboratorio.

I primi risultati ottenuti rispettavano in parte i risultati attesi dall'attività di ricerca, quindi per avere ulteriori conferme sono state eseguite altre prove di sminuzzatura nei cantieri 5-6-7 e 8. Le prove sono state svolte sempre su impianti di pioppo al primo e secondo ciclo di taglio, con Claas Jaguar 890 e Claas Jaguar 860, la prima equipaggiata con rotore CRA I la seconda con rotore di serie.

Oltre a definire le caratteristiche fisiche e qualitative dei campioni prelevati dai cantieri 5-6-7 e 8, per ogni cantiere è stato costruito un campione casuale di 100 scaglie, ricadente all'interno della classe dimensionale più rappresentata (16-45 mm). Su ogni singola scaglia sono state rilevate lunghezza, larghezza e spessore, per ogni parametro sono state effettuate 3 misurazioni secondo le tre direzioni anatomiche del legno. Inoltre è stato rilevato anche il peso di ogni scaglia per un totale quindi di 10 misurazioni per singola scaglia.

Le indicazioni avute da tutte le prove sperimentali eseguite, hanno portato allo sviluppo di un nuovo rotore (CRA II) con l'obiettivo di migliorare ulteriormente la distribuzione dimensionale e l'uniformità del prodotto ottenuto.

I campioni di sminuzzato prodotti dal rotore CRA II sono stati raccolti durante una prova sperimentale svoltasi, nel Novembre del 2011, su un impianto di pioppo in provincia di Treviso (cantiere 9). L'impianto si presentava al quarto anno di età e al secondo ciclo di taglio (R4F2).

I campioni prelevati durante la prova di raccolta sono stati trasportati in laboratorio, dove sono state determinate le caratteristiche qualitative del prodotto secondo la UNI EN 14961:2010. È stata condotta inoltre l'analisi dimensionale delle scaglie ricadenti nella

classe dimensionale rappresentativa, determinando inoltre il peso il volume calcolato ed il volume misurato con il metodo dello xilometro.

I risultati ottenuti con il nuovo rotore sono stati confrontati con i risultati delle prove precedenti eseguite con il rotore di serie ed il primo rotore CRA, evidenziandone l'eventuale miglioramento della pezzatura. Caratteristica essenziale per una buona conservazione e resa energetica del prodotto.

I campioni raccolti

Da ogni prova di raccolta eseguita per definire la distribuzione dimensionale delle scaglie prodotta dai tre rotorii sono stati prelevati dei campioni pari ad un volume di 300 l ciascuno (50 kg circa), sulla cui base sono stati costruiti dei sottocampioni da 60 l suddivisi a loro volta in 20 frazioni da 3 l.

Per il calcolo del tenore idrico sono stati prelevati 10 campioni della massa di circa 1 kg, dove in laboratorio sono stati suddivisi in sottocampioni di circa 300 g. Per determinare la massa volumica apparente tal quale invece sono state effettuate 10 pesate direttamente sul sito di raccolta, con l'ausilio di un cilindro normalizzato.

Le caratteristiche tecniche rilevate degli impianti

Prima della raccolta gli impianti sono stati caratterizzati sulla base delle loro caratteristiche dendro-auxo-metriche e morfologiche, influenti durante la fase di raccolta. I rilievi sono stati eseguiti secondo i criteri delle "Linee guida per l'esecuzione delle prove di raccolta in SRF" (Mitchell et al. 1997), evidenziando in particolare:

- posizione e forma del sito;
- specie e clone;
- numero di raccolti precedenti, età della ceppaia e della parte aerea;
- sesto di impianto originale;
- altezza,
- diametro basale
- n° di rami e loro dimensioni (diametro basale e apicale, lunghezza)

- peso
- numero fallanze
- la distanza d'impianto effettiva tra le file, misurando la distanza che intercorre dal centro della ceppaia campione con il centro delle ceppaie sulle due file adiacenti (nel caso di una fila a margine misurare la distanza della stessa con quella adiacente);
- la distanza d'impianto effettiva sulla fila, misurando la distanza tra il centro della prima e il centro dell'undicesima ceppaia e dividendo il valore ottenuto per 10. Nel contempo bisogna contare anche il numero di ceppaie morte.
- i fusti, delle piante campionate, di lunghezza $> 1,5$ m (a 100 mm dal terreno) sono stati tagliati, legati in fasci, identificati con il n° di ceppaia di origine e il n° della fila, e pesati al fine di determinare la massa legnosa presente. Dalle piante campionate è stata eliminata l'eventuale presenza di neve o l'eccessivo accumulo d'acqua sulla superficie della pianta scuotendo i fasci prima di pesarli.

Materiali e metodi per analisi di laboratorio

In laboratorio i campioni raccolti sono stati caratterizzati sulla base delle loro caratteristiche fisiche. In particolare per ciascun campione raccolto si è determinato: la distribuzione dimensionale, il tenore idrico e la massa volumica apparente secondo le prescrizioni della Norma Europea UNI EN 14961:2010. Inoltre in laboratorio è stata condotta un'analisi dimensionale sulle singole scaglie di sminuzzato secondo le tre dimensioni anatomiche del legno.

Analisi Granulometrica

Per le successive fasi di laboratorio il campione è stato lasciato ad asciugare all'aria aperta per circa una settimana, in maniera tale che le particelle di sminuzzato non aderissero alle pareti dei setacci. Le operazioni di setacciatura sono state eseguite secondo le prescrizioni della Specifica Tecnica Europea UNI CEN/TS 15149-1:2006, con un setacciatore meccanico ANLYSETTE 18 (Figura 32).

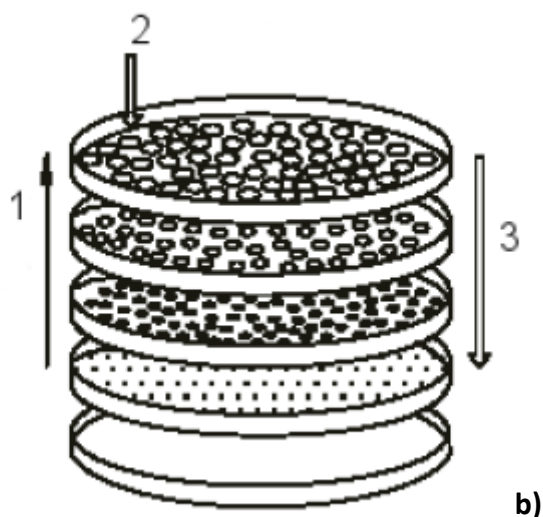


Figura 32: setacciatore meccanico (a); pila di setacci di dimensioni adeguate in ordine decrescente, 1) diametro dei fori in aumento, 2) Materiale aggiunto, 3) direzione del flusso del materiale (b).

L'analisi granulometrica è stata definita con appositi vagli vibranti disposti in serie, attraverso la valutazione delle frazioni dimensionali che compongono il campione analizzato, secondo classi di ampiezza. In relazione alle dimensioni dei setacci il campione è stato suddiviso in più sottocampioni in modo da evitare un sovraccarico.

Le dimensioni dei setacci erano tali da contenere il sottocampione e permetterne il movimento all'interno del setaccio stesso, secondo quanto previsto dalla normativa ISO 3310-2. Sul dispositivo agitatore meccanico è stato assemblato la pila di setacci in ordine decrescente, che terminava con un fondo di raccolta (Figura 31b). Il campione è stato pesato con una bilancia con approssimazione di 0,01 g, è sistemato secondo uno strato uniforme sul setaccio superiore.

L'operazione di setacciatura è stata eseguita in modo continuata per 15 minuti, fino a quando la variazione di peso tra due setacci successivi non è scesa sotto lo 0,3% del peso totale del campione per un minuto di setacciatura. I risultati sono stati espressi come percentuale in peso dell'intero campione.

La perdita di prodotto durante le operazioni di setacciatura, quindi la differenza tra il peso totale del campione e il peso della somma di tutte le frazioni, risultava inferiore al 2% come prescritto dalla specifica tecnica.

Determinazione dell'umidità

Il contenuto di umidità è stato determinato con il metodo gravimetrico, secondo la Norma Europea UNI EN 14774-2. Con il metodo della doppia pesata, prima e dopo l'essiccazione, in stufa a ventilazione forzata (Figura 33a) con temperatura pari a 103 ± 2 °C fino a massa costante (24 ore).

I campioni trasportati in laboratorio in contenitori sigillati sono stati preparati nel seguente modo: un contenitore vuoto e pulito è stato pesato con una bilancia tecnica con approssimazione a 0,01 g (Figura 33b), successivamente il prodotto è stato trasferito dal sacchetto sigillato nel contenitore di essiccazione, 300 g circa, e ripeso nuovamente. Una delle prerogative considerate è stato lo strato del campione, visto che il tempo di essiccazione richiesto dipende tra le altre cose da questa prerogativa.

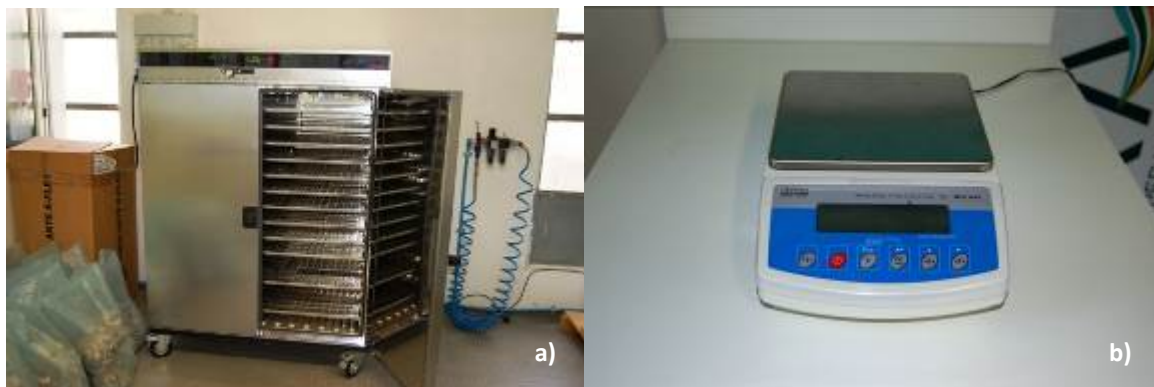


Figura 33: stufa a ventilazione forzata (a); bilancia tecnica d: 0,01 (b)

L'umidità rimasta sulla superficie interna del sacchetto, è stata inclusa nel calcolo del contenuto di umidità, pesando il sacchetto prima e dopo l'essiccazione.

Il contenuto totale di umidità è stato calcolato secondo l'equazione (2), il risultato è stato riportato su base umida in conformità alla Norma.

$$M_{ar} = \frac{(m_2 - m_3) + m_4}{(m_2 - m_1) + m_4} \times 100 \quad (2)$$

dove:

m_1 è la massa in g del contenitore vuoto;

m_2 è la massa in g del contenitore e del campione prima dell'essiccazione;

m_3 la massa in g del contenitore e del campione dopo l'essiccazione

m_4 è la massa in g di umidità unita all'imballaggio.

Massa volumica apparente

Per determinare la massa volumica apparente dei biocombustibili solidi si utilizza un recipiente dalle dimensioni standard secondo quanto prescritto dalla Norma Europea UNI EN 15103:2010.

Il campione rappresentativo viene versato nel contenitore di dimensioni standard e poi pesato, la massa volumica viene calcolata rispetto al peso netto del contenitore standard e riportato per il tasso di umidità misurato. Il contenitore standard utilizzato è di forma cilindrica, con un volume di $0,026 \text{ m}^3$ (Figura 34), caratterizzato da un rapporto altezza-diametro pari a 1,25-1,50 come previsto dalla Norma.



Figura 34: cilindro normalizzato

Il contenitore è stato riempito versando il campione in caduta libera da un'altezza di 20 cm al di sopra del bordo superiore del contenitore, fino a formare un cono di massima altezza possibile. Il materiale in eccesso veniva livellato con un asse di legno.

Il contenitore riempito di legno sminuzzato veniva lasciato cadere liberamente da un'altezza di 15 cm su un pannello di legno per 3 volte, lo spazio vuoto che si creava era riempito con altro materiale.

