

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AGRICOLTURA, LE FORESTE, LA
NATURA E L'ENERGIA (DAFNE)**

Corso di Dottorato di Ricerca in

Scienze e tecnologie per la gestione forestale e ambientale – XXV Ciclo.

**CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DI ALCUNE BIOMASSE VEGETALI REPERIBILI IN
ITALIA**

s.s.d. AGR/06

Tesi di dottorato di:

Dott.ssa Serena Blasi

Coordinatore del corso

Prof. Rosanna Bellarosa

Firma

.....

Tutore

Dott. Rodolfo Picchio

Firma

Co-tutore

Dott. Alessandro Sirna

Firma.....

**Data della discussione
27 maggio 2013**

Summary

Energy characterization of same plant biomass available in Italy

This work has the purpose to analyze some physical and energetic parameters of woodchip from woody material of different types of tree species for the biomass production used in the different technological processes for energy conversion.

The characteristics examined are: component breakdown, particlesize distribution, bulk density, high heating value, ash content and content on Carbon (C), Nitrogen (N) Hydrogen (H). Those parameters influence the energetic quality and the economical convenience of the woody biomass.

The research was extended to several species, different cultivation systems and dedicated plantations for woody biomass production, they are an excellent source of low-cost material. The energetic characterization has been realized for biomass from Short Rotation Coppice (SRC) of different poplar clones, from whole plants and residual biomass from forest utilization and pruning residues. The poplar clones (*Populus* spp.) from Short Rotation Coppice (SRC) analyzed are AF2, AF6, Monviso, Limavady and Muur. Whole plants from first thinning operations are *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller, *Picea abies* and *Pinus pinaster* Miller L, the forest utilization material from *Quercus* spp. and *Fagus sylvatica* and the residual biomass from orange pruning residues.

After having realized those analysis, it's possible to say that wood chips size has a fundamental role for the product's shelf and for the subsequent conversion efficiency.

Keywords: biomass, energy characterization, chips, bulk density, calorific value.

Riassunto

Caratterizzazione energetica di alcune biomasse vegetali reperibili in Italia

Il presente lavoro ha avuto lo scopo di analizzare alcuni parametri relativi ad analisi fisico-energetiche di materiale legnoso proveniente da diverse tipologie di specie arboree idonee alla produzione di biomassa utilizzabile nei diversi processi tecnologici di conversione energetica. Le caratteristiche esaminate sono state la composizione macroscopica, distribuzione granulometrica, densità bulk (db), potere calorifico, contenuto in ceneri ed analisi ultima, parametri che influenzano enormemente la qualità e la convenienza economica delle scelte di utilizzo della biomassa.

Le ricerche sono state estese a diverse specie, diversi sistemi di coltivazione e piantagioni dedicate alla produzione di biomassa legnosa in quanto sono un'ottima fonte di approvvigionamento di materiale a basso costo, anche se in alcuni casi con caratteristiche energetiche non ottimali.

La caratterizzazione energetica è stata condotta su biomasse ligno-cellulosiche di specie provenienti da Short Rotation Forestry (SFR) di diverse cloni di pioppo, da piante intere e materiale ritratto da interventi di utilizzazioni forestali e da biomasse residuali ottenute da scarti di potature. I cloni di pioppo (*Populus* spp.) analizzati provenienti da Short Rotation Coppice (SRC) sono 5, il clone AF2, AF6, Monviso, Limatola e Muur. Le piante intere provenienti da operazioni di primo diradamento sottoposte alla sminuzzatura appartengono alle specie di *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller, *Pinus pinaster* Miller e *Picea abies* L, mentre il materiale ritratto da interventi di utilizzazioni forestali è stato ottenuto da *Quercus* spp. and *Fagus sylvatica* L.. Nel caso delle biomasse residuali provenienti dagli scarti di potature si sono prese in esame quelle ottenute da agrumeti.

A seguito delle analisi effettuate è risultato che la pezzatura riveste un ruolo di assoluta importanza sia per la conservabilità del prodotto e sia per la successiva conversione energetica.

Parole chiave: biomassa, caratterizzazione energetica, sminuzzato, bulk density, potere calorifico.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare calorosamente il *Dr. Rodolfo Picchio* che mi ha accompagnato nel percorso di studi e di ricerca dimostrando sempre una grande disponibilità e amicizia nell'aiutarmi a sviluppare il progetto di tesi.

Inoltre ringrazio in particolare modo il *Dr Alessandro Sirna* che è sempre stato disponibile ad aiutarmi per la raccolta dei dati e per la stesura di questo lavoro e non solo, ma anche per avermi supportata nei momenti più difficili di questi anni.

Un sentito e affettuoso ringraziamento alla *Prof.ssa Angela Lo Monaco* e un caro ringraziamento ai miei colleghi dottorandi *Dr Luca Calienno* e *Dr Raffaello Spina* con cui ho condiviso molte pause caffè e tutto il periodo del mio dottorato di ricerca.

Per ultima, ma di certo non per importanza, ringrazio la mia famiglia, in particolar modo *mia madre*.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 - Situazione energetica e politiche di riferimento	1
1.2 – Aspetti economici, tecnici e sociali legati alle biomasse legnose	2
1.3 - La biomassa	9
1.4 - Le biomasse legnose.....	14
1.5 - I combustibili legnosi	17
1.5.1- Legna da ardere	19
1.5.2 - Sminuzzato/Cippato	20
1.5.3 - Pellet	22
1.5.4 – Bricchette	24
1.6 – Quale scegliere e perché	25
1.7 - Come ottenere lo sminuzzato.....	27
1.7.1 - Le sminuzzatrici a disco.....	29
1.7.2 - Le sminuzzatrici a tamburo	30
1.7.3 - Le sminuzzatrici a vite senza fine o elica	31
1.8 – Caratteristiche qualitative delle biomasse.....	32
1.8.1 - Massa volumica.....	33
1.8.2 - Densità apparente (Bulk density)	35
1.8.3- Umidità del legno	35
1.8.4 - Il potere calorifico	37
1.9 – Gli standard qualitativi dello sminuzzato	38
1.9.1 – La pezzatura	39
1.9.2. – Il tenore idrico	41
1.9.3. – Il contenuto di fibre e ceneri.....	42
1.9.4. – Il potere calorifico dello sminuzzato.....	43
1.9.5. – La massa volumica apparente dello sminuzzato.....	45
1.10 - Le tecnologie di conversione	45
1.10 - La filiera Legno - Energia.....	51
1.11 - Obiettivo dello studio	52
2. COLTURE IN ESAME	54
2.1 - La Short Rotation Forestry (SRF).....	54

2.1.1 - Il pioppo	56
2.2 - Diradamenti	57
2.2.1 - Il pino	59
2.2.2 - L'Abete rosso (<i>Picea Abies</i> L.)	60
2.2.3 - Il Cerro (<i>Quercus cerris</i> L.)	62
2.2.4 - La roverella (<i>Quercus pubescens</i> Willd.)	63
2.2.5 - Il Faggio (<i>Fagus Sylvatica</i> L.)	64
2.3 - La coltivazione delle arance	64
3. MATERIALI E METODI	66
3.1 – Analisi di laboratorio	69
3.2 - Composizione macroscopica dello sminuzzato	70
3.3 - Distribuzione granulometrica dello sminuzzato	70
3.4 - Umidità e contenuto idrico	71
3.5 - Densità Bulk (densità apparente)	72
3.6 - Il potere calorifico	72
3.7 - Analisi ultima	74
3.8 - Contenuto in ceneri	74
3.9 - Analisi statistica	75
4. RISULTATI	76
4.1 - Sminuzzato proveniente da SRF	76
4.1.1 - Composizione macroscopica dello sminuzzato	76
4.1.2 - Distribuzione granulometrica dello sminuzzato	79
4.1.3 - Densità Bulk (densità apparente) dello sminuzzato	80
4.1.4 - Potere Calorifico Superiore (PCS) dello sminuzzato	82
4.1.5 - Analisi Ultima dello sminuzzato	84
4.2 - Sminuzzato ottenuto da piante intere utilizzate in operazioni di primo diradamento.	85
4.2.1 - Composizione macroscopica dello sminuzzato	85
4.2.2 - Distribuzione granulometrica dello sminuzzato	87
4.2.3 - Densità Bulk (densità apparente) dello sminuzzato	88
4.2.4 - Potere Calorifico Superiore (PCS) dello sminuzzato	91
4.2.5 - Analisi Ultima dello sminuzzato	93

4.3 - Confronto tra sminuzzato da SRF e sminuzzato ottenuto da piante intere utilizzate in operazioni di primo diradamento	95
4.3.1 - Composizione macroscopica dello sminuzzato	95
4.3.2 - Distribuzione granulometrica dello sminuzzato.....	96
4.4 - Sminuzzato proveniente dalla potatura delle arance	97
4.4.1 – Computo energetico	100
5. CONCLUSIONI	101
6. BIBLIOGRAFIA	104

1. INTRODUZIONE

1.1 - SITUAZIONE ENERGETICA E POLITICHE DI RIFERIMENTO

La scelta di fondare sugli investimenti nelle fonti rinnovabili la politica energetica comunitaria deriva direttamente dalle linee guida fissate dal Protocollo di Kyoto, trattato internazionale stipulato per la riduzione delle emissioni inquinanti responsabili del riscaldamento globale. Il protocollo sottoscritto nel dicembre del 1997 da più di 160 paesi, durante la Conferenza COP3 della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), ed entrato in vigore il nel febbraio 2005, dopo la ratifica da parte della Russia.

Il trattato prevedeva l'obbligo per i paesi industrializzati di adottare una politica di riduzione delle emissioni inquinanti responsabili dell'effetto serra, ovvero biossido di carbonio (CO₂), ossido di azoto (N₂O), metano (CH₄), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC) ed esafluoruro di zolfo (SF₆), per il periodo 2008 - 2012, in una misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990.

Questi gas presenti nell'atmosfera sono chiamati gas serra (GHG, dall'inglese *Green House Gases*) perchè in grado di assorbire la radiazione infrarossa, in questo modo il calore di una parte delle radiazioni solari destinate alla dispersione verso lo spazio dopo essere state riflesse dalla superficie della Terra viene catturata invece che dispersa, cosa che accadrebbe nel caso fossero assenti tali gas. La comunità scientifica internazionale (IPCC, 2007a) è concorde nel riconoscere che un lieve aumento della concentrazione dei GHG può determinare incrementi apprezzabili della temperatura media della superficie terrestre con presumibili effetti rilevanti sul clima.

Il Governo Italiano ha presentato a luglio 2011 il secondo Piano d'Azione Europeo per l'Efficienza Energetica (PAEE) in cui sono riportati i risultati del primo periodo di monitoraggio (2007-2010) e le misure di efficienza energetica volte al raggiungimento degli obiettivi fissati per il 2016.

Le emissioni italiane di gas serra, contrariamente all'obiettivo di riduzione fissato al 2012, del 6,5% rispetto al 1990, aumentano al 2007 del 7,3%, in base al rapporto ufficialmente consegnato dall'ISPRA all'UNFCCC. Nel 2011 il PAEE rimarca il ruolo dell'efficienza energetica come strumento imprescindibile di riduzione dei consumi

nell'ambito dei Paesi Membri, nel raggiungimento dell'obiettivo più ambizioso del -20% al 2020 e al fine di avviare un uso efficiente delle risorse. Il piano è redatto in base alla Direttiva 2006/32/CE, in cui si mira a conseguire un obiettivo nazionale indicativo globale di risparmio energetico al 2016, pari al 9% per il nono anno di applicazione, da conseguire tramite servizi energetici e altre misure di miglioramento dell'efficienza energetica.

Tra le misure di miglioramento dell'efficienza energetica incluse nel PAEE2011 si sono considerate anche le tecnologie rinnovabili in grado di ridurre il fabbisogno di energia primaria, questo anche attraverso i Certificati Bianchi e le detrazioni fiscali del 55%, destinati ad interventi che adottano tecnologie energetiche efficienti per il risparmio energetico, così permettono l'adozione di tecnologie rinnovabili per usi termici, come collettori solari per la produzione di acqua calda, pompe di calore ad alta efficienza ovvero impianti geotermici a bassa entalpia o alimentati da prodotti vegetali e rifiuti organici e inorganici, ecc. Nella politica italiana delle energie rinnovabili la funzione strategica è rappresentata dal settore delle biomasse, e tra queste un ruolo prioritario è quello ricoperto dai prodotti legnosi. Secondo il Piano di Azione Nazionale (PAN) approvato nel giugno 2010 in attuazione della Direttiva 28/2009, le biomasse dovrebbero diventare entro il 2020 le prime rinnovabili in Italia, coprendo il 44% dei consumi di rinnovabili (20% dell'elettricità; 58% del calore; 84% dei biocarburanti), per un totale di 22,3 M tep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) (Pettenella, 2011). Oltre che al perseguimento degli obiettivi imposti nell'ambito delle conferenze internazionali sul clima l'energia dalle biomasse vegetali contribuiscono a ridurre la dipendenza dalle importazioni di combustibili fossili e a diversificare le fonti di approvvigionamento energetico.

1.2 – ASPETTI ECONOMICI, TECNICI E SOCIALI LEGATI ALLE BIOMASSE LEGNOSE

Il ruolo attuale dell'energia derivante dalle biomasse e, in particolare, della dendro-energia o anche xiloenergetica (l'energia che deriva dalle biomasse ligno-cellulosiche) nel soddisfacimento della domanda complessiva di energia è un tema entrato nel dibattito politico ed economico internazionale, investendo questioni ambientali e sociali oltre che economiche. Le politiche energetiche tendono, in genere, a stimolare l'impiego di risorse

rinnovabili, decentrate e con impatti ambientali non negativi e le biomasse legnose rispondono pienamente a questi requisiti; le politiche ambientali riconoscono la funzione di sostituzione di combustibili fossili che le biomasse possono assumere, con la conseguente riduzione delle emissioni in atmosfera di carbonio di origine fossile (Anonimo, 1996; Marland e Schlamadinger, 1997; Hall, 1998; Hall e Scarse, 1998; Tustin, 2000).

Vi sono altre ragioni che stanno stimolando un'attenzione crescente verso le biomasse: la prevalente localizzazione delle risorse forestali in aree interne svantaggiate fa sì che i problemi della valorizzazione delle biomasse legnose si colleghino a quelli delle politiche di sviluppo delle aree marginali, così come la ricerca di opportunità di utilizzo alternativo dei terreni attualmente destinati a produzione agricole eccedentarie porta a valorizzare le produzioni specializzate di biomasse legnose come strumento di diversificazione e stabilizzazione delle economie rurali.

Globalmente, la legna grezza costituisce una fonte primaria d'energia di grande rilevanza (7% del bilancio energetico complessivo per la *Food and Agriculture Organization*, 3% secondo l'*International Energy Agency*), specialmente nei paesi in via sviluppo, dove la legna contribuisce a soddisfare il 15% della domanda d'energia. Nei paesi più poveri le biomasse legnose non solo rappresentano la prima fonte energetica, ma costituiscono praticamente l'unica sorgente di energia per la popolazione rurale, con evidenti conseguenze di carattere sociale dal momento che la legna ha un ruolo essenziale per la copertura di bisogni di base, quali sono l'alimentazione (cottura dei cibi), l'illuminazione e il riscaldamento.

Tuttavia, è proprio nei paesi occidentali, dove la legna contribuisce per il 2% alla richiesta complessiva d'energia, che si registra di recente il maggiore interesse verso l'impiego della biomassa come fonte energetica (www.fao.org/forestry/foris/webview/energy/).

Già a metà degli anni '70, in concomitanza con la prima crisi energetica, molti paesi sviluppati presero le prime iniziative per valorizzare la legna – e più in generale le biomasse – per produrre energia alternativa alle fonti fossili, avviando attività promozionali e finanziando investimenti in ricerca e sviluppo.

In Italia, pur riconoscendo il raggiungimento di qualche risultato lusinghiero e incoraggiante, a 25 anni di distanza dalla crisi energetica si può affermare che la bioenergia stenta ad affermarsi a scala industriale ed è rimasta ancora allo stadio di sviluppo, nonostante una considerevole serie di affermazioni programmatiche, qualche (limitato) investimento pubblico in attività di ricerca e un'adeguata politica tariffaria e

fiscale per favorire l'uso del legno a fini energetici. A questo parziale insuccesso hanno contribuito la riduzione dei prezzi dei combustibili convenzionali verificatasi negli anni '80 e '90.

In effetti il mercato, dato un sistema di prezzi che solo parzialmente è in grado di internalizzare i costi e benefici sociali dell'impiego delle diverse fonti di energia, non è stato finora in grado di stimolare un utilizzo delle biomasse a fini energetici a scala industriale. Tuttavia, va registrato che - a livello di consumi domestici in aree rurali, soprattutto montane - l'impiego di legna come fonte di energia è andato in Italia gradualmente ma costantemente crescendo a partire dagli anni '70, anche per la spontanea diffusione di sistemi di conversione in energia termica più efficienti.

L'utilizzazione energetica della legna proveniente dai boschi è stata trascurata anche dalla politica forestale, che ha erroneamente ritenuto la legna da ardere un prodotto obsoleto, a domanda inelastica rispetto al reddito, destinato quindi ad essere emarginato dal mercato dalla diffusione di altre forme rinnovabili d'energia. Non ci si è così resi conto che la presenza e lo sviluppo di una domanda di legna da ardere poteva essere un potente stimolo alla realizzazione di interventi di miglioramento colturale di molti boschi degradati, riducendo, ad esempio, i costi di avviamento di cedui ad altofusto, oltre a poter sostenere un'economia forestale che, soprattutto in aree appenniniche e prealpine, era e rimane sostanzialmente collegata a forme di governo a ceduo e, quindi, alla produzione di piccoli assortimenti.

Tuttavia, i recenti indirizzi di politica ambientale ed energetica scaturiti dagli accordi internazionali sullo sviluppo sostenibile (la Convenzione sui Cambiamenti Climatici, per la Biodiversità, per la Lotta contro la Desertificazione, i Principi Forestali e altri processi e accordi internazionali fino agli ultimi Accordi di Johannesburg), la necessità di ridurre la dipendenza energetica dall'estero (tra i Paesi più industrializzati, l'Italia è la nazione con il minor tasso di auto-provvigionamento di energia), le politiche di diversificazione degli impieghi di terreni agricoli a produzioni eccedentarie e l'esigenza di valorizzare le fonti interne d'energia stanno aprendo prospettive interessanti per i sistemi d'energia rinnovabile e per le biomasse ligno-cellulosiche in particolare (Trossero, 2000).

Nei prossimi decenni, la crescente sensibilità delle collettività verso i temi ambientali, il temuto e verosimile incremento dei prezzi dei combustibili fossili, lo sviluppo della tecnologia di condizionamento e di conversione energetica del materiale ligno-cellulosico è possibile che portino ad una maggiore attenzione alla diffusione di questa forma di energia.

La filiera degli impieghi energetici di biomasse legnose, contrariamente a quanto possa sembrare ad una prima valutazione è caratterizzata da notevoli elementi di complessità. Per un insieme diverso di ragioni, che si cercherà di evidenziare nel seguito, le caratteristiche economiche della domanda e dell'offerta, i canali di approvvigionamento, il sistema dei prezzi e, quindi, i margini di convenienza all'utilizzo delle biomasse sono, infatti, molto eterogenei.

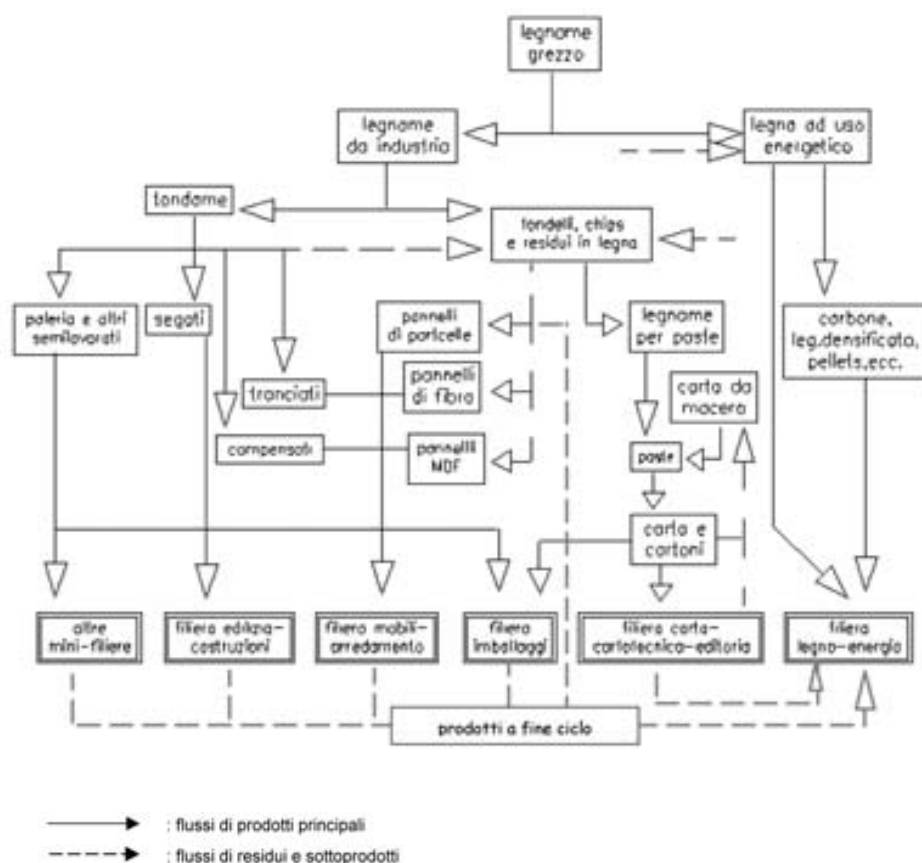


Figura 1: gli impieghi delle biomasse legnose nelle diverse filiere produttive (APAT, le biomasse legnose)

Innanzitutto si è in presenza di impieghi finali diversi delle biomasse legnose che, in alcuni casi, comportano forti condizioni di competizione (non sempre scevre da conflitti tra le organizzazioni in gioco, viste le politiche di incentivazione pubblica esistenti per alcune destinazioni finali). Come illustrato in figura 1, nel sistema foresta-legno si possono individuare diverse filiere; l'utilizzo a fini energetici di biomasse legnose si può, quindi, porre in competizione con:

- la produzione industriale di pannelli;

- la produzione di paste ad uso cartario;
- l'utilizzo in una serie molto articolata di nicchie di mercato (produzione di paleria, carbone vegetale attivato per filtri o impieghi farmaceutici, di tannino, di segatura per impieghi zootecnici, di prodotti compositi legno-plastica per la realizzazione di sedie da ufficio, cruscotti per auto, ecc...).

Non di rado un impiego intensivo di biomasse può, inoltre, entrare in conflitto con politiche di tutela ambientale, ovvero di limitazione dei prelievi boschivi, ivi comprese le politiche di invecchiamento delle formazioni cedue per favorirne la conversione a fustaie. Va, tuttavia, ricordato che la produzione di biomasse a fini energetici ha nel sistema foresta-legno dei rapporti sinergici con le filiere di lavorazione di prodotti di maggior valore unitario (tronchi per segati, tranciati, compensati, ecc.) e, talvolta, anche con quello di materie prime legnose relativamente “povere” (si pensi, nelle produzioni cartarie, alla disponibilità di fanghi impiegabili a fini energetici). E’ per questa ragione che paesi che tradizionalmente trasformano grandi quantità di tondame (Austria, Svezia, Finlandia, ecc.) sono anche paesi che hanno alti impieghi di biomasse ad uso energetico.

Nella figura 1 i flussi di sottoprodotti e scarti di lavorazione sono evidenziati con una linea tratteggiata. È importante rimarcare che tali flussi, nonostante tendano ad assumere una rilevanza in termini quantitativi sempre maggiore, spesso non sono oggetto di rilievi statistici accurati.

Nello specifico, per ciò che riguarda il settore degli impieghi di biomasse a fini energetici, si ha una notevole diversificazione delle categorie di utilizzatori, con diverse propensioni di spesa. La “disponibilità a pagare” per l’acquisto di biomasse è, infatti, ben diversa tra:

- gli utilizzatori tradizionali di legna da ardere in aree rurali che possono ricorrere a forme di autoproduzione o che godono del diritto di Uso civico di legnatico che hanno l’esplicito o tacito diritto di raccogliere i residui delle lavorazioni boschive (consuetudine diffusa soprattutto nelle proprietà forestali collettive);
- gli utilizzatori di legna e carbone vegetale in camini o per barbecue in aree urbane o nelle seconde case in zone turistiche;
- le imprese che utilizzano legna da ardere in attività connesse alla ristorazione (pizzerie, forni, ristoranti, ecc.);
- le industrie del legno e della carta che fanno utilizzo dei propri sottoprodotti e scarti di lavorazione in impianti aziendali;
- le centrali che producono energia e/o calore impiegando diverse tipologie di biomasse.

E' evidente che l'elasticità della domanda di biomasse a fini energetici varia in misura significativa tra le diverse figure di utilizzatori sopra richiamate. In particolare l'elasticità rispetto al reddito ha un andamento del tutto peculiare: nelle fasce della popolazione a basso reddito c'è una tendenza a ridurre i consumi sostituendo il legname con altri combustibili (la legna da ardere si caratterizza quindi come un bene inferiore), nelle fasce a reddito alto c'è una domanda di legna da ardere per camini, stufe, forni, ecc. crescente (ovvero tale prodotto assume le caratteristiche di un bene superiore).

Sul lato dell'offerta, le biomasse legnose possono essere rese disponibili in diversi assortimenti, in differenti fasi del ciclo di vita del prodotto legnoso, quindi con costi di produzione estremamente disomogenei.

In molti casi le biomasse legnose sono disponibili a costi nulli, come nell'assegnazione di piante in piedi ad Uso civico. Nelle situazioni non rare in cui le imprese di lavorazione del legno non siano in grado di sostenere gli ingenti costi per impianti di trasformazione energetica che rispettino la normativa sulle emissioni, lo smaltimento dei residui legnosi può comportare dei costi e, quindi, una disponibilità a pagare perché il materiale sia impiegato da terzi.

La convenienza all'utilizzo delle biomasse a fini energetici, oltre evidentemente ad essere connessa ai costi di produzione della materia prima, dipende da almeno altri tre fattori:

- la logistica, ovvero i costi di trasporto e stoccaggio, che possono fortemente incidere sui costi del materiale alla bocca dell'impianto;
- i sistemi di produzione di energia, ovvero il tipo e le dimensioni degli impianti, le modalità di alimentazione degli stessi, l'assortimentazione del materiale (tronchetti formato stufa, sminuzzato, pellets, ecc.), il rendimento energetico;
- i costi di produzione di energia con combustibili convenzionali (in genere fossili) o con altre fonti energetiche rinnovabili, alternativa che si può porre nelle condizioni di applicazione di tecniche di green pricing o dei certificati verdi.

La loro disponibilità e la velocità di ricostituzione del materiale consumato (bruciato) dipendono da una molteplicità di fattori che possono essere riuniti in due grandi gruppi: le caratteristiche ambientali e stazionali ed i fattori antropici (contesto socio-economico-politico).

Dato per scontato che il prelievo non possa in ogni caso superare la produzione corrente, in quanto la riduzione del capitale produttivo porterebbe ad una diminuzione della produttività totale e della qualità del sistema, i fattori ambientali influenzano la capacità

produttiva del sistema e determinano le quantità che in misura assoluta possono essere prelevate nello spazio e nel tempo.

Alcuni esempi: se in un ambiente temperato con buone precipitazioni (aree collinari e montane delle Alpi) un sistema forestale è in grado di produrre 5-10 t ha⁻¹anno⁻¹, in ambiente boreale i ritmi di accrescimento sono molto più lenti (0,5-1 t ha⁻¹anno⁻¹) e quindi il prelievo, a prescindere dalla biomassa legnosa presente, deve essere molto più cauto. In ambiente tropicale umido è invece la natura dell'ecosistema, con equilibri molto precari, a porre delle limitazioni nonostante produzioni decisamente elevate.

Il secondo gruppo di fattori, quello legato all'attività dell'uomo, complica ulteriormente il calcolo di quanta biomassa possa realmente essere destinata alla produzione di energia. Da una parte le condizioni economiche e sociali pongono dei limiti circa le aree in cui effettuare il prelievo, cioè la disponibilità di spendere risorse via via maggiori man mano che le condizioni dell'accessibilità ai siti di raccolta diventano più difficoltose (morfologia, pendenza, viabilità presente, possibilità di meccanizzazione ecc.). D'altro canto, il patrimonio forestale svolge una molteplicità di funzioni che impongono dei vincoli che spesso cozzano con l'esigenza di un intenso prelievo di legno (per altro possibile dal punto di vista ecologico e tecnico), basti pensare alla funzione di protezione idrogeologica oppure a quella turistico-paesistica.

Anche la funzione produttiva entra fortemente in gioco in questo contesto. Il legno è una materia prima di estrema importanza per innumerevoli manufatti quotidianamente utilizzati dall'uomo, dai mobili ai pavimenti alle strutture nell'edilizia per cui, al di là delle tensioni sul rapporto prezzo opportunità, esiste un'obiettivo impossibilità di utilizzare tutta la biomassa legnosa presente in un bosco per scopi energetici.

Dal punto di vista gestionale le biomasse “vergini”, cioè quelle provenienti dalla produzione primaria, possono derivare dagli scarti della funzione produttiva primaria (legname da opera) oppure da popolamenti destinati ad hoc alla loro produzione. Inoltre esse possono essere prodotte “in foresta” o “fuori foresta” se i siti rientrano o meno nella definizione legale di bosco.

Nel primo caso il sistema selvicolturale adottato tiene esclusivamente conto delle caratteristiche (dimensioni e qualità) degli assortimenti che costituiscono l'obiettivo produttivo e, almeno in teoria, lo “scarto” dovrebbe essere ridotto alle quantità minime possibili. Naturalmente è possibile in questo caso distinguere nei diversi approcci selvicolturali al bosco. Se ad esempio in pecceta o faggeta la selvicoltura è di norma una selvicoltura di popolamento con la quale tutti gli alberi del bosco rientrano più o meno

negli obiettivi gestionali, nei boschi misti (soprattutto di latifoglie), la selvicoltura d'albero che concentra le cure su pochi individui rende possibile la produzione di masse maggiori da destinare alla produzione di energia. Nella produzione fuori foresta (arboricoltura da legno a ciclo lungo), la biomassa oltre che provenire dalla ramaglia e dai cimali delle piante principali, può essere ottenuta dalle piante accessorie (arboree o arbustive), già previste e destinate a questa funzione in sede di progettazione dell'impianto.

I popolamenti destinati all'esclusivo utilizzo energetico hanno, dal punto di vista selvicolturale, l'innegabile aspetto positivo di non dover perseguire obiettivi di qualità degli assortimenti ma solo di quantità di materia prima prodotta. Per contro, mentre è molto facile utilizzare anche legname di pregio per la combustione, diventa piuttosto complicato e lungo trasformare un popolamento con scarse qualità tecnologiche del legname presente in una produzione di assortimenti di pregio.

Nel bosco propriamente detto la produzione di legno destinato esclusivamente alle biomasse da energia trova nel governo ceduo la forma ottimale di gestione. La facilità di rinnovazione, il rapido accrescimento nei primi anni ed i turni relativamente brevi rendono questi tipi di boschi una fonte preferenziale di biomassa legnosa. Dal punto di vista produttivo, dopo il relativamente lungo periodo di abbandono al quale gran parte di queste formazioni è stato sottoposto (molti popolamenti cedui non più ordinariamente gestiti si trovano oggi a superare per due-tre volte il turno consuetudinario), la massa legnosa accumulata supera spesso i 200 m³ con incrementi medi che raggiungono facilmente 8-10 m³ ha⁻¹anno⁻¹). Per altro l'aspetto negativo è che in molti di questi boschi (ad esempio le faggete) le ceppaie hanno ormai perso la capacità pollonifera e quindi la gestione ordinaria a ceduo non è più possibile e la massa legnosa deve necessariamente essere ottenuta attraverso i tagli di avviamento all'alto fusto; questo fatto implica una selezione accurata dei fusti (martellata da parte di un tecnico forestale) ed un prelievo dilazionato nel tempo. Un ulteriore problema all'utilizzo di questa risorsa è dovuto alla diffusa mancanza di una adeguata viabilità.

1.3 - LA BIOMASSA

Il termine "biomassa" comparve in Italia verso la fine degli anni sessanta quando dopo la prima crisi energetica si risvegliò l'interesse per le fonti rinnovabili, così vennero inserite

sulla scia di quanto avveniva in altre nazioni. Per essere considerata fonte rinnovabile si escludono tutte le biomasse fossilizzate e derivati i quali non sono conformi alla definizione di risorsa rinnovabile in quanto i tempi di formazione sono di milioni di anni e non comparabili con i tempi di sfruttamento di breve periodo necessari oggi, quindi purché vengano impiegate a un ritmo non superiore alle capacità di rinnovamento biologico (Tabella 1).

Tabella 1: valori di PCI per i principali biocombustibili e combustibili fossili

Combustibili		PCI (MJ/kg)
Combustibili fossili	Metano	50,2
	GPL	46,1
	Benzina	43
	Gasolio	42,7
	Petrolio grezzo	41,9
	Olio combustibile	41
	Antracite	33,5
	Carbone	31,4
	Coke	29,3
	Lignite	16,7
	Torba	12,6
	Olio di girasole	37,7
Biocombustibili	Olio di colza	37,6
	Biodiesel	37,3
	Bioetanolo	27,2
	Biogas	23
	Briquettes	17,6
	Pellet	17,2
	Legna conifere (20% di umidità)	14,9
	Legna latifoglie (20% di umidità)	14,2

Con biomassa ci si riferisce ad una gran quantità di materiali di natura estremamente eterogenea, tutta la materia organica prodotta da attività biologica che deriva dal processo di organizzazione fotosintetica della CO₂, con esclusione delle plastiche e dei materiali fossili che rientrano sempre nella chimica del carbonio ma non hanno nulla a che vedere con la caratterizzazione dei materiali organici di nostro interesse.

Nella sua accezione energetica il termine biomassa indica più specificatamente la materia organica prodotta o residua utilizzabile come fonte di energia in processi di generazione di elettricità, calore o biocombustibili (Aa. Vv., 2010). Questo perchè la biomassa

rappresenta la forma più sofisticata di accumulo di energia solare. Durante la crescita attraverso il processo di fotosintesi clorofilliana le piante catturano la radiazione solare e la trasformano in energia chimica, in pratica convertono la CO₂ atmosferica in materia organica.

Il motivo dell'impiego a fini energetici della biomassa nelle priorità di sviluppo delle politiche post Kyoto è dovuto al fatto che è una fonte energetica considerata neutrale ai fini dell'incremento delle emissioni di gas a effetto serra, questo perché il processo di fotosintesi utilizzato per la crescita dei vegetali determina la sottrazione di CO₂ atmosferica e alla fissazione del carbonio nei tessuti, ma quando questa viene emessa a seguito della sua combustione è di una quantità pari a quella precedentemente assorbita dalla pianta rientrando così nel ciclo naturale.

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici di origine vegetale o animale da cui sia possibile ottenere energia attraverso processi di tipo termochimico o biochimico, la loro trasformazione o conversione in energia può avvenire in modo diretto nel caso dei biocombustibili, o indiretto dopo averlo trasformato in vettore liquido nel caso dei biocarburanti o gassoso nel caso del biogas (Fiala, 2012).

A livello normativo è Il D.lgs n. 387 del 29 dicembre 2003, di “Attuazione della direttiva 2001/77/CE³, relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità”, stabilisce, all'art. 2, comma 1, lett. a) che per “biomasse” deve intendersi: “la parte biodegradabile dei prodotti residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze animali e vegetali) e dalla silvicoltura e da industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”. Questa definizione è stata ampliata dal recente D.Lgs 28/2011 “Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili...”. L'art. 2, lettera e), definisce la biomassa come “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.”

È importante, dunque, una precisa descrizione delle biomasse che si intendono utilizzare e la loro provenienza, al fine di poter adeguatamente inquadrare l'intera produzione all'interno delle diverse norme vigenti relativamente al loro approvvigionamento e alla tipologia di impianto (Maglia S., 2010).

Nell'art. 2 (rispetto alla precedente direttiva 2003/30/CE) oltre alla definizione generale è stata aggiunta la definizione del composto "biometano" e vengono distinti i "bioliquidi" dai "biocarburanti" come segue:

- bioliquidi - "combustibili liquidi per scopi energetici diversi dal trasporto, compresi l'elettricità, il riscaldamento ed il raffreddamento, prodotti dalla biomassa";
- biocarburanti - "carburanti liquidi o gassosi per i trasporti ricavati dalla biomassa";
- biometano - "gas ottenuto a partire da fonti rinnovabili avente caratteristiche e condizioni di utilizzo corrispondenti a quelle del gas metano e idoneo alla immissione nella rete del gas naturale".

La definizione di biomassa diviene più dettagliata quando la si debba intendere come combustibile nella procedura di autorizzazione alle emissioni in atmosfera ai sensi del DLgs 152/2006, parte V (Testo Unico Ambientale).

I combustibili derivanti dalle biomasse sono descritti all'art. 293 ed elencati in dettaglio all'allegato X:

- biodiesel;
- legna da ardere;
- carbone di legna;
- biomasse combustibili;
- biogas;
- gas di sintesi.

L'utilizzo delle biomasse a fini energetici si può considerare vantaggioso quando queste si trovano concentrate nello spazio e disponibili con continuità nell'arco dell'anno, in quanto una eccessiva dispersione sul territorio o una stagionalità troppo concentrata dei raccolti renderebbero più difficili e onerose le operazioni di raccolta, trasporto e stoccaggio (ENEA, 2008).

La variabilità di forme e di caratteristiche richiede più criteri di classificazione, il DL 152/2006 (Parte V, Allegato X, parte II, sez. 4, n. 1) individua nella definizione di biomassa combustibile i seguenti materiali in base alla loro provenienza:

- a) Materiale vegetale prodotto da coltivazioni dedicate;
- b) Materiale vegetale prodotto da trattamento esclusivamente meccanico di coltivazioni agricole non dedicate;

- c) Materiale vegetale prodotto da interventi selvicolturali, da manutenzione forestale e da potatura;
- d) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di legno vergine e costituito da cortecce, segatura, trucioli, chips, refili e tondelli di legno vergine, granulati e cascami di legno vergine, granulati e cascami di sughero vergine, tondelli, non contaminati da inquinanti;
- e) Materiale vegetale prodotto dalla lavorazione esclusivamente meccanica di prodotti agricoli.
- f) Sansa di oliva disoleata [...];
- g) Liquor nero ottenuto nelle cartiere [...];

I prodotti energetici derivanti dalle “biomasse combustibili” possono trovare impiego in un’ampia gamma di applicazioni come biocombustibili solidi, liquidi e gassosi, la tipologia dei processi di conversione attuabili dipendono dalle proprietà chimico-fisiche delle biomasse utilizzate.

Le tre tipologie di materiali che comprende la nozione giuridica di biomassa sono in generale i prodotti, rifiuti e residui. L’inquadramento della biomassa come prodotto, rifiuto o come sottoprodotto deve essere effettuato sulla base dei principi generali. La biomassa deve intendersi sottoprodotto e non rifiuto quando soddisfa i criteri e le condizioni del DLgs 152/2006 (modificato dal DLgs 205/2010) art. 184 bis.

In materia, deve inoltre essere tenuto presente il DLgs 205/2010 il quale esclude dal campo di applicazione dei rifiuti le materie fecali, sfalci, potature ed altri materiali da attività agricola o forestale reimpiegati in agricoltura, nella selvicoltura o nella produzione di energia da biomassa. Mentre i residui vegetali provenienti da pulitura di aree verdi devono essere conferiti al servizio pubblico di raccolta in quanto classificati rifiuti urbani in base alla loro gestione (ex articolo 184, dlgs 152/2006), e come rifiuti organici in base alla loro natura (articolo 183, dlgs 152/2006). L’affermazione delle biomasse per uso energetico è tutt’ora limitata da diversi fattori di natura tecnica collegati alle fasi di approvvigionamento e trasporto fino alla fase di conversione. Ottenere energia dalle biomasse è attualmente ancora un processo costoso rispetto a quello derivante dalle fonti fossili, anche se si prevede in un breve periodo di raggiungere una certa competitività. Sono in atto diversi programmi di ricerca per rendere competitiva l’energia da biomassa, tramite l’applicazione di tecnologie in grado di aumentare il livello di rendimento della conversione in energia e di ridurre, contemporaneamente, i costi di investimento.

1.4 - LE BIOMASSE LEGNOSE

Le fonti delle biomasse di origine forestale per la produzione energetica dei biocombustibili possono essere suddivise in primarie e secondarie, le prime sono collegate direttamente all'attività biologica, ovvero alla fissazione di energia solare che darà come prodotto il legno, si possono ulteriormente distinguere le fonti legnose naturali e le fonti legnose coltivate.

Tabella 2: tipologie di fonti di approvvigionamento delle biomasse

BIOMASSA DEDICATA	Short Rotation Forestry	Pioppo, salice, robinia, eucalipto,...
	Colture oleaginose	Girasole, colza, soia, jatropha,...
	Colture alcoligene	Cereali, barbabietola, sorgo,...
	Colture erbacee ad alta efficienza fotosintetica	Sorgo da fibra, mais, miscanto, arundo donax, canna, kenaf,...
BIOMASSA RESIDUALE	Residui agricoli	Paglie di cereali, residui verdi, potature di vite, olivo, frutteti, ecc.
	Residui forestali, silvicolture e della lavorazione del legno	Frasconi, ramaglie, sfridi legnosi, segatura, ecc.
	Residui agroindustriali e dell'industria alimentare	Vinacce, sansa, lolla di riso, siero di latte, ecc
	Reflui zootecnici	Deiezioni suine e bovine, pollina, ecc.

Le fonti secondarie o fonti legnose residuali sono collegate direttamente all'attività umana, si trovano concentrate nell'industria, nelle prime lavorazioni e le produzioni agroindustriali (paglia, sarmenti, frasche, ecc.) (ASSAM, 2010b) ma non solo anche per esempio le biomasse provenienti dalla raccolta differenziata (imballaggi legnosi, potatura del verde urbano e residui della lavorazione). Nelle risorse naturali il maggior serbatoio di biomassa in termini quantitativi è costituito dai boschi di tipo tradizionale, la materia prima è ottenuta dai residui delle utilizzazioni boschive commerciali, dagli sfolli o primi diradamenti, dal taglio del ceduo ecc. bisogna però evidenziare che la particolare conformazione del nostro territorio determina però non poco delle difficoltà per il loro utilizzo per un eventuale sfruttamento energetico, ma non per questo non bisogna tenerne

conto tra la possibili fonti di approvvigionamento di biomassa all'interno di un ipotetico bacino di raccolta (Tabella 2).

Le colture “dedicate” ovvero colture con un elevato tasso di crescita impiantate su suoli agricoli, costituite da tutte quelle specie erbacee e/o arboree idonee alla produzione di biomassa utilizzabile nei diversi processi tecnologici di conversione energetica, si cerca così di massimizzare la produzione in archi temporali brevi, sono favorite elevate densità e piantagioni dove è possibile praticare un'elevata meccanizzazione.

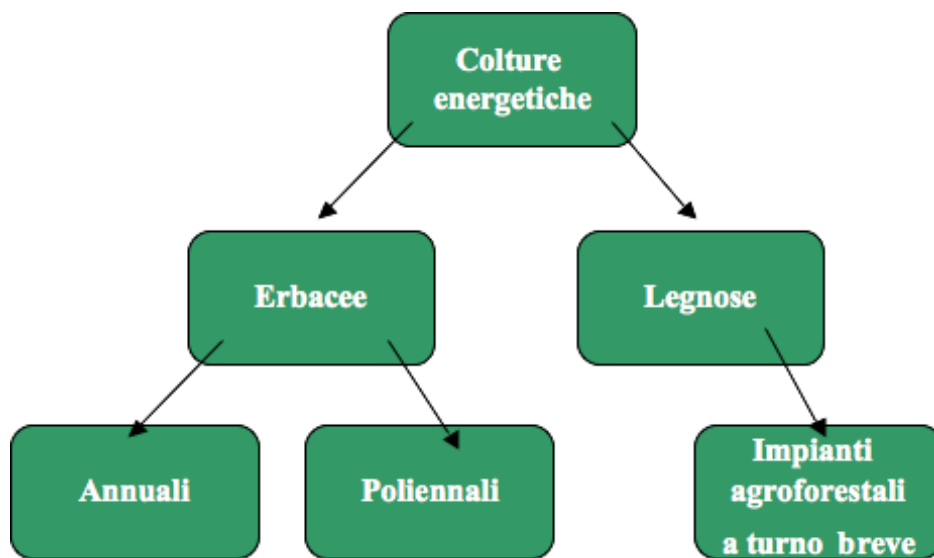


Figura 2: Classificazione colture energetiche

Le piantagioni energetiche (Figura 1)sono distinguibili per cicli di vita, per tipologia di struttura vegetale, possono essere raggruppate in tre tipologie principali:

- *Colture da biomassa lignocellulosica*, specie a elevata produzione di sostanza secca come le specie per la Short Rotation Forestry (SFR), ossia specie arboree a rapido accrescimento.
- *Colture oleaginose* dalle quali si ottiene il biodisel tramite l'esterificazione degli oli vegetali estratti dalle piante. Le colture utilizzate per questo processo sono la colza, il girasole e la soia, le prime due sono le più adatte agli ambienti italiani.
- *Colture da carboidrati* ovvero colture zuccherine che vengono utilizzate per la produzione di bioetanolo tramite la fermentazione dei carboidrati, previa trasformazione

in etil-tertiobutiletere viene addizionato alle benzine. Le specie impiegate più diffuse sono la canna da zucchero, il frumento, il sorgo e il mais, un certo interesse è stato mostrato anche per la barbabietola da zucchero e il topinambur.

Gli elementi su cui si basa una SRF sono la densità di impianto che va da 5.000 a 20.000 piante per ettaro, il turno che varia dai 2 ai 5 anni, le piantagioni vengono effettuate su terreni agricoli gestiti con meccanizzazione integrale, impianto di talee.

Nell'Unione Europea le piantagioni di SRF sono più diffuse in Svezia e Danimarca, l'interesse ed i primi approfondimenti in Italia sulle culture dedicate a destinazione energetica iniziarono verso la prima metà degli anni '90 con il progetto PRISCA del MiPAF e con alcune esperienze finanziate principalmente da Enel (Piccioni et al., 2006), tale iniziative hanno previsto una sperimentazione sulla SRF nell'Italia centro-settentrionale, finalizzata alla produzione di biomassa da utilizzare per la produzione di energia elettrica (Sperandio et al., 2000), nel campo delle biomasse l'obiettivo della Commissione europea era quello di produrre per il 2010 almeno 130 milioni di tonnellate di equivalente in petrolio (tep) all'anno, in particolare la produzione nel nostro paese doveva essere di 8-10 milioni di tep (Bisoffi, 2000).

In queste occasioni iniziarono le sperimentazioni agronomiche sulla SRF di pioppo nei differenti areali italiani per la messa a punto dei principali elementi della tecnica di impianto, di conduzione e difesa, di raccolta e stoccaggio (Piccioni et al., 2006), ricerche per restringere il campo a quelle specie che per produttività, adattabilità alle diverse condizioni ambientali e semplicità di gestione risultassero le più idonee nei diversi ambienti italiani, insieme ad una ricerca sul miglioramento genetico con lo scopo di selezionare cloni di pioppo sempre più idonei alle caratteristiche della gestione di una SRF. Un ulteriore incentivo alla loro diffusione si deve grazie anche ai cospicui finanziamenti erogati a favore degli agricoltori con i Piani di Sviluppo Rurale 2001-07 per la costituzione di piantagioni da bioenergia. In Italia allo stato attuale le piantagioni SRF sono distribuite soprattutto nel Nord (Pianura Padana) ed in parte al Centro (Umbria, Marche e Lazio), la principale coltura ligno-cellulosica coltivata a scopo energetico sono impianti arborei di pioppo, e continuerà in futuro a mantenere un ruolo rilevante grazie ai suoi vantaggi colturali (rapidità di crescita e di propagazione), che per gli aspetti maggiormente inerenti la produzione di biomassa legnosa da energia (facilità di raccolta meccanizzata, di lavorazione) ma si ricordano la robinia, l'eucalipto e il salice.

1.5 - I COMBUSTIBILI LEGNOSI

Le biomasse ligno-cellulosiche sono caratterizzate da un'estrema eterogeneità per composizione, misura e forma: si passa, infatti, dalla polvere di legno alla segatura, dai trucioli alle scaglie, fino ai tronchi interi (vedi tabelle 3 e 4).

Tabella 3: Classificazione dei biocombustibili solidi in base a natura e provenienza: biomassa legnosa (CTI, 2003).

Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Biomassa Legnosa	1. Biomassa legnosa da arboricoltura e silvicoltura	1.1. Alberi e arbusti interi	1.1.1. Legno di latifoglie
			1.1.2. Legno di conifere
		1.2. Tronchi	1.1.3. Ceduo a turno di rotazione breve
			1.1.4. Arbusti
		1.3. Residui di potatura	1.2.1. Latifoglie
			1.2.2. Conifere
	2. Sottoprodotti e residui dell'industria di lavorazione del legno	1.4. Ceppaie	1.2.3. Miscele e miscugli
			1.3.1. Fresco/verde (incluse foglie e aghi)
		1.5 Corteccia da scortecciatura preindustriale	1.3.2. Secco
			1.3.3. Miscele e miscugli
		1.6 Biomassa legnosa da gestione del territorio	
		2.1 Residui di legno non trattato	1.4.1. Latifoglie
		2.2. Residui di legno	1.4.2. Conifere
			1.4.3. Ceduo a turno breve
			1.4.4. Arbusti
			2.1.1. Legno privo di corteccia
			2.1.2. Corteccia (da operazioni industriali)
			2.1.3. Miscele e miscugli
			2.2.1. Legno privo di corteccia

		trattato	2.2.2. Corteccia (da operazioni industriali) 2.2.3. Miscele e miscugli
		2.3. Scarti fibrosi dell'industria della carta e della cellulosa	
	3. Legno post-consumo	3.1 Legno non trattato	3.1.1. Legno privo di corteccia 3.1.2. Corteccia (da operazioni industriali) 3.1.3. Miscele e miscugli
		3.2 Legno trattato	3.1.1. Legno privo di corteccia 3.1.2. Corteccia (da operazioni industriali) 3.1.3. Miscele e miscugli
		3.3. Miscele e miscugli	
	4. Miscele e miscugli		

Tabella 4: Classificazione dei biocombustibili solidi in base a natura e provenienza: frutti e semi (CTI, 2003)

Livello 1	Livello 2	Livello 3	Livello 4
Frutti e semi	1. Frutti da frutticoltura e orticoltura	1.1. Bacche e affini	1.1.1. Bacche intere 1.1.2. Polpa 1.1.3. Semi 1.1.4. Miscele e miscugli
		1.2. Drupe e affini	1.2.1. Bacche intere 1.2.2. Polpa 1.2.3. Noccioli 1.2.4. Miscele e miscugli
		1.3. Noci, nocule e acheni (frutta secca)	1.3.1. Frutto intero 1.3.2. Gusci, tegumenti 1.3.3. Noccioli

			1.3.4. Miscele e miscugli
	2. Residui e sottoprodotti dell'industria di lavorazione di frutti	2.1. Residui di frutti non trattati	2.1.1. Bacche e affini 2.1.2. Drupe e affini 2.1.3. Noci, nocule e acheni 2.1.4. Sansa di olive vergine
		2.2. Residui di frutti trattati	2.2.1. Bacche a affini 2.2.2. Drupe e affini 2.2.3. Noci, nocule e acheni 2.2.4. Sansa di olive esausta
	3. Miscele e miscugli		

Il legno prima di essere immesso sul mercato ed essere impiegato come combustibile subisce generalmente un processo di trasformazione volto a conferire loro caratteristiche fisiche ed energetiche diverse, idonee all'impiego come bio-combustibile degli impianti energetici. Le più diffuse forme commerciali di biomasse sono le seguenti tipologie:

- Legna da ardere (in ciocchi o tronchetti);
- Sminuzzato/Cippato;
- Pellet;
- Bricchette.

1.5.1- LEGNA DA ARDERE

La tipologia del legno ad uso energetico più diffusa è quella della legna da ardere, si possono distinguere dimensioni diverse in base all'assortimento, il diametro delle varie pezzature va dai 5 ai 30 cm (nel caso in cui siano presenti diametri maggiori viene effettuata la spaccatura in senso longitudinale), si hanno *squartoni* e *tondelli* quando viene ridotta in pezzi di lunghezza di 1 m, utilizzata in determinate caldaie con potenze di almeno 50 kW. Legna da stufa o corta o ciocchi invece viene ulteriormente divisa in pezzature minori, 50 cm per caminetti, caldaie e forni, in 33 cm per caminetti e forni ed infine 25 cm per le stufe e termo cucine.

I tenori in umidità variano a seconda del tempo e della tipologia di stagionatura a cui è sottoposta la biomassa (al coperto o in bosco), sono valori comunque inferiori al 50%, la legna pronta all'uso deve possedere un contenuto idrico del 20%.



Figura 3: legna da ardere

1.5.2 - SMINUZZATO/CIPPATO

Lo sminuzzato, ormai più comunemente chiamato cippato termine che deriva dall'inglese *chips* ovveo pezzettini, si ricava dal processo di sminuzzatura delle biomasse legnose. La riduzione in scaglie (o chips) irregolari del legno avviene ad opera di una macchina sminuzzatrice chiamata “*cippatrice*”, le dimensioni possono variare dagli 8 ai 60 mm, mentre la geometria delle scaglie varia in base alle tecniche di taglio utilizzate e dal sistema di alimentazione dell'impianto di trasformazione energetica a cui sono destinate. Tramite dei vagli si ottiene la calibratura delle scaglie per ottenere omogeneità del cippato, una buona qualità è ottenuta quando la maggior parte delle scaglie ricade nella stessa classe di dimensioni e il contenuto in rametti e polvere è ridotto al minimo o meglio del tutto assente. L'omogeneità è una caratteristica importante perchè i sistemi di alimentazione degli impianti operano nell'ambito di determinate tolleranze dimensionali che è necessario rispettare, tra le più comuni classi dimensionali riportiamo il P16 ($3,15 \text{ mm} < P < 16 \text{ mm}$) e P45 ($3,15 \text{ mm} < P < 45$), tra i fattori che determinano le dimensioni

delle singole scaglie vi sono il materiale di partenza, il modello della cippatrice utilizzata e l'eventuali condizioni dei coltelli.



Figura 4: legno sminuzzato

Il materiale destinato alla sminuzzatura è solitamente legname di poco pregio o non commerciabile che non potrebbe essere trasformato in alcun assortimento convenzionale, come gli scarti di segheria (refili e sciaveri), il materiale ricavato dalle cure colturali (diradamenti), dalle normali pratiche agronomiche (potature di oliveti e vigneti) o dagli scarti di utilizzazioni (ramaglie e cimali), in questo modo si riduce il volume apparente degli scarti più ingombranti ma non solo, essendo materiali costituiti da una percentuale molto bassa di legno, a seconda del materiale di partenza attraverso la cippatura completa si può recuperare un 15-30% in peso. La sminuzzatura permette quindi di utilizzare come combustibile materiale legnoso di nullo o scarso valore, di aumentare la resa ad ettaro e di risolvere il problema dei residui di utilizzazione. La riduzione del legname in scaglie permette di aumentare la superficie esposta del legno accelerando tutte le reazioni chimiche come anche la combustione, ma crea però problemi di conservazione al cippato fresco, in quanto si innesca la fermentazione della biomassa a causa dell'ampia superficie

specifica che favorisce lo svilupparsi di microrganismi che la degradano determinando una perdita di sostanza secca che può arrivare fino al 4%.

1.5.3 - PELLET

“Biocombustibile densificato in genere di forma cilindrica ottenuto comprimendo della biomassa polverizzata con o senza l’ausilio di additivi di pressatura”, definizione tratta dalla specifica tecnica europea CEN/TS 14588 “*Solid Biofuels – Terminology, Definitions and Description*” (Probio, 2004).

I pellets vengono prodotti tramite la pressatura della segatura di legno o di scaglie polverizzate di legno fino a rendere coesivo il materiale di partenza, questo avviene per l’effetto legante della lignina attivato dalle alte pressioni impiegate (circa 100 bar) e dal calore derivante dall’attrito (può raggiungere gli 85-95 °C), secondo la normativa UNI/TS 11263:2007 i cilindri che si formano sono di diametro variabile tra i 6-10 mm con una lunghezza tra i 10-50 mm, la densità oscilla tra i 600-700 kg/m³.

Rispetto alle biomasse non densificate (scaglie di legno o cippato), il pellet presenta maggiori vantaggi che lo rendono più apprezzabile sul mercato, i più importanti sono:

elevata densità apparente (bulk density);

basso contenuto in umidità che migliora il rendimento nella combustione che contribuisce a ridurre i costi di trasporto, inoltre nella fase di stoccaggio del combustibile al contrario del cippato non incorre a fenomeni fermentativi causati da muffe e batteri;

elevato potere calorifico: il pellet di legno possiede un valore elevato tra i biocombustibili, un PCI tra 16-21 MJ/kg;

omogeneità delle caratteristiche fisiche, qualitative ed energetiche, la granulometria ridotta e l’omogeneità nella forma garantiscono una movimentazione del prodotto più semplice attraverso coclee o sistemi pneumatici di aspirazione, che ne consentono l’utilizzo in caldaie automatizzate dotate di sistemi di dosatura e alimentazione continua del combustibile permettendo così ai pellets di comportarsi nella movimentazione come un fluido con un conseguente elevato grado di automatizzazione degli impianti di combustione.

Si può dire che il mercato del pellet è a esclusivo della biomassa legnosa, in particolar modo di quella proveniente dai comparti di prima e seconda lavorazione del legno, sono

presenti studi rivolti a sviluppare la filiera del pellet da colture erbacee o da una miscela di queste con biomasse legnose, bisogna tener sempre conto che la diversa qualità della biomassa di partenza specialmente in termini di potere calorifico e di contenuto in ceneri comporta una diversa qualità finale del prodotto pellet.



Figura 5: pellet

Le principali differenze tra pellets e scaglie sono sintetizzate nella tabella 5.

Le caratteristiche che più di tutte le altre portano a considerare i pellets combustibili più all'avanguardia sono principalmente due: la bassa umidità del materiale, inferiore al 12% e l'omogeneità delle dimensioni. Il potere calorifico si attesta mediamente intorno alle 4.000 kcal/kg.