Il contenitore riempito è stato pesato con un dinamometro d: 10g, la densità apparente tal quale (BD_{ar}) del campione è stata calcolata secondo l'equazione (3):

$$BD_{ar} \text{ (at } M_{ar}) = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (3)$$

dove:

m_1 : peso del contenitore vuoto

m_2 : peso del contenitore pieno di cippato

V: volume standardizzato del contenitore

Analisi dimensionale delle scaglie

L'analisi dimensionale delle scaglie è avvenuta in maniera analitica e puntuale su un campione di 500 scaglie, le scaglie prodotte dai tre dispositivi di trinciatura sono state campionate all'interno della classe dimensionale rappresentativa 16-45 mm.

Le scaglie campione sono state dimensionate secondo le tre direzioni anatomiche del legno, per ogni direzione sono state effettuate 3 misurazioni rispettivamente individuate in pos.1), pos.2) e pos.3) (Figura 35).

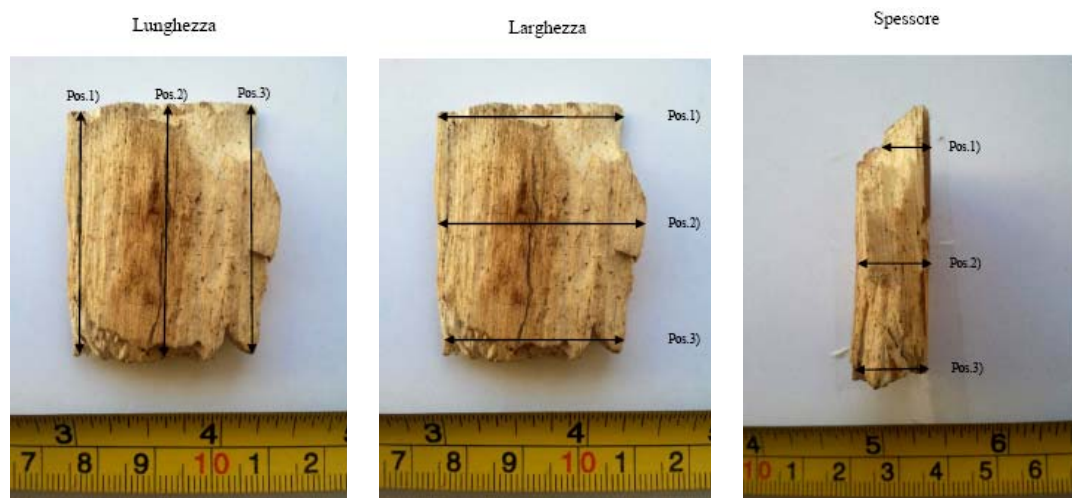


Figura 35: i parametri dimensionali rilevati sulla singola scaglia

Definite le dimensioni delle scaglie si è calcolati il volume, con lo scopo di stabilire l'effettiva grandezza delle scaglie prodotte dai tre rotori e stabilirne le eventuali differenze. La geometria irregolare delle scaglie però non consentiva una misurazione precisa e dettagliata pertanto si è deciso i misurare il volume delle scaglie con il metodo dello xilometro.

Il metodo dello xilometro prevede la totale immersione della scaglia in un recipiente graduato riempito d'acqua fino al bordo. L'equivalente del volume di acqua occupato dalla scaglia cade in un secondo recipiente di raccolta, per essere pesato con una bilancia con d a 0,01 g.

Considerato che il peso volumico dell'acqua a temperatura di 4°C e pressione atmosferica normale è uguale ad 1 g/cm³, il peso in grammi del volume di acqua spostato da parte della scaglia corrisponde al volume in cm³ del campione.

Nella tabella 14 è riportata la ripartizione del campione di scaglie per impianto e rotore, per il rotore di serie ed il rotore CRA I le scaglie campionate provenivano sia da impianti al primo ciclo di taglio e sia da impianti al secondo ciclo di taglio. Per il rotore CRA II invece il campione di scaglie per l'analisi dimensionale proveniva da un solo impianto al secondo ciclo di taglio. Nella tabella 14 sono riassunti il numero di parametri rilevati per ogni singola scaglia, per un totale di 5300 misurazioni.

Tabella 14: numero scaglie campionate e i parametri rilevati, () numero misure effettuate per singola scaglia. () n° misure effettuate per singola scaglia.

Rotore	R2F2	R4F2	Parametri rilevati	n° misurazioni
Claas	100	100	lunghezza, larghezza, spessore , peso	2000 (10)
CRA I	100	100	lunghezza, larghezza, spessore , peso, volume xilometrico	2200 (11)
CRA II	–	100	lunghezza, larghezza, spessore , peso, volume xilometrico	1100 (11)
Totale	200	300		5300

RISULTATI E DISCUSSIONI

La caratterizzazione degli impianti

Nella tabella 15 sono riportate le caratteristiche e i risultati dei rilievi dendroauxometrici dei 9 cantieri sperimentali, scelti per le prove comparative di sminuzzatura. Le cifre riportate non sono in alcun modo rappresentative della produttività media dei campi Veneti, ma piuttosto rappresentano le diverse situazioni riscontrate durante l'esecuzione delle prove di raccolta.

Tabella 15: caratteristiche dei campi sperimentali

Cantieri	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Provincia	PD		PD		VR	VR	VR	VR	TV
Rotore	Claas /CRA		Claas/CRA		CRA	Claas	CRA	Claas	CRA II
Clone	AF2		AF2		—	—	AF2	AF2	AF2
Età	R4F2		R2F2		R4F2	R4F2	R2F2	R2F2	R4F2
Superficie (ha)	1,61		1,53		1,23	1,17	1,21	1,55	1,45
Lunghezza media fila (m)	598,5		224,1		201,3	234,7	209,4	198,7	195,6
Distanza tra le fila (m)	3,00		3,02		3,05	3,08	3,02	3,03	3,00
Distanza sulla fila (m)	0,53		0,57		0,55	0,56	0,57	0,51	0,59
N° polloni	2,4		1,0		3,8	3,4	1,0	1,0	5,4
Diametro fusto princ. (mm)	73,9		64,6		74,8	76,6	80,8	78,2	61,9
	±22,15		±13,99		±10,03	±7,09	±12,93	±11,36	±11,85
Diametro fusto sec. (mm)	36,70				41,4	36,9			27,6
	±16,10		—		±17,27	±15,60	—	—	±7,41
Altezza fusto princ. (m)	8,24		5,50		9,01	8,75	8,9	8,63	7,86
	±0,74		±0,88		±0,18	±0,47	±1,08	±0,46	±0,60
Altezza fusto sec. (m)	5,22				5,65	5,61			4,24
	±1,95		—		±2,02	±2,10	—	—	±1,00
Densità (p/ha)	6239		5223		5468	4963	4986	5914	4957
Fallanze (%)	0,88		9,32		3,27	14,3	13,00	8,73	12,03
Peso polloni/ceppaia (kg)	12,29		5,23		14,42	16,30	10,36	9,10	12,83

I rilievi effettuati hanno fornito informazioni non solo sulle principali caratteristiche dendrometriche degli impianti, ma bensì hanno fornito anche informazioni sul sesto d'impianto adottato, sulla densità d'impianto sulle fallanze e sui valori di produttività media, in termini di sostanza fresca, per ceppaia.

Tutti i cantieri ad esclusione dei cantieri 5 e 8 sono stati realizzati con clone AF2, contraddistinto da un elevato attecchimento e una notevole velocità di accrescimento in fase giovanile. Raggiungendo dimensioni superiori rispetto ai cloni della pioppicoltura tradizionale, con produzioni superiori alla media (Facciotto et al. 2006)

Dalla tabella 15 inoltre si evince come le prove comparative dei cantieri di raccolta 1-2-3-4 svolte nella provincia di Padova, in realtà hanno interessato solo due siti sperimentali dove su ognuno sono stati organizzati due cantieri: uno con Claas Jaguar 860 equipaggiata con rotore di serie, l'altro con Claas Jaguar 890 equipaggiata con il rotore di nuova concezione CRA. (Figura 36) I restanti cantieri di raccolta invece, sono stati allestiti ognuno su siti di raccolta diversi.



Figura 36: fasi di raccolta degli impianti di pioppo al secondo ciclo di taglio

Va detto comunque che in ogni cantiere sono stati rilevati i tempi di lavoro per fasi separate, definendo così i vari elementi caratteristici del processo di raccolta. Con lo scopo di valutare le prestazioni operative delle operatrici equipaggiate con rotore di serie

e rotore CRA. Inoltre sono stati effettuati i rilievi di post-raccolta al fine di valutare la qualità del lavoro svolto dalle falciatrinciacaricatrici. L'analisi dei tempi di lavoro è la qualità del lavoro svolto dalle macchine operatrici non sono stati oggetto di studio dell'attività del Dottorato di ricerca.

I risultati del rotore CRA I

Nella tabella 15 sono riassunte le prime prove comparative di sminuzzatura dei cantieri 1-2-3-4. Una prima analisi dei campioni di sminuzzato prodotto dai due rotor, ha evidenziato una diversa distribuzione dimensionale delle scaglie di sminuzzato prodotto. Dal confronto tra i due rotor emerge come il rotore CRA I produca un incremento percentuale del prodotto ricadente nelle classi dimensionali medie (16-45) ed una corrispondente riduzione nelle classi più fini (3,15-8).

Nelle classi dimensionali medie l'incremento prodotto è del 7,83% per il primo ciclo di taglio mentre il secondo ciclo di taglio ha fatto registrare un incremento del 8,03%.

Per le classi dimensionali più fini invece si sono verificate riduzioni del 5,48% per il primo ciclo di taglio e del 1,87% per il secondo ciclo di taglio (Tabella 16).

Tabella 16: classi dimensionali del legno sminuzzato prodotto, dal rotore di serie ed il rotore CRA I

Classe granulometrica	R2F2		R4F2	
	rotore Claas	rotore CRA I	rotore Claas	rotore CRA I
>125 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
100-125 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
63-100 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
45-63 (%)	2,05	6,98	0,64	0,17
16-45 (%)	60,32	68,15	58,03	66,06
8-16 (%)	24,61	17,92	28,86	25,47
3,15-8 (%)	8,64	3,16	8,19	6,32
<3,15	1,39	0,90	2,75	1,20
Sovra misure (%)	1,17	2,73	1,20	0,78
Impurità (%)	1,83	0,23	0,33	0,01

Per quanto riguarda la presenza di sovra misure, al primo ciclo di taglio il rotore di nuova concezione ha fatto registrare un incremento, seppur lieve, della frazione. Per il secondo ciclo di taglio invece si è verificato una riduzione, va specificato comunque che l'ampiezza della classe risultava relativamente ridotta. Pressoché assenti invece le impurità.

Nelle figure 37, 38, 39 e 40 è illustrata la distribuzione dimensionale dei campioni di sminuzzato prodotto dai due rotor, attraverso vagliatura condotta in laboratorio.