Esiste per i pellets una precisa certificazione che ne chiarisce le caratteristiche fisiche, chimiche ed energetiche. Il presupposto per l'utilizzo di questo prodotto è l'impiego di legname vergine, non trattato con corrosivi, colle o vernici, i quali causerebbero, in impianti sprovvisti di appositi filtri, emissioni di gas nocivi all'ambiente durante la combustione.

Tabella 5: Pro e contro nell'impiego di scaglie o pellets.

Scaglie			Pellets	
Pro				
1	Reperibili localmente	+	1	Omogenei e standardizzati
2	Stimolano l'occupazione locale		2	Facilità di gestione e manutenzione dell'impianto
3	Più economiche		3	Minor volume di stoccaggio
			4	Minore umidità
Contro				
1	Mancanza di uniformità nelle dimensioni	-	1	Minori benefici per l'economia locale
2	Maggiori costi per la gestione e la manutenzione dell'impianto		2	Più costosi
3	Richiedono un volume di stoccaggio maggiore			
4	Minore densità			

1.5.4 – BRICCHETTE

Le bricchette è una forma diversa di biocombustibile legnoso densificato, di dimensioni maggiori del pellet, solitamente in forma di parallelepipedo o cilindro di diametro che varia

da 8 a 12 cm e una lunghezza di circa 25-35 cm, alcuni tipi sono forati al centro per permettere una combustione più rapida e efficiente. Il procedimento di produzione è analogo a quello del pellet, sono ottenuti da mescole di materiali utilizzati come possono essere gli scarti, segatura di legno, paglia, pula di riso, gusci di noci, gusci di caffè, cippato ecc con più o meno presenza di additivi, sottoposti a forte pressione con delle macchine chiamate bricchettatrici, in questo caso però si necessita di un preventivo condizionamento del materiale, la biomassa deve essere essiccata precedentemente fino a valori di umidità pari all'8-10%, in modo tale da ottenere bricchetti con un grado di umidità che può variare umidità da 8 a 15%. In generale si può dire che la densificazione della biomassa in bricchetti comporta gli stessi vantaggi e svantaggi della trasformazione

in pellet, il processo di bricchettatura determina un miglioramento delle caratteristiche fisiche della biomassa (densità, omogeneità, ecc.), una riduzione dei volumi, una riduzione dei costi di stoccaggio e trasporto e un miglioramento del comportamento durante la combustione, sono indicati per impianti di medie e grandi dimensioni, ma si prestano anche all'uso in piccoli impianti residenziali.



Figura 6: bricchette

1.6 – QUALE SCEGLIERE E PERCHÉ

In definitiva questi biocombustibili sono in grado di rispondere a molteplici esigenze, ma per essere sfruttati al pieno delle proprie potenzialità necessitano di conoscenze specifiche, che sono alla base di qualsiasi proposta di fattibilità, sia per impianti piccoli, sia medi, sia grandi. Quando si parla di microfiliera, filiere corte o autoconsumo in genere i modesti investimenti in gioco e il livello tecnologico giustificabile, rendono senza troppi dubbi vantaggioso l'impiego del cippato. Tra l'altro esso rappresenta anche il biocombustibile ottenibile tal quale da legno vergine o piante con minor facilità. Quando

la filiera energetica si affianca a prestrutturate realtà i cui residui di produzione rappresentano trucioli, segatura o polveri di legno vergine, allora la produzione di pellet e/o briquette rappresenta un ottimo investimento, rivolto alla loro commercializzazione o anche un loro impiego in impianti energetici annessi alla realtà produttiva preesistente. Il consumo spicciolo o familiare in realtà urbanizzate, senza alcun dubbio vede in questi due ultimi biocombustibili un'ottima alternativa ai combustibili fossili.

Tabella 6: sintesi dei principali pro e contro del legno sminuzzato rispetto a pellets e brichette.

Sminuzzato o cippato		Pellets e Briquettes	
Pro			
1	Maggior semplicità di applicazione nelle filiere corte ed autoconsumo	1	Omogenei e standardizzati
2	Più economico	2	Facilità di gestione e manutenzione dell'impianto
3	Minor dispendio energetico nella produzione	3	Minor volume di stoccaggio
		4	Minore umidità
Contro			
1	Scarsa uniformità nelle dimensioni	1	Più costosi
2	Maggiori costi per la gestione e la manutenzione dell'impianto	2	Maggiori difficoltà nell'applicarli alle filiere corte ed autoconsumo
3	Richiedono un volume di stoccaggio maggiore	3	Maggior dispendio energetico nella produzione
4	Difficile gestione dell'umidità		

Tabella 7: principali caratteristiche dei biocombustibili legnosi (valori riportati all'umidità massima consigliata di immissione in caldaia).

	Unità di misura	Pellet (u 12%)	Cippato (u 30%)	Briquettes (u 15%)
Lunghezza	mm	10 - 50	3-100	250-350
Diametro/larghezza	mm	6-10	7,5-35	80-120
Spessore	mm	-	1,5-10	-
Densità apparente	kg/m ³	650-780	180-450	680-850
Contenuto idrico medio (w)	%	6-12	20-30	8-15
PCI	MJ/kg	16-21	12-18	16-21
Ceneri	% in peso	0,2-1,1	0,5-5,5	0,2-1,1

1.7 - COME OTTENERE LO SMINUZZATO

Le sminuzzatrici chiamate impropriamente cippatrici, sono macchine impiegate per ridurre la materia prima legno in scaglie o minuzzoli, con dimensioni pressoché costanti e forma tendenzialmente parallelepipedica. Il termine cippatrice è un'italianizzazione del termine inglese “chipper” che a sua volta deriva da “chip”, termine sempre inglese che sta ad indicare minuzzolo, scaglietta, truciolo. Si tratta senza dubbio di un termine di largo uso nel nostro Paese per identificare queste macchine, ma si ritiene che per chiarezza linguistica in gergo tecnico - didattico debbano essere chiamate sminuzzatrici.

Le macchine sminuzzatrici sono: “macchine per ridurre il legno, generalmente tronchi o tondelli, in trucioli o strisce di dimensioni più o meno uniformi” (Bernetti et. al., 1980). Vengono definite anche come “macchine usate in alcune industrie per il taglio dei materiali in pezzi minuti, per lo più mediante lame a ghigliottina o rotanti” (Devoto, Oli, 1992).

La struttura portante ha la funzione di sostegno per l'organo di taglio e funge da supporto per le varie tipologie di trasporto impiegate. L'organo di taglio è azionato tramite una

trasmissione dall'unità motrice per mezzo di giunti cardanici, muniti di frizione, per far fronte alle frequenti ed eccessive sollecitazioni che porterebbero in forte stress tutta la struttura. L'alimentazione può essere manuale o meccanica, tramite una bocca a tronco di piramide; l'espulsione delle scaglie è affidata ad un collo d'oca.

Le macchine più grandi sono montate su rimorchi di varia grandezza, mentre quelle più piccole sono attaccate al sollevatore idraulico dei trattori. Queste possibilità danno origine ad una prima classificazione delle sminuzzatrici (Baldini, 1986): portate, trainate, semoventi.

Un'altra classificazione, molto più adottata della precedente, è quella che prende in considerazione la struttura che supporta l'organo di taglio. In base a questo principio possono essere suddivise in sminuzzatrici a disco, a tamburo e a vite senza fine (Baldini 1986, Hippoliti 1997).

La possibilità di variare la dimensione delle scaglie in funzione della utilizzazione finale del materiale, consente una vasta elasticità d'impiego a queste macchine. Quasi tutte (fatta eccezione per i modelli a vite senza fine) possono agire sulle dimensioni longitudinali delle scaglie, regolandone la lunghezza, secondo la direzione delle fibre, semplicemente variando la sporgenza dei coltelli, la lunghezza dell'incudine e la velocità di alimentazione. Lo spessore viene invece regolato dalla velocità di espulsione del materiale. In genere le scaglie sono lunghe dagli 8 ai 60 mm e con spessore non superiore a 8-10 mm. Per l'impiego energetico vengono richieste scaglie lunghe 20-25 mm, mentre per il compost 5-15 mm. Le dimensioni non sono l'unico fattore discriminante per una tipologia di sminuzzato; sono fondamentali anche parametri quali l'umidità, la specie legnosa e la composizione percentuale (foglie, rami, corteccia, legno).

I modelli attualmente più richiesti dal mercato o meglio più appetibili sembrano essere senza dubbio, viste le caratteristiche di flessibilità, quelli a disco e a tamburo. Allo stato attuale, in Italia, le sminuzzatrici a disco sono le più diffuse (Spinelli, Hartsough, 2001). Certo il nuovo mercato delle scaglie e la costruzione di nuovi modelli di sminuzzatrici a tamburo, più compatte e funzionali, sembrano far presagire, per il futuro, una maggiore diffusione di quest'ultimo modello, il quale è in grado, dimostrando quindi maggior flessibilità d'impiego, di sminuzzare anche materiale di ridotte dimensioni, come ramaglia e cimali, senza dare origine ad uno sminuzzato con forte presenza di rametti ancora non sminuzzati (bacchette). Alcune di queste macchine sono dotate di dispositivi che separano rametti e corteccia dal legno.

1.7.1 - LE SMINUZZATICI A DISCO

Le sminuzzatrici a disco montano radialmente, su un volano in acciaio (con diametro variabile da 65 cm a 200 cm), i propri coltelli, in genere da 2 a 4. A ridosso dei coltelli vi sono delle piccole fessure sul disco che consentono l'espulsione verso l'esterno del materiale sminuzzato. Le dimensioni del materiale in uscita vengono stabilite in precedenza dall'operatore, il quale le regola agendo sulla sporgenza dei coltelli e della battuta. Il disco ha un diametro minimo di 65 cm, e ruota intorno ad un asse orizzontale o inclinato di 40-45° rispetto al terreno.



Figura 7: Sminuzzatrice a disco con alimentazione manuale

Una serie di alette metalliche, solidali al disco e poste dalla parte opposta a quella dove sporgono le lame, hanno la funzione di ventole, in grado di espellere con forza le scaglie, che passando attraverso il collo d'oca, possono venire direttamente indirizzate sul mezzo di trasporto.

1.7.2 - LE SMINUZZATICI A TAMBURO

Le sminuzzatrici a tamburo sono formate da un cilindro, ruotante intorno al proprio asse longitudinale, disposto orizzontalmente, che supporta dei coltelli; questi sono incassati sulla superficie esterna del cilindro in numero di 2-4 o più e la loro sporgenza è regolabile per variare le dimensioni delle scaglie. Il diametro del tamburo varia da un minimo di 30 cm fino a 150 cm, per crescere ulteriormente nei modelli industriali più pesanti.



Figura 8: Sminuzzatrice a tamburo con alimentazione manuale e motore autonomo

Il materiale in ingresso impatta perpendicolarmente con i coltelli. Si ha così una direzione di taglio delle scaglie non proprio costante, ma variabile da perpendicolare a quasi

parallela alla direzione assiale del legno. Le scaglie sono espulse tramite una corrente d'aria generata da una ventola supplementare all'interno del carter. Il collo d'oca permette l'espulsione del materiale, consentendo così anche l'eventuale, immediato, carico.

1.7.3 - LE SMINUZZATRICI A VITE SENZA FINE O ELICA

Le sminuzzatrici ad elica o a vite senza fine hanno l'organo tagliente costituito da una spirale con bordi affilati. Essa è una grossa vite conica, con i bordi della filettatura che costituiscono la lama, in grado di ruotare intorno ad un asse orizzontale. In questo caso si ha un organo imm modificabile che non consente regolazioni di sorta, in grado di produrre scaglie di lunghezza pari al passo della vite (50-80 mm).

Il legno, sia vergine (piante o scarti delle utilizzazioni boschive) sia residuo delle prime lavorazioni, una volta giunto sulla bocca di alimentazione è spinto verso i coltelli da rulli o tappeti dentati, mossi da motori idraulici, raramente in questo caso per caduta. Solo i modelli a vite senza fine sono sprovvisti di tali organi in quanto è la stessa vite che trascina verso se il materiale.



Figura 9: Sminuzzatrice a vite senza fine con alimentazione manuale

1.8 – CARATTERISTICHE QUALITATIVE DELLE BIOMASSE

Pur essendo di natura qualitativa, questo parametro può descrivere sinteticamente e in prima approssimazione le caratteristiche fisiche ed energetiche del prodotto. Per l'uso combustibile la specie legnosa riveste però minore importanza rispetto ad altri impieghi; si possono quindi raccogliere i legnami di più comune impiego in tre gruppi omogenei:

- legni teneri;
- legni duri non resinosi;
- legni duri resinosi.

Legni teneri: di colore chiaro, contenuto energetico per unità di volume non elevato in ragione della ridotta massa volumica, elevata umidità allo stato fresco, contenuto in estrattivi resinosi o tannici ridotto. Il cippato di queste specie va bene, purché si tenga conto che a parità di volume offre un apporto energetico minore e quindi ne è prevedibile un consumo maggiore. Bisogna evitare partite provenienti da legname appena abbattuto, che possono avere un contenuto d'acqua anche superiore al 150% del peso anidro e che quindi risulta eccessivo anche per impianti predisposti per la combustione del legno umido. Fanno parte di questo gruppo i pioppi, i salici, gli ontani, le betulle, i tigli tra le latifoglie; gli abeti e i pini tra le conifere.

Legni duri non resinosi: querce, castagno, carpino, faggio, noce, robinia, frassino e altre latifoglie nobili. Tali specie hanno in genere un contenuto d'umidità che non supera il 100% allo stato fresco e quindi possono essere utilizzate subito dopo l'abbattimento per l'impiego combustibile in impianti opportunamente predisposti, anche se è preferibile una parziale stagionatura. Hanno massa volumica più elevata e quindi il cippato, a parità di volume, ha un contenuto energetico superiore rispetto alle specie precedenti. Anche il castagno, che sotto forma di legna tonda o spaccata, non è particolarmente apprezzato come legna da ardere a causa dell'elevato contenuto di tannini (sostanze antiossidanti che rendono più difficile la combustione del legno), non mostra controindicazioni da questo punto di vista quando si trova sotto forma di cippato, grazie all'elevato rapporto superficie/volume che consente un migliore contatto fra comburente e combustibile.

Legni duri resinosi: larice, douglasia e cipresso. Queste specie sono caratterizzate da un contenuto in resine mediamente elevato (fino all'8% del peso anidro), che aumentano il

potere calorifico del legno. Tali resine non presentano problemi nella combustione, se questa si svolge ad altissime temperature ed è regolata secondo rapporti stechiometrici ottimali. In caso contrario, i prodotti parzialmente incombusti che si liberano da questi estrattivi possono originare incrostazioni del focolare e delle canne fumarie, richiedendo frequenti interventi di manutenzione dell'impianto. Poiché la presenza di umidità nel legno rende più difficile la combustione, se non altro abbassando la temperatura assorbendo calore, è preferibile bruciare questo tipo di legnami quando sono almeno parzialmente stagionati.

La terminologia impiegata per questa classificazione non è corretta da un punto di vista scientifico: infatti il termine durezza è da riferirsi correttamente non alla massa volumica o densità del legno quanto alla resistenza alla penetrazione di corpi estranei e quindi ha poco a che fare con l'impiego combustibile. Tuttavia, nel linguaggio comune e nello stesso gergo tecnico-commerciale tali termini sono impiegati per attribuire una classificazione di massima delle specie legnose in base alla loro massa volumica (densità). Con l'intento di voler presentare, per un primo approccio all'argomento, una terminologia che consenta di interloquire con gli operatori del settore, avendo compreso con chiarezza i fenomeni fisici di principale importanza per l'utilizzo e commercializzazione del cippato di legno come fonte energetica, si rinuncia in questo caso al rigore terminologico, confidando che ciò possa aiutare la comprensione dei fenomeni anche ai non addetti ai lavori.

La massa volumica e l'umidità determinano il valore del contenuto energetico, parametro direttamente correlato all'impiego energetico, la cui determinazione richiede però attrezzature di laboratorio complesse. Si ricorre quindi alla sua stima per via indiretta, determinando i valori di massa volumica e umidità, per i quali è sufficiente possedere una bilancia di precisione e una stufa ventilata.

1.8.1 - MASSA VOLUMICA

La massa volumica (ρ) è definita come la massa nell'unità di volume:

$$\rho = m/v \quad [\text{kg/m}^3]$$

con:

m	massa del provino espressa in kg;
v	volume del provino espresso in m ³

La massa volumica è una proprietà di grande interesse e di rilevanza tale da condizionare le caratteristiche fisico-meccaniche, come le variazioni dimensionali e la resistenza alle diverse sollecitazioni, e influenzare quindi la qualità degli assortimenti legnosi e fisico-chimiche come il potere calorifico.

La massa volumica è una caratteristica del legno tanto importante quanto variabile, essa può variare a seconda del contenuto di umidità, poiché essa induce variazioni significative sia sulla massa che sul volume, con ripercussioni anche sulla logistica di un possibile trasporto, stoccaggio della biomassa.

Per questa ragione quando si parla di massa volumica del legno è necessario precisare a quale umidità essa viene riferita, infatti si distingue:

massa volumica allo stato fresco:

$$\rho_f = m_f / v_f$$

dove (ρ_f) è la massa volumica allo stato fresco (l'umidità supera il punto di saturazione delle pareti cellulari), in cui massa e volume sono misurati allo stato fresco;

massa volumica ad umidità normale:

$$\rho_{12} = m_{12} / v_{12}$$

dove (ρ_{12}) è la massa volumica a umidità normale, in cui la massa e il volume sono misurati a umidità normale;

massa volumica allo stato anidro:

$$\rho_0 = m_0 / v_0$$

dove (ρ_0) è la massa volumica allo stato anidro, in cui massa e volume sono misurati allo stato anidro.

Tra i principali fattori che la influenzano nel settore biomasse o meglio ancora SRF e MRF vanno citati i seguenti:

- la provenienza geografica con i relativi fattori climatici, stagionali, ereditari;
- la stazione con i relativi fattori ambientali quali la fertilità del suolo, il regime pluviometrico, l'esposizione;
- la presenza di estrattivi, contenuti in misura maggiore nel durame conferiscono una maggiore densità (Bonamini *et al.*, 1993).

La massa volumica è utilizzata per il calcolo della densità energetica (DE), questa esprime il contenuto energetico di un'unità di volume del legno inteso come metro cubo

massiccio espresso in mc quindi si parla di densità energetica massiccia del legno (B. Hellrigl, 2006), questo però è un parametro poco impiegato nella xiloenergetica e nel commercio del legno per energia perché la sua determinazione per i diversi assortimenti sarebbe troppo laboriosa, di difficile o praticamente di impossibile esecuzione, per ovviare a questi problemi viene utilizzato il metro stero (mst) con il conseguente calcolo della densità energetica sterica (MJ/mst).

1.8.2 - DENSITÀ APPARENTE (BULK DENSITY)

Un'importante caratteristica della biomassa è la sua densità apparente (bulk density), sia come materia prima che come prodotto finale. L'importanza della bulk density è dovuta soprattutto in relazione ai costi di trasporto e di immagazzinamento, importante per i requisiti di stoccaggio del combustibile, ma non solo, per il dimensionamento del sistema di movimentazione dei materiali e di come il materiale probabilmente si comporterà successivamente nella trasformazione termochimica o nella trasformazione da materia prima a carburante. Il legno come materia prima possiede un costo di trasporto e stoccaggio, se prendiamo un altro tipo di biomassa come può essere la paglia per possedere la stessa competitività in riferimento alla bulk density ha bisogno di essere imballata o essere trasformata in pellet con ovvio conseguente aumento dei costi (McKendry, 2002).

1.8.3- UMIDITÀ DEL LEGNO

Si definisce umidità del legno u il rapporto percentuale tra il peso dell'acqua contenuta in un qualsiasi pezzo di legno e il peso di quest'ultimo:

$$u = [(p - p_0) / p_0] \%$$

con:

p	peso umido
p_0	peso anidro

Sebbene qualche autore faccia una netta distinzione tra acqua libera e acqua collegata alle pareti cellulari, chiamando la prima "Acqua contenuta nel legno", e la seconda "umidità

del legno”, di solito si indica il complesso di tutta l’acqua presente nel legno con il semplice termine di “umidità”.

Facendo riferimento alle norme di unificazione nazionali e internazionali l’umidità viene espressa in percentuale del peso del legno assolutamente secco, facendo notare che nell’industria della carta e delle cellulosa, nonché talvolta nella pratica commerciale, l’umidità viene espressa in percentuale del legno umido.

$$u = [(p - p_0) / p] \%$$

All’interno del legno il contenuto di umidità assume valori variabili, in funzione dello spazio e del tempo. La variazione spaziale è dovuta al movimento dell’acqua, il quale è governato da leggi fisiche relative a fenomeni di tipo assai diverso quali ad esempio la permeabilità, l’adsorbimento, la diffusione, l’osmosi, ecc.

In generale si può enunciare il principio che l’acqua si muove all’interno del legno, con velocità finita, tendendo a fluire più o meno rapidamente dalle zone più umide a quelle meno umide.

Una volta tagliata la pianta e allestito il materiale, l’umidità del legno tenderà ad equilibrarsi con quella dell’ambiente e quindi varierà in funzione anche del periodo di stagionatura e delle condizioni di conservazione. Così, in un primo tempo viene perduta l’acqua contenuta allo stato liquido nelle cavità cellulari (acqua libera di imbibizione), successivamente viene rilasciata anche una parte dell’acqua legata con legami polari alle pareti cellulari (acqua di saturazione) (Bonamini *et al.*, 1993).

Per indicare il tenore idrico del legno, generalmente esprimendolo in termini percentuali, esistono due criteri che si distinguono per il tipo di peso del corpo legnoso a cui viene rapportato il peso dell’acqua contenutavi. Tale peso del corpo legnoso può essere quello dello stato idrico in cui si trova, si ha così il contenuto idrico detto anche “umidità sul peso umido” oppure quello della condizione di assoluta assenza di acqua tecnicamente chiamata umidità e spesso detta “umidità sul secco”, il primo è di corrente impiego per il calcolo del potere calorifico ed è la misura impiegata per il commercio del legno da energia mentre il secondo è impiegato nella tecnologia del legno quindi per il calcolo delle variazioni della massa volumica e della densità sterica del legno (Hellrigl, 2006).

1.8.4 - IL POTERE CALORIFICO

La quantità di calore prodotta dall'unità di massa di un determinato combustibile, quando questo brucia completamente, rappresenta il potere calorifico di quel combustibile.

Il parametro chiave della xiloenergetica è dato dal potere calorifico inferiore (*PCI*) che esprime la quantità di energia termica ricavabile dalla combustione completa di 1 chilogrammo di legno se l'acqua liberata nella combustione è rimasta allo stato di vapore, viene espresso in MJ/Kg ed il suo andamento è decrescente in modo lineare all'aumentare del contenuto idrico della sostanza legnosa mentre secondo una curva concava a raggio di curvatura crescente all'aumentare dell'umidità (Hellrigl, 2006).

Nella xiloenergetica è meno impiegato il potere calorifico superiore (*PCS*), questo rappresenta la quantità di calore, espresso sempre in MJ/kg, sviluppato dalla combustione, a pressione atmosferica, di un kg di combustibile, considerando nel prodotto della combustione l'acqua allo stato liquido, si deduce che il *PCI* assume sempre valori inferiori a quelli del *PCS* poiché si riferisce a materiale umido (Giordano, 1980; Hellrigl, 2006). Il potere calorifico nel corso della stagionatura ha un andamento crescente lineare, questo è dovuto in massima parte all'aumento della concentrazione legnosa anidra e solo in piccola parte alla diminuzione della spesa energetica per l'evaporazione dell'acqua (Hellrigl, 2006). I valori medi riscontrabili del potere calorifico allo stato anidro delle diverse specie botaniche variano relativamente poco, le differenze sono imputabili alla differenza di composizione della loro sostanza legnosa quindi dal contenuto di lignina, cellulosa, emicellulosa e resine. La cellulosa possiede un *PCS* medio di circa 16.7 kJ/g contro 25.1 kJ/g della lignina. Legni ricchi di cellulosa, come il pioppo e il salice, e le biomasse ligno-cellulosiche di origine agro-industriale presentano, perciò, un minor valore di *PCS*. Le altre sostanze accessorie ad alto contenuto energetico tra cui vi è la resina, che possiede un *PCS* di circa 33.5 kJ/g, determinano un incremento energetico delle biomasse che le contengono. Il *PCS* dipende anche dalle caratteristiche qualitative di sostanze minerali contenute nelle cellule che influenzano la trasmissione del calore e dal contributo in ceneri (Giordano, 1980). Per i combustibili legnosi densificati (pellet e bricchette) si può ammettere che, in assenza di aggiunte di densificanti, il loro potere calorifico sarà quasi del tutto identificato a quello del legno (o delle mescolanze di legni) che li compone (Hellrigl, 2006).

1.9 – GLI STANDARD QUALITATIVI DELLO 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:

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

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 del cippato 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. Assumendo un ruolo fondamentale nella contrattazione tra domanda e offerta, permettendo di specificare il contenuto energetico del combustibile, sulla base della qualità determinata.

Secondo la Norma UNI EN 14961: 2010, il cippato 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.

La “qualità” del cippato 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 al cippato (Spinelli *et al.* 2004). Per caratterizzare la maggiore o minore “qualità” di una partita di cippato 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, (fig. 1) 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, 2007). 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 cippato verso una logistica di filiera efficace e remunerativa.

1.9.1 – 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 (Hartmann *et al.* 2006; Paulrud and Nilsson 2004; Suadicane and Gamborg 1999), 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 del cippato 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.

La specifica tecnica UNI CEN/TS 15149: 2006 stabilisce 4 classi dimensionali (Tab. 8):

Tabella 8: classi dimensionali dello 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 sovrammisura 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 cippatrice (Spinelli et al. 2004), dipende dal tipo di materiale ligneo a disposizione, rami o fusto, dalla specie legnosa dallo stato delle lame e dal tipo di griglia o dispositivo di calibrazione utilizzato (Jensen et al. 2004).

- Il tipo di materiale: Se alimentate con tronchi sramati, le cippatrici ben progettate producono una miscela di cippato 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, 2007). Cippando piante intere o ramaglie invece questi risultati potrebbero cambiare, e la qualità del cippato potrebbe ridursi, in seguito ad un prevedibile aumento della percentuale di particelle sovrammisura e di polvere.

- La specie legnosa: può influenzare le dimensioni delle scaglie, studi recenti dimostrano che il cippato prodotto da alcune latifoglie contiene una percentuale più elevata di particelle di piccole dimensioni, indipendentemente dal tipo di cippatrice. 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, 2007).
- L'usura dei coltelli: condiziona sia la qualità del cippato che la produttività della cippatrice. Come un coltello perde l'affilatura, la cippatrice tenderà a frantumare il legname piuttosto che a tagliarlo, producendo una maggior quantità di polvere e di particelle sovrammisura. Allo stesso tempo, il legno avanzerà più lentamente entro la cippatrice, con il risultato di una pezzatura generalmente più piccola. La tendenza alla formazione di scaglie sovrammisure può essere determinata dalla presenza, nel materiale di origine, di rami flessibili, una caratteristica che si riscontra soprattutto nelle latifoglie (Alakangas, 2005). 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 cippatura (Nati et al. 2008).
- Dispositivi raffinatori: la maggior parte delle cippatrici possono essere dotate di particolari dispositivi, che agevolano la produzione di un materiale regolare. Diversi tipi sono usati nelle cippatrici a disco e in quelle a tamburo. Tali dispositivi servono a tagliare nuovamente il cippato troppo grossolano in tal modo le particelle sovrammisura vengono trattenute fino a che non sono state ridotte nelle dimensioni prefissate. In base alle esigenze dell'utenza finale, possono essere montate griglie di diverse misure, per produrre cippato più o meno fine.

1.9.2. – IL TENORE IDRICO

Il contenuto di umidità è forse il parametro qualitativo più importante per un combustibile, che dovrebbe essere il più asciutto possibile. 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, 2007). 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. Naturalmente abbassando il tenore idrico, aumenta il valore energetico, migliora l'efficienza degli impianti, e si rende più economico il trasporto del cippato.

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. Il cippato 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 (Spinelli, Magagnotti, 2007), 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 cippato 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 dal cippato 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).

1.9.3. – IL CONTENUTO DI FIBRE E CENERI

Il contenuto di fibra indica la quantità di legno presente nel cippato 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 è emerso che il contenuto di fibra nel cippato si aggira mediamente sull'80%, e scende al 70% per le ramaglie di latifoglie

(Spinelli e Magagnotti, 2007). 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 (Tab. 9).

Tabella 9: Contenuto di ceneri per tipo di biocombustibile legnoso (Vesterinen, 2003)

Combustibile legnoso	Contenuto di ceneri db (%)
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

Soprattutto le caratteristiche delle ceneri cambiano a seconda delle condizioni del terreno, del deposito di metalli pesanti e dei fertilizzanti utilizzati.

1.9.4. – IL POTERE CALORIFICO DELLO SMINUZZATO

Il potere calorifico di un combustibile, espresso in J/kg, è l'energia termica massima

sviluppiabile 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, cippato 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 vapore 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.

1.9.5. – LA MASSA VOLUMICA APPARENTE DELLO SMINUZZATO

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 del cippato, 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 il cippato, evidentemente superiore.

L'unità di misura comunemente usata è il kg/m^3 . La massa volumica apparente dipende sia dalla massa volumica delle particelle che compongono il cippato, sia dalle loro dimensioni, che influenzano il grado di costipazione del cumulo. Per legname fresco di taglio, la densità del cippato ottenuto può variare fra 150 e 450 kg/m^3 . I valori inferiori si riscontrano nel caso di legno dolce come pioppo, abete, pino strobo e di particelle di grandi dimensioni; quelli più elevati sono tipici del legno duro (faggio, quercia, carpino) e di particelle minute. La densità varia anche in funzione dell'umidità del materiale legnoso: ad esempio cippato di pino strobo fresco di taglio, composto da particelle della lunghezza di 20 mm e avente umidità media del 180% (rif. al peso anidro), ha una densità media pari a 310 kg/m^3 , che si riduce a circa 150 kg/m^3 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 m^3 tondo corrisponde a circa 2 msr di tronchetti e a circa 3 msr di cippato (AA.VV., 2011).

1.10 - LE TECNOLOGIE DI CONVERSIONE

Il contenuto calorico delle biomasse può essere sfruttato attraverso molteplici processi di conversione, questi hanno la capacità di convertire la materia prima in combustibili solidi, liquidi o gassosi. In base al tipo di combustibile prodotto le applicazioni energetiche

possono variare, dalla produzione di energia elettrica o termica (riscaldamento, raffreddamento, essiccazione), all'elettrica e termica insieme in cogenerazione, alla produzione di combustibili per i mezzi di trasporto.

Si distinguono processi biochimici e termochimici per la conversione delle biomasse in vettori energetici, sono alcune delle caratteristiche chimico-fisiche della biomassa che determinano il tipo di processo da adottare, ovvero l'umidità e il rapporto C/N (McKendry, 2002).

Nel caso dei processi di conversione biochimica l'energia è ricavata grazie all'azione di enzimi, funghi e micro-organismi che creano in particolari condizioni reazioni chimiche nella biomassa. Le biomasse idonee a questo tipo di processi sono quelle dove l'umidità risulta superiore al 30% e il cui rapporto C/N sia inferiore a 30, sono un esempio le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti agricoli come le foglie e gli steli di barbabietola, patate ecc., i reflui zootecnici ma anche la frazione di biomassa stoccata nelle discariche controllate dei rifiuti urbani. I processi termochimici si basano sull'azione termica, questa attiva una serie di reazioni chimiche che hanno come risultato finale la liberazione di energia termica o eventualmente energia elettrica. In questo genere di processi l'energia viene ricavata dalla biomassa tramite l'azione del calore, generalmente necessitano di una materia prima caratterizzata da un contenuto di umidità inferiore al 30% e da un rapporto C/N maggiore di 30. Le biomasse cellulosiche impiegate in questi casi sono legna e i suoi derivati, gli scarti agro- industriali come le paglie di cereali, fusti e foglie di colture dedicate (canna comune, sorgo, miscanto, ecc.) ed infine gli scarti e residui di lavorazioni agroindustriali (lolla, pula, gusci, noccioli, sanse, ecc.). In tabella 10 vengono fornite, per le principali biomasse vegetali utilizzabili in Italia a fini energetici, le caratteristiche produttive, i rapporti C/N e i valori dell'umidità alla raccolta. Si ricorda che l'umidità, contenuta nei tessuti vegetali, al momento dell'impiego, penalizza l'attitudine alla combustione della stessa biomassa, in quanto riduce la quantità di sostanza secca e causa lo "spreco" di parte del calore sviluppato durante la combustione per l'essiccazione completa.

Tabella 10: Produzioni medie e rapporti C/N del prodotto principale e del residuo per alcune colture italiane

Specie	Prodotto	Umidità media alla raccolta [%H ₂ O]	Produzione media di tal quale [t/ha]	Produzione media di sostanza secca [t/ha]	Rapporto C/N
Grano tenero	granella	12÷16	3,0÷4,0	2,5÷3,5	15÷24
	paglia	12÷15	2,1÷2,8	1,8÷2,4	118÷129
Grano duro	granella	10÷14	1,5÷2,5	1,3÷2,1	17-26
	paglia	10÷13	1,2÷2,0	1,1÷1,7	110-130
Riso	granella	18-30	4,5-5,5	3,6-3,8	32-38
	paglia	20-30	4,0-5,0	3,2-3,5	60-65
Mais	granella	20-30	6,0-7,0	4,8-4,9	23-29
	culmi	55-65	9,0-10,5	3,7-4,0	60-64
	tutoli	40-50	1,8-2,1	0,9-1,3	70-80
Barbabietola	radici	73-78	40,0-50,0	10,0-13,0	45-65
da zuccheri	foglie	75-80	16,0-20,0	3,2-4,0	13-17
Patata	tuberi	72-80	10,0-25,0	2,5-6,0	29-36
	steli	55-65	5,0-10,0	2,2-3,5	18-22
Girasole	acheni	14-20	1,5-2,5	1,3-2,2	45-58

In tabella 11 viene specificata la composizione chimica di alcuni prodotti legnosi, sottoprodotti colturali e scarti di lavorazione, e riportato il corrispondente Potere Calorifico Inferiore (PCI).

Tabella 11: Sottoprodotti colturali e scarti di lavorazione: proprietà chimico-fisiche

Materiale	Umidità	C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]	Cl [%]	Ceneri [%]	PCI [MJ/kg s.s.]
Paglia frumento	10-20	43,2	5	39,4	0,61	0,11	0,28	11,4	16,49
Paglia orzo	10-20	39,92	5,27	43,81	1,25	-	-	9,75	16,24
Paglia riso	20-30	41,78	4,63	36,57	0,7	0,08	0,34	15,9	15,34
Stocchi mais	50-60	43,65	5,56	43,31	0,61	0,01	0,6	6,26	16,52
Tutoli mais	40-50	46,68	5,87	45,46	0,47	0,01	0,21	1,4	17,58
Residui potatura vite	45-55	46,59	5,85	43,9	0,83	0,04	0,08	2,71	17,84
Residui potatura olivo	50-55	-	-	-	-	-	-	-	18,4
Residui potatura frutteti	35-45	-	-	-	-	-	-	-	18

Legna abete bianco	40-50	49	5,98	44,75	0,05	0,01	0,01	0,2	18,74
Legna pioppo	40-50	48,45	5,85	43,69	0,47	0,01	0,1	1,43	18,19
Legna quercia	40-50	49,98	5,38	43,13	0,35	0,01	0,04	1,61	18,33
Lolla riso	10-15	40,96	4,3	35,86	0,4	0,12	0,03	18,35	15,27
Gusci noce	10-20	49,98	5,71	43,35	0,21	0,05	0,04	0,71	19,02
Sanse esauste	10-15	43,73	5,29	37,82	-	0,64	-	12,52	15,5
Carta	15-20	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	-	6	18

Le tecnologie di conversione energetica delle biomasse più valide, ovvero quelle che con i minori costi di conversione energetica si ottengono maggiori rendimenti, sono le seguenti:

La combustione diretta, che permette la trasformazione dell'energia chimica intrinseca alla biomassa in energia termica, in pratica avviene attraverso reazioni fortemente esotermiche tra una sostanza combustibile (biomassa) e una sostanza comburente (ossigeno), in pratica la biomassa subisce inizialmente una essiccazione, con l'aumentare della temperatura si innescano i processi di pirolisi e gassificazione e infine la combustione (figura 10). Il calore prodotto viene utilizzato per il riscaldamento domestico, civile e industriale o per la generazione di vapore per la produzione di energia elettrica. La combustione diretta è il processo più utilizzato e tecnologicamente più sviluppato, anche se si cerca di progettare sistemi sempre più efficienti e con minore impatto ambientale, quest'ultimo dovuto in particolare dalla natura del combustibile solido, ovvero la sua composizione chimica, il contenuto in sostanze volatili, la disomogeneità fisica, il contenuto e il comportamento delle ceneri in quanto la biomassa si decompone e volatilizza lasciando un residuo carbonioso costituito in maggioranza da composti minerali inerti, appunto le ceneri.

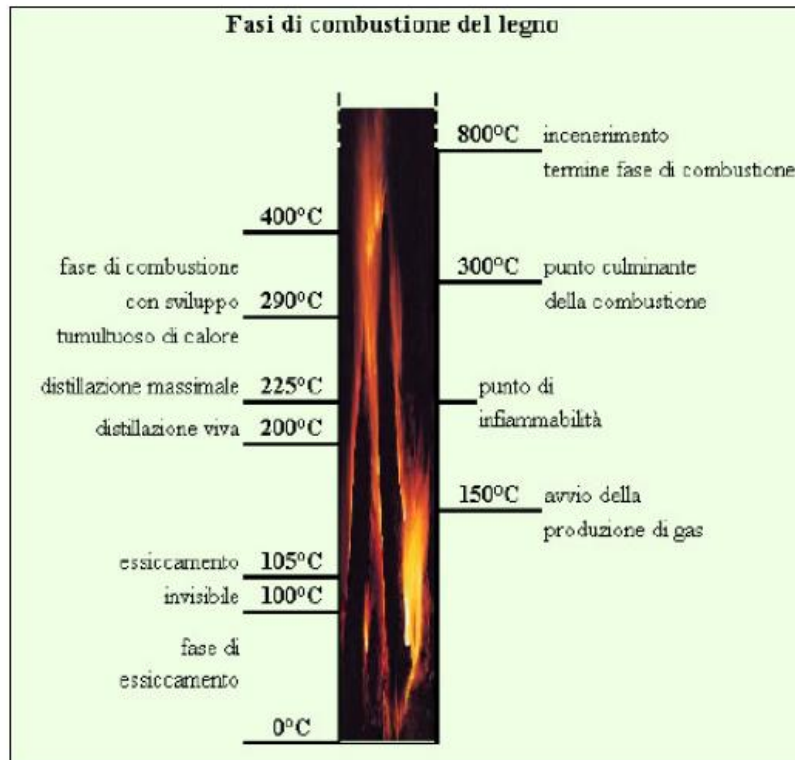


Figura 10: Fasi della combustione alle diverse temperature.

Le tecnologie di combustione più diffuse sono le seguenti:

Combustione a griglia (fissa o mobile): le caldaie di questo tipo godono di notevoli vantaggi in termini di semplicità, economicità ed affidabilità di funzionamento, possono utilizzare combustibili di diversa tipologia, con pezzatura disomogenea, con un grado di umidità ed un contenuto di ceneri elevati, per questo però non hanno rendimenti eccellenti (60-70%) e richiedono eccessi d'aria piuttosto elevati (75-80%) per una completa combustione. Le griglie fisse sono utilizzate per impianti di piccola taglia, le griglie mobili sono generalmente adottate in impianti industriali, questo perchè facilitano la movimentazione, il rimescolamento del combustibile e la rimozione delle ceneri.

Combustione in letto fluido (bollente o circolante): la camera di combustione è parzialmente riempita di materiale inerte (sabbia o allumina, calcare o dolomite per abbattere gli inquinanti) che viene fluidificato dall'aria di combustione primaria, in modo da costituire il letto bollente o, nel caso di maggiore velocità dell'aria e di trascinamento del materiale, il cosiddetto letto ricircolato, il quale viene recuperato e reimpresso nella camera di combustione. Il combustibile è costituito da diversi materiali carboniosi

‘difficili’ con elevata percentuale di umidità (superiore al 40%) quali ligniti, torbe, rifiuti solidi urbani selezionati, fanghi di varia natura.

Combustione a tamburo rotante: la combustione avviene in una camera costituita da un cilindro metallico in rotazione lenta, leggermente inclinato per l’avanzamento del materiale. La biomassa utilizzata come combustibile può essere solida, ma anche liquida, fanghi, fusti, senza necessità di particolari pretrattamenti, con caratteristiche termofisiche particolarmente povere e con elevati carichi di inquinante per questa elasticità nell’alimentazione sono adatti all’incenerimento dei rifiuti industriali.

Combustione a doppio stadio: in pratica in una prima camera si ha la gassificazione e la pirolisi della biomassa poi in una seconda camera avviene la combustione e il trasferimento del calore al fluido termovettore.

La trasformazione in combustibili liquidi delle biomasse coltivate, le oleaginose per la produzione di biodiesel tramite l’estrazione degli oli e conversione chimica degli stessi in miscele di esteri metilici, e le colture zuccherine per la produzione di etanolo via fermentazione. In Europa, le principali piante oleaginose impiegabili per tale scopo sono la colza e il girasole.

Produzione di biogas, la componente organica viene degradata mediante fermentazione anaerobica liberando l’energia chimica in essa contenuta sotto forma di biogas, la materia prima impiegata generalmente sono i reflui zootecnici, civili o agroindustriali. Il biogas prodotto è utilizzato come combustibile per caldaie a gas, per produrre calore, per motori a combustione interna o per produrre energia elettrica. In questo tipo di tecnologia il ruolo energetico riveste un ruolo complementare rispetto a quello più propriamente ambientale.

Produzione di gas combustibile, questa avviene tramite la gassificazione di legno, biomasse lignocellulosiche coltivate, residui agricoli e rifiuti solidi urbani, in pratica consiste nell’ossidazione incompleta della biomassa in ambiente ad elevata temperatura ($900\div 1.000^{\circ}\text{C}$). Si possono ottenere elevati rendimenti di conversione energetica nel caso in cui i processi di gassificazione vengono accoppiati a cicli combinati.

Il processo di gassificazione si realizza in 3 fasi:

- nella prima fase avviene l’essiccazione per ottenere la disidratazione del materiale;
- nella seconda fase di pirolisi in cui si ottiene una parziale “distillazione” del legno;
- infine la terza fase di gassificazione in cui i prodotti della pirolisi reagiscono con l’agente gassificante dando origine a vari prodotti.

Il prodotto risultante è un gas combustibile denominato gas di gasogeno o syngas caratterizzato da un potere calorifico inferiore (PCI) variabile (valori intermedi attorno a 10.000 kJ/Nm³). Questa tecnologia è ancora in fase di sperimentazione e presenta diverse problematiche.

1.10 - LA FILIERA LEGNO - ENERGIA

La filiera legno-energia è l'insieme dei processi di trattamento della biomassa per fini energetici, partendo dalla produzione, successivamente alla riduzione del legno in materiale idoneo alla trasformazione energetica, al trasporto, stagionatura fino al conferimento all'impianto termico e conversione in energia. Tutte le persone, società o cooperative che intervengono in queste attività sono operatori della filiera.

Quando la filiera legno-energia si sviluppa a livello locale, la quale convive con il territorio e considera gli aspetti ambientali si definisce corta, si tratta di biomassa prodotta *"...entro il raggio di 70 km dall'impianto di produzione dell'energia elettrica. La lunghezza del predetto raggio è misurata come la distanza in linea d'aria che intercorre tra l'impianto di produzione dell'energia elettrica e i confini amministrativi del Comune in cui ricade il luogo di produzione della biomassa stessa come individuato da un'ulteriore tabella allegata al decreto"* artt. 9 e 10 del Dlgs n.102/2005.

La filiera legno-energia può dare un'adeguata remunerazione valorizzando le biomasse legnose locali quando l'uso energetico del legno avviene in impianti di piccola e media dimensione, questo può avvenire seguendo uno dei tre modelli seguenti di filiera (ARSIA,2009):

Filiera dell'autoconsumo, l'impianto termico è alimentato con la biomassa autoprodotta dal proprietario attraverso l'utilizzazione dei soprassuoli gestiti. La produzione di energia termica di questo tipo di filiera è destinata esclusivamente al riscaldamento degli ambienti lavorativi e dell'abitazione dell'imprenditore.

Filiera della vendita della biomassa, nel territorio sono presenti impianti di piccola o media taglia alimentati con biomassa di provenienza locale di imprese agroforestali in forma singola o associata, queste collocano sul mercato locale la biomassa prodotta in eccesso rispetto all'autoconsumo.

Filiera della vendita del calore (legno-energia contracting) l'impresa agroforestale non si limita semplicemente a fornire la biomassa, ma realizza l'impianto termico e vende calore

alle utenze pubblico/private. L'impresa agroforestale in questo tipo di filiera vende direttamente l'energia alle utenze, massimizzando la remunerazione della sua attività.

Si possono distinguere altri tipi di filiera che non sono a livello locale, nella filiera lunga il produttore ed il consumatore non sono direttamente connessi, il profitto si concentra nella fase terminale senza nessuna ricaduta sul bilancio dell'agricoltore, al contrario nel caso in cui partecipasse al profitto generato nella fase finale la filiera viene detta integrata.

All'interno delle filiere corte si inseriscono quindi le microfiliere di autoconsumo per la produzione di energia termica e acqua sanitaria destinata al fabbisogno di locali con volumetrie ridotte. Questa tipologia di filiera ben si adatta alle necessità di aziende agrarie, zootecniche o a vocazione serricola. In sintesi il modello di microfilaria è applicabile in una qualsiasi azienda agroforestale che possa garantire il reperimento di biomassa da boschi esistenti o abbia disponibilità di terreni idonei per la costituzione di piantagioni dedicate. Naturalmente la filiera può essere alimentata anche da scarti di potature di aziende vicine, o da scarti di segherie, sempre che si trovino nelle vicinanze.

1.11 - OBIETTIVO DELLO STUDIO

Il presente lavoro ha avuto lo scopo di analizzare alcuni parametri relativi ad analisi fisico-energetiche di materiale legnoso proveniente da diverse tipologie di specie arboree idonee alla produzione di biomassa utilizzabile nei diversi processi tecnologici di conversione energetica. Le caratteristiche esaminate, ovvero composizione macroscopica, distribuzione granulometrica, densità bulk (db), potere calorifico, contenuto in ceneri ed analisi ultima, influenzano enormemente la qualità e la convenienza economica delle scelte di utilizzo della biomassa.

La caratterizzazione energetica è stata condotta su biomasse lignocellulosiche di specie provenienti da Short Rotation Forestry (SFR) con diverso turno di ceduzione (2 anni e 3 anni), piante intere da diradamenti da boschi di conifere (*Pinus* spp. and *Picea abies* L.), materiale ritratto da interventi di utilizzazioni forestali in boschi di latifoglie (*Quercus* spp. and *Fagus sylvatica* L.) ed infine biomasse residuali provenienti da scarti di potature da agrumeti.

I cloni di pioppo (*Populus* spp.) analizzati provenienti da *Short Rotation Coppice* (SRC, impianti sottoposti a turno di ceduzione biennale) sono 5, il clone AF2, AF6, Monviso, Limatola e Muur. Le piante intere provenienti da operazioni di primo diradamento

sottoposte alla sminuzzatura appartengono alle specie di *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller, *Pinus pinaster* Miller e *Picea abies* L per quanto riguarda le conifere, mentre *Quercus* spp. and *Fagus sylvatica* L. per quanto riguarda le latifoglie. Nel caso delle biomasse residuali provenienti dagli scarti di potature si sono prese in esame quelle ottenute da agrumeti in Sicilia, con particolare riferimento agli scarti delle potature delle coltivazioni di arance per capire se le biomasse residuali possono contribuire alla disponibilità di biomasse per l'energia.

Le ricerche sono state estese a diverse specie, diversi sistemi di coltivazione e piantagioni dedicate alla produzione di biomassa legnosa, in quanto sono un ottima fonte di approvvigionamento di materiale a basso costo, anche se in alcuni casi con caratteristiche energetiche non ottimali, ma bisogna considerare che le analisi vengono sempre condotte tenendo conto dell'intero scenario quindi delle produzioni di massa, dei costi e degli impatti ambientali. Importante quindi risulta studiare la totalità del sistema di produzione di energia da biomasse, non concentrarsi esclusivamente sull'impianto di conversione di energia ma anche sull'approvvigionamento delle biomasse, dei flussi di gas serra e l'utilizzo finale dell'energia.

Nel presente lavoro nella prima parte si è introdotta la situazione energetica collegata direttamente ai cambiamenti climatici nel contesto internazionale e nazionale, fondamentale in quanto si inseriscono i temi legati allo sfruttamento delle biomasse. Successivamente si passa alla descrizione delle biomasse, alle loro caratteristiche e tecnologie di conversione per la produzione di energia. Si procede poi delineando le specie arboree studiate, esponendo materiali e metodi impiegati, sulle modalità di calcolo e di misura impiegate per analizzare i parametri sopracitati, e riportando i risultati e le relative conclusioni.

2. COLTURE IN ESAME

2.1 - LA SHORT ROTATION FORESTRY (SRF)

Tra le principali alternative per sostituire i combustibili fossili in Europa la *Short Rotation Forestry* (SRF), ovvero la coltivazione di specie arboree a rapido accrescimento e a turno breve (2-5 anni), era stata considerata tra le più promettenti (Ledin and Willebrand, 1995; Hall and House, 1994). Considerazioni effettuate in seguito alle previsioni che si fecero sul futuro dello sviluppo dell'agricoltura in Europa che una percentuale considerevole dei campi agricoli presenti, prati e pascoli non sarebbero più stati coltivati in modo intensivo per la produzione di colture per alimenti e foraggi (Makeschin, 1999), ma che una parte di questi sarebbe stata impiegata per la sostituzione dei combustibili fossili mediante le fonti rinnovabili, come la biomassa. Una vasta letteratura ha previsto che in futuro le piantagioni di bio-energia diverranno la più importante fonte di biomassa per l'energia su scala globale (Berndes et al., 2003), queste colture legnose a corta rotazione per la produzione di materia prima lignocellulosica per la pasta, per le industrie del legno e di energia sono conosciute con diverse denominazioni *Short Rotation Forestry* (SRF) o *Energy Forestry* in Svezia, *Short Rotation Intensive Culture* (SRIC) in Nord America, and *Short Rotation Coppice* (SRC) in Gran Bretagna (Figura 11).

Le motivazioni del progressivo sviluppo delle coltivazioni dedicate di specie legnose a corta rotazione sono diverse, come i benefici ambientali in quanto efficace strategia per contrastare i cambiamenti climatici tramite lo stoccaggio di carbonio nel suolo e la produzione di biomassa utilizzata per la sostituzione dei combustibili fossili, questa tecnica permette di ottenere quantità elevate di materia ligno-cellulosica in breve tempo, in turni che possono essere di 1 a 5 anni. La pioppicoltura da legno tradizionale ha un ciclo di produzione più lungo, il taglio avviene una sola volta dopo circa 15 anni mentre nella SRF si utilizza il metodo della ceduzione, il taglio dei fusti viene effettuato a pochi centimetri dalla base ad intervalli periodici brevi a seconda del tipo di impianto, così ad ogni taglio le piante emettono nuovi germogli dalla ceppaia che vengono tagliati nel successivo turno. Il ciclo di vita totale di un impianto di SRF è di circa 10-12 anni in cui si possono effettuare diversi turni di taglio. Rispetto ai pioppeti tradizionali nella SRF la

densità di impianto è molto maggiore e l'utilizzo di materiale di propagazione selezionato permette di sopportare numerosi cicli di taglio, la ricerca sul miglioramento genetico ha permesso di selezionare cloni proprio per questo uso specifico. Le specie prese in considerazione per la SRF sono state il salice in Europa settentrionale e occidentale, il pioppo nel nord e centro Europa, la Robinia nella regione mediterranea e Eucalyptus nella penisola iberica e parte della Francia meridionale (Mitchell et al., 1999).



Figura 11: Immagine dell'impianto SRF

L'interesse ed i primi approfondimenti in Italia sulle culture dedicate a destinazione energetica iniziarono verso la prima metà degli anni '90 con il progetto PRISCA del MiPAF e con alcune esperienze finanziate principalmente da Enel (Piccioni et al., 2006). In queste occasioni iniziarono le sperimentazioni agronomiche sulla SRF di pioppo nei differenti areali italiani per la messa a punto dei principali elementi della tecnica di impianto, di conduzione e difesa, di raccolta e stoccaggio (Piccioni et al., 2006), ricerche per restringere il campo a quelle specie che per produttività, adattabilità alle diverse condizioni ambientali e semplicità di gestione risultassero le più idonee nei diversi ambienti italiani, insieme ad una ricerca sul miglioramento genetico con lo scopo di

selezionare cloni di pioppo sempre più idonei alle caratteristiche della gestione di una SRF. il miglioramento genetico ha fatto passi da gigante nella selezione, in particolare per il pioppo, di cloni sempre più produttivi e la meccanizzazione ha trovato soluzioni tecniche e di conseguenza economicamente vantaggiose, sia per la costituzione della piantagione che per la sua raccolta (Picchio et al., 2004).

2.1.1 - IL PIOPPO

Il genere *Populus* (pioppo) è compreso insieme al genere *Salix* (salice) nella flora italiana nella famiglia delle Angiosperme delle Salicaceae. La tassonomia di questa famiglia è molto complessa, il sistema di Cronquist pone la famiglia nell'ordine delle Salicales con soli 3 generi (*Salix*, *Populus* e *Chosenia*) e circa 350 specie, mentre la classificazione filogenetica dell'APG espande moltissimo i limiti delle Salicaceae includendo 57 differenti generi.

Il *Populus* è un genere di piante arboree che può raggiungere i 30 m di altezza, in Italia vegetano spontanee 4 specie che possono essere distinte per i diversi caratteri delle foglie, il Pioppo nero (*P. nigra*), il Pioppo bianco (*P. alba*), il Pioppo tremolo (*P. tremula*), il Pioppo gatterino (*P. canescens*). V Sono alberi a rapido accrescimento, necessitano di conseguenza di molta luce, prediligono terreni fertili e umidi ma senza ristagno d'acqua, per questo vegetano principalmente lungo le sponde di corsi d'acqua, ai margini dei boschi, non sono alberi molto longevi anche se in natura il pioppo può arrivare a vivere fino a 200-400 anni.

Le principali caratteristiche che rendono il pioppo una delle specie più idonee alle colture dedicate di S.R.F. sono la possibilità di effettuare elevate densità di impianto, che può superare le 7000 piante ad ettaro, la straordinaria e rapida ricrescita dopo il taglio e l'elevata rusticità che ne garantisce l'adattabilità alle più disparate condizioni pedoclimatiche.

L'avanzata e costante ricerca agronomica ha consentito nel corso degli ultimi anni l'individuare di ibridi di pioppo specializzati per le colture per la produzione di biomassa per uso energetico, questi ottenuti dall'incrocio di diverse specie di pioppi provenienti da tutto il mondo. Le caratteristiche che si vanno a ricercare tramite la selezione sono un'alta resa produttiva, mancanza di lavorazioni colturali e assenza di concimazione e trattamenti fitosanitari.

A parte diversi cloni selezionati nell'ambito delle specie botaniche, la pioppicoltura si basa soprattutto sugli ibridi euroamericani (gruppi dei pioppi canadesi e dei pioppi caroliniani) ma anche su numerosi altri ibridi ottenuti non solo fra specie della stessa sezione o di sezioni diverse (ibridi semplici) ma anche reincrociando ibridi con specie (parentali e non) o con altri ibridi (ibridi multipli), generalmente, *P. x euramericana* (l'ibrido fra *P. deltoides* e *P. nigra*), più raramente, *P. x interamericana* (l'ibrido fra *P. deltoides* e *P. trichocarpa*) e *P. deltoides*.

Per gli aspetti morfologici e le esigenze ecologiche si rinvia a testi specializzati. (Gellini, Grossoni, 1997).

I cloni utilizzati nella costituzione delle piantagioni dedicate alla produzione di biomassa analizzati in questo lavoro già iscritti o in via di iscrizione al Registro Nazionale dei Cloni Forestali provengono da prove sperimentali sulla SRF, allestite impiegando talee dei cloni AF2, AF6, Monviso, Limatola e Muur.

2.2 - DIRADAMENTI

La realizzazione di impianti artificiali ha caratterizzato l'attività forestale nel nostro Paese per buona parte del secolo scorso, modificando ed arricchendo fortemente il tessuto paesistico. L'opera di ricostituzione boschiva di superfici spoglie da vegetazione arborea ha avuto inizio, nell'Appennino centro-settentrionale, fin dai primi anni del 1900 ed è stata compiuta mediante rimboschimenti con conifere. Si stima che in Italia, siano stati effettuati rimboschimenti per circa 1.300.000 ha di superficie (Romano, 1986). Il pino nero (inizialmente *Pinus nigricans* Horst., successivamente anche *Pinus laricio* Poiret impiegato soprattutto su suoli silicati) fu la specie generalmente preferita sia per la facilità di allevamento in vivaio, sia per le caratteristiche spiccatamente pioniere. Oltre agli scopi essenzialmente protettivi quali conservazione del suolo, riforestazione dei terreni agricoli o pascolivi abbandonati, rimboschimento delle aree improduttive, preparazione del suolo alle specie autoctone forestali, i rimboschimenti hanno permesso di recuperare estese superfici in gravi condizioni di dissesto garantendo un netto miglioramento delle funzioni idrogeologiche su ampie aree dell'Appennino.

A tali scopi si assommava la possibilità di dare occupazione, anche se temporanea, alle popolazioni montane ed interne della penisola. A partire dagli anni '50, le finalità dei rimboschimenti divennero anche di tipo produttivo. La politica forestale nazionale favori

degli interventi atti ad incrementare la diffusione delle conifere, la cui preferenza era motivata dalla maggiore capacità di adattamento alla eterogeneità dei suoli, dalla rapidità di accrescimento e da una pronta ed efficace copertura del suolo (Nocentini, 1995). Il forte impegno finanziario sostenuto per la realizzazione di questi interventi è stato indirizzato principalmente a sostenere la piantagione e le prime cure colturali (risarcimenti e ripuliture) necessarie a favorire l'attecchimento delle piantine, mentre scarsa rilevanza è stata data all'esecuzione dei successivi necessari diradamenti.

Infatti, il costante e rapido aumento del prezzo della manodopera, cui non ha fatto riscontro, negli ultimi decenni, un corrispondente aumento del prezzo del legname, ha portato all'abbandono di molti rimboschimenti, soprattutto nei terreni di proprietà privata. Nei terreni di proprietà pubblica, dove le finalità del rimboschimento sono multiple e l'impiego della manodopera svolge anche un ruolo essenzialmente sociale, si è proceduto il più delle volte a qualche intervento di ripulitura e di diradamento di tipo basso e di moderata intensità.