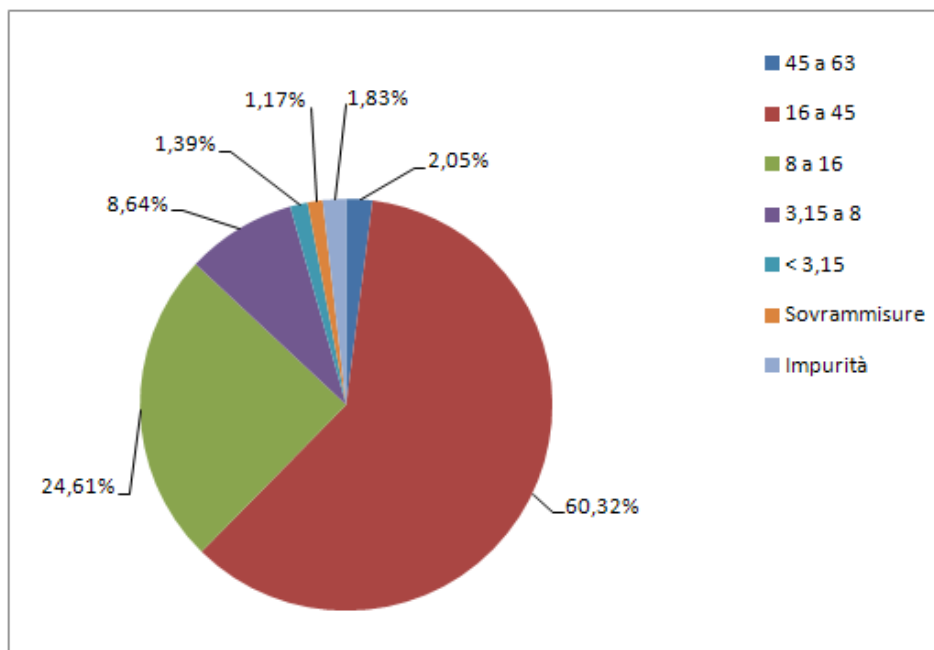


Figura 37: distribuzione dimensionale sminuzzato Claas R2F2

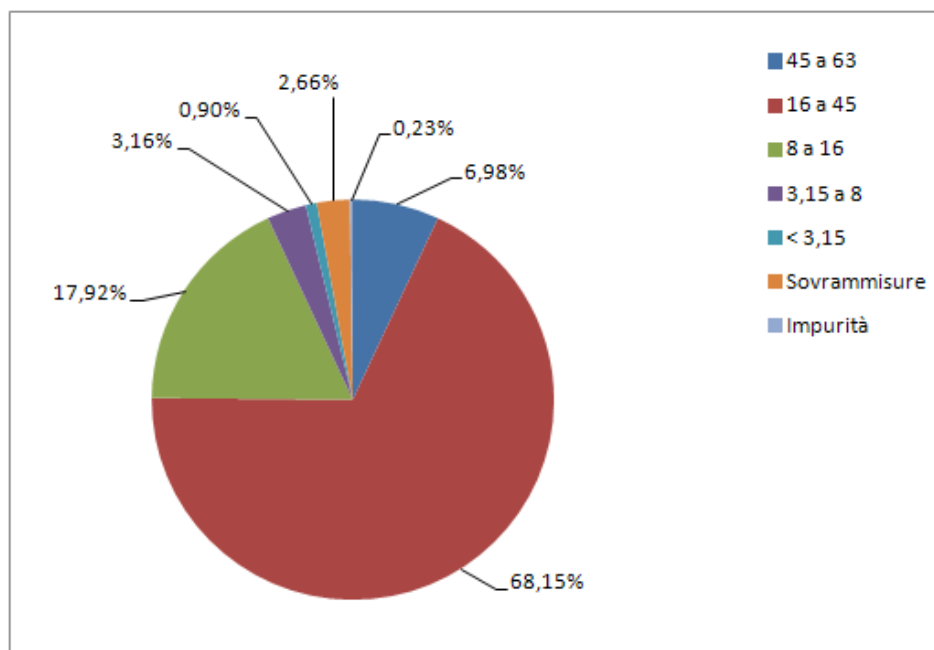


Figura 38: distribuzione dimensionale sminuzzato CRA I R2F2

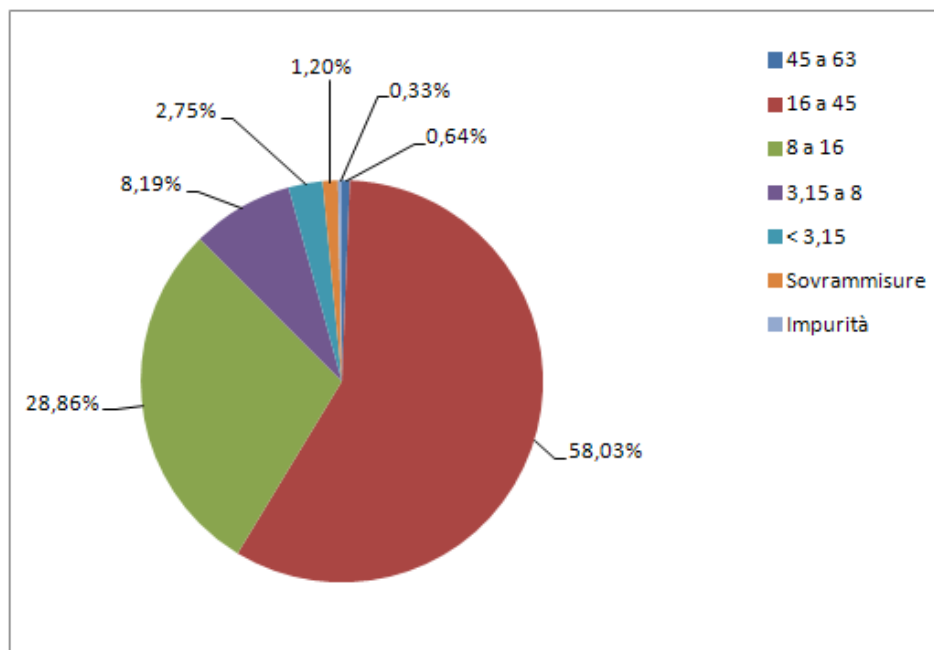


Figura 39: distribuzione dimensionale sminuzzato Claas R4F2

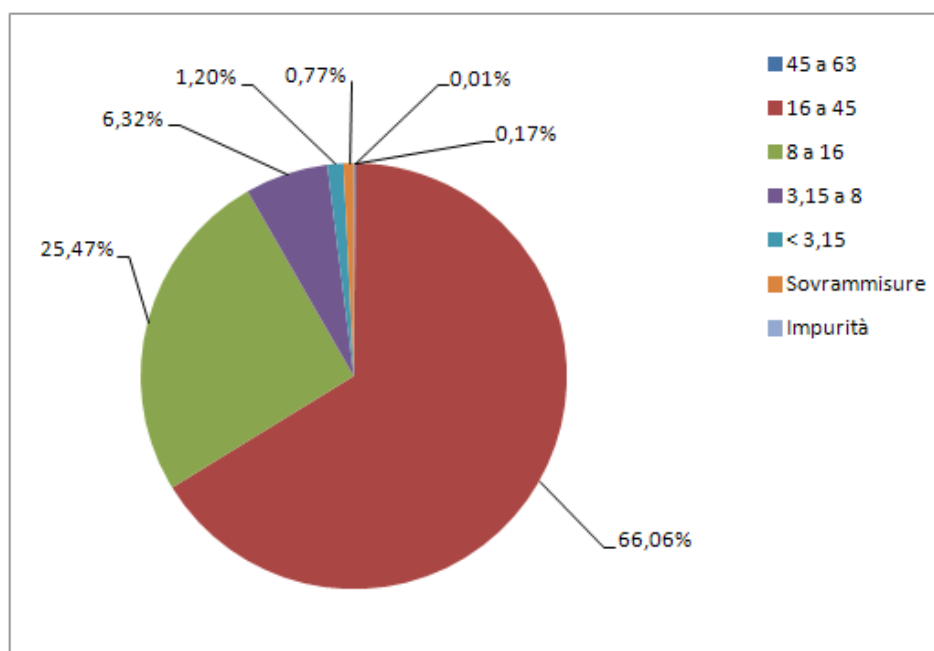


Figura 40: distribuzione dimensionale sminuzzato CRA I R4F2

I primi risultati ottenuti hanno indicato come il rotore CRA in linea generale, abbia effettivamente migliorato la distribuzione dimensionale del prodotto.

Al fine di avere delle indicazioni dimensionali, e quantificare le differenze delle scaglie prodotte dai due rotor. Su un campione di 100 scaglie ricadenti all'interno della classe rappresentativa è stata condotta una prima analisi dimensionale, rilevando in questo caso una sola misura per dimensione (Figura 41). La lunghezza è stata misurata come l'estensione massima della particella, la larghezza è stata registrata come la dimensione massima perpendicolare alla lunghezza. Mentre lo spessore, la terza dimensione, è stata rilevata come la dimensione massima perpendicolare alla lunghezza e alla larghezza della scaglia (Hartmann et al. 2006).

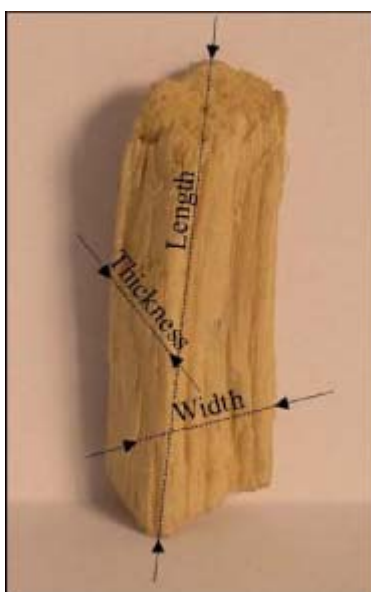


Figura 41: dimensioni rilevate sulla scaglia

L'analisi ha sottolineato come l'incremento dimensionale del chips sia avvenuto lungo la sola dimensione longitudinale, confermando in questo caso solo in parte i risultati attesi, in quanto ci si aspettava un incremento dimensionale della scaglia lungo tutte le dimensioni.

Tabella 17: analisi dimensionale delle scaglie prodotte dai due rotor

	Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	Spessore (mm)	Peso (g)
Rotore Claas				
Media	32,23	14,82	11,21	1,03
	±7,89	±4,70	±4,77	±0,64
Rotore CRA I				
Media	40,25	13,19	10,31	1,21
	±6,82	±4,45	±4,21	±0,64

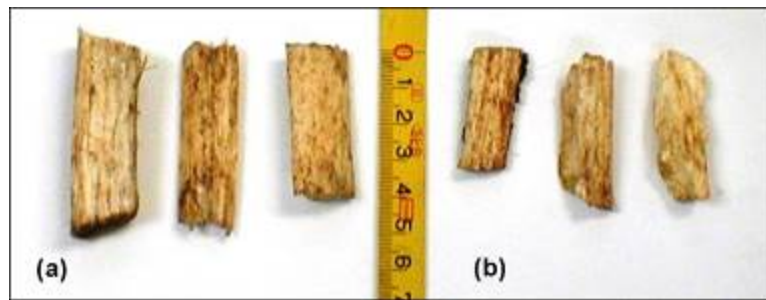


Figura 42: Profilo longitudinale dei chips di pioppo prodotti dal rotore CRA-ING (a) e dal rotore di serie (b)

Le motivazioni che porterebbero a tale risultato potrebbero risiedere sia nelle scelte meccaniche applicate sul dispositivo di trinciatura sperimentale, sia nelle caratteristiche della coltura in relazione al ciclo di raccolta.

La possibile influenza della specie legnosa

La ripartizione dimensionale delle particelle all'interno di una classe di riferimento è influenzata in parte anche dalla specie legnosa utilizzata (Spinelli et al. 2004b), studi condotti in precedenza dimostrano che lo sminuzzato prodotto da alcune latifoglie è contraddistinto da una percentuale elevata di particelle di piccole dimensioni, indipendentemente dal tipo di sminuzzatrice. Questo può essere messo in relazione con il legno più duro, che è “digerito” più lentamente dalla sminuzzatrice e quindi produce scaglie più piccole (Spinelli, Magagnotti, 2007a).

Un legno duro offre una maggiore resistenza al taglio, essendo caratterizzato dalla presenza di una maggiore quantità di legno estivo, più denso a causa della presenza di pareti cellulari molto spesse e cavità interne piccole. Un legno primaverile, invece, offre una minore resistenza per via delle pareti sottili e delle ampie cavità cellulari.

Al fine di valutare come tale influenza condizioni il processo di formazione della scaglia, e quindi cercare di identificare la causa dell'incremento prevalente della sola dimensione longitudinale; oppure se è necessario apportare delle modifiche al rotore sperimentale.

Sono state organizzate ulteriori prove sperimentali sminuzzando, con i due rotori oggetto di indagine, dei campioni di piante forestali. Le piante utilizzate per la prova avevano un diametro basale compreso tra 70 e 100 mm, in linea con le dimensioni diametriche raggiungibili dal pioppo al secondo anno di vegetazione.

Le specie impiegate per la prova sono state sminuzzate sia con il rotore di serie, montato su falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar 860, sia con rotore CRA-ING, equipaggiato su falciatrinciacaricatrice Claas Jaguar 890. Il materiale prelevato in bosco è stato sminuzzato a macchine ferme, inserendo le piante manualmente nella bocca di alimentazione delle due operatrici. Lo sminuzzato ottenuto da ciascuna specie è stato caratterizzato rilevandone la distribuzione granulometrica, il contenuto di umidità e la densità apparente (Tabella 18).