Tuttavia, la gestione carente ed inappropriata, se non addirittura di "abbandono" dopo l'impianto, ha dato origine a sistemi con organizzazione e struttura a diverso grado di semplificazione, non autonomi e non in grado di perpetuarsi autonomamente.

Per questi sistemi artificiali si pone, oggi, la prospettiva di organizzarne non tanto la produttività, quanto piuttosto la rinaturalizzazione, intendendo con questa espressione un'azione colturale tesa alla valorizzazione dei processi naturali di autorganizzazione del sistema bosco, prescindendo da qualsiasi modello predefinito (Ciancio & Nocentini, 1994). Oltretutto bisogna considerare che le caratteristiche principali di buona parte della vegetazione forestale italiana attuale sono spesso il risultato del secolare intervento dell'uomo che, per soddisfare le proprie impellenti esigenze, ha eccessivamente semplificato gli ecosistemi primigeni, influenzandone i flussi di energia e modificando in vario modo le componenti autotrofe ed eterotrofe sia dal punto di vista qualitativo sia quantitativo (La Marca, 1996). Pertanto, poiché proprio il rimboschimento crea un sistema semplificato, e nel caso in cui con la piantagione di alberi siano state introdotte specie estranee all'ambiente, l'azione di rinaturalizzazione dovrà tendere all'affermazione di una vegetazione di tipo climacica, con la reintroduzione delle specie locali e con la massimizzazione della complessità del sistema.

Gli interventi colturali rappresentano un momento fondamentale nell'ambito dei processi evolutivi di un soprassuolo boschivo, accelerandone considerevolmente i tempi, soprattutto nel caso in cui si riscontrano fenomeni di diffusione spontanea di specie

autoctone sotto copertura o sono presenti, nelle aree limitrofe, elementi residuali di formazioni arboree cui è attribuibile un ruolo potenziale di centri di diffusione. In tal caso la presenza anche minima di latifoglie autoctone consente di accelerare i processi successionali e fornisce alcuni utili suggerimenti per eventuali nuovi interventi di ricostituzione della copertura arborea autoctona (La Marca, 1996). I diradamenti hanno infatti lo scopo di evitare quella fase di bosco buio, che tende ad eliminare qualsiasi specie dal piano dominato e a rallentare la crescita del piano dominante, oltre che di ottenere un soprassuolo più stabile nei confronti di eventuali avversità ambientali (La Marca, 1983). Ciò anche in considerazione del fatto che il popolamento di origine artificiale in via di rinaturalizzazione deve possedere sufficiente efficienza funzionale durante la graduale fase di passaggio verso un sistema arboreo naturale.

Secondo i dati dell'Inventario Forestale Nazionale, la superficie rimboschita nella dorsale appenninica dell'Italia centro meridionale è di circa 40.000 ha, pari al 9% delle 'fustaie', mentre in Umbria si stima pari a 8.100 ha la superficie delle pinete montane. L'Inventario Forestale Regionale dell'Umbria indica per le pinete di pino nero una superficie di 7.700 ha pari a circa la metà delle fustaie regionali. Per questi boschi il Piano Forestale Regionale prevede che vengano effettuati diradamenti nelle perticaie e nelle giovani fustaie al fine di migliorare la stabilità meccanica, di controllare l'accumulo di combustibile e di creare condizioni favorevoli all'insediamento e allo sviluppo di novellame di latifoglie. Nei popolamenti adulti, il piano prevede di favorire i processi di rinnovazione a partire dal novellame di latifoglie presente applicando il trattamento per tagli successivi a gruppi. La presenza di pini tra la rinnovazione va mantenuta con lo scopo di aumentare la diversità specifica e strutturale.

2.2.1 - IL PINO

Il pino è il nome comune del genere *Pinus*, della famiglia delle Pinacee che comprende 213 specie diffuse in tutto l'emisfero settentrionale e riunite in 11 generi. Le Pinacee sono suddivise in 3 sottofamiglie, le *Abietoideae*, con aghi inseriti solo sui macroblasti (*Abies*, *Picea*, *Tsuga*, *Pseudotsuga*), le *Laricoideae*, con aghi inseriti sia sui macroblasti che sui brachiblasti (*Larix*, *Cedrus*) ed infine le *Pinoideae*, con aghi inseriti esclusivamente sui brachiblasti *Pinus*.

Sono piante arboree il cui fusto, con accrescimento secondario, è costituito da legno omoxilo e canali resiniferi. Le foglie sono aghiformi disposte a spirale portate su due tipi

di rami, i brachiblasti, con internodi brevissimi, e i macroblasti, con internodi più lunghi. Le Pinaceae comprendono specie monoiche, con fiori maschili provvisti alla base dell'asse fiorale di foglioline squamiformi che funzionano da perigonio, al di sopra delle quali si collocano gli stami, numerosi ed inseriti a spirale. Le infiorescenze femminili, formanti degli strobili, sono formati da squame copritrici sterili e squame fertili fortemente ispessite, accoppiate in modo che a ciascuna squama fertile ne corrisponda una sterile posta inferiormente. Sulla pagina superiore di quelle fertili si formano 2 ovuli che, dopo la fecondazione, protetti dalle squame che si richiudono, divengono 2 semi forniti di una membrana che funziona da ala. Gli strobili si trasformano in coni legnosi che rimangono chiusi fino alla maturazione dei semi. L'impollinazione è maggiormente anemogama, favorita dalla grande quantità di polline prodotto e dalla morfologia del granulo pollinico, reso più leggero dalla presenza di sacche aeree.

In Italia sono spontanee 10 specie, alcune diffuse nella zona mediterranea, altre nella zona alpina, nella prima si ricordano il Pino d'Aleppo (*Pinus halepensis*), il Pino domestico (*Pinus pinea*) e il Pino marittimo (*Pinus pinaster*), largamente utilizzati come piante ornamentali e per rimboschimenti in aree con clima mite.

Le specie legate all'ambiente montano invece sono il Pino silvestre (*Pinus sylvestris*), con areale molto vasto, presente in Italia sulla catena alpina, il Pino nero (*Pinus nigra*), al quale appartengono sottospecie endemiche di territori di limitata estensione, tra cui *Pinus nigra* ssp. *calabrica*, presente in Calabria e sull'Etna, ed il *Pinus mugo* con portamento prostrato, esclusivo delle Alpi in Italia.

Nel presente studio sono stati analizzati per la caratterizzazione energetica chips ottenuti dalla sminuzzatura di piante intere di *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller e *Pinus pinaster* Miller, provenienti da operazioni di primo diradamento effettuate in aree individuate nell'Italia Centrale, in una pineta monospecifica di pino nero sita in Umbria, di densità normale e grado di copertura elevato, età approssimativa 33 anni e un imboschimento di pini mediterranei nel Lazio, di densità normale e grado di copertura elevato, età di circa 30 anni.

2.2.2 - L'ABETE ROSSO (*PICEA ABIES* L.)

L'areale del peccio, in tutte le sue varietà e forme, è vastissimo, va dalle coste atlantiche della Scandinavia, attraversa tutta la Siberia fino al Mare di Okhotsk, a nord nella Siberia

e Fennoscandia, a sud, dall'Italia fino la penisola balcanica. In Italia si trova sulle Alpi ad altitudini comprese tra gli 800 e i 2.100-2.300 m. Forma estesi boschi puri, climax, che contraddistinguono la vegetazione forestale delle Alpi da quella degli altri monti italiani. Sugli Appennini se ne ritrovano nuclei relitti dell'ultima glaciazione presso il passo del Cerreto e Abetone, Picea di Campolino.

Albero sempreverde che può raggiungere nelle migliori condizioni stazionali 50 m di altezza e occasionalmente anche 60 m con circonferenze del tronco fino a 2 m, è molto longevo. Il peccio ha un fusto dritto e slanciato che nelle migliori condizioni è quasi cilindrico per oltre 20 m, la chioma è di colore verde scuro, può avere profilo ogivale e da triangolare a quasi cilindrica, il cimale ha sempre la dominanza e anche in vecchiaia la cima ha forma di freccia.

La corteccia è sottile e rossastra nelle piante giovani, formata da squame membranacee, negli adulti si forma un ritidioma di poco spessore, di colore grigio-brunastro formato da placche irregolari o rotonde.

Le foglie sono chiamate aghi, persistono anche fino a 10 anni, sono lunghi da 15 a 25 mm, sono a sezione tetragonale, romboidale di colore verde scuro, lucidi o opachi, sono caratteristicamente inseriti su “cuscinetti” rilevati che avvolgono il rametto. I conetti maschili si trovano generalmente all'apice dei rametti dell'anno precedente e nel terzo superiore della chioma, mentre i conetti femminili si trovano all'apice dei rametti laterali nella parte più alta della chioma, sono sessili, cilindrici e di colore rosso cupo, eretti fino alla fecondazione, poi penduli. Gli strobili sono generalmente cilindrici ma rastremati all'apice, possono essere dritti o incurvati mediamente da 10 a 18 cm., larghi 3-4 cm. Il legno è di colore giallognolo, è poco pesante ed è tenero, formato da fibre lunghe, è facilmente lavorabile perciò largamente impiegato in falegnameria, nella costruzione di mobili non di pregio e varie parti leggere e resistenti, non ha una grande durabilità agli agenti atmosferici, se non trattato.

Il legno del peccio ha un forte potere calorifico, dato dalla resina che contiene, ed è superiore anche al faggio, alle querce e al carpino.



Figura 12: impianto artificiale di pino

2.2.3 - IL CERRO (*QUERCUS CERRIS* L.)

L'areale del Cerro è molto vasto, il suo centro va dalla Croazia all'Ungheria, da qui si irradia, ad Ovest, verso l'Italia, in qualche zona della Francia (Provenza) e della Spagna, ad Est arriva in Anatolia, al Nord è limitato dal Danubio e a sud arriva sino al Mediterraneo. In Italia forma boschi dall'Appennino Tosco-Emiliano fino alla Calabria e nei Balani, manca in Sardegna.

Il cerro è un albero che può raggiungere i 30-35 m di altezza, il tronco è diritto e slanciato, presenta una chioma ovaleggiante e di media compattezza, a differenza delle altre querce, questa specie tende a sviluppare la chioma più in altezza che in ampiezza. Le foglie sono molto variabili nella forma tardivamente caduche, hanno consistenza coriacea e la pagina inferiore pubescente. La ghianda matura è fornita di una cupola con squame lunghe anche 1 cm ad uncino, è portata sui rami dell'anno precedente. Il cerro è una specie piuttosto esigente di acqua, si può trovare anche in boschi planiziari in cui si associa alla farnia, mentre nelle zone xeriche perde di vigore e di potere di concorrenza, si

può trovare in consociazioni con la roverella.

Specie mesofila, tendenzialmente eliofila, teme le gelate tardive e i freddi intensi, non ha particolari esigenze edafiche in quanto può vegetare su terreni di vario tipo ma il suo ottimo edafico sono suoli profondi, freschi e ricchi di basi.

Il legno, di colore roseo e' duro, pesante, non durevole, di difficile segagione simile a quello della Rovere ma di pregio minore veniva usato per le traverse ferroviarie previa impregnazione e per doghe da botte oppure come legna da ardere essendo un buon combustibile e per il rapidissimo accrescimento giovanile così che, dal punto di vista economico, una specie apprezzata nei cedui da legna da ardere.

2.2.4 - LA ROVERELLA (*QUERCUS PUBESCENS* WILLD.)

La roverella è una quercia decidua molto diffusa nell'Europa occidentale, centrale e meridionale, in Italia si ritrova in tutte le regioni fra 200 e 800 m s.l.m. prevalentemente su pendii caldi e luminosi.

È un albero che raramente raggiunge i 25 m di altezza, il fusto è breve, non particolarmente diritto, con branche sinuose e rami sottili e divergenti che vanno a formare una chioma ampia, irregolare, non molto densa, a volte assume un portamento cespuglioso. Le foglie sono semplici, alterne, con lamina di forma fittamente pubescente. Il picciolo è lungo 0,5-1,5, tomentoso . E' specie che può iniziare a fruttificare molto precocemente (10-12 anni). Il frutto, maturante nell'anno, e' un achenio ovato allungato portato su un breve peduncolo pubescente, protetto anche sino a metà da una cupola munita di squame grigiastre, molto pubescenti, appressate, triangolari. Specie termofila, xerofila, basifila, rustica, con grande capacità di adattamento, forma boschi puri o misti in consorzio con altre latifoglie (cerro, aceri, castagno, carpino nero, nocciolo), per la sua frugalità' viene usata come specie pioniera nei rimboschimenti delle pendici calcaree mediante semina diretta. Ha crescita relativamente lenta e notevole capacità pollonifera, la lavorazione del legno risulta difficile a causa delle fibre non tanto dritte, tende ad imbarcarsi, viene tenuta per lo più a ceduo per produrre legna da ardere ma anche per travature e costruzioni navali.

2.2.5 - IL FAGGIO (*FAGUS SYLVATICA* L.)

Il faggio è una pianta tutta europea, presente dalla Svezia meridionale ai monti della Sicilia e della Gran Bretagna alla Russia sudorientale. E' presente su gran parte della penisola italiana, dall'arco alpino all'Appennino fino alla Sicilia nord-orientale, non è presente in Sardegna.

Sull'Appennino e sulle Alpi orientali forma estese foreste, spingendosi fino a quote rispettivamente di 1800-2000 e di 1200-1400 m, mentre a valle scende mediamente fino a 500-600 m.

Albero che raggiunge altezze di 20-30 metri, con chioma a portamento conico-globoso, con tendenza ad espandersi nelle piante adulte, vegetazione folta e densa. Il tronco è diritto, cilindrico da giovane, largamente scanalato da vecchio; la scorza sottile si presenta caratteristicamente liscia e lucente, grigio chiaro. Le foglie alterne, ovato-ellittiche, sono lunghe 10-15 cm, leggermente ondulate e cigliate al margine, con nervi secondari diritti e paralleli, dotate di un breve picciolo, si presentano all'inizio arrossate, poi superiormente verde scuro, più chiare sotto.

Il faggio è di temperamento igrofilo, cioè gradisce l'umidità atmosferica ma non quella nel terreno.

Il legno di faggio, piuttosto leggero facilmente aggredibile dai tarli, non è della migliore qualità, tuttavia quello cresciuto in fustaia è largamente impiegato negli usi industriali, specialmente in passato in lavori di costruzione e di falegnameria, mentre dai cedui di faggio si ricava essenzialmente legna da ardere.

2.3 - LA COLTIVAZIONE DELLE ARANCE

Gli agrumi appartengono alla famiglia delle Rutaceae, sottofamiglia Aurantioideae, tribù Citreae, sottotribù Citrinae. La classificazione degli agrumi ha impegnato per molto tempo i tassonomi a causa della presenza di individui derivati da ibridazione naturale considerati da alcuni come specie a sé stanti. L'origine degli ibridi naturali si ne è persa ogni traccia, mentre di quelli ottenuti in epoca più recente si conoscono più o meno bene le specie d'origine. Gli agrumi appartengono a diversi generi, di cui i principali sono *Citrus*, *Fortunella* e *Poncirus*, il genere *Citrus* è sicuramente il più importante. L'arancio (*Citrus sinensis* Osbeck) sono piante di origine tropicale con particolari esigenze nei confronti del clima, per ottenere una produzione commerciale valida occorre che sia

caldo, sufficientemente umido, con inverni miti e senza ampie escursioni termiche, generalmente svolgono la loro attività vegetativa a temperature comprese tra i 13 e i 30°C. Gli agrumi prediligono il terreno sciolto o di medio impasto, profondo, fertile, ben drenato, con pH compreso tra 6,5 e 7,5 e ben dotato di sostanza organica. Rifuggono i terreni troppo argillosi, calcarei e salini. La coltivazione delle arance in Italia è fortemente concentrata in Sicilia 52,6% e in Calabria con il 31,7%.

La forma di allevamento che è maggiormente impiantata negli agrumeti è il globo, con sesto di impianto in quadrato 5 x 5 m. Le tendenze attuali però sono quelle di adottare un sesto d'impianto temporaneo di m 4-5 x 3-3,5 fino a che le piante avranno raggiunto uno sviluppo tale da ostacolarsi l'un l'altra, così che poi verranno diradate eliminando le file in modo alterno, ottenendo un sesto di m 4-5 x 6-7 m, questo con lo scopo di ottenere un rapido ammortamento delle spese di impianto. L'altezza delle piante adulte è fortemente influenzata dalla potatura, in media intorno 2,5 metri da terra con la tradizionale forma a globo, questo per facilitare le operazioni di raccolta. La potatura è una fase essenziale dell'ottimizzazione del rapporto tra parte vegetativa (rami e foglie) e parte riproduttiva (fiori) e deve essere effettuata considerando le peculiarità delle varie specie. Quando si parla dell'utilizzo di biomasse prodotte in agricoltura a scopo energetico, si fa riferimento principalmente alla coltivazione di specie destinate alla produzione di combustibili come pioppo, eucalitti, mentre una nuova e significativa fonte potrebbero essere gli scarti di potatura (Picchio *et al.*). I residui degli interventi di potatura attualmente vengono di consuetudine bruciati o trinciati in campo, tuttavia norme legislative vietano la libera combustione dei residui vegetali in pieno campo ed impongono lo smaltimento degli stessi in opportuni centri di stoccaggio ed eliminazione. Nel presente lavoro si è cercato di ottenere informazioni su quanto le biomasse residuali provenienti dagli scarti di potature possano contribuire alla disponibilità di biomassa per l'energia, prendendone anche in considerazione le caratteristiche energetiche. Per questo studio è stata presa in considerazione una delle realtà agricole più consistenti della Sicilia, la coltivazione delle arance. Le zone ottimali in Sicilia dove le condizioni climatiche e pedologiche permettono di ottenere produzioni agrumicole qualitativamente pregevoli sono concentrate lungo la fascia costiera tirrenica, Jonica, la piana di Catania e un tratto della costa meridionale da Campobello di Mazara a Ribera. La produzione delle arance interessa tutte le province della Sicilia, concentrandosi in quella di Catania, dove è localizzato il 41% della produzione regionale, seguita dalle province di Siracusa, Enna e Agrigento.

3. MATERIALI E METODI

Lo sminuzzato oggetto di studio in questo lavoro proviene da diverse zone del territorio italiano e da diversi tipi di cantiere.

1. Sminuzzato proveniente da SRF.

I cloni di pioppo oggetto di studio provengono da diverse aree. Nella prima parte vengono analizzati dei cloni provenienti da prove sperimentali sulla SRF, cloni utilizzati nella costituzione di piantagioni dedicate alla produzione di biomassa già iscritti o in via di iscrizione al Registro Nazionale dei Cloni Forestali, prove collocate nel centro-sud Italia, allestite impiegando talee dei cloni AF2, AF6, Monviso, Limatola e Muur. Ulteriore prelievo di campioni di sminuzzato è stato effettuato in 10 cantieri di SRC composti in questo caso solo da 4 cloni differenti (AF2, AF6, Monviso e Muur) ma con due diversi intervalli di raccolta, 2 anni e 3 anni, in questo caso sono stati raccolti 20 campioni di cippato di un kg ciascuno in modo casuale per ogni sito per un totale di 200 campioni per 10 siti di raccolta (tabella 12).

Tabella 6 Schema sperimentale dei cantieri agroforestali

Turno	Clone	N° campioni
2 anni	AF2	20
3 anni	AF2	20
2 anni	AF3	20
3 anni	AF3	20
2 anni	Monviso	20
3 anni	Monviso	20
2 anni	Monviso	20
3 anni	Monviso	20
2 anni	Muur	20
3 anni	Muur	20

Le piante oggetto di studio sono state abbattute e sminuzzate direttamente sul letto di caduta dove subito sono stati prelevati i vari campioni di sminuzzato da analizzare per ognuna delle categorie tassonomiche esaminate. Di seguito questi macrocampioni, sono stati portati presso il laboratorio di Utilizzazioni Forestali del Dipartimento di scienze e tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia (DAFNE) dell'Università

degli Studi della Tuscia dove è stato possibile proseguire con le analisi. I campioni sono stati analizzati per (a) composizione macroscopica, (b) distribuzione granulometrica, (c) umidità (u%), (d) contenuto idrico (w%), (e) densità bulk (db), (f) potere calorifico superiore (PCS), (g) contenuto di carbonio (C), azoto (N), idrogeno (H) e (h) il tenore di ceneri. Ciascuno dei macro campioni è stato suddiviso in 8 sub-campioni con pesi differenti. Per l'analisi (a) ogni sub-campione era pari a 0,5 kg, mentre per l'analisi (b) ogni sub-campione era di 1 kg, per l'analisi (c-e) ogni sub-campione era di 0,5 kg e per l'analisi (f-h) ogni sub-campione era di 0,2 kg. Tutti i sotto-campioni sono stati estratti casualmente dallo stock più grande dei campioni originali

2. Sminuzzato ottenuto da piante intere di *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller e *Pinus pinaster* Miller utilizzate in operazioni di primo diradamento.

Proviene da aree dell'Italia Centrale, sono state individuate due aree di studio, una pineta monospecifica sita in Umbria e un imboschimento di pini mediterranei nel Lazio. La pineta monospecifica di *P. nigra* impiantata sul Monte Peglia, Situata nel comune di Orvieto, loc. “le Scalette”, si estende su una superficie di 13,91 ha. Si tratta di un imboschimento a densità normale e grado di copertura elevato, età approssimativa 33 anni, di seguito in tabella 13 vengono riportate le caratteristiche del popolamento, prima dell' intervento e post intervento.

Tabella 13: tabella riassuntiva sulle caratteristiche del popolamento pre-intervento.

Pre-diradamento			Postdiradamento		Piante utilizzate	
Specie	piante/ha	DBH(cm)	piante/ha	DBH(cm)	piante/ha	%
Pino nero	1326	20,3	472	20,5	854	64

La seconda area individuata nella regione Lazio è rappresentata da un imboschimento misto di pino d'Aleppo e marittimo di circa 2,4 ha (*P. halepensis* e *P. pinaster*). Si tratta di una pineta di pini mediterranei a densità normale e grado di copertura elevato, di seguito in tabella 14 vengono riportate le caratteristiche del popolamento, prima dell' intervento e post intervento.

Tabella 14: tabella riassuntiva sulle caratteristiche del popolamento post-intervento

Pre-diradamento			Post-diradamento		Piante utilizzate	
Specie	piante/ha	DBH(cm)	piante/ha	DBH(cm)	piante/ha	%
Pini mediterranei	982	22,9	438	25,1	544	55

Per rappresentare meglio la produzione di sminuzzato presente in Italia ottenuto da piante intere o dai residui delle utilizzazioni forestali sono stati individuati ulteriori 10 cantieri forestali (tabella 15) costituiti da conifere (*Pinus* spp. and *Picea abies* L.) e latifoglie (*Quercus* spp. And *Fagus sylvatica* L.). Questi cantieri si differenziano in tre aspetti principali che influenzano la qualità del cippato, prima di tutto il tipo di albero e di conseguenza il suo legno, nel caso delle latifoglie un legno duro mentre per le conifere legno tenero, caratteristica che influisce in particolar modo il potere calorifico del cippato. Gli interventi sono stati effettuati nel periodo invernale così che lo sminuzzato proveniente dai cantieri di boschi cedui è privo di foglie contrariamente a quello proveniente dai boschi di conifere, ultima differenza sta nel contenuto in corteccia dovuto al fatto che gli elementi sminuzzati nei cantieri di boschi di latifoglie si trattava di piccole parti come i rami, mentre nel caso delle conifere è stato sminuzzato l'albero intero quindi con un rapporto tra corteccia e legno diverso.

Tabella 15: Schema sperimentale dei cantieri forestali

Tipo	Specie principale	N° campioni
Conifere	<i>Picea abies</i>	20
	<i>Picea abies</i>	20
	<i>Pinus nigra</i> Arn.	20
	<i>Pinus pinaster</i> Ait.	20
	<i>Pinus halepensis</i> Mill.	20
Latifoglie	<i>Quercus cerris</i> L.	20
	<i>Quercus pubescens</i> Willd.	20
	<i>Quercus cerris</i> L.	20
	<i>Fagus sylvatica</i> L.	20
	<i>Fagus sylvatica</i> L.	20

3. Sminuzzato proveniente dalla potatura delle arance

È stato inoltre effettuato uno studio per fornire informazioni su quanto le biomasse residuali provenienti dagli scarti di potature degli agrumeti in Sicilia, con particolare riferimento agli scarti provenienti dalle potature delle arance, possano contribuire alla disponibilità di biomassa per l'energia, prendendone anche in considerazione le caratteristiche energetiche.

Tramite un'analisi della cartografia sono stati individuati e distinti 3 possibili ipotetici distretti energetici, riferiti alla coltivazione delle arance. Per ognuno dei tre distretti sono stati effettuati 5 rilievi nei cantieri di potatura, al fine di ottenere un valore medio del quantitativo di biomassa disponibile. Inoltre in ciascun cantiere analizzato sono stati prelevati tre campioni di biomassa (rami comprensivi di foglie e rametti) per la caratterizzazione fisico-energetica.

La biomassa proveniente dalle potature degli aranceti, è stata caratterizzata energeticamente rilevando parametri, quali il Potere calorifico superiore (Pcs) e inferiore (Pci), le caratteristiche chimiche (contenuto di Carbonio, Idrogeno e Azoto) e le caratteristiche fisiche (contenuto di umidità, ceneri, sostanze volatili e carbonio fisso), è stata rilevata inoltre la massa volumica e la densità bulk dello sminuzzato

3.1 – ANALISI DI LABORATORIO

Tutti i campioni, sono stati portati presso il laboratorio di Utilizzazioni Forestali del Dipartimento di scienze e tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia (DAFNE) dell'Università degli Studi della Tuscia dove è stato possibile proseguire con le analisi. I campioni sono stati analizzati per (a) composizione macroscopica, (b) distribuzione granulometrica, (c) umidità (u%), (d) contenuto idrico (w%), (e) densità bulk (db), (f) potere calorifico superiore (PCS), (g) contenuto di carbonio (C), azoto (N), idrogeno (H) e (h) il tenore di ceneri. Ciascuno dei macro campioni è stato suddiviso in 8 sub-campioni con pesi differenti. Per l'analisi (a) ogni sub-campione era pari a 0,5 kg, mentre per l'analisi (b) ogni sub-campione era di 1 kg, per l'analisi (c-e) ogni sub-campione era di 0,5 kg e per l'analisi (f-h) ogni sub-campione era di 0,2 kg. Tutti i sotto-campioni sono stati estratti casualmente dallo stock più grande dei campioni originali.

3.2 - COMPOSIZIONE MACROSCOPICA DELLO SMINUZZATO

La composizione macroscopica dello sminuzzato è stata determinata separando manualmente il contenuto delle componenti principali: fibra, corteccia, ramoscelli. Questa operazione è stata condotta su 30 sub - campioni di 0,5 kg ciascuno per ogni tipologia di sminuzzato. Ogni gruppo di componenti è stato pesato con una bilancia di precisione Orma (modello BC16D). Sono state calcolate le percentuali in peso di fibra (legno), corteccia e rami. Inoltre con un calibro della precisione di 1/10 mm sono stati misurati i diametri mediani dei singoli rametti ed in seguito calcolato il loro diametro medio.

Nel dettaglio le analisi condotte hanno seguito questa procedura: si è iniziato prelevando una manciata casuale di sminuzzato contenuto in un apposito recipiente. Questo materiale è stato successivamente posto in un altro recipiente precedentemente opportunamente tarato mediante una bilancia tecnica (precisione al decimo di grammo) ed è stata in questo modo rilevata la pesatura lorda totale. Di seguito per ognuno dei campioni considerati è stata effettuata la separazione manuale dello sminuzzato in 3 categorie (rami, corteccia e legno) ed è stata rilevata la pesatura per ognuna delle 3 classi indicate. Quindi, di fatto, per ogni campione analizzato sono stati ottenuti oltre al peso lordo totale anche il peso lordo del legno, il peso lordo della corteccia ed il peso lordo dei rami. Detraendo alle pesature lorde misurate la tara del recipiente, sono state ottenuti il peso netto totale, il peso netto della corteccia, il peso netto del legno ed il peso netto dei rametti. Sono state in seguito calcolate le percentuali in peso di fibra (legno), corteccia e rami. La corteccia è stata separata dalle fibre con l'ausilio di un piccolo taglierino.

3.3 - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DELLO SMINUZZATO

La distribuzione granulometrica è stata ottenuta su 30 sub - campioni di 1 kg ciascuno per ogni tipologia di sminuzzato. Per quest'analisi si è seguita la norma europea, CEN/TS 15149-1:2011 "Biocombustibili solidi - Metodi per la determinazione della distribuzione granulometrica - Parte 1: Metodo del vaglio oscillante con aperture maggiori o uguali ad 1 mm", utilizzando un dispositivo certificato di screening automatico FTL0200. Cinque setacci sono stati utilizzati per separare le seguenti sei classi granulometriche di cippato: > 100 mm, 100-63 mm, 63-45 mm, 45-16 mm, 16-3 mm, <3 mm. Ogni frazione è stata poi pesata con la bilancia di precisione Orma (modello BC16D).

3.4 - UMIDITÀ E CONTENUTO IDRICO

Per il calcolo dell'umidità del legno e del contenuto idrico è stato impiegato il metodo gravimetrico o per doppia pesata (CEN/TS 14774-1: Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content - Oven dry method. Part 1: Total moisture - Reference method, 2004; CEN/TS 14774-2: Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content- Oven dry method. Part 2: Total moisture - Simplified method, 2004; CEN/TS 14774-3: Solid Biofuels -Methods for determination of moisture content - Oven dry method. Part 3: Moisture in general analysis sample, 2004), così come ha una certa rilevanza ricordare che l'umidità contenuta nei tessuti vegetali, al momento dell'impiego, penalizza l'attitudine alla combustione della stesso cippato per cui condizione ottimale sarebbe che né umidità né contenuto idrico assumessero valori piuttosto elevati. Umidità (u%) e contenuto idrico (w%) sono stati rilevati e calcolati per 30 sub - campioni di 0,5 kg per ogni tipologia di sminuzzato.

Operativamente si è effettuata una prima pesata del campione mediante una bilancia tecnica (precisione 1/100 g) e, sempre grazie alla bilancia, si è rilevata la tara della vaschetta. Dalla detrazione dei 2 valori ottenuti è stata identificato P_u . Si è messo poi il campione in una stufa ventilata e termostata a $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ per 24 h (la ventilazione è necessaria per asportare il vapore liberato dal provino; la temperatura invece consente di trasformare tutta l'acqua in vapore, a pressione normale, senza dar luogo a distillazione degli estrattivi del legno, salvo rarissimi casi, oppure al degradamento termico di costituenti della parete cellulare, che devono rimanere intatti affinché le pesate non risultino falsate), al termine delle quali si è effettuata una seconda pesata. In seguito il campione è stato nuovamente posto in stufa per 12 h al termine delle quali è stata effettuata un'altra pesata. Si è poi confrontato l'ultimo dato con la registrazione precedente: se la variazione di peso intervenuta nelle 12 ore era trascurabile (minore del 2%), si considerava raggiunto lo stato di peso costante e di conseguenza si assumeva che tutto il vapore, l'acqua libera e quella di saturazione fossero stati eliminati dal provino, che risultava quindi perfettamente anidro. Se invece il confronto tra le ultime 2 registrazioni effettuate rivelava una perdita di peso non trascurabile (maggiore del 2%), si rimetteva il provino in stufa per ulteriori 12 ore e si ripeteva la procedura fino al raggiungimento di un valore di peso costante tra le due ultime letture. E' stato così determinato P_0 . In questo modo è stato possibile calcolare l'umidità ed il contenuto idrico del provino.

3.5 - DENSITÀ BULK (DENSITÀ APPARENTE)

Parametro dato dal rapporto tra la massa ed il volume di un campione di sminuzzato non soggetto a compressione o assestamento di alcun genere. La densità bulk (bulk density in inglese) si esprime in kg/m³ ed è bene chiarire che il volume è sterico, composto quindi da spazi vuoti e pieni. Inoltre sia massa che volume sono sempre riferiti allo stesso contenuto di umidità. Rilevare tale parametro ha importanza per qualsiasi forma di quantificazione esistente (CEN/TS 14779 : Solid Biofuels – Sampling – Methods for preparing sampling plans and sampling certificates, 2004).

Per ottenere la densità bulk (db), rilevata su 30 sub - campioni di 0,5 kg l'uno, è stato posto manualmente del cippato all'interno di un recipiente graduato (precisione 10 ml) sino al raggiungimento di 400 ml (limite stimato ocularmente) senza sottoporre il campione esaminato a compressione o assestamento di alcun genere ed è stata poi effettuata la pesatura dello sminuzzato presente nel recipiente stesso con una bilancia tecnica della precisione di 1/10 di grammo.

3.6 - IL POTERE CALORIFICO

Il potere calorifico superiore è di solito determinato su campioni omogeneizzati, facendo uso della bomba calorimetrica di Berthelot - Mahler (Calorimetro Parr 6200) (Canagaratna & Witt 1988, ISCO 1991). La bomba calorimetrica di Mahler è un apparecchio utile alla determinazione del potere calorifico superiore di un combustibile solido o liquido, per i combustibili in forma gassosa si ricorre all'uso del calorimetro di Junkers. Il calore prodotto dalla reazione di combustione del combustibile in esame viene assorbito da una massa di acqua o di altro liquido di cui si osserva l'aumento della temperatura.

Essa consiste in un recipiente cilindrico di circa 500 cm³, chiuso con un coperchio a vite, dal quale rientrano due fori verso l'interno. In uno di questi fori è introdotta un'asticella di ferro che regge un crogiolo di platino ed una piccola spirale di ferro. Nel crogiolo viene inserito il combustibile di cui vogliamo conoscere il potere calorifico (di solito 40 cm³) e viene introdotto ossigeno sotto pressione. La bomba viene immersa in un calorimetro colmo d'acqua, munito di agitatore e termometro. Si mette in moto l'agitatore e, quando il termometro legge una temperatura costante, nasce una differenza di potenziale tra le

asticelle di ferro la quale fa ossidare la spirale di ferro; da qui si crea la combustione del nostro materiale in esame. Il termometro legge la temperatura, che si alza bruscamente fino ad un certo valore, per poi diminuire lentamente. In tal modo è possibile calcolare il potere calorifico superiore con la seguente formula:

$$Q_s = \frac{(T_2 - T_1)(P + A)}{p}$$

dove T2 e T1 sono rispettivamente le temperature di massima e di minima, P è la quantità di acqua immessa nel calorimetro, A è l'equivalente in acqua del calorimetro e p è la quantità di combustibile utilizzato. Nel presente studio, seguendo la norma europea UNI EN 14918:2010 "Biocombustibili solidi - Metodo per la determinazione del potere calorifico", per la misurazione del potere calorifico superiore, ogni sub-campione di 200 g è stato macinato con un mulino Ika Werke MF10B a lama rotante e con un setaccio di 0,7 mm, quindi è stato selezionato 1 g di polvere di legno e compresso con una pressa manuale Parr fino ad ottenere un singolo pellet. Il pellet è stato poi bruciato in una bomba calorimetrica adiabatica Parr 6200.



Figura 13: bomba calorimetrica adiabatica Parr 6200.

3.7 - ANALISI ULTIMA

L'analisi ultima consente di determinare le percentuali di carbonio (C), azoto (N) ed idrogeno (H) caratterizzanti il materiale di partenza. Un elevato contenuto in carbonio indica la presenza nei tessuti vegetali di composti organici di rinforzo (lignina), caratterizzati da struttura chimica complessa, lenta degradabilità biologica ed elevata attitudine alla combustione. La lignificazione dei tessuti vegetali di alcune piante erbacee, che inizia nell'ultima fase del ciclo vegetativo, si manifesta attraverso l'essiccazione e l'ingiallimento delle parti epigea della pianta. Secondo Kataki & Konwer (2002), un elevato contenuto in carbonio all'interno delle biomasse suggerisce che esse potrebbero essere utilizzate per la produzione di carbone da legna. Il contenuto percentuale in carbonio e in azoto può essere utile anche per la stima indiretta del potere calorifico. Vari Autori riportano modelli riconducibili alla composizione chimica del materiale esaminato (Giordano 1980, Baccanti & Colombo 1988, Demirbas 1997) anche se una serie di elementi, tra i quali la variabilità biologico-strutturale delle specie considerate, il differente periodo di raccolta, gli ambienti di crescita esaminati, ecc., rende estremamente complicato individuare delle formule esaustive per la stima del potere calorifico (Todaro et al., 2007). Nel presente studio, in accordo con la norma europea UNI EN 15104:2011 "Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto totale di carbonio, idrogeno e azoto - Metodi strumentali", il contenuto di C, H e N è stato determinato su dei sub-campioni di 200 g ed è stato rilevato da un analizzatore elementare CHN Leco 1000 che impiega la metodologia LECO-1 con un analizzatore di combustione. Anche in questo caso i campioni di sminuzzato sono stati prima omogeneizzati con apposito mulino.

3.8 - CONTENUTO IN CENERI

E' quanto mai necessario considerare che la composizione e quantità delle ceneri rappresentano un parametro molto importante per la conversione energetica delle biomasse. L'aumento della quantità di ceneri determina infatti un effetto negativo sul potere calorifico (Demirbas, 1997) mentre è stato riscontrato un effetto positivo sulla durabilità della combustione a causa di una possibile elevata quantità di silice e di carbonio (Jain & Singh, 1999). Un elevato contenuto in ceneri, influenzato dalla temperatura di fiamma della camera di combustione, può causare la formazione di

superfici vetrificate nella fornace con conseguente riduzione dell'efficienza del sistema di scambio. Lo smaltimento delle ceneri, inoltre, è ancora un problema non completamente risolto poiché esse risultano ancora difficilmente o poco utilizzabili come ammendanti nel settore agro-forestale (Ciccarese, 2000). Nel presente studio il contenuto di cenere è stato calcolato secondo la norma UNI EN 14775:2010 "Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto di ceneri". Il sottocampione di 200 g è stato macinato con un mulino a lama rotante Ika Werke MF10B e setaccio di 1 mm. Poi, è stato messo in un forno da laboratorio distribuendolo in modo tale che la sua densità superficiale non superasse 1,0 kg/m². Il forno è stato riscaldato a 250°C ad una velocità di 0,083°C/s. Il campione è stato lasciato a questa temperatura per 1 h per permettere la devolatizzazione delle sostanze prima dell'accensione. Successivamente, il forno è stato portato ad una temperatura di 550°C sempre ad una velocità di 0,083°C/s. Il campione è stato poi mantenuto a questa temperatura per 2 h. Successivamente, estratto dal forno, è stato fatto raffreddare a temperatura ambiente per circa 5 min, e quindi è stato trasferito in un essiccatore in cui è stato immagazzinato per un uso successivo (pesatura) in un contenitore sigillato.

3.9 - ANALISI STATISTICA

I dati ottenuti sono stati analizzati con il software statistico Statistica 2010, al fine di verificare la significatività statistica delle eventuali differenze tra i trattamenti con i test ANOVA e MANOVA. Tests Post-hoc sono stati eseguiti con il metodo di test di Tukey. Inoltre sono stati eseguiti i test preliminari ai test di statistica parametrica quali Levene e Kolmogorov-Smirnov. Per validare statisticamente l'esistenza di relazioni o differenze è stata condotta un'analisi di correlazione non parametrica applicando il test di Wilcoxon per campioni appaiati per i dati di densità bulk in funzione di umidità o contenuto idrico.

4. RISULTATI

4.1 - SMINUZZATO PROVENIENTE DA SRF

4.1.1 - COMPOSIZIONE MACROSCOPICA DELLO SMINUZZATO

Un'elevata percentuale di corteccia ha un effetto negativo sul potere calorifico, questo dovuto all'elevato contenuto di umidità nella corteccia rispetto alla fibra (Spinelli et al., 2011). La presenza di corteccia determina alte quantità di ceneri durante la combustione causando un effetto negativo sul sistema di combustione, la formazione di superfici vetrificate nella fornace riduce l'efficienza del sistema di scambio e diverse problematiche nello smaltimento (Ciccarese, 2000).

Le percentuali in massa (sul secco) di legno e corteccia presente nello sminuzzato tra i 5 cloni di pioppo analizzati (AF2 (*Populus x canadensis*), AF6 ((*Populus x generosa*) X *Populus nigra*), Monviso (*Populus x generosa* X *Populus nigra*), Limatola (*Populus nigra*), Muur (*Populus deltoides* x *Populus nigra*)) in tabella 16, non evidenziano differenze statisticamente significative (p-value 0.420), in media è quindi possibile affermare che lo sminuzzato analizzato è composto dal 72,6% da legno ed il 27,4% da corteccia.

Tabella 16: percentuali in massa (sul secco) di legno e corteccia presente nello sminuzzato tra i 5 cloni di pioppo analizzati

	Legno % in massa	Corteccia % in massa
Limatola	74±0,09	26±0,09
Muur	75±0,12	25±0,12
AF2	70±0,14	30±0,14
AF6	73±0,12	27±0,12
Monviso	72±0,14	28±0,14

Di seguito sono stati esaminati tramite l'applicazione dell'Anova ad una via i parametri della percentuale in massa (sul secco) dei rametti presenti nello sminuzzato, del loro

diametro e del numero di rami presenti nello sminuzzato tra i 5 cloni. L'analisi della percentuale in massa (sul secco) ha evidenziato differenze statisticamente elevate (p-value 0.012) tra i 5 cloni, dal Tukey test si riscontrano due principali gruppi statisticamente significativi (a e b), come riportato in tabella 17.

Nel caso del diametro dei rametti presenti nello sminuzzato non si sono riscontrate differenze statisticamente significative (p-value 0.661), come per il parametro del numero di rami presenti (p-value 0.000), mentre dal Tukey test si evidenziano due principali gruppi statisticamente significativi (a e b), come riportato in tabella 17.

Tabella 17: Percentuale in massa, diametro e numero dei rametti presenti nello sminuzzato tra i 5 cloni di pioppo.

	Rametti % in massa	Diametro mm	Numero rami
Limatola	13±0,1a,b	3,8±0,8	8±2,4a,b
Muur	17±0,1b	3,9±1,0	9±4,3b
AF2	11±0,05a	3,8±0,9	6±2,2a
AF6	10±0,05a	3,7±0,9	6±2,1a
Monviso	13±0,6a,b	3,9±0,9	8±2,9b

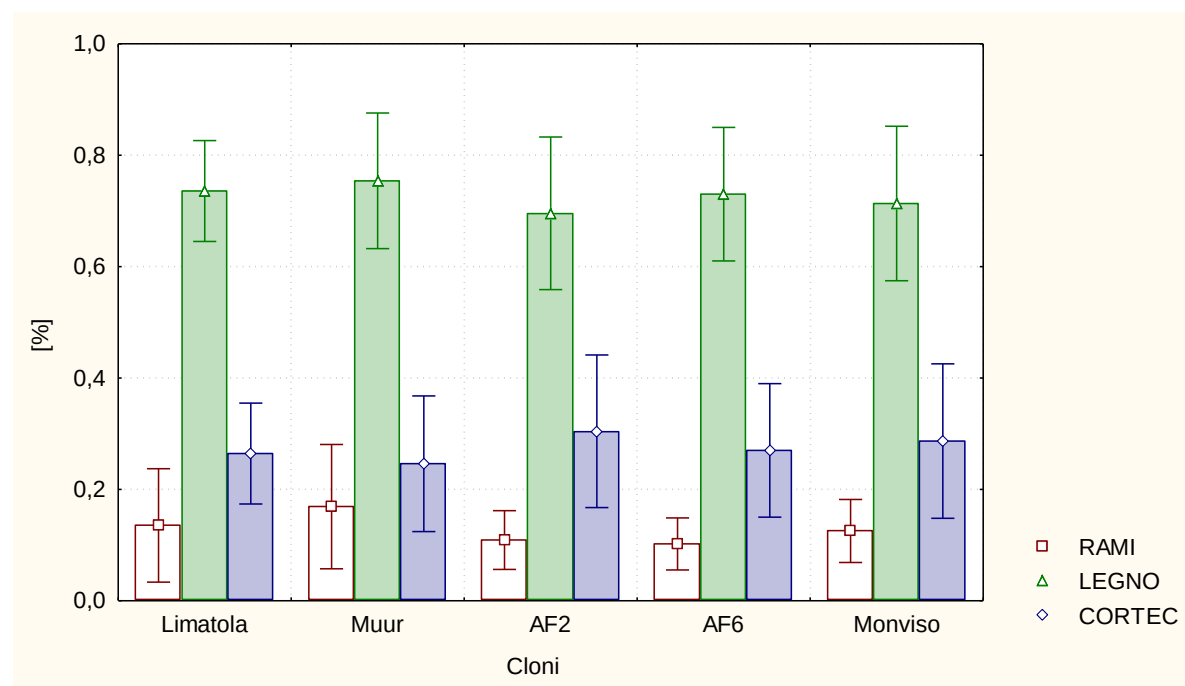


Grafico 1: Distribuzione percentuale dei rami, legno e corteccia presenti nello sminuzzato tra i 5 cloni di pioppo

La distribuzione macroscopica dei campioni di cippato provenienti da SRC composti da 4 cloni differenti con due diversi intervalli di raccolta, 2 anni e 3 anni, è mostrata in tabella 16, sono stati raccolti 20 campioni di cippato di un kg ciascuno in modo casuale per ogni sito per un totale di 200 campioni.

Tabella 18: distribuzione macroscopica dei campioni di cippato provenienti da SRC composti da 4 cloni differenti con due diversi intervalli di raccolta, 2 anni e 3 anni

Turno	Clone	N°	Legno %	Corteccia %	Rametti %	Altro %	
2 anni	AF6	20	66.5	26.0	3.9	3.6	$p > 0,05$
2 anni	AF2	20	66.7	25.8	3.4	4.1	
2 anni	Monviso1	20	62.0	30.5	3.9	3.6	
2 anni	Monviso2	20	70.8	21.7	3.8	3.7	
2 anni	Murr	20	65.3	27.2	3.0	4.5	
	Tutti	100	66.3 ± 9.26	26.2 ± 4.14	3.6 ± 1.06	3.9 ± 1.10	
3 anni	AF6	20	69,6	22,9	3,5	4	$p > 0,05$
3 anni	AF2	20	73,7	18,8	3,9	3,6	
3 anni	Monviso1	20	70,5	22	4,7	2,8	
3 anni	Monviso2	20	70,6	21,9	4,5	3	
3 anni	Murr	20	73,4	19,1	5	2,5	
	Tutti	100	71.5 ± 7.79	21.0 ± 2.12	4.3 ± 0.97	3.2 ± 1.01	

Dall'applicazione del test MANOVA si sono riscontrate differenze significative tra i due intervalli di raccolta (2 anni vs 3 anni; $p < 0,05$ per tutte le variabili) e tra i diversi cloni per alcune delle variabili ($p < 0,05$). Lo sminuzzato prodotto dai cloni con turno di 2 anni in media contengono il 66,3% di fibra di legno, il 26,2% di corteccia, il 3,6% di rametti e il 3,9% di "altro" (principalmente polveri). Nell'ipotesi peggiore il contenuto in legno può scendere al 62,0% mentre la corteccia con i rametti aumentare al 34,4% del peso totale.

La distribuzione macroscopica dei campioni di sminuzzato provenienti invece dagli impianti con turno di 3 anni in media contengono il 71,5% di fibra di legno, il 21,0% di corteccia, il 4,3% di rametti e il 3,2% di "altro" (principalmente polveri). In questo caso la peggiore delle ipotesi in contenuto in fibre di legno riscontrato è stato il 69,6% mentre la corteccia sommata ai rametti può raggiungere il 26,4% del peso totale.

4.1.2 - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DELLO SMINUZZATO

La distribuzione granulometrica è un'importante proprietà fisica delle biomasse solide in quanto conferisce quella caratteristica che la rende simile ad un fluido, necessaria nei sistemi di trasporto e di rifornimento degli impianti termici. Comprendere la distribuzione granulometrica aiuterà anche a spiegare in modo adeguato il trattamento, l'attrezzatura e l'organizzazione necessarie per l'immagazzinamento (Wu M. R. et al., 2010)

La tabella 19 mostra i risultati ottenuti dalla ripartizione granulometrica di 200 campioni di sminuzzato di 4 cloni diversi di pioppo provenienti da impianti di SRC con turno 2 anni e 3 anni. Il MANOVA test applicato ai campioni mostra una differenza significativa tra i due intervalli di raccolta (2 anni vs 3 anni; $p < 0,05$ per tutte e tre le variabili).

Lo sminuzzato proveniente dagli impianti di SRC con turno 2 anni contiene in media l'1,0% di particelle oltre misura (> 63 mm) e l'11,8% di fine (< 3 mm) mentre l'87,3% è rappresentato dalle particelle della categoria giuste, ovvero tra i 63 e i 3 mm, mentre i trucioli prodotti dai cantieri degli impianti di SRC con turno 3 anni contengono il 2,3% di particelle oltre misura (> 63 mm) l'8,0% di fine (< 3 mm), mentre l'89,7% è rappresentato dalle particelle della categoria giuste (63-3 mm).

Tabella 19: ripartizione granulometrica di 200 campioni di sminuzzato di 4 cloni diversi di pioppo provenienti da impianti di SRC con turno 2 anni e 3 anni

Turno	Clone	N°	Oltre misura %	Giuste %	Fini %
2 anni	AF6	20	0.9	86.8	12.3
2 anni	AF2	20	0.9	90.4	8.7
2 anni	Monviso1	20	1.0	88.9	10.1
2 anni	Monviso2	20	1.0	87.2	11.9
2 anni	Murr	20	1.0	83.2	15.9
	Tutti	100	1.0 $\pm$ 0.31	87.3 $\pm$ 4.65	11.8 $\pm$ 4.66
3 anni	AF6	20	2.4	85.9	11.8
3 anni	AF2	20	2.4	91.4	6.1
3 anni	Monviso1	20	2.2	90.7	7.1
3 anni	Monviso2	20	2.3	89.5	8.2
3 anni	Murr	20	2.0	91.1	6.9
	Tutti	100	2.3 $\pm$ 0.45	89.7 $\pm$ 3.03	8.0 $\pm$ 2.93

I risultati della ripartizione granulometrica della totalità dei campioni provenienti sia dai cantieri di conifere e latifoglie, sia dagli impianti di SRC con turno di 2 anni e 3 anni, sono stati sottoposti al test MANOVA per evidenziare le possibili differenze, sono stati analizzati un totale di 400 campioni provenienti da 20 cantieri, ovvero 10 cantieri forestali e 10 agroforestali. Il test mostra alcune differenze significative tra i quattro tipi di cantiere, più precisamente latifoglie vs conifere vs SRC 2 anni vs SRC 3 anni, $p < 0,01$ per la variabile oltremisura, $p < 0,05$ per la variabile giuste, $p < 0,05$ per la variabile fini. Andando più nello specifico la categoria giuste dei campioni provenienti dai residui di latifoglie non mostra differenze con lo sminuzzato proveniente dai cantieri di SRC con turno di 2 anni, stessa cosa è stata riscontrata per la categoria fini, nessuna differenza tra lo sminuzzato ottenuto da piante intere di conifere e quello prodotto nei cantieri di SRC con turno di 3 anni.

4.1.3 - DENSITÀ BULK (DENSITÀ APPARENTE) DELLO SMINUZZATO

Parametro dato dal rapporto tra la massa ed il volume sterico di un campione di sminuzzato non soggetto a compressione o assestamento di alcun genere, è espressa in kg/m^3 . La densità apparente o *bulk density* in inglese, è un parametro importante per la conservazione nel momento dello stoccaggio e del trasporto. Diverse ricerche hanno evidenziato che questo parametro è fortemente influenzato dal contenuto idrico dello sminuzzato e dalle dimensioni delle scaglie che lo compongono (Tumuluru, 2011). Il contenuto di umidità può influenzare i risultati dei rilievi sulla *bulk density*, al diminuire dell'umidità si avrà una diminuzione anche della *bulk density* (Wu M. R., 2011).

I campioni dei cloni di pioppo oggetto di studio provenienti dalle aree collocate nel centro-sud Italia analizzati hanno dato come risultato una densità bulk anidra media misurata per ogni singolo clone rispettivamente pari a $0,138 \text{ kg/m}^3$ Limatola; $0,129 \text{ kg/m}^3$ Muur; $0,140 \text{ kg/m}^3$ AF2; $0,144 \text{ kg/m}^3$ AF6; $0,150 \text{ kg/m}^3$ Monviso. L'Anova ad una via per la densità bulk dello sminuzzato anidro tra i 5 cloni ha evidenziato differenze statisticamente elevate ($p\text{-value } 0,00008$), dal Tukey test si evidenziano tre principali gruppi statisticamente significativi (a,b,c.), come riportato in tabella 20

Tabella 20: tre principali gruppi statisticamente significativi (a,b,c.),

	Densità Bulk [kg/m ³]	Gruppi Tukey
Limatola	0,138±0,02	a,b
Muur	0,129±0,01	a
AF2	0,140±0,00	a,b,c
AF6	0,144±0,01	b,c
Monviso	0,150±0,01	c

Come si è già scritto precedentemente il parametro *densità bulk* è fortemente influenzato dall'umidità (u%) e in egual misura dal contenuto idrico (w%). Analizzando le curve riportate nei grafici 2, 3 si può vedere come al variare dell'umidità (u% o w%) la *densità bulk* varia, in questo caso abbia un andamento crescente.

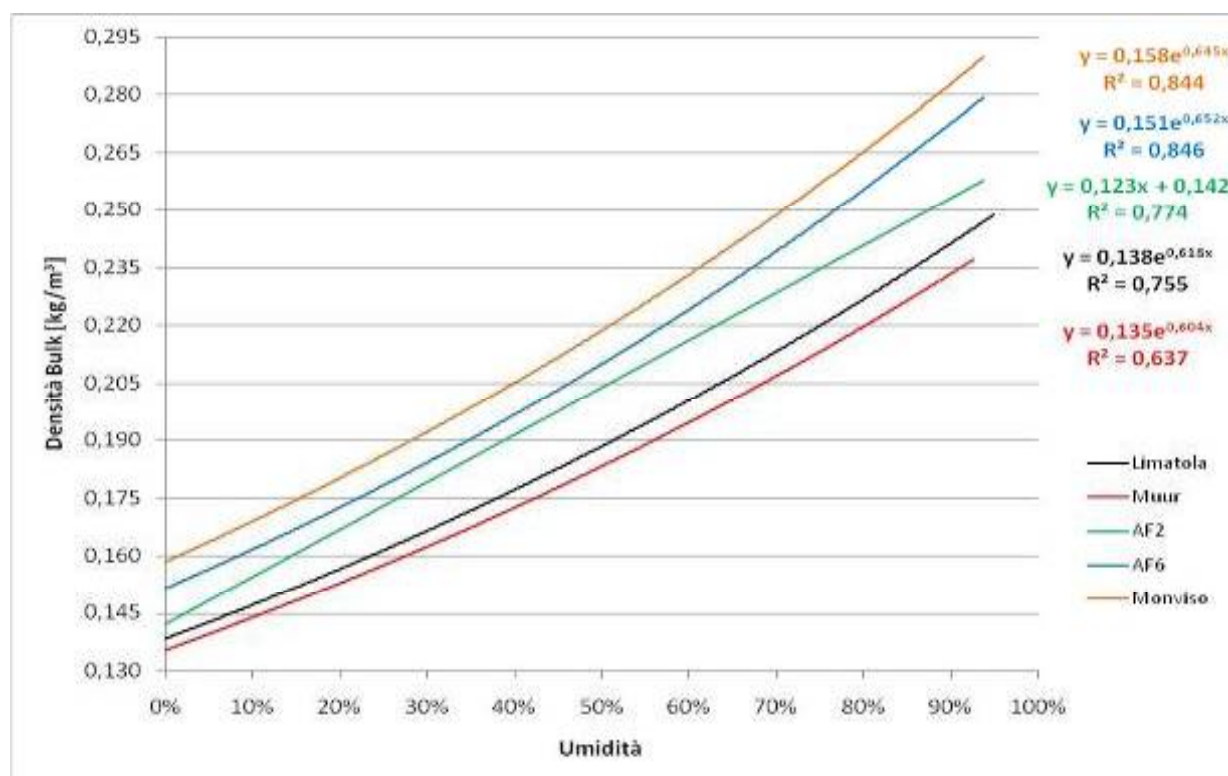


Grafico 2: andamento della densità bulk dello sminuzzato in funzione dell'umidità %

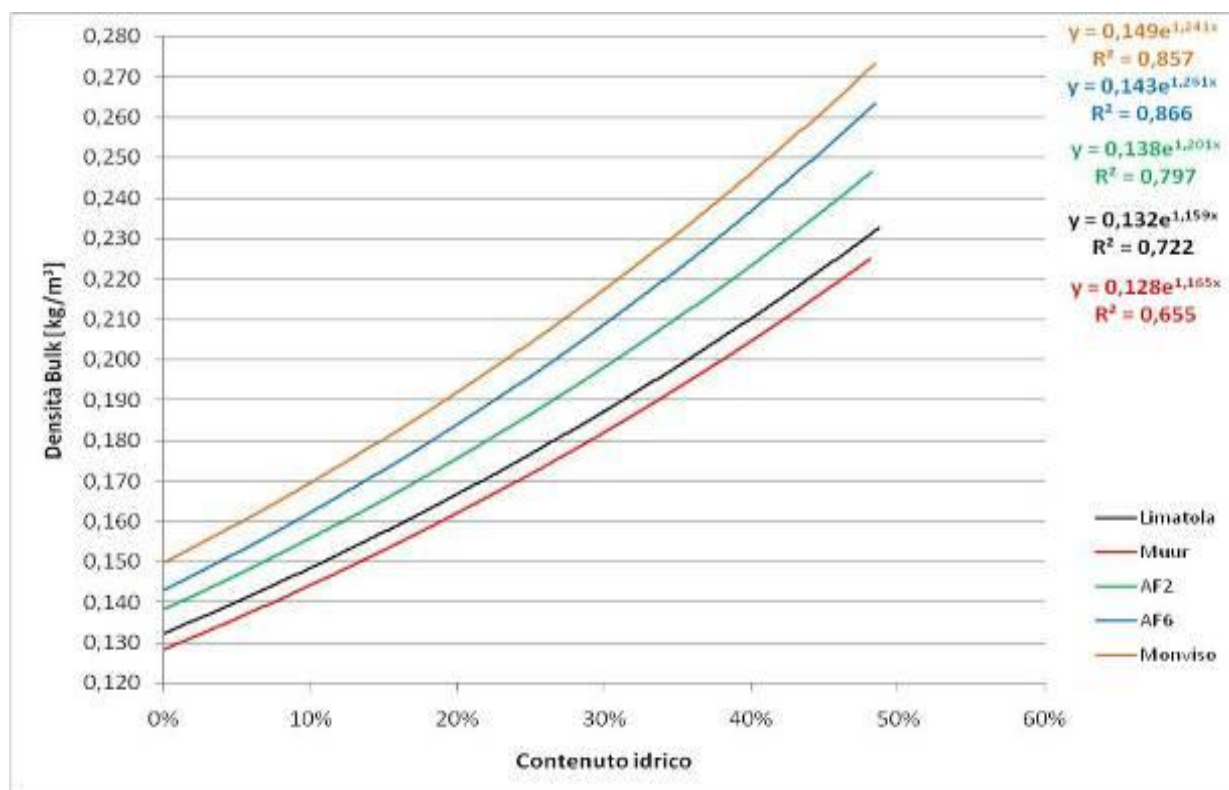


Grafico 3: andamento della densità bulk dello sminuzzato in funzione del contenuto idrico %

Per validare anche statisticamente l'esistenza di questa correlazione è stata condotta un'analisi di correlazione non parametrica applicando il test non parametrico di Wilcoxon per campioni appaiati, è stato possibile verificare come solo tra i cloni Limatola e Muur non esistono differenze statisticamente rilevanti (p-value 0,105), per tutti gli altri cloni le differenze medie della densità bulk sono sempre statisticamente rilevanti (p-value <0,05).