Tabella 18: Distribuzione granulometrica dello sminuzzato prodotto da Claas Jaguar trinciando piante forestali con rotore di serie e rotore CRA-ING

<i>Specie</i>	<i>Acero campestre</i>		<i>Roverella</i>		<i>Cerro</i>		<i>Robinia</i>		<i>Olmo campestre</i>	
Rotore	Claas	CRA	Claas	CRA	Claas	CRA	Claas	CRA	Claas	CRA
Classe (mm)	Distribuzione del prodotto tra le classi granulometriche (%)									
100 a 125 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
63 a 100 (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45 a 63 (%)	0,58	0,77	5,48	2,68	2,12	2,71	10,86	0,65	12,62	9,18
16 a 45 (%)	45,43	52,74	60,62	67,43	63,20	68,26	49,38	64,97	43,52	51,24
8 a 16 (%)	42,16	36,30	30,29	26,43	28,57	25,44	29,73	27,79	32,80	30,38
3,15 a 8 (%)	11,09	9,60	3,25	3,15	5,19	3,10	8,94	5,97	9,66	8,04
< 3,15 (%)	0,75	0,59	0,37	0,31	0,92	0,50	1,09	0,61	1,40	1,16
Sovra misure (%)	0,30	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	1,20	0,00
Impurità (%)	0,00	0,00	0,00	0,40	0,10	0,00	0,00	0,00	0,30	0,00
Moisture content (%)	29,19%	30,11%	30,20%	30,47%	33,51%	29,16%	30,79%	30,41%	32,48%	33,11%
Bulk density (kg/m³)	187	164	282	247	220	212	212	179	182	168

L'analisi granulometrica dello sminuzzato ottenuto dalle specie forestali, conferma in linea generale i risultati ottenuti nelle prove sperimentali condotte con il pioppo; il nuovo rotore, rispetto a quello di serie, consente di ottenere un prodotto dalle caratteristiche qualitative più elevate, contraddistinto da una maggiore percentuale di materiale ricadente all'interno della classe dimensionale rappresentativa (16-45), e da una minore percentuale di materiale ricadente all'interno delle classi più fini. La densità apparente indica come in tutte le prove eseguite con specie diverse, il rotore CRA abbia incrementato le dimensioni

delle scaglie ed allo stesso tempo ha portato ad una maggiore uniformità del prodotto, aumentando quindi gli spazi vuoti all'interno dell'unità di volume. Aspetti di notevole importanza soprattutto ai fini della conservabilità del prodotto e successiva valorizzazione energetica.

Nella figura 43 è riportata la variazione incrementale delle classi medie e fini per ogni singola specie; la robinia è la specie che ha mostrato l'incremento maggiore rispetto alle altre specie, nella classe dimensionale 16-45 mm, rispettivamente del +15,59%. Gli incrementi minori si sono verificati, invece, per il cerro (+5,06%) e per la roverella (+6,81). La riduzione della percentuale di prodotto ricadente nelle classi granulometriche inferiori a 8-16 mm è risultata variabile da -5,86% per l'acero, a -1,94% per la robinia.

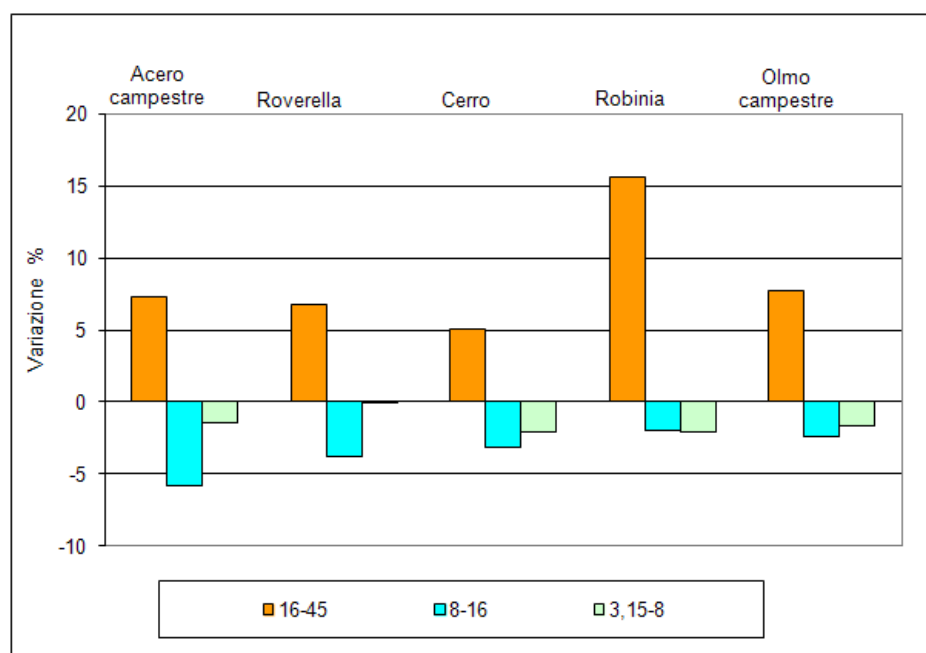


Figura 43: Variazione degli incrementi percentuale della distribuzione granulometrica del legno sminuzzato prodotto dal rotore CRA-ING, rispetto al rotore Claas Jaguar, per le classi più rappresentative

L'analisi delle scaglie conferma la tendenza generale del nuovo rotore nel concentrare gli incrementi dimensionali prevalenti nella sezione longitudinale, indipendentemente dalla specie in esame. Passando mediamente dai 30 mm ai 40 mm, mentre restano pressoché inalterate le sezioni trasversale e radiale.

Analizzando le diverse sezioni delle singole scaglie e i risultati ottenuti, si è ipotizzato come due delle dimensioni della scaglia, lunghezza e larghezza siano imputabili alle diverse regolazioni effettuate sull'organo di taglio e alla variazione della velocità de rulli di alimentazione. Per quanto riguarda la dimensione trasversale, più piccola rispetto alle altre due, può essere riconducibile all'anatomia della pianta e alla sua età.

Tra le osservazioni macroscopiche fatte sulle scaglie, in particolare sui campioni di cerro e roverella sono stati osservati due aspetti importanti: la presenza dell'anello poroso costituito da vasi primaverili grandi e pareti sottili. Tale caratteristica può aver influito sullo spessore della scaglia, rappresentando nei casi osservati il punto di frattura della scaglia (Figura 44), osservazione comunque già rilevata precedentemente in altri studi (Pari *et al.* 2009b).

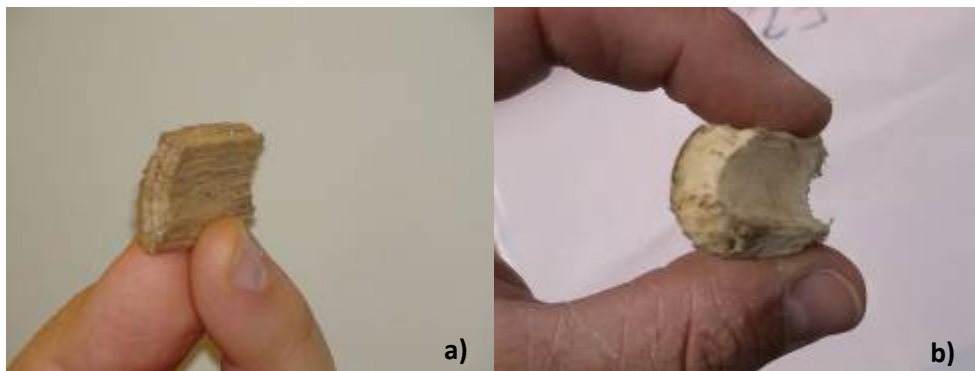


Figura 44: tendenza delle scaglie a separarsi lungo la porzione del legno primaticcio, dell'anello di accrescimento, Roverella (a), Pioppo (b)

Secondo aspetto di cui si è tenuto conto è stata l'età della singola pianta, i criteri di scelta delle piante si sono basati sulle caratteristiche dimensionali, vista la difficoltà di reperire in bosco polloni di 2 anni aventi le dimensioni del pioppo allevato in SRF. L'età avanzata delle specie forestali e il contesto in cui si sono sviluppate hanno mostrato accrescimenti annuali molto ridotti rispetto al pioppo determinandone la dimensione della sezione trasversale. In ultima analisi anche gli avanzati processi di duramificazione hanno portato ad un diverso grado di densità tra albarno e durame, conferendo di conseguenza una diversa densità ai diversi tessuti costituenti l'anello di accrescimento (E. Guilley, G.Nepveu, 2003).

L'analisi dimensionale delle scaglie

I risultati ottenuti dagli impianti di pioppo e la prova di sminuzzatura con specie diverse, hanno fornito indicazioni su come si abbia una tendenza generale, da parte del rotore CRA, a concentrare gli incrementi dimensionali lungo la sola dimensione longitudinale lasciando le dimensioni radiali e trasversali pressoché inalterate. Per ulteriori conferme di ciò, sono state eseguite altre prove comparative di cippatura (cantieri 5-6-7 e 8).

Le prove si sono svolte sempre su impianti al primo e secondo ciclo di taglio nella provincia di Verona, dai singoli cantieri sono stati raccolti altri campioni e trasportati in laboratorio per una nuova caratterizzazione del prodotto ottenuto dai due rotori.

L'analisi granulometrica ha evidenziato per entrambi i diversi cicli di taglio un lieve ma costante incremento nella classe dimensionale rappresentativa (16-45 mm), seguita da una costante riduzione delle classi più fini. Dalle figure 45 e 46 è possibile notare anche vi sia a favore del rotore CRA una maggior rappresentanza di scaglie ricadenti nella classe dimensionale 45-63 mm, confermando i risultati delle precedenti prove.

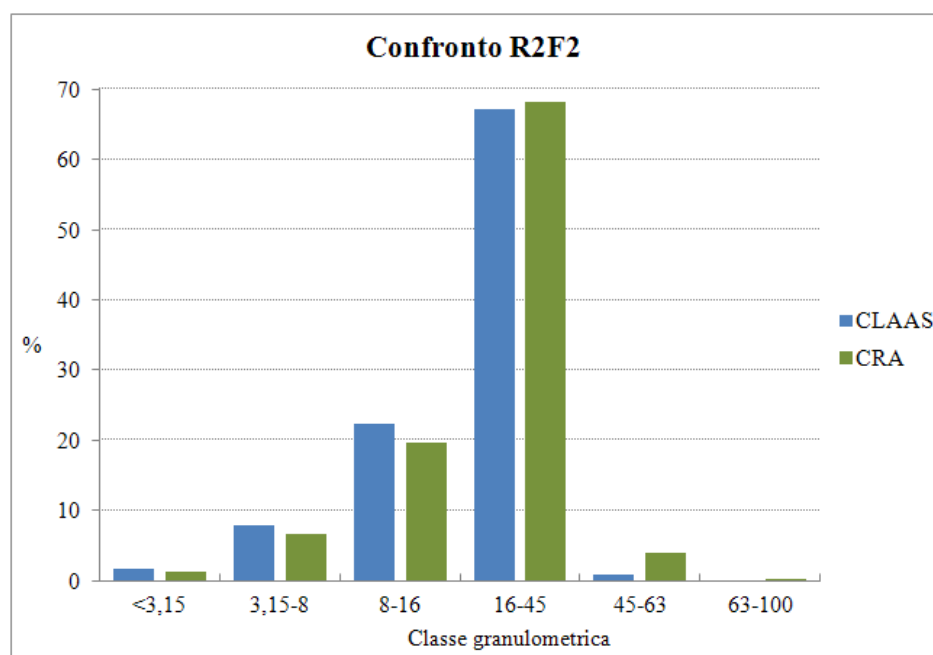


Figura 45: distribuzione dimensionale per impianti al primo ciclo di taglio

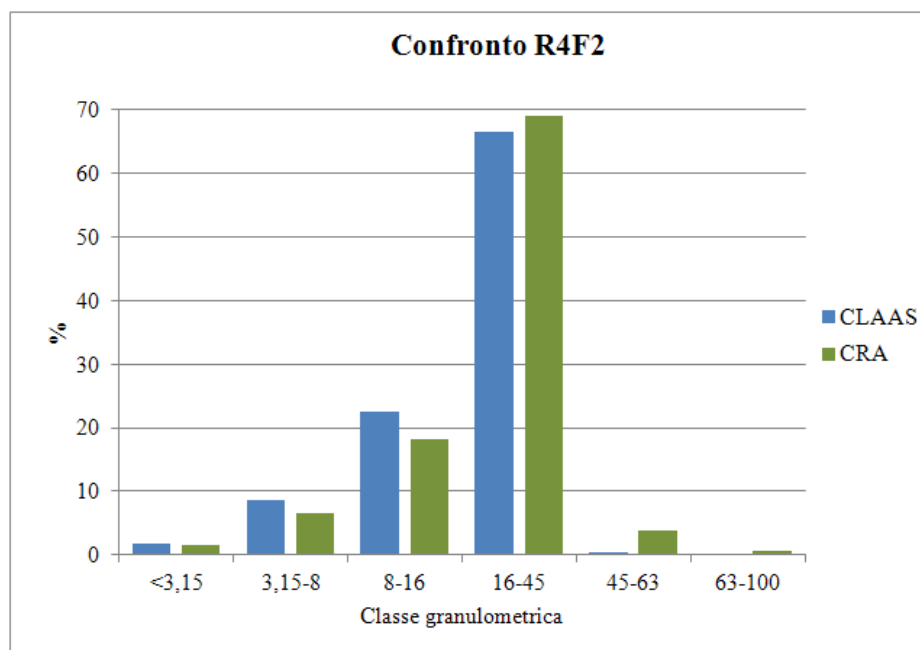


Figura 46: distribuzione dimensionale per impianti al secondo ciclo di taglio

Nella tabella 19 sono riportati i valori di umidità e densità apparente dei campioni prelevati nei cantieri 5-6-7-8. Dalla tabella è possibile notare come per entrambi i diversi cicli di taglio anche i valori della densità apparente facciano ipotizzare, a favore del rotore CRA, una maggiore uniformità di prodotto e scaglie di maggiori dimensioni.