4.1.4 - POTERE CALORIFICO SUPERIORE (PCS) DELLO SMINUZZATO

Il potere calorifico di un materiale è l'espressione del suo contenuto energetico che viene rilasciato quando brucia, generalmente viene misurato in termini di contenuto di energia per unità di massa o di volume, da cui MJ/kg per i solidi, MJ/l per i liquidi e MJ/Nm³ per i gas. Il potere calorifico può essere espresso in due forme, potere calorifico lordo o superiore (PCS), o potere calorifico netto o inferiore (PCI). Il PCS è il contenuto totale di energia liberata quando il combustibile viene bruciato in aria, compreso il calore latente contenuto nel vapore acqueo, rappresentando così la massima quantità di energia potenzialmente recuperabile da una data fonte di biomassa, ovviamente la quantità di energia recuperata varierà con la tecnologia di conversione utilizzata (McKendry 2001).

La composizione chimica di una biomassa combustibile produce nel momento del processo di trasformazione un residuo solido, questo prodotto durante la combustione in presenza di aria si chiama “cenere”, e viene considerato un parametro standard per i combustibili sia liquidi che solidi. Il contenuto in ceneri influisce sui costi di trasformazione della biomassa fino ai costi per la conversione in energia, in quanto nei processi di conversione termochimica la composizione chimica della cenere può determinare notevoli problemi operativi (McKendry, 2002).

Il Potere Calorifico Superiore riferito alla sostanza secca dei campioni dei cloni di pioppo analizzati hanno dato valori medi di 20.6 MJ/kg e una DS di ± 1.4 MJ/kg per Limatola, 19.4 MJ/kg e una DS di ± 1.0 MJ/kg per Muur, 21.7 MJ/kg e una DS di ± 0.3 MJ/kg per AF2, 21.9 MJ/kg e una DS di ± 0.1 MJ/kg per AF6, 21.8 MJ/kg e una DS di ± 0.4 MJ/kg per Monviso. L’Anova ad una via per il PCS (sul secco) dello sminuzzato tra i 5 cloni ha evidenziato differenze statistiche altamente significative (p-value <0,01), come riportato in tabella 21 l’applicazione del Tukey test ha evidenziato tre principali gruppi statisticamente significativi (a, b, c).

Tabella 21: risultati dell’Anova ad una via per il PCS (sul secco) dello sminuzzato tra i 5 cloni

	U.M.	Limatola	Muur	AF2	AF6	Monviso
PCS	MJ/kg _{s.s.}	20,6 $\pm$ 1,4	19,4 $\pm$ 1,0	21,7 $\pm$ 0,3	21,9 $\pm$ 0,1	21,8 $\pm$ 0,4
		b	a	b,c	c	c
Ceneri	%	4,4 $\pm$ 0,9	3,7 $\pm$ 0,7	4,7 $\pm$ 1,0	3,3 $\pm$ 1,1	4,6 $\pm$ 0,9
		a,b	a,b	b	a	a,b

La caratterizzazione energetica dei campioni di cippato provenienti da SRC composti da 4 cloni differenti con due diversi intervalli di raccolta, 2 anni e 3 anni, è mostrata in tabella 22, sono stati raccolti 20 campioni di cippato di un Kg ciascuno in modo casuale per ogni sito per un totale di 200 campioni in 10 diversi cantieri agroforestali. I campioni sono stati sottoposti all’analisi MANOVA, il risultato è stato di evidenziare differenze statisticamente significative per ogni variabile tra i due tipi di impianto di SRC (2 anni vs 3 anni; p <0,01 per tutte le variabili) e in ogni tipo di impianto tra i cloni di pioppo (p <0,05 per tutte le variabili).

Tabella 22: caratteristiche energetiche dei campioni di cippato provenienti da SRC composti da 4 cloni differenti con due diversi intervalli di raccolta, 2 anni e 3 anni

Turno	Clone	PCS MJ/kg _{d.m.}	Ceneri % _{d.m.}	
2 anni	AF2	19,1	4	$p > 0,05$
2 anni	AF6	20,1	2,8	
2 anni	Monviso 1	19,9	4	
2 anni	Monviso 2	20,5	3,9	
2 anni	Muur	19,4	3,7	
2 anni	Tutti	19.7 ± 0.93	3.8 ± 1.02	
3 anni	AF2	20,1	3,2	$p > 0,05$
3 anni	AF6	20,4	2,1	
3 anni	Monviso 1	20,6	2,9	
3 anni	Monviso 2	20,6	3,1	
3 anni	Muur	19,7	2,9	
3 anni	Tutti	20.2 ± 0.70	2.8 ± 0.93	

La media del PCS dei campioni ottenuti dagli impianti di SRC di 2 anni, come si può vedere dalla tabella 22, è risultato essere di 19,7 MJ/kg_{d.m.} mentre il contenuto in ceneri in media del 3,8%, nel caso dei 100 campioni provenienti dai cantieri agroforestali di SRC di 3 anni la media del PCS è stata del 20,2 MJ/kg_{d.m.} con contenuto in ceneri in media del 2,8%.

4.1.5 - ANALISI ULTIMA DELLO SMINUZZATO

Eseguire un'analisi elementare su un combustibile significa rilevare il contenuto in C, N, H, O e S, insieme al contenuto in ceneri e viene generalmente definita analisi ultima. Nel nostro studio questo tipo di analisi è stata effettuata per rilevare la quantità di Carbonio, Idrogeno e Azoto (C, H e N). I risultati che sono riportati in tabella 23 mostrano le analisi effettuate sui campioni di cippato provenienti dagli impianti di SRC composti da 4 cloni differenti con due diversi intervalli di raccolta, 2 anni e 3 anni, in media nello sminuzzato proveniente dalla SRC di 2 anni il contenuto in C è stato di 50,0%_{daf}, dello 0,2%_{daf} per N e 6,2%_{daf} per H. Nel caso dello sminuzzato proveniente dagli impianti di SRC con turno di 3 anni il contenuto in C è risultato essere in media del 50,1%_{daf} dello 0,2%_{daf} per N e 6,2%_{daf} per H.

Tabella 23: quantità di Carbonio, Idrogeno e Azoto (C, H e N)

Turno	Clone	C % _{daf}	N % _{daf}	H % _{daf}	
2 anni	AF2	49,5	0,2	6,4	$p > 0,05$
2 anni	AF6	49,7	0,2	6,1	
2 anni	Monviso 1	49,9	0,2	6,1	
2 anni	Monviso 2	50	0,2	6,2	
2 anni	Muur	51,2	0,2	6	
2 anni	Tutti	50.0 ± 0.86	0.2 ± 0.04	6.2 ± 0.35	
3 anni	AF2	49,5	0,2	6,4	$p > 0,05$
3 anni	AF6	49,7	0,1	6,2	
3 anni	Monviso 1	50,2	0,2	6,2	
3 anni	Monviso 2	50,1	0,2	6,2	
3 anni	Muur	51	0,2	6,1	
3 anni	Tutti	50.1 ± 0.85	0.2 ± 0.05	6.2 ± 0.34	

4.2 - SMINUZZATO OTTENUTO DA PIANTE INTERE UTILIZZATE IN OPERAZIONI DI PRIMO DIRADAMENTO.

4.2.1 - COMPOSIZIONE MACROSCOPICA DELLO SMINUZZATO

Un'elevata percentuale di corteccia ha un effetto negativo sul potere calorifico, questo dovuto all'elevato contenuto di umidità nella corteccia rispetto alla fibra (Spinelli et al., 2011). La presenza di corteccia determina alte quantità di ceneri durante la combustione causando un effetto negativo sul sistema di combustione, la formazione di superfici vetrificate nella fornace riduce l'efficienza del sistema di scambio e diverse problematiche nello smaltimento (Ciccarese, 2000).

La tabella 24 mostra i risultati ottenuti della distribuzione macroscopica dei 100 campioni di cippato proveniente da sminuzzato di piante intere di conifere, i dati sono raggruppati in singole categorie, contenuto in legno, corteccia e rametti. In media, il cippato analizzato dei campioni consiste in 79,2% di legno, 13,3% in corteccia e il 3,2% di ramoscelli, il resto è costituito da "altro" ovvero polvere, foglie e altri materiali in quantità minime. Nel caso peggiore il contenuto in legno può scendere al 76,7% e la somma tra corteccia e rametti raggiungere il 19,2% del peso totale.

Tabella 24: Composizione macroscopica sminuzzato piante intere di conifere

	N°	Legno %	Corteccia %	Rametti %	Altro %	
Picea abies L.	20	76,7	15,9	3,3	4,2	$p > 0,05$
Picea abies L.	20	81,1	11,4	3,9	3,6	
Pinus nigra Arn.	20	77,4	15,1	2,9	4,6	
Pinus pinaster Ait.	20	79,9	12,6	2,7	4,8	
Pinus halepensis Mill.	20	81,1	11,4	3,2	4,3	
Tutte	100	79,2 ± 7,96	13,3 ± 5,18	3,2 ± 1,44	4,3 ± 1,21	

La Tabella 25 mostra i risultati della ripartizione in gruppi dei 100 campioni di cippato provenienti in questo caso dei residui di interventi in boschi di latifoglie effettuati nel periodo invernale, quando i rami sono spogli dalle foglie. In media i campioni contengono il 74.1% di legno, il 18.4% di corteccia, 5.9% di foglie e l'1.6% di "altro". Nell'ipotesi peggiore il contenuto in legno può scendere al 72.3% e la somma tra corteccia e rametti raggiungere il 26,0% del peso totale. La totalità dei campioni sia provenienti dalle piante intere di conifere che dai cantieri dei boschi cedui di latifoglie sono stati analizzati tramite MANOVA, il risultato è stato quello di ottenere esclusivamente una differenza significativa tra i campioni delle conifere rispetto a quelli delle latifoglie ($p < 0,01$ per tutte le variabili).

Tabella 25: Composizione macroscopica del cippato proveniente da residui di interventi su boschi di latifoglie

	N°	Legno %	Corteccia %	Rametti %	Altro %	
Quercus cerris L.	20	78	14,5	5,9	1,6	$p > 0,05$
Quercus pubescens Willd.	20	73,4	19,1	5,9	1,6	
Quercus cerris L.	20	74,1	18,4	5,9	1,6	
Fagus sylvatica L.	20	72,3	20,2	5,8	1,7	
Fagus sylvatica L.	20	72,8	19,7	5,9	1,6	
Tutte	100	74,1 ± 7,51	18,4 ± 1,10	5,9 ± 0,71	1,6 ± 0,33	

4.2.2 - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DELLO SMINUZZATO

La distribuzione granulometrica è un'importante proprietà fisica delle biomasse solide in quanto conferisce quella caratteristica che la rende simile ad un fluido, necessaria nei sistemi di trasporto e di rifornimento degli impianti termici. Comprendere la distribuzione granulometrica aiuterà anche a spiegare in modo adeguato il trattamento, l'attrezzatura e l'organizzazione necessarie per l'immagazzinamento (Wu M. R. et al., 2010).

Dall'applicazione del test MANOVA svolte sui 100 campioni di cippato provenienti dallo sminuzzato di piante intere di conifere da 10 diversi cantieri e sui 100 campioni provenienti sempre da 10 cantieri ma in questo caso di interventi in boschi di latifoglie si è riscontrata una differenza significativa tra i campioni di conifera e i campioni di latifolia per tutte le variabili prese in considerazione ($p < 0.01$ per ogni variabile), ovvero "Oltre misura" particelle con lunghezza maggiore di 63 mm, "Giuste" particelle con lunghezza tra i 63 mm e i 3 mm ed in fine "Fini" con particelle con lunghezza inferiore ai 3 mm.

Possiamo vedere in tabella 26 che in media lo sminuzzato proveniente dai campioni di piante intere di conifere contiene lo 0,6% di particelle oltre misura (<63 mm), l'8,0% di fini (<3 mm), mentre la maggior parte, il 91,4%, è rappresentato da particelle giuste, tra 63 mm e 3 mm.

Tabella 26: distribuzione granulometrica dei campioni di piante intere di conifere

	N°	Oltre misura %	Giuste %	Fini %
Picea abies L.	20	0,6	91,5	7,8
Picea abies L	20	0,5	91,3	8,2
Pinus nigra Arn.	20	0,5	91,7	7,8
Pinus pinaster Ait.	20	0,6	91,5	7,9
Pinus halepensis Mill.	20	0,6	91,2	8,2
Tutte	100	0,6 ± 0,14	91,4 ± 1,18	8,0 ± 1,16

La tabella 27 mostra i risultati invece della ripartizione granulometrica dei 100 campioni di sminuzzato proveniente dai cantieri effettuati nei boschi di latifoglie, in media lo sminuzzato analizzato contiene il 6,4% di particelle ricadenti nella categoria Oltre misura e il 6,4% di particelle nella categoria Fini, la maggior parte ricade nella categoria Giuste, ovvero per l'87,2%.

Tabella 27: ripartizione granulometrica dei 100 campioni di sminuzzato proveniente dai cantieri effettuati nei boschi di latifoglie

	N°	Oltre misura %	Giuste %	Fini %
Quercus cerris L.	20	6,8	85	8,1
Quercus pubescens Willd.	20	6,6	87,6	5,9
Quercus cerris L.	20	6,1	88	5,8
Fagus sylvatica L.	20	6,1	87	6,9
Fagus sylvatica L.	20	6,5	88,4	5,1
Tutte	100	6,4 ± 0,98	87,2 ± 2,0	6,4 ± 1,73

4.2.3 - DENSITÀ BULK (DENSITÀ APPARENTE) DELLO SMINUZZATO

Parametro dato dal rapporto tra la massa ed il volume sterico di un campione di sminuzzato non soggetto a compressione o assestamento di alcun genere, è espressa in kg/m^3 . La densità apparente o *bulk density* in inglese, è un parametro importante per la conservazione nel momento del magazzino e del trasporto. Diverse ricerche hanno evidenziato che questo parametro è fortemente influenzato dal contenuto idrico dello sminuzzato e dalle dimensioni delle scaglie che lo compongono (Tumuluru, 2011). Il contenuto di umidità può influenzare i risultati dei rilievi sulla *bulk density*, al diminuire dell'umidità si avrà una diminuzione anche della *bulk density* (Wu M. R., 2011).

La densità bulk anidra media dei campioni di chips ottenuti dalla sminuzzatura di piante intere di *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller e *Pinus pinaster* Miller, utilizzate durante operazioni di primo diradamento è pari a $168,72 \text{ kg/m}^3$ per il P 45 e $157,38 \text{ kg/m}^3$ per il P 16 nella area sperimentale caratterizzata dalle specie pino d'Aleppo e marittimo, mentre per l'area sperimentale con pino nero $146,94 \text{ kg/m}^3$ per il vaglio P 45 e $123,50 \text{ kg/m}^3$ per il vaglio P 16. Su tali valori è stato condotto il test t di Student per due campioni indipendenti (livello di significatività $\alpha = 0,05$) e tale confronto ha evidenziato differenze statisticamente significative (grafico 4,5).

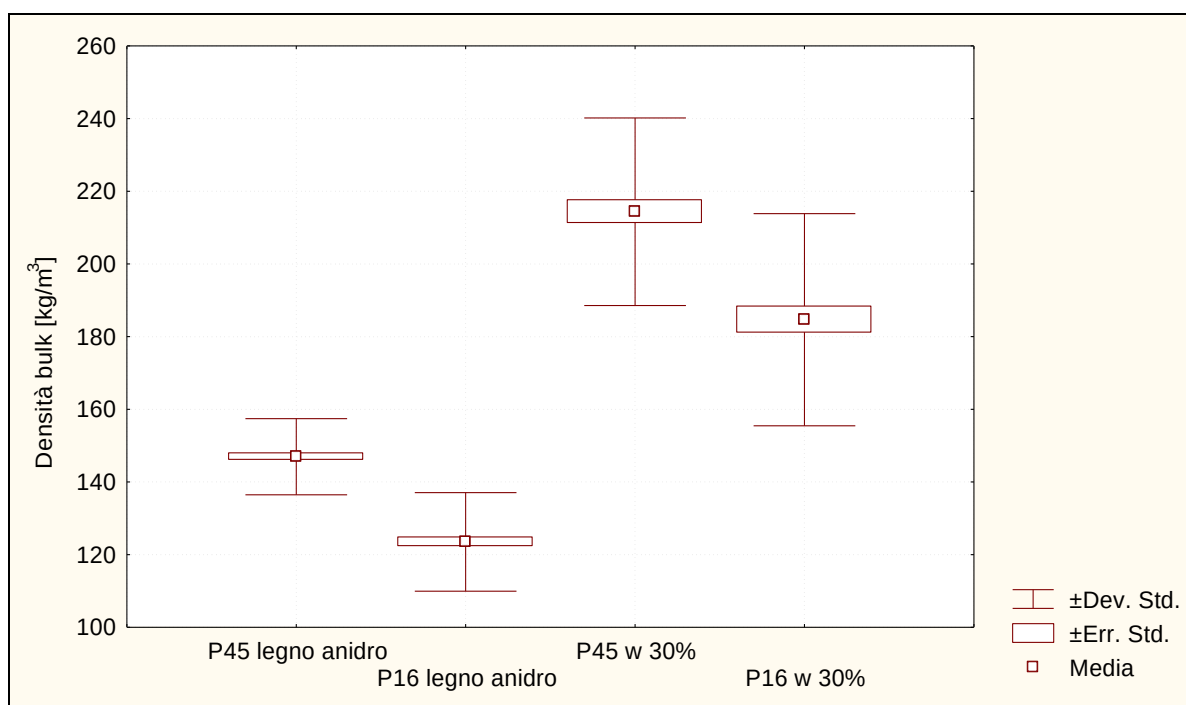


Grafico 4: Grafico box-plot dei valori di densità bulk riferiti alle pezzature P45 e P16 dello sminuzzato di pino nero

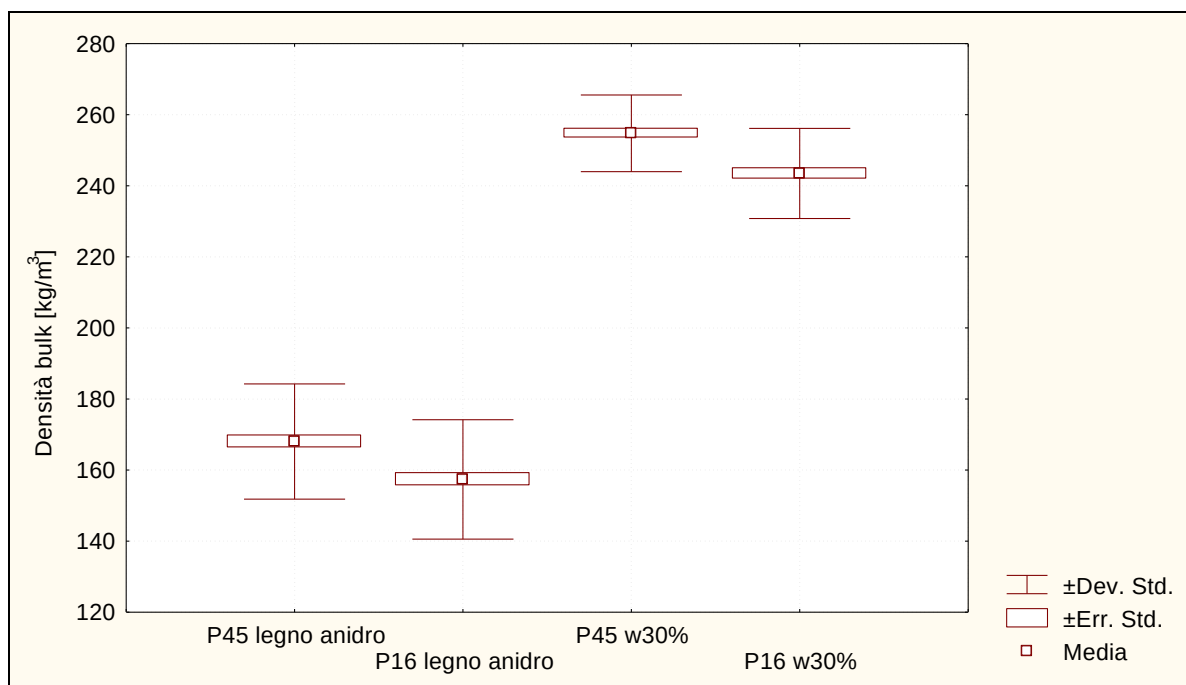


Grafico 5: Grafico box-plot dei valori di densità bulk riferiti alle pezzature P45 e P16 dello sminuzzato dei pini mediterranei

I valori di densità bulk aumentano significativamente all'aumentare del contenuto di acqua come dimostrato dalle equazioni ricavate, con valori sempre superiori per lo sminuzzato con vagliatura p 45 rispetto alla p 16 (grafico 6,7).

Dalle curve riportate nei grafici 6 e 7 è chiaramente visibile come al variare dell'umidità (u% o w%) la densità bulk abbia un andamento crescente, per validare statisticamente questa correlazione è stata condotta un'analisi di correlazione non parametrica dimostrando il buon fitting presente con un valore del coefficiente ρ (rho) di Spearman superiore a 0,9 in tutte le quattro correlazioni testate. Le due curve ottenute dello sminuzzato P16 e al P45 assumono un comportamento leggermente diverso causato da un differente coefficiente sterico (m^3/m_{st}) con valori inferiori per la pezzatura P16 rispetto il P45, quest'ultima presenta una maggiore eterogeneità nelle dimensioni delle scaglie determinando così una minore presenza di spazi liberi all'interno del volume sterico, dando luogo a diversità statisticamente significative nei valori di densità bulk rispetto al vaglio P16.

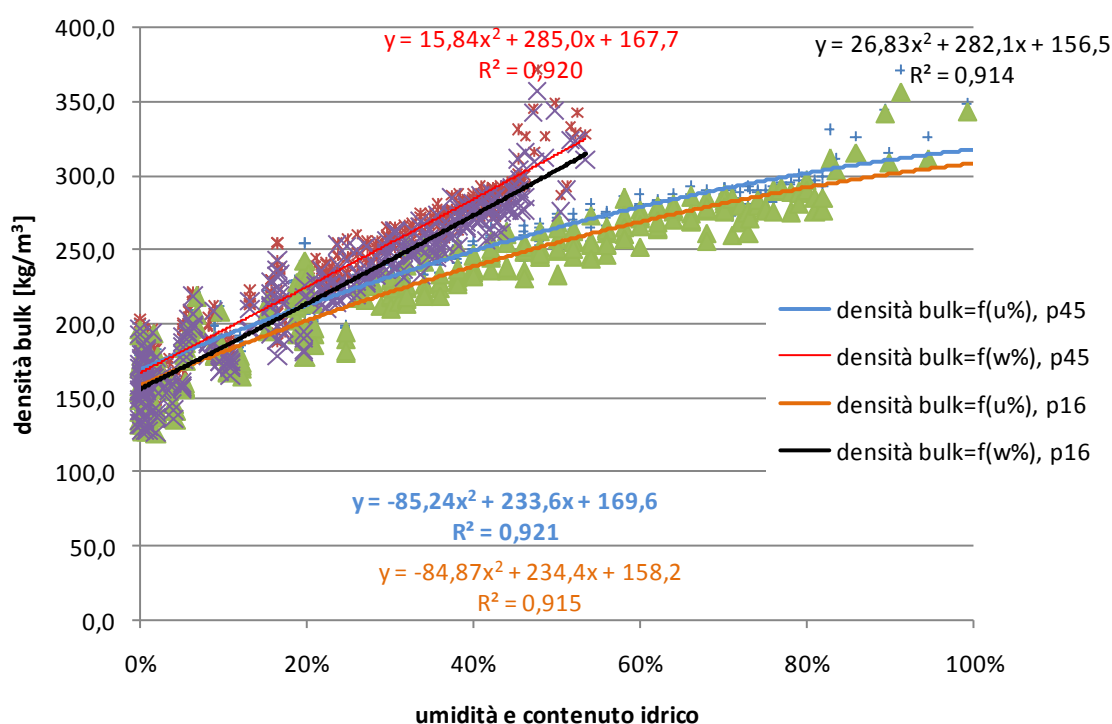


Grafico 6: Umidità e contenuto idrico del cippato proveniente dal CRA- PLF.

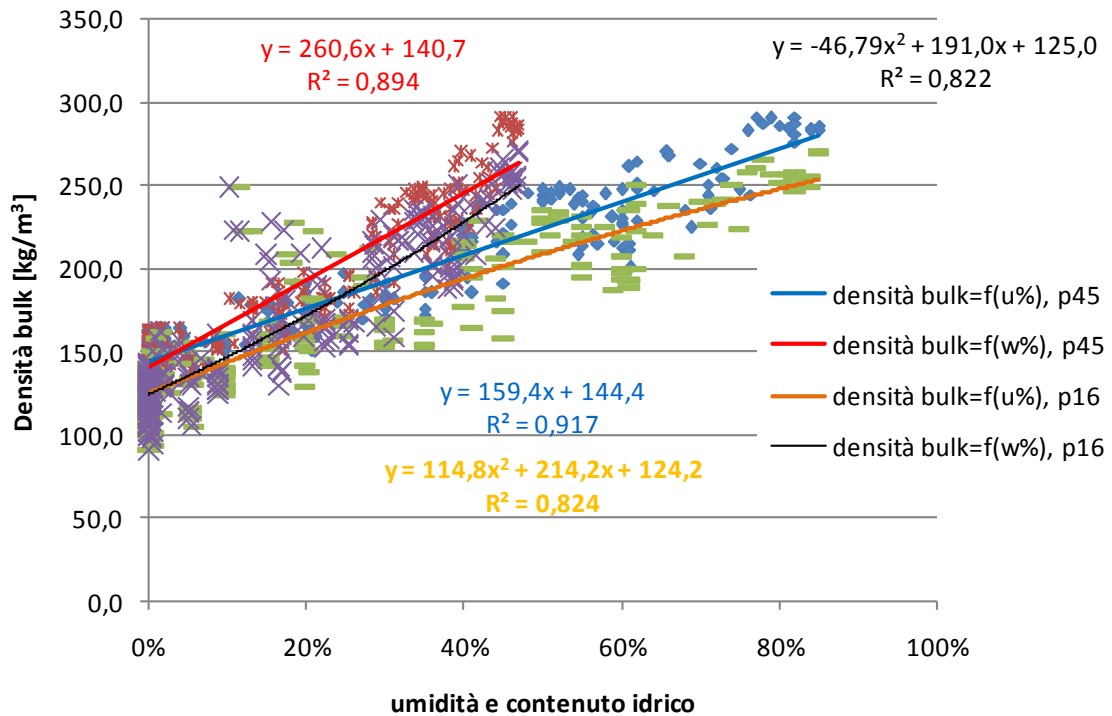


Grafico 7: Umidità e contenuto idrico del cippato proveniente dal Monte Peglia.

4.2.4 - POTERE CALORIFICO SUPERIORE (PCS) DELLO SMINUZZATO

Il potere calorifico di un materiale è l'espressione del suo contenuto energetico che viene rilasciato quando brucia, generalmente viene misurato in termini di contenuto di energia per unità di massa o di volume, da cui MJ/kg per i solidi, MJ/l per i liquidi e MJ/Nm³ per i gas. Il potere calorifico può essere espresso in due forme, potere calorifico lordo o superiore (PCS), o potere calorifico netto o inferiore (PCI). Il PCS è il contenuto totale di energia liberata quando il combustibile viene bruciato in aria, compreso il calore latente contenuto nel vapore acqueo, rappresentando così la massima quantità di energia potenzialmente recuperabile da una data fonte di biomassa, ovviamente la quantità di energia recuperata varierà con la tecnologia di conversione utilizzata (McKendry 2001).

La composizione chimica di una biomassa combustibile produce nel momento del processo di trasformazione un residuo solido, questo prodotto durante la combustione in presenza di aria si chiama "cenere", e viene considerato un parametro standard per i combustibili sia liquidi che solidi. Il contenuto in ceneri influisce sui costi di trasformazione della biomassa fino ai costi per la conversione in energia, in quanto nei processi di conversione termochimica la composizione chimica della cenere può determinare notevoli problemi operativi (McKendry, 2002).