Tabella 19 media della densità apparente e tenore idrico dei campioni dello sminuzzato prodotto dai due rotori

<i>Impianto</i>	<i>R2F2</i>		<i>R4F2</i>	
Contenuto di umidità	58.92	58,23	58,98	59.49
	±0.41	±0,36	±0,58	±1.12
Rotore	CLAAS	CRA	CLAAS	CRA
Massa volumica Apparente (Kg/m³)	286.7	277.9	289.5	279.7
	±4.7	±4.1	±3.4	±3.2

Per confermare le ipotesi fatte è stata condotta un'analisi dimensionale delle singole scaglie prodotte dai due rotori, per tale analisi sono state prese in considerazione le sole scaglie ricadenti nella classe granulometrica più rappresentativa (16-45 mm).

La prova è stata eseguita su un campione casuale di 100 scaglie (400 scaglie in tutto), ricadente all'interno della classe dimensionale rappresentativa. Le scaglie campione sono state dimensionate secondo le direzioni anatomiche del legno, per ogni direzione sono state effettuate 3 misurazioni rispettivamente individuate in pos.1), pos.2) e pos.3) per un totale di 9 misure per ogni singola scaglia (Figura 47).

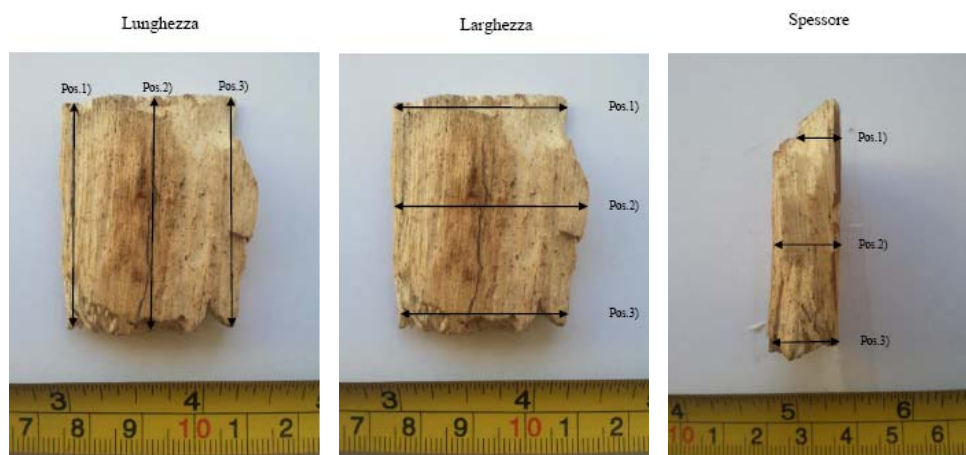


Figura 47: dimensioni della scaglia campione rilevate

L'analisi dimensionale ha evidenziato a favore del rotore modificato un incremento lungo la sola direzione longitudinale, mentre lungo le altre due direzioni non si sono verificati aumenti dimensionali, confermando i risultati ottenuti nelle prime prove comparative. Nella tabella 20 sono riportate le dimensioni medie delle scaglie prodotte dai due rotori suddivisi per diversa tipologia di impianto e per rotore utilizzato.

Tabella 20: analisi dimensionale

CRA-ING R2F2 16-45										
	Lunghezza (mm)			Larghezza (mm)			Spessore (mm)			Peso (gr)
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Media	36,03	38,77	33,52	21,75	21,89	16,03	15,48	16,74	11,05	2,83
Dev. Std	10,42	9,22	10,48	6,76	6,57	7,38	7,32	7,13	6,17	2,18
Massimo	68,03	62,13	56,12	39,16	37,20	32,86	32,46	31,91	30,35	9,20
Minimo	8,69	16,18	6,99	6,62	7,94	2,70	3,38	5,87	2,71	0,30
CLAAS R2F2 16-45										
Media	33,67	36,73	32,53	21,89	22,48	18,60	15,08	16,12	11,83	2,57
Dev. Std	9,45	7,78	8,44	7,50	7,26	8,08	6,63	6,38	6,55	1,92
Massimo	78,22	73,26	55,36	45,56	45,66	40,90	36,34	37,59	38,54	9,00
Minimo	3,69	22,47	13,81	6,29	10,10	4,40	4,32	6,11	2,93	0,30
CRA-ING R4F2 16-45										
Media	37,20	40,26	36,37	23,18	23,25	18,87	15,00	15,89	10,63	3,01
Dev. Std	8,40	7,47	9,81	6,97	6,67	7,16	5,75	5,79	5,34	1,95
Massimo	53,20	62,22	55,58	39,25	39,78	34,22	31,44	33,73	31,08	10,40
Minimo	16,68	16,49	9,13	4,91	6,84	6,14	2,16	4,89	3,22	0,30
CLAAS R4F2 16-45										
Media	33,48	35,29	32,30	24,28	24,31	20,24	14,98	15,75	11,63	2,59
Dev. Std	9,09	7,57	7,24	6,19	5,77	6,58	5,19	5,07	5,33	1,30
Massimo	108,33	91,44	69,22	38,54	37,50	36,57	29,00	35,71	32,07	7,10
Minimo	19,91	23,49	12,15	9,69	13,94	6,71	6,57	6,57	3,51	0,80

Oltre le dimensioni rilevate su ogni scaglia prodotta dai due rotori, è stato determinato anche il peso. Dalla tabella 21 si evince come in ambedue le tipologie di impianto la scaglia prodotta dal rotore CRA abbia subito un incremento in peso rispettivamente del +10,11% per il primo ciclo di taglio e del +16,21% per il secondo ciclo di taglio.

Tabella 21: peso delle scaglie prodotte dai due rotori

Rotore	R4F2			R2F2		
	Peso medio (g)	errore standard	$\Delta\%$	Peso medio (g)	errore standard	$\Delta\%$
Claas	2,59	0,13	+16,21	2,57	0,22	+10,11
	$\pm 1,30$			$\pm 1,92$		
CRA I	3,01	0,20		2,83	0,19	
	$\pm 1,95$			$\pm 2,18$		

In linea generale le prove condotte con il rotore modificato hanno evidenziato e confermato un generale miglioramento della pezzatura, ma anche la tendenza a concentrare gli incrementi dimensionali delle scaglie nella sola sezione longitudinale.

Alla luce di tali risultati si è tornati sull'idea progettuale iniziale è valutate le possibili modifiche da apportare, è stato sviluppato quindi un nuovo rotore al fine di superare le limitazioni dimensionali evidenziate, durante le prove, dal rotore di prima generazione CRA.

I risultati del rotore di seconda generazione

I risultati ottenuti dalle prove comparative tra il rotore di serie ed il rotore CRA, hanno fornito indicazioni utili per valutare le possibili cause del solo incremento longitudinale della scaglia, è quindi effettuare delle modifiche costruttive e sviluppare un nuovo dispositivo di taglio.

Le modifiche apportate al nuovo rotore hanno riguardato principalmente le caratteristiche dimensionali del rotore, la massa del tamburo, comprensiva dei portacoltelli e dei coltelli, è stata incrementata da 349 kg a 403 kg, al fine di aumentarne l'inerzia durante la sminuzzatura, con evidenti vantaggi in termini di assorbimenti di potenza (Tabella 22). Sono stati modificati anche l'inclinazione dei porta coltelli e l'angolo di taglio degli stessi coltelli.

Le modifiche apportate avevano lo scopo di superare le limitazioni dimensionali delle scaglie, in particolare nelle sezioni radiali e trasversali evidenziate dal rotore di prima generazione nelle precedenti prove.

Tabella 22: caratteristiche dimensionali rotore CRA II

Caratteristiche	Unità	Rotore	
		CRA II	CRA I
Peso rotore	Kg	403	349
Diametro rotore ⁱⁱ	mm	630	578
Lunghezza rotore	mm	720	701.5
Numero di portacoltelli	N.	10	10
Inclinazione portacoltelli	Gradi	15	30
Lunghezza portacoltelli	mm	340	320
Numero di coltelli	N.°	10	10
Angolo di taglio dei coltelli	Gradi	4	4.6
Lunghezza coltelli	mm	363	380

I risultati delle prove di sminuzzatura condotte con il rotore di seconda generazione (CRA II), sono stati confrontati con i risultati ottenuti dal dispositivo di taglio di prima

generazione ed il dispositivo di serie Claas. Al fine di verificare le eventuali differenze sulla base delle caratteristiche fisiche e qualitative

I campioni di sminuzzato prodotti dal rotore CRA II sono stati raccolti e trasportati in laboratorio durante una prova sperimentale svoltasi, nel Novembre del 2011, su un impianto di pioppo sito in provincia di Treviso. L'impianto si presentava al quarto anno di età e al secondo ciclo di taglio (R4F2),

Lo sminuzzato prodotto dal rotore di seconda generazione per il 92,76% ricade nelle classi dimensionali medie, rispettivamente per il 21,38% nella classe 8-16 mm e per il 71,38% nella classe 16-45 mm (Figura 48). La frazione delle classi dimensionali fini <3,15 e 8-16 mm invece è rappresentata per il 5,25%, mentre la frazione della classe 45-63 mm, pressoché assente invece la presenza di scaglie sopra misura con lo 0,22% del tutto assente la frazione delle impurità.

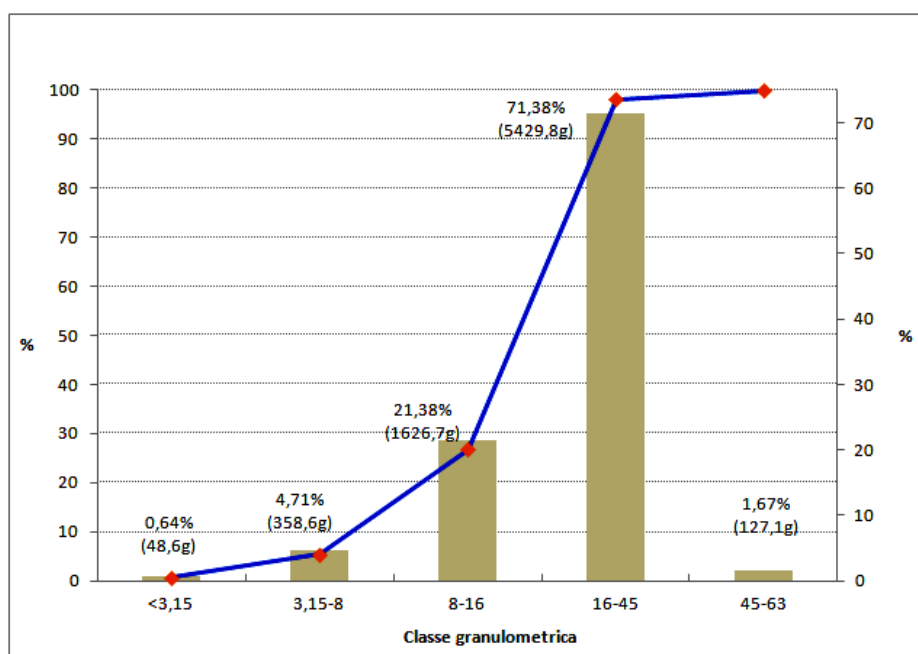


Figura 48: distribuzione dimensionale rotore CRA II

Analizzando i dati relativi ai tre rotori (Tabella 22) è possibile notare il progressivo miglioramento delle caratteristiche fisiche e qualitative dello sminuzzato ottenuto dai tre rotori. La massa volumica apparente indica come la progressiva omogeneità del prodotto

e maggiori dimensioni delle scaglie influenzino il grado di costipazione dello sminuzzato, passando da 289 kg mc⁻¹ per il rotore Claas, a 279 kg mc⁻¹ e 265 kg mc⁻¹ per i rotori CRA I e CRA II.