Nel caso dello sminuzzato di piante intere di pino nero proveniente da interventi di primo diradamento il valore di PCS riferito alla sostanza secca ha un valore medio di 20,78 MJ/kg e una DS di $\pm 0,40$ MJ/kg. La media del contenuto in ceneri è risultata essere del 0,58%.

Nel caso del legno sminuzzato di pini mediterranei invece il valore di PCS riferito alla sostanza secca ha fornito un valore medio di 20,75 MJ/kg e una DS di $\pm 1,11$ MJ/kg. La media del contenuto in ceneri è risultata essere del 0,94%. Il materiale oggetto di studio, sia sotto il profilo fisico che energetico, ha evidenziato buone potenzialità, con discreti valori di potere calorifico e produzione di ceneri nella norma.

Tabella 28: valori medi di PCS e contenuto in ceneri.

	PCS MJ/kgs.s.	Ceneri %db
Pino nero	20,78 $\pm$ 0,4	0,58
Pini mediterranei	20,75 $\pm$ 1,1	0,94

Di seguito vengono esposti i risultati della caratterizzazione energetica dei 100 campioni di cippato provenienti dallo sminuzzato di piante intere di conifere da diversi cantieri e dei 100 campioni provenienti da cantieri in questo caso di interventi in boschi di latifoglie.

L'applicazione dell'analisi MANOVA ha evidenziato differenze statistiche tra conifere e latifoglie ($p < 0.01$) ma non solo, anche tra le singole specie ($p < 0.05$ per ogni singola specie).

Tabella 29: Caratteristiche energetiche campioni di conifera

	N°	PCS MJ/kgs.s.	Ceneri %db
Picea abies L.	20	20,7	1,2
Picea abies L	20	20,6	1,1
Pinus nigra Arn.	20	20,4	0,6
Pinus pinaster Ait.	20	20,6	0,8
Pinus halepensis Mill.	20	20,9	0,9
Tutte	100	20,6 $\pm$ 0,51	0,9 $\pm$ 0,30

Dalla tabella 29 si evidenzia che in media il PCS ottenuto dai 100 campioni di cippato prodotto da piante intere di conifere è di 20,6 MJ/kg_{s.s.} con un contenuto in ceneri dello 0,9%, ricordando però che sono state riscontrate differenze statisticamente rilevanti tra le varie specie che compongono i campioni.

Nel caso dello sminuzzato proveniente dai cantieri in boschi di latifoglie si sono ottenuti valori in media di PCS del 19.5 MJ/kg_{s.s.} con un contenuto in ceneri dell'1,5%, ricordando sempre però che sono state riscontrate differenze statisticamente rilevanti tra le varie specie che compongono i campioni (Tabella 30).

Tabella 30: caratteristiche energetiche campioni di latifolia

	N°	PCS MJ/kg _{s.s.}	Ceneri %db
Quercus cerris L.	20	19,5	1,5
Quercus pubescens Willd.	20	19,3	1,5
Quercus cerris L.	20	19,6	1,2
Fagus sylvatica L.	20	19,6	1,7
Fagus sylvatica L.	20	19,7	1,5
Tutte	100	19,5 ± 0,41	1,5 ± 0,53

4.2.5 - ANALISI ULTIMA DELLO SMINUZZATO

Eseguire un'analisi elementare su un combustibile significa rilevare il contenuto in C, N, H, O e S, insieme al contenuto in ceneri e viene generalmente definita analisi ultima. Nel nostro studio questo tipo di analisi è stata effettuata per rilevare la quantità di Carbonio, Idrogeno e Azoto (C, H e N).

Per quanto riguarda lo sminuzzato di pino nero e pini mediterranei proveniente dagli interventi di primo diradamento i risultati dell'analisi ultima è evidenziata in tabella 31

Tabella 31: Valori medi quantità di Carbonio, Idrogeno, Azoto

	C % _{daf}	H % _{daf}	N % _{daf}
Pino nero	50,00±3,2	6,04±0,5	0,22±0,1
Pini mediterranei	52,82±2,3	6,39±0,5	0,20±0,02

I valori ottenuti rivelano una ottimale condizione del contenuto in C sicuramente per i pini mediterranei ($52,82 \pm 2,3\%_{daf}$), dove risulta più elevato rispetto al pino nero ($50,00 \pm 0,5\%_{daf}$). Stesso andamento si ha per il contenuto in H, mentre si ha una tendenza inversa nel caso dell'azoto dove il valore riscontrato per i pini mediterranei è inferiore al pino nero.

Di seguito la tabella 32 mostra i risultati ottenuti dell'analisi ultima dei 100 campioni di cippato proveniente da sminuzzato di piante intere di conifere di 10 diversi cantieri, in media il contenuto in C del cippato è risultato essere del 50,2%, insieme al contenuto in N, che è risultato essere dello 0,2% hanno mostrato differenza significativa tra le singole specie di conifere, al contrario del contenuto in H che con il 6,3% non ha rilevato differenze significative tra le singole specie.

Tabella 32: Contenuto in C, H e N dei campioni di sminuzzato provenienti da piante intere di conifera

	C %daf	H %daf	N %daf
Picea abies L.	49,5	0,2	6,4
Picea abies L	49,8	0,1	6,3
Pinus nigra Arn.	50	0,2	6,3
Pinus pinaster Ait.	50,6	0,2	6,1
Pinus halepensis Mill.	50,9	0,2	6,1
Tutte	$50,2 \pm 0,91$	$0,2 \pm 0,05$	$6,1 \pm 0,35$

Analizzando i 100 campioni provenienti dai cantieri di boschi di latifoglie si è riscontrato nel caso dell'analisi ultima lo stesso andamento precedentemente descritto per i campioni provenienti da boschi di conifere, in media il contenuto in C del cippato è risultato essere del 47,9%, insieme al contenuto in N, che è risultato essere dello 0,2% hanno mostrato differenza significativa tra le singole specie di conifere, al contrario del contenuto in H che con il 6,1% non ha rilevato differenze significative tra le singole specie.

Tabella 33: Contenuto in C, H e N dei campioni di sminuzzato ottenuto da residui di latifoglie

	C %daf	H %daf	N %daf
Quercus cerris L.	47,9	0,2	6,2
Quercus pubescens Willd.	48	0,2	6,3
Quercus cerris L.	47,8	0,2	6,1
Fagus sylvatica L.	47,9	0,2	5,9
Fagus sylvatica L.	47,9	0,2	6,1
Tutte	47,9 ± 0,51	0,2 ± 0,03	6,1 ± 0,33

4.3 - CONFRONTO TRA SMINUZZATO DA SRF E SMINUZZATO OTTENUTO DA PIANTE INTERE UTILIZZATE IN OPERAZIONI DI PRIMO DIRADAMENTO

4.3.1 - COMPOSIZIONE MACROSCOPICA DELLO SMINUZZATO

La Tabella 34 mette a confronto le percentuali delle diverse categorie della composizione macroscopica di tutti i campioni di sminuzzato, latifoglie, conifere e impianti di SRC con turno di 2 e 3 anni, per la categoria fibra di legno la media totale risulta essere del 72,8% , la percentuale più bassa si individua nello sminuzzato proveniente dagli impianti di SRC con turnazione di 2 anni, 66,3%, questo di conseguenza li porta ad avere la più alta percentuale di corteccia con il 26,2%. La percentuale più alta di rametti (5,9%) si è riscontrata nello sminuzzato ottenuto dai residui provenienti dagli interventi sui boschi di latifolia, mentre va fatto notare come la percentuale più alta della categoria “altro” è stata riscontrata nello sminuzzato di piante intere di conifere, 4,3% costituita principalmente da fogliame.

Tabella 34: confronto tra le percentuali delle diverse categorie della composizione macroscopica di tutti i campioni di sminuzzato, latifoglie, conifere e impianti di SRC con turno di 2 e 3 anni

	N°	Legno %	Corteccia %	Rametti %	Altro %
Conifere	100	79.2	13.3	3.2	4.3
Latifoglie	100	74.1	18.4	5.9	1.6
Pioppo 2 anni	100	66.3	26.2	3.6	3.9
Pioppo 3 anni	100	71.5	21.0	4.3	3.2
Tutti	400	72.8 ± 9.38	19.7 ± 2.31	4.3 ± 1.55	3.2 ± 1.01

I risultati della distribuzione macroscopica della totalità dei campioni provenienti sia dai cantieri di conifere e latifoglie, sia dagli impianti di SRC con turno di 2 anni e 3 anni, sono stati sottoposti ai MANOVA e Tukey test per evidenziare le possibili differenze, sono stati testati un totale di 400 campioni provenienti da 20 cantieri, ovvero 10 cantieri forestali e 10 agroforestali. I test mostrano alcune differenze significative tra i quattro tipi di cantiere, più precisamente latifoglie vs conifere vs SRC 2 anni vs SRC 3 anni, $p < 0.05$ per la variabile fibre di legno e $p < 0,05$ per la variabile corteccia. Per la categoria rametti e “altro” invece lo sminuzzato proveniente da cantieri di conifere e gli impianti di SRC 2 anni non hanno mostrato differenze statisticamente significative ($p > 0,05$).

4.3.2 - DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DELLO SMINUZZATO

I risultati della ripartizione granulometrica della totalità dei campioni provenienti sia dai cantieri di conifere e latifoglie, sia dagli impianti di SRC con turno di 2 anni e 3 anni, sono stati sottoposti al test MANOVA per evidenziare le possibili differenze, sono stati analizzati un totale di 400 campioni provenienti da 20 cantieri, ovvero 10 cantieri forestali e 10 agroforestali. Il test mostra alcune differenze significative tra i quattro tipi di cantiere, più precisamente latifoglie vs conifere vs SRC 2 anni vs SRC 3 anni, $p < 0,01$ per la variabile oltre misura, $p < 0,05$ per la variabile giuste, $p < 0,05$ per la variabile fini. Andando più nello specifico la categoria giuste dei campioni provenienti dai residui di latifoglie non mostra differenze con lo sminuzzato proveniente dai cantieri di SRC con turno di 2 anni, stessa cosa è stata riscontrata per la categoria fini, nessuna differenza tra lo sminuzzato ottenuto da piante intere di conifere e quello prodotto nei cantieri di SRC con turno di 3 anni.

Tabella 35: confronto tra le percentuali delle diverse categorie della composizione macroscopica di tutti i campioni di sminuzzato, latifoglie, conifere e impianti di SRC con turno di 2 e 3 anni.

Tipo	Campioni	Oltre misura %	Giuste %	Fini %
Conifere	100	0,6	91,4	8
Latifoglie	100	6,4	87,2	6,4
Pioppo 2 anni	100	1	87,3	11,8
Pioppo 3 anni	100	2,3	89,7	8
Tutte	400	2.56 ± 2.38	88.91 ± 3.50	8.54 ± 3.54

La tabella 35 mette a confronto le percentuali delle diverse categorie della composizione macroscopica di tutti i campioni di sminuzzato, latifoglie, conifere e impianti di SRC con turno di 2 e 3 anni, prendendo la totalità dei campioni la media percentuale della categoria dei trucioli giusti è pari all'88,91%, la percentuale più bassa si individua nello sminuzzato proveniente dagli scarti degli interventi nei boschi di latifolia con l'87,2%, questo di conseguenza li porta ad avere la più alta percentuale di trucioli oltre misura con il 6,4%. La percentuale più alta invece di trucioli fini si individua nei campioni di sminuzzato provenienti dagli impianti di SRC con turno 2 anni (11,8%).

4.4 - SMINUZZATO PROVENIENTE DALLA POTATURA DELLE ARANCE

è stata presa in considerazione una delle realtà agricole più consistenti della Sicilia, la coltivazione delle arance. L'obiettivo di questo studio è fornire informazioni su quanto le biomasse residuali provenienti dagli scarti di potature degli agrumeti in Sicilia, con particolare riferimento agli scarti provenienti dalle potature delle arance, possano contribuire alla disponibilità di biomassa per l'energia, prendendone anche in considerazione le caratteristiche energetiche. Attualmente la superficie coltivata ad agrumi in Sicilia si attesta su 96.615 ha, ovvero il 56,5% della superficie agrumetata nazionale, di cui 60.426 ha investiti ad arancio (62,5%).

La produzione delle arance pur interessando tutte le province, si concentra soprattutto in quella di Catania, dove è localizzato il 41% della produzione regionale, seguita dalle province di Siracusa, Enna e Agrigento. Dall'analisi della cartografia fig. 2, sono stati individuati e distinti 3 possibili ipotetici distretti energetici, riferiti alla coltivazione delle arance. Per ognuno dei tre distretti sono stati effettuati 5 rilievi nei cantieri di potatura, al

fine di ottenere un valore medio del quantitativo di biomassa disponibile. Inoltre in ciascun cantiere analizzato sono stati prelevati tre campioni di biomassa (rami comprensivi di foglie e rametti) per la caratterizzazione fisico energetica.

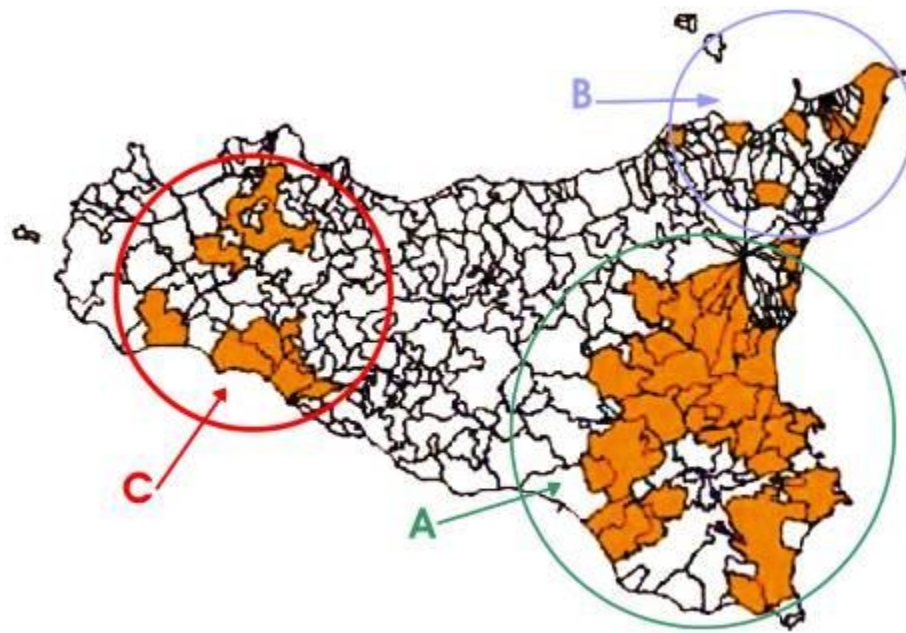


Figura 14: possibili distretti energetici nelle aree di coltivazione delle arance

Il materiale ritraibile dal recupero delle potature degli aranceti, sia sotto il profilo fisico che energetico, ha evidenziato delle buone potenzialità (tabella 36), con discreti valori di potere calorifico e produzione di ceneri nella norma. Il legno di per se può essere considerato tra i legni pesanti, come dimostrato dagli elevati valori di massa volumica rilevata, quindi con ottime caratteristiche energetiche. Tuttavia la densità bulk del materiale ritratto dalla potature e sminuzzato non è elevata, questo in quanto lo sminuzzato contiene foglie e rametti anche di dimensioni ridotte e ciò si riflette anche sul contenuto energetico dello sminuzzato analizzato.

Tabella 36: caratteristiche fisico energetiche della biomassa analizzata.

	U.M.	N°	Media	Min	Max	Range	Varianza	Std. Dev.	Std. Err.
PCS	MJ/kg s.s.	45	18,79	18,67	18,91	0,24	0,004	0,066	0,010
PCI	MJ/kg s.s.	45	17,49	17,37	17,61	0,24	0,004	0,066	0,010
Ceneri	% db	45	4,63	0,200	8,500	8,300	5,337	2,210	0,344
Volatili	% db	45	83,48	75,100	93,200	18,100	29,567	5,438	0,811
Carbonio fisso	% db	45	9,720	2,300	16,200	13,900	21,143	4,598	0,685
C	% daf	45	56,08	47,400	64,000	16,600	27,781	5,271	0,786
H	% daf	45	6,96	5,700	7,800	2,100	0,360	0,600	0,089
N	% daf	45	0,74	0,400	1,000	0,600	0,031	0,176	0,026
Massa volumica s.f.	kg/m³	45	1016,31	926,000	1039,000	113,000	474,537	21,784	3,247
Massa volumica s.s.	kg/m³	45	589,44	537,000	603,000	66,000	161,162	12,695	1,892
Densità Bulk sminuzzato s.f.	kg/m³	45	352,04	316,800	391,700	74,900	459,671	21,440	3,196
Densità Bulk sminuzzato s.s.	kg/m³	45	253,46	228,100	282,000	53,900	238,131	15,431	2,300
Legenda: s.s valore riferito alla sostanza secca u% 0; s.f. valore riferito alla sostanza fresca o tal quale u% umidità percentuale riferita alla massa fresca; % db Base secca; % daf Base fresca e priva di ceneri									

Impiegando il software Statistica (2007), è stata confermata la validità dei dati con test multipli. Per testare la normalità dei dati è stato impiegato il test di KolmogorovSmirnov, mentre per l'omogeneità delle varianze il test di Levene. Infine è stato impiegato il test Anova ad una via (con disegno completamente randomizzato).

Dall' applicazione del Test ANOVA sono emerse differenze statisticamente significative tra i tre distretti solo per quanto riguarda le ceneri, p-level 0,034.

4.4.1 – COMPUTO ENERGETICO

In definitiva volendo fare un computo energetico per i tre possibili distretti individuati, si avrà:

A) in questo distretto dove gli aranceti si estendono in media per oltre 54.500 ha, si potrebbe ottenere un quantitativo di biomassa annua pari a 103.005 ts.f./anno (58.860 ts.s./anno), che in termini di energia lorda producibile si riflette in 1030 TJ, quantitativo di tutto rispetto per un distretto circoscritto in un raggio di circa 40 km;

B) in questo distretto dove gli aranceti si estendono in media per 3.200 ha, si potrebbe ottenere un quantitativo di biomassa annua pari a 6.048 ts.f./anno (3.456 ts.s./anno), che in termini di energia lorda producibile si riflette in 60 TJ, quantitativo indirizzabile esclusivamente verso realtà energetiche di piccola scala, il tutto circoscritto in un raggio di circa 27 km;

C) in questo distretto dove gli aranceti si estendono in media per 6.200 ha, si potrebbe ottenere un quantitativo di biomassa annua pari a 11.718 ts.f./anno (6.696 ts.s./anno), che in termini di energia lorda producibile si riflette in 117 TJ, quantitativo ancora validamente indirizzabile verso realtà energetiche di medio piccola scala, il tutto circoscritto in un raggio di circa 30 km.

5. CONCLUSIONI

Le ricerche condotte durante il triennio hanno avuto come scopo quello di analizzare alcuni parametri relativi ad analisi fisico-energetiche di sminuzzato di legno proveniente da diverse tipologie di specie arboree idonee alla produzione di biomassa utilizzabile nei diversi processi tecnologici di conversione energetica. Sono stati messi a confronto campioni di sminuzzato provenienti oltre che da specie arboree diverse anche da differenti sistemi colturali o tipo di intervento di utilizzazioni forestali, più precisamente biomasse ligno-cellulosiche di diversi cloni di pioppo (*Populus* spp.) provenienti da *Short Rotation Forestry* (SRF) con diverso turno di ceduzione (2 anni e 3 anni), piante intere da diradamenti da boschi di conifere (*Pinus* spp. and *Picea abies* L.), materiale ritratto da interventi di utilizzazioni forestali in boschi di latifoglie (*Quercus* spp. and *Fagus sylvatica* L.) ed infine biomasse residuali provenienti da scarti di potature da agrumeti.

Le caratteristiche esaminate sono state la composizione macroscopica, distribuzione granulometrica, densità bulk (db), potere calorifico superiore (PCS), contenuto in ceneri ed analisi ultima, grazie a questi parametri si è potuta inoltre effettuare un'indagine comparativa tra le categorie in esame al fine di evidenziare la tipologia più interessante dal punto di vista energetico, tenendo comunque presente i parametri produttivi di ciascuna specie e tipologia colturale.

Per quanto riguarda la caratterizzazione energetica dei campioni di sminuzzato provenienti da piante intere di *Pinus nigra* Arnold., *Pinus halepensis* Miller e *Pinus pinaster* Miller da due diverse stazioni, i parametri che differenziano i campioni di pino nero da quelli di pini mediterranei sono la densità bulk e il contenuto in ceneri che risultano inferiori nello sminuzzato di pino nero, il PCS pur essendo influenzato dalla massa volumica e dalla densità bulk dello sminuzzato non mostra differenze statisticamente significative rimanendo quasi invariato, si ha una sensibile differenza nel contenuto medio percentuale in ceneri, minore per lo sminuzzato di pino nero. Tra i campioni delle due aree di studio, inoltre, non vengono evidenziate differenze nel contenuto in C, H ed N.

Con riferimento ai primi impianti di SRF studiati in cui sono stati messi a confronto i cloni AF2, AF6, Monviso, Limatola e Muur la caratterizzazione energetica ha rilevato buoni valori di potere calorifico superiore (PCS) anche se con una elevata percentuale di contenuto in ceneri, i parametri che differenziano i campioni dei 5 cloni di pioppo sono la

percentuale in massa (sul secco) dei rametti presenti nello sminuzzato, il numero di rami presenti nello sminuzzato, la densità bulk (db) dello sminuzzato anidro e il contenuto in ceneri.

Questa differenza tra la massa volumica e densità bulk tra i diversi cloni determina di conseguenza differenze statisticamente significative di PCS essendone influenzato.

Il materiale ritraibile dal recupero delle potature degli aranceti, sia sotto il profilo fisico che energetico, ha evidenziato delle buone potenzialità con discreti valori di potere calorifico e produzione di ceneri nella norma, il legno possiede elevati valori di massa volumica potendolo così considerare un legno pesante che possiede ottime caratteristiche energetiche, ma bisogna tener conto del fatto che lo sminuzzato è ottenuto dai residui delle potature quindi formato da foglie e rametti determinando una densità bulk non elevata che si riscontra sulle caratteristiche energetiche dello sminuzzato analizzato.

Si può affermare che le biomasse residuali derivanti dal comparto agricolo producono una ingente quantità di scarti legnosi che potrebbero essere valorizzati in maniera adeguata, eliminando così anche i problemi di smaltimento degli agricoltori. Potenzialmente lo sminuzzato ottenuto dai sottoprodotti agricoli può essere considerevole ma bisogna sempre tener conto degli usi alternativi e della vasta collocazione sul territorio che ne comporta un elevato costo di raccolta capillare e trasporto fino agli impianti di utilizzo.

Lo studio condotto ha approfondito alcuni aspetti riguardanti le principali caratteristiche quali quantitative del legno sminuzzato.

Tali caratteristiche ricoprono difatti 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.

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. 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.

Tale caratteristica è influenzata da numerose variabili, soprattutto di natura meccanica, ma una delle principali è proprio il materiale fornito alla bocca di entrata delle

sminuzzatrici, come dimostrato anche in questo studio, riveste quindi un ruolo fondamentale conoscere il massimo ottenibile da un prodotto in anticipo onde indirizzarlo alla corretta valorizzazione energetica.

6. BIBLIOGRAFIA

- 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».
- AA.VV., 1997b–Progetto U.E. Saving optimizing renewable traditional energy. ARSIA, Regione Toscana.
- AA.VV., 2003–Come produrre energia dal legno. quaderno ARSIA 3/2003
- AA.VV., 2004–Gestione e valorizzazione delle ceneri di combustione nelle filiera Legno-Energia. Relazione tecnica conclusiva Progetto BIOCEN.
- AA.VV., 2009–Unità di misura. In: Manuale Pratico Legna e Cippato-Produzione, Requisiti qualitativi, Compravendita. Biomass Trade Centres, ed. AIEL.
- AA.VV., 2011–Rassegna Tecnologica. POLITECNICO DI TORINO Dipartimento di Energetica Progetto “renerfor”.
- Abdallah R., Auchet S., Me’ausoone P.J., 2011–Experimental study about the effects of disc chipper setting on the distribution of wood chip size. Biomass & bioenergy 35: 843-852.
- Agliani L., 2006–Pioppo SRF, più macchine per prodotti diversi. Terra e vita 9: 88-91.
- Alakangas E., 2005–Properties of wood fuels used in Finland. BIOSOUTH, Project Report. Technical Research Centre of Finland.
- ANPA, 2001–Biomasse agricole e forestali, rifiuti e residui organici: fonti di energia di energia rinnovabile. Stato dell’arte e prospettive di sviluppo a livello nazionale. Agenzia Nazionale per la Protezione dell’Ambiente, Roma
- APAT, 2003–Le biomasse legnose. Un indagine sulle potenzialità del settore forestale Italiano nell’offerta di fonti di energia. Rapporto 30/2003
- ARSIA, 2009. Woodland Energy, La filiera Legno-Energia come strumento di valorizzazione delle biomasse legnose agroforestali. ARSIA - AGENZIA REGIONALE PER LO SVILUPPO E L’INNOVAZIONE NEL SETTORE AGRICOLO-FORESTALE
- ASSAM (2010b), La filiera legno-energia Aspetti salienti dello stato dell’arte e

prospettive Università Politecnica Marche - Regione Marche - ASSAM 1-91

- Baccanti M, Colombo B (1988). Analisi elementare simultanea ed automatica di C, H, N, S. *Tecnologie chimiche* 11/1988.
- Baldini S., 1986–Meccanizzazione sulle sminuzzatrici o cippatrici. *Acer* 4: 25-30.
- Barella L., 2009–SRF di pioppo, salice e robinia: Cippato di qualità e buone rese. *Terra e vita* 9: 14-16.
- Berndes G, Hoogwijk M, van den Broek R. The contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. *Biomass and Bioenergy* 2003;25:1-28.
- BERNETTI G. (1980) - Terminologia forestale - Accademia Italiana di Scienze Forestali e C. N. R. Roma.
- 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.
- Bidini M., 2008–Cippatrici. *Tecnica e pratica* n° 41, Febbraio.
- Bisoffi S. (2000). Biomasse legnose da impianti a ciclo breve per la produzione di energia: sono una cosa seria? *Legno ed ENergia*, 54, 15-18.
- 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.
- Bisoffi S., Minotta G., Paris P., 2008. Indirizzi colturali e valorizzazione delle produzioni legnose fuori foresta. In: III Congresso Nazionale di Selvicoltura. Taormina (ME), 16-19 Ottobre 2008.
- Bonamini G., Uzielli L., Zanutini R., 1993 - Elementi di tecnologie del legno e utilizzazioni forestali., *Scienza del legno*, Firenze, vol. 1.
- 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
- Buchanan JG, Duchinicki TS., 1963–Some experiments in low speed chipping. *Pulp & Paper Magazine Canada* May: T235-45.
- Buresti Lattes E., Mori P., 2005 – Glossario dei termini più comuni impiegati in arboricoltura da legno. Seconda parte. *Sherwood* 110, pp. 5-10.

- CANAGARATNA S.G., WITT J. (1988) - Calculation of temperature rise in calorimetry. *Journal of chemical education* 65 (2):126-129.
- 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.
- Carraro V., Grigolato S., 2007–Biomasse forestali ad uso energetico in ambiente alpino: potenzialità e limiti. Università degli studi di Padova dip.to Territorio e Sistemi Agro-Forestali.
- Cavalaglio G., Cotana S., Barbanera M., Giraldi D., 2007–Valorizzazione energetica degli scarti di potatura dei vigneti. 7° Congresso Nazionale CIRIAF-Perugia
- Cavalli R., 2008–Linee evolutive nel settore delle utilizzazioni forestali e dell’approvvigionamento del legname. *L’Italia Forestale e Montana*. 64(4): 297-306
- Cavalli R., Emer B., Grigolato S., 2007b–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
- Cavalli R., Emer B., Grigolato S., Zuccoli Bergomi L., 2007a–Wood chipping service: an analysis approach in Northastern Italy. In Austro 2007/FORME C’07: Meeting the needs of tomorrow Forest-New Developments in Forest Engeneering, Vienna and Heilingen Kreuz-Austria, 7-11 October
- Cavalli R., Grigolato S., Sgarbossa A., Francescato V., Negrin M., 2011-2012–Qualità del cippato. I nuovi standard UNI EN e la loro applicazione nel settore forestale. *Sherwood* 179: 37-41.
- CEN/TS 14774-1 - Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content - Oven dry method. Part 1: Total moisture - Reference method (2004).
- CEN/TS 14774-2 - Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content - Oven dry method. Part 2: Total moisture - Simplified method (2004).
- CEN/TS 14774-3 - Solid Biofuels - Methods for determination of moisture content - Oven dry method. Part 3: Moisture in general analysis sample (2004).
- CEN/TS 14775 - Solid Biofuels – Methods for determination of ash content (2004).

- CEN/TS 14779 - Solid Biofuels – Sampling – Methods for preparing sampling plans and sampling certificates (2004).
- Chandrasekaran H., Svensson S., Nissle M., 1987–Tooth Chipping During Power Hack Sawing and the Role of Saw Material Characteristics. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Volume 36, Pages 27-31.
- Ciancio O., Mercurio R., Nocentini S., (1995). First thinnings of young conifer stands: strategy and perspectives. Abstract of invited papers. IUFRO XX World Congress, Tampere 6-12 august 1995: 61-66.
- Ciccarese L (2000). Effetto della cenere di legna sul substrato d'allevamento e sullo sviluppo in semenzali di douglasia e orniello. Sherwood 53 (2): 39-46.
- 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.
- Demirbas A (1997). Calculations of higher heating values of biomass fuel