Tabella 22: le caratteristiche qualitative del legno sminuzzato prodotto dai tre rotori

Parametro	Rotore			
	Unità di misura	Claas	CRA I	CRA II
Massa volumica apparente	kg m ⁻³	289 ±3,4	279±3,2	265±13,3
Umidità	%	57,67	60,03	58,08
Distribuzione granulometrica				
>45 mm		0,54	4,45	1,67
16-45 mm		66,58	69,03	71,38
8-16 mm	%	22,51	18,26	21,38
8-3,15 mm		8,60	6,58	4,71
<3,15 mm		1,77	1,68	0,64

L'incremento di pezzatura viene confermato anche dall'analisi dimensionale effettuata sulle singole scaglie, analisi, quest'ultima, che ha permesso di evidenziare in maniera ancora più dettagliata gli effetti prodotti dal nuovo rotore rispetto, soprattutto, alla versione commerciale Claas (Figura 49).

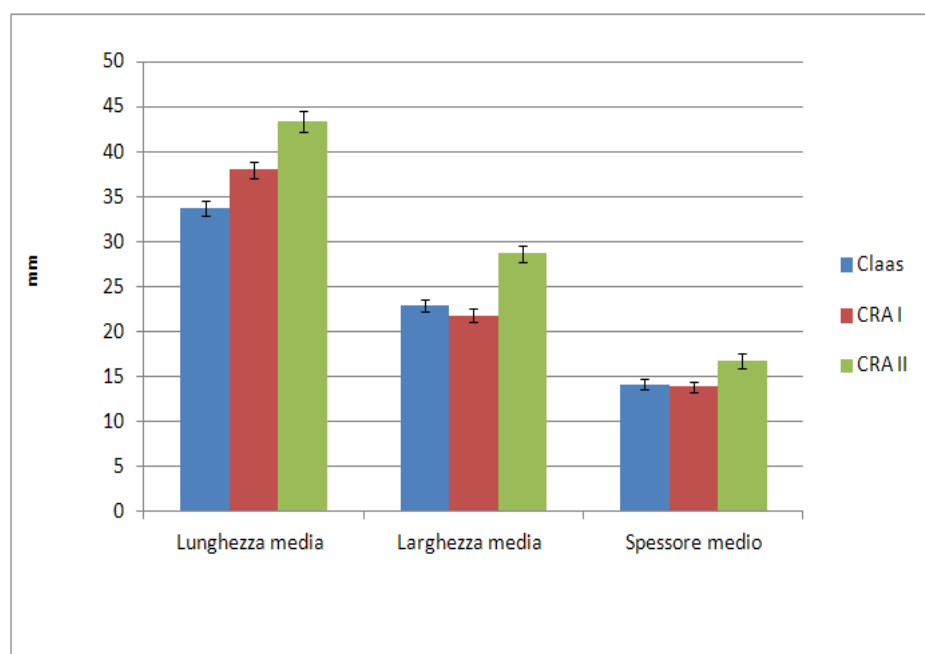


Figura 49: dimensioni medie delle scaglie prodotte dai tre rotori

I risultati raggiunti con il nuovo rotore da una prima analisi possono ritenersi positivi, lo sminuzzato ottenuto è contraddistinto da scaglie mediamente più lunghe, più larghe e più spesse, rispettivamente del 28,79%, del 24,76% e del 18,70% rispetto al rotore di serie.



Figura 50: le scaglie prodotte dal rotore di serie



Figura 51: le scaglie prodotte dal rotore CRA I

Nelle figure 50-51 e 52 viene evidenziata la qualità del prodotto ottenuto dai tre rotori a confronto è possibile notare come passando dal rotore di serie al rotore CRA II si sia raggiunta una migliore pezzatura ed una maggiore omogeneità dello sminuzzato.

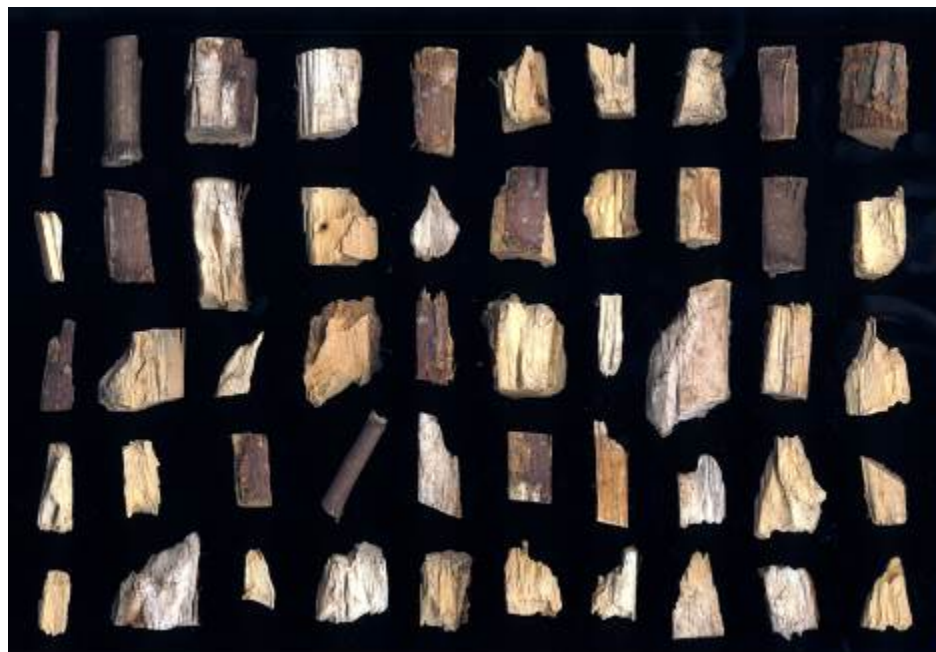


Figura 52: le scaglie prodotte dal rotore CRA II

Nella tabella 23 viene riassunto il peso medio delle scaglie prodotte dai tre rotori, si nota come passando dalla versione commerciale al rotore di seconda generazione il peso sia praticamente raddoppiato, facendo registrare un incremento in peso del +111,20% ovvero si è passati da un peso medio di 2,59 g a 5,47 g.

Tabella 23: Peso medio delle scaglie di sminuzzato della classe 16-45 mm prodotte dai tre rotori

<i>Rotore</i>	<i>Peso medio (g)</i>	<i>errore standard</i>	<i>Δ%</i>
Claas	2,59	0,13	—
CRA I	3,01	0,20	+16,21
CRA II	5,47	0,36	+111,20

Il volume calcolato dalle dimensioni medie rilevate su ogni singola scaglia, (Figura 49) ha evidenziato come sia raddoppiato a favore del rotore di seconda generazione rispetto al

rotore di serie ed al rotore di prima generazione. Mettendo, ancora una volta, in risalto gli effetti prodotti dal rotore di seconda generazione sulla pezzatura dello sminuzzato, migliorando le caratteristiche fisiche e merceologiche

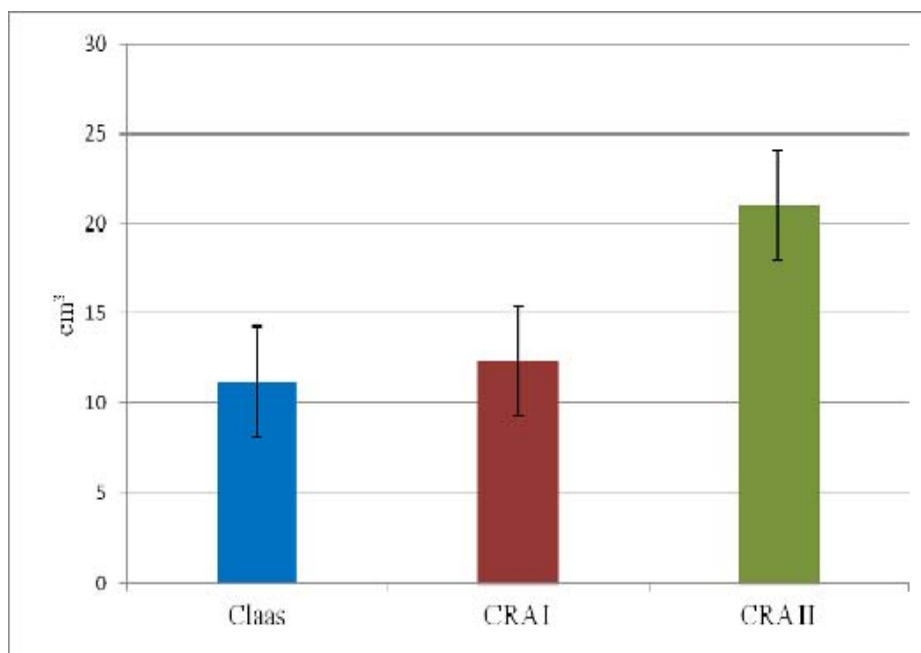


Figura 49: volume calcolato delle scaglie

Considerata l'irregolarità geometrica delle scaglie, il volume calcolato con le dimensioni medie delle scaglie forniva dei valori tendenzialmente sovradimensionati e quindi non veritieri. Per poter stabilire l'effettivo incremento volumetrico apportato dal rotore di seconda generazione rispetto al rotore di prima generazione si è usato il metodo dello xilometro. In questo caso sono state confrontate le sole scaglie prodotte dai due rotor CRA.

Tabella 24: volume delle scaglie misurate con lo xilometro

<i>Rotore</i>	<i>Volume Xilometrico (cm³)</i>	<i>Δ%</i>
CRA I	8,18 ±4,56	+26
CRA II	11,07 ±7,06	

Dalla tabella 24 si evidenzia come il metodo dello xilometro abbia fornito un volume diverso rispetto al volume calcolato in un primo momento, sottolineando comunque un incremento volumetrico a favore del rotore di seconda generazione del 26%. I risultati ottenuti con il rotore di seconda generazione ci indicano che lo sminuzzato prodotto sia contraddistinto da caratteristiche fisiche e merceologiche elevate. Caratteristiche fondamentali per la fase di stoccaggio del prodotto e la successiva termovalorizzazione.

Le scelte tecniche effettuate, variazione dei parametri dimensionali del tamburo, diversa inclinazione dei portacoltelli e variazione dell'angolo di taglio, hanno permesso quindi di superare in una certa misura le limitazioni dimensionali delle scaglie prodotte dal rotore di serie, favorendo l'incremento dei parametri dimensionali della singola scaglia, e ottenere così dello sminuzzato di buona qualità anche impiegando le normali falciatrinciacaricatrici da foraggio.

CONCLUSIONI

In questi ultimi anni la richiesta di combustibili legnosi: legna da ardere, sminuzzato, pellet e briquettes è aumentata, grazie alla messa in commercio di impianti per il riscaldamento, o cogenerazione, di diversa dimensione capaci di valorizzare questa risorsa con un'efficienza molto maggiore rispetto al passato.

Tra i diversi combustibili legnosi ben si inserisce il legno sminuzzato, un combustibile ecologico ed allo stesso tempo una fonte di energia rinnovabile. Ottimo dal punto di vista economico, permettendo il recupero di materiale legnoso originato da residui di lavorazione ad un prezzo molto contenuto e accessibile.

Lo studio condotto ha approfondito alcuni aspetti riguardanti gli standard qualitativi del legno sminuzzato. Tali standard ricoprono infatti un ruolo determinante ai fini commerciali, specificandone la resa energetica, la conservabilità e il tipo di impianto in grado di utilizzarlo. Inoltre la qualità gioca un ruolo determinante da un punto di vista economico essendo decisiva nella formazione del prezzo da attribuire allo sminuzzato.

Quanto sopra è ben chiarito dalla UNI EN 14961-1, la norma in generale: spiega come classificare la biomassa usata per scopi energetici ed elenca le principali forme commerciali di biocombustibili solidi, dandone una prima classificazione in base alle modalità di produzione (per esempio: pianta intera, sminuzzato, tronchetti, fascine, polvere, pellet, trucioli, paglia, gusci).

Nello studio si è dato particolare risalto allo sminuzzato di pioppo proveniente da impianti di Short Rotation Forestry, evidenziandone le caratteristiche fisiche e merceologiche, aspetti ritenuti essenziali per la successiva termovalorizzazione.

Tra le caratteristiche fisiche richieste per il legno sminuzzato, la pezzatura riveste un ruolo di assoluta importanza sia per la conservabilità del prodotto e sia per la successiva conversione energetica. Il più delle volte infatti il prodotto presenta caratteristiche dimensionali molto contenute e ben al di sotto dei valori richiesti dagli impianti di trasformazione.

È stato visto come le dimensioni fisiche delle scaglie costituiscano un parametro di qualità, nella classificazione dei biocombustibili solidi, inoltre le dimensioni e la forma influenzano le modalità d'impiego e le proprietà di combustione. Di fatto, la conversione d'energia e le emissioni sono influenzate anche dalle dimensioni delle scaglie. Inoltre una calibratura uniforme del materiale garantisce il regolare funzionamento dei sistemi di alimentazione delle caldaie.

Nello studio condotto la distribuzione dimensionale delle scaglie è stata messa in relazione anche con la specie legnosa utilizzata, le indicazioni avute dai risultati dimostrano come la possibile influenza della specie venga sovrastata dall'organo di taglio utilizzato e dalle regolazioni effettuate sul dispositivo di taglio.

Tra le innovazioni tecniche per superare i limiti dimensionali dello sminuzzato, operando in particolare sugli aspetti tecnici relativi alla meccanizzazione oggi disponibile sul mercato, e sviluppando una serie di innovazioni tecnologiche in grado di migliorare uno o più aspetti legati alla filiera agro energetica. La ricerca ha sviluppato un nuovo dispositivo di taglio da poter installare sulle macchine operatrici, e cercare di rispondere così alle richieste di una pezzatura più grande delle scaglie di sminuzzato, e ottenere un prodotto qualitativamente migliore.

Il rotore sviluppato, in linea generale, è risultato in grado di produrre scaglie di maggiori dimensioni rispetto al dispositivo di trinciatura di serie.

Consentendo inoltre di ottenere indipendentemente dalla specie impiegata, un prodotto con caratteristiche più omogenee, caratterizzato da una minore percentuale di materiale di dimensioni fini e da una maggiore percentuale di materiale ricadente nelle classi medie.

Sottolineando come una buona distribuzione dimensionale dello sminuzzato venga riconosciuta come uno dei parametri più importanti per garantire un'efficiente combustione, influenzando oltre a ciò il buon andamento dello stoccaggio, l'efficienza della conversione energetica e le emissioni ambientali.

Riferimenti normativi

- UNI EN 14961-1:2010 “Biocombustibili solidi–Specifiche e classificazione del combustibile” Parte 1: Requisiti generali.
- UNI EN 14774-2:2010 Biocombustibili solidi–Determinazione dell’umidità, Metodo di essiccazione in stufa–Parte 2: Umidità totale–Metodo semplificato
- UNI EN 15103:2010 Biocombustibili solidi–Determinazione della massa volumica apparente
- UNI CEN/TS 15149-1:2006 Biocombustibili solidi–Metodi per la determinazione della distribuzione granulometrica Parte 1: Metodo del vaglio oscillante con apertura maggiore o uguale a 3,15 mm

BIBLIOGRAFIA

1. AA.VV., 1997a–Libro Bianco per una strategia e un piano d’azione della comunità. Commissione Europea «Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili».
2. AA.VV., 1997b–Progetto U.E. Saving optimizing renewable traditional energy. ARSIA, Regione Toscana.
3. AA.VV., 2003–Come produrre energia dal legno. quaderno ARSIA 3/2003
4. AA.VV., 2004–Gestione e valorizzazione delle ceneri di combustione nelle filiera Legno-Energia. Relazione tecnica conclusiva Progetto BIOCEN.
5. AA.VV., 2009–Unità di misura. In: Manuale Pratico Legna e Cippato-Produzione, Requisiti qualitativi, Compravendita. Biomass Trade Centres, ed. AIEL.
6. AA.VV., 2011–Rassegna Tecnologica. POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Energetica Progetto “renerfor”.
7. Abdallah R., Auchet S., Méausoone P.J., 2011–Experimental study about the effects of disc chipper setting on the distribution of wood chip size. Biomass & bioenergy 35: 843-852.
8. Alakangas E., 2005a–Properties of wood fuels used in Finland. BIOSOUTH, Project Report. Technical Research Centre of Finland.
9. Alakangas E., 2005b–Properties of wood fuels used in Finland – BIOSOUTH – project. VTT Processes, Project report PRO2/ P2030/05 (Project C5SU00800). Jyväskylä : Technical Research Centre of Finland; p. 90 + app. p. 10.
10. Baldini S., 1986–Meccanizzazione sulle sminuzzatrici o cippatrici. Acer 4: 25-30.
11. Berti S., 2007–Le biomasse legnose: Il Legno. In: Atti del 43° corso, Biomasse forestali ad uso energetico in ambiente alpino: Potenzialità e limiti. Università degli Studi di Padova.
12. Bidini M., 2008–Cippatrici. Tecnico e pratico n° 41, Febbraio.
13. Bisoffi S., Facciotto G., 2000–I cedui a turno breve (SRF). Atti del convegno “ La produzione di legno a fini energetici nei boschi e nei campi”. Sherwood 59: 21-23.
14. Brand M.A., Bolzon de Múniz C.I., Ferreira Quirino W., Brito J.O.,–2011 Storage as a tool to improve wood fuel quality. Biomass and Bioenergy 35, 2531-2588

-
15. Buchanan JG, Duchinicki TS., 1963–Some experiments in low speed chipping. *Pulp & Paper Magazine Canada* May: T235-45.
 16. Buresti Lattes E., Mori P., 2005 – Glossario dei termini più comuni impiegati in arboricoltura da legno. Seconda parte. *Sherwood* 110, pp. 5-10.
 17. Canesin C., 2009-2010–“La Short Rotation Forestry in Nord Italia. Limiti e potenzialità del suo impiego sotto differenti scenari: produzione di biomassa e prove di fertilizzazione”. Università degli Studi di Padova Scuola di Dottorato di Ricerca in “Territorio, ambiente, risorse e salute”; indirizzo: ECOLOGIA Ciclo XXII.
 18. Carraro V., Grigolato S., 2007–Atti del 43° corso, Biomasse forestali ad uso energetico in ambiente alpino: potenzialità e limiti. Università degli studi di Padova dip.to Territorio e Sistemi Agro-Forestali.
 19. Cavalaglio G., Cotana S., Barbanera M., Giraldi D., 2007–Valorizzazione energetica degli scarti di potatura dei vigneti. 7° Congresso Nazionale CIRIAF-Perugia
 20. Cavalli R., Emer B., Grigolato S., 2007–Wood biomass boiler and heating plants in North-eastern Italy: wich strategy to boost a sustainable local supply chain? In 15 th European biomass Conference and Exhibition from Research to market deployment. Berlino 7-11 Maggio 2007. Firenze:Eta Florence.
 21. Cavalli R., 2008–Linee evolutive nel settore delle utilizzazioni forestali e dell’approvvigionamento del legname. *L’Italia Forestale e Montana*. 64(4): 297-306
 22. Cavalli R., Grigolato S., Sgarbossa A., Francescato V., Negrin M., 2011–Qualità del cippato. I nuovi standard UNI EN e la loro applicazione nel settore forestale. *Sherwood* 179: 37-41.
 23. Ciccarese L., Spezzati E., Pettenella D., 2003–Le biomasse legnose. Un indagine sulle potenzialità del settore forestale Italiano nell’offerta di fonti di energia. Rapporti 30/2003. APAT-Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi tecnici.
 24. Comitato Termotecnico Italiano, Energia e Ambiente, 2003–Biocombustibili specifiche e classificazione, raccomandazione CTI elaborata dal SC 9 “Fonti rinnovabili di energia”.
 25. Cotana F., Cavalaglio G., 2008–Impianto pilota per la conversione energetica degli scarti di potatura dei vigneti. Atti 8° congresso Nazionale CIRIAF, Perugia 4-5 Aprile.

-
26. Decreto Legislativo 3 marzo 2011, n. 28 Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
 27. Drigo R., Chirici G., Lassere B., Marchetti M., 2007–Analisi su base geografica della domanda e dell’offerta di combustibili legnosi in Italia. *Italia Forestale e Montana*, anno LXII n° 5-6.
 28. Edelma JS, Stuart WB.,–1992Effect of disk speed on sawmill residue wood chip quality. In: *Proceeding of TAPPI pulping conference*;. p. 375-380. Boston, MA, USA.
 29. Emer B., Grigolato S., Lubello D., Cavalli R., 2011–Comparison of biomass feedstock supply and demand in Northeast Italy. *Biomass & Bioenergy* 35(8): 3309-3317
 30. Facciotto G., Giorcelli A, Vietto L. Allegro G, Castro G. Picco F., (2006)–Nuovi cloni di pioppo. *Inserto Agricoltura* n°71.
 31. Facciotto G., Mughini G., 2003 – Modelli colturali e produttività della selvicoltura da biomassa. *L’Informatore Agrario*, 10: 95-98.
 32. Fiorese G., 2007–Biomasse per l’energia: aspetti ecologici, energetici ed economici. *Corso di Dottorato di Ricerca in Ecologia XX ciclo*, Università degli Studi di Parma.
 33. *Foresta-Legno-Energia*, 2007–Linee guida per lo sviluppo di un modello di utilizzo del cippato forestale a fini energetici. cap. 3: 68-100.
 34. Francescato V., 2002–Bosco legno-energia. Il bosco giacimento di energia termica. *L’emporio di Sherwood, Speciale Bosco e Territorio*, *Supplemento di Sherwood* 8(7):5-9
 35. Francescato V., 2009–Moderne tecnologie per la produzione di energia termica dei combustibili legnosi. In: *La filiera Legno-Energia: Risultati del progetto interregionale Woodland Energy*, pp. 97-105.
 36. Francescato V., Antonini E., 2004–Legno-Energia, quando l’agricoltura è protagonista. *Alberi e Territorio* 1(3): 38-44.
 37. Francescato V., Antonini E., 2009–Contenuto energetico del legno. In: *Manuale Pratico Legna e Cippato-Produzione, Requisiti qualitativi, Compravendita*. Biomass Trade Centres, ed. AIEL.
 38. Franz N., 1958–An analysis of the wood cutting process [Phd thesis]. Ann Arbor: University of Michigan;.

-
39. Giordano G., 1981–Tecnologia del legno. Vol. 1., La materia prima. Ed. UTET, Torino: 1256 pp.
40. Goli G., Rémi M., Uzielli L., 2004–Superfici e loro formazione. Xylon-Aprile pp. 68-72.
41. Grigolato S., Hellrigl B., 2009–Legno da energia. Prezzi e indici in Austria e Italia. Sherwood 152: 13-18
42. Guilley E. Nepveu G. 2003–Interpretation anatomique des composantes d'un modele mixte de densité du bois chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl): âge du cerne compte depuis la moelle, largeur de cerne, arbre, variabilité interannuelle et duraminisation. *Annals of Forest Science*, May-June, vol. 60, N° 4.
43. Hakkila P., 1989–Utilization of residual forest biomass. Editions Springer Berlin 568 p.
44. Hartler N.,–1986 Achievement and significance of optimal chip quality. *TAPPI J* 79(2):259-264.
45. Hartmann H., Böhm T., Bock m., 2001–Measuring size distribution and bulk density of wood chips.–Munich University of Technology, Center of Agricultural Engineering, Germany-Grey.
46. Hartmann H., Böhm T., Jensen PD., Temmerman M., Rabier F., Golser M., 2006–Methods for size classification of wood chips. *Biomass & Bioenergy* 30: 944-953.
47. Hellrigl B., 2001–La pezzatura del legno combustibile. Speciale “Bosco e Territorio” 2002.
48. Hellrigl B., 2004–Convegno di Studio “Le biomasse agricole e forestali nello scenario energetico nazionale” Progetto Fuoco, Verona 18-19 Marzo.
49. Hellström L., 2010–On the wood chipping process-a study on basic mechanism in order to optimize chip properties for pulping. Department of Natural Sciences, Engineering and Mathematics Mid Sweden University, Doctoral thesis.
50. Hernandez R, Jacques B., 1997–Effect of the rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by chipper-canter. *For Prod J*;47(4):43-49.
51. ITABIA, 2002–Contributo delle biomasse alla tutela del territorio. Roma: Maggio 2002

-
52. Jensen P.D., Mattsson J.E., Koffman P.D., Klauser A., 2004–Tendency of wood fuels trees, logging residues and round wood to bridge over opening. *Biomass and Bioenergy* 26: 107-113.
53. Jonas A., Haneder H., 2001.–Energie aus Holz. Niederösterreichische Landeslandwirtschaftskammer, St. Pölten.
54. Kivimaa E., Murto J.O., 1949–Investigation on factors affecting chipping of pulp wood; Statens Tekniska Forskningsanstalt, Finland Publ. 9.
55. Kofman P., 2006–Quality wood chip fuel. Harvesting/Transportation No. 6. Coford Connects.
56. Magagnotti N., 2012–Analisi dei cantieri di cippatura in merito ad aspetti operative e di salvaguardia degli operatori. Dottorato di ricerca in Ingegneria Agraria ciclo XXIV, Alma Mater Studiorum-Università di Bologna.
57. Martin K., Weber M., 2006–Markets for solid biofuels within the EU-15. *Biomass & Bioenergy* 30: 897-907
58. Mazzei T., 2009–La filiera Legno-Energia. In: La filiera Legno-Energia. In: La filiera Legno-Energia: Risultati del progetto interregionale Woodland Energy, pp. 17-23.
59. McKenzie WM, Karpovich H., 1968–The Frictional behaviour of wood. *Wood Science & Technology* 2:139-52.
60. McLauchlan TA, Lapointe JA., 1979–Production of chips by disc chippers. In: Hatton JV, editor. chips quality monograph. Pulp and paper technology Series. Atlanta: TAPPI; pp. 15-32.
61. Minotta M., Muzzi E., 2007–Indagini sui cedui di pino a turno breve nella pianura Ferrarese. *L'Italia Forestale e Montana*, 5/6: 411-419.
62. Mitchell C. P., Kofman P. D., Angus-Hankin C.M., 1997–Guidelines for conducting harvesting trials in short rotation forestry. Aberdeen University, Forestry research paper, 1: 1-50.
63. Monico JA, Soule HM. 1979–A machine to harvest and chip brush stands. Presented at the 1979 Winter Meeting. New Orleans LA: American Society of Agricultural Engineers; Dec 11e14. Paper No. 79e1595.
64. Nardi Berti R., 1994–La struttura anatomica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego. *Contributi Scientifico-Pratici per una*

migliore conoscenza ed utilizzazione del legno. Consiglio nazionale delle ricerche, Istituto per la ricerca sul legno, Firenze.

65. Nati C., Spinelli R., Fabbri P., 2008–Classificazione merceologica del cippato. Effetti dell'usura delle lame. *Sherwood* 148: 31-35.
66. Nati C., Spinelli R., Fabbri P., 2010–Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass & bioenergy* 34: 583-587.
67. Neri F., 2007–Indagine sull'impiego delle macchine cippatrici, analisi dei tempi di lavoro, produttività e costi di trasformazione in tre cantieri di utilizzazioni integrale della biomassa nella regione Toscana. Tesi di dottorato in Economia, Pianificazione Forestale e Scienze del Legno. Università degli studi di Firenze.
68. Negrin M., 2009–Produttività, costi e qualità nell'approvvigionamento di cippato ad uso energetico. Un'indagine su dieci cantieri della Magnifica Comunità di Fiemme. Università degli Studi di Padova-Tesi di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali.
69. Nellist M., 1995–The effect of particle size on the storage and drying of wood fuels. In: Hudson B., Kofman P. Ed. *Harvesting storage and road transportation of logging residues. Proceedings of a workshop of IEA-BA-Task XII activity 1.2 held in October 1995 Glasgow, Scotland. FSL, Vejle (Denmark): 59-70.*
70. Nord-Larsen T., Bergstedt A., Faver O., Heding N., 2011–Drying of firewood –the effect of harvesting time, tree species and shelter of stacked wood. *Biomass and Bioenergy* 35, 2993-2998.
71. Nystrom J., Dahlquist E., 2003–Methods for determination of moisture content in wood chip for power plant–a review. *Fuel* 83 (7-8): 779-779.
72. Nurmi J., 1999 –The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy* 17, 41-47.
73. Pari L., Fedrizzi M., Ciriello A. 2008–La migliore qualità del cippato si ottiene dal cumulo coperto. *L'Informatore Agrario*, n° 39: 52-55.
74. Pari L., Civitarese V., Del Giudice A., 2009a–Claas Jaguar 890 e 860 prove di raccolta su pioppo.. *Supplemento al n°29 de L'Informatore Agrario* pag: 31-33.
75. Pari L., Civitarese V., Del Giudice A., Giannini E., 2009b–Un nuovo Rotore per la CLAAS JAGUAR 890. *Supplemento al n°29 de L'Informatore Agrario* pag: 41-43.
76. Pari L., Civitarese V., Del Giudice A., 2010–Rotore sperimentale CRA-ING. Qualità del cippato prodotto da CLAAS JAGUAR con cippatore innovativo. *Supplemento n°2 a Sherwood* 168: pp. 19-21.

-
77. Pari L., Civitarese V., Del Giudice A., Barontini M., 2013–Miglioramento della pezzatura del cippato. Rotore CRA-IMG di seconda generazione per Claas Jaguar. Supplemento n°2 a Sherwood-Foreste ed alberi oggi n°192, anno 19 n°3 Aprile-ISSN 1590-7805.
78. Paulrud S., Nilsson C., 2004. The effects of particle characteristics on emissions from burning wood fuel powder. *Fuel* 83:813–21.
79. Picchio R., Spina R., Sirna A., 2012–Sminuzzatrici o cippatrici fra tecnica e innovazione. *Terra e Vita* n° 43.
80. Pignatelli V., Robertiello A., 2007–Biomasse per un’energia rinnovabile. In: *Enciclopedia degli idrocarburi vol. III, Nuovi sviluppi: Energia, Trasporti, Sostenibilità* pp.611-630.
81. Pouët JC., 2007–Mise en place d’une chaufferie au bois. EDP Sciences ADEME edition.
82. Recchia L., 2005–Utilizzo di biomassa ligneo-cellulosica. Quale biocombustibile: aspetti organizzativi, energetici e ambientali. Corso di dottorato di Ricerca in Ingegneria Agro-Forestale (XVIII CICLO), Università degli Studi di Firenze.
83. Richardson J. et al., 2002–Bioenergy from sustainable forestry. Guiding principle and practice, Dordrecht-Boston, Kluwer Academic.
84. Secknus M., 2007–Disponibilità della biomassa, mercati e ruolo delle associazioni. In: *Foresta, Legno, Energia. Linee guida per lo sviluppo di un modello di utilizzo del cippato forestale a fini energetici.* pp. 44-67 Ed. Press Service Firenze.
85. Spinelli R., 1995–Le cippatrici ed i frantumatori nelle utilizzazioni forestali. *Macchine e motori agricoli* 1-2: 40-45.
86. Spinelli R., Verani S., 2000–La raccolta del legno per uso energetico industriale. Atti del convegno “ La produzione di legno a fini energetici nei boschi e nei campi”. *Sherwood* 59: 43-48.
87. Spinelli R., Hartsough B., 2001–Indagine sulla cippatura in Italia. Contributi scientifico-pratici, XLI, Firenze, pp. 112.
88. Spinelli R., Nati C., Magagnotti N., 2003–Raccolta di legno cippato dalle giovani peccete artificiali del Feltrino. Associazione Montegrappa – Feltre, Belluno pp. 26.

-
89. Spinelli R., Hartsough B., Magagnotti N., 2004a– La pezzatura del cippato: Cippatrici a confronto. Convegno di Studio: “Le biomasse agricole e forestali nello scenario energetico nazionale” Progetto Fuoco 2004, Verona (18-19 marzo 2004).
 90. Spinelli R., Hartsough B., Magagnotti N., 2004b–Qualità del cippato. Confronto tra nove cippatrici mobili in commercio in Italia. *Sherwood* 99: 13-18.
 91. Spinelli R., Magagnotti N., 2005–L’utilizzo di macchine cippatrici per il trattamento del materiale legnoso. *Mondo macchina* 5-6: 56-63.
 92. Spinelli R., Secknus M., 2005–Restituire competitività alla biomassa forestale. *Alberi e Territorio* 12.
 93. Spinelli R., Hartsough B., Magagnotti N., 2005–Testing mobile chippers for chip size distribution. *International Journal of Forest Engineering*;16:29–36.
 94. Spinelli R., Magagnotti N., 2007a–Il cippato forestale. In: *Foresta, Legno, Energia. Linee guida per lo sviluppo di un modello di utilizzo del cippato forestale a fini energetici*. pp. 69-103 Ed. Press Service Firenze.
 95. Spinelli R., Magagnotti N., 2007b–La produzione di biomassa legnosa nella selvicoltura alpina: quantità, sistemi di raccolta, costi. *Italia Forestale Montana* 5-6: 421-435.
 96. Spinelli R., 2007c–Cippatrici a disco, come regolare la pezzatura delle scaglie. *Tecnico e pratico* n° 34, Maggio.
 97. Spinelli R., 2008–CIPPATO: La raccolta della materia prima. *Mondo Macchina* 2: 56-59.
 98. Spinelli R., Nati C., Pari L., Mescalchin E., Magagnotti N., 2012–Production and quality of biomass fuels from mechanized collection and processing of Vineyard pruning residues. *Applied Energy* ;89:374-79.
 99. Streheler A., 1988–Biomass combustion technologies, FAO/ENEA.
 100. Suadicane K., Gamborg C., 1999–Fuel quality of whole-tree chips from freshly felled and summer dried Norway spruce on a poor sandy soil and a rich loamy soil. *Biomass and Bioenergy* 17:199-208.
 101. Thornqvist T., 1984–Hyggerester som råvaror för energiproduktion–torkning lagring, hanterin och kvalitet (Logging residues as a feedstock for energy production–Drying, storing, handling and grading). SLU, Inst. För virkeslära, Rapport 152, Uppsala.

-
102. Twaddle A., 1997–The influence of species, chip length, and ring orientation on chip thickness. TAPPI J 80(6): 123-31.
 103. Uhmeier A., 1995–Some fundamental aspects of wood chipping. TAPPI J;78(10):79-86.
 104. Vesterinen P., 2003–Rapporto di Ricerca PRO 2/6107/03 “Wood ash re cycling- State of the Art in Finland and Sweeden”. Progetto BIOECN.
 105. Wihersaari M., 2005–Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue. Biomass and Bioenergy 28, 444-453.
 106. Wu M.R., Schott D.L., Lodewijks G., 2011–Physical properties of solid biomass. Biomass & bioenergy 35: 2093-2105.
 107. Wyeth D.J., Goli G., Atkins A.G., 2009–Fracture toughness, chip types and the mechanics of cutting wood. Holzforschung 63: 168-180.
 108. Zanuttini R., Castro G., Berti S., 1998–XILOGLOS-Glossario multilingue dei termini usati in tecnologia del legno. Contributi scientifico-pratici per una migliore conoscenza ed utilizzazione del legno. C.N.R.-I.R.L., Firenze: pp. 258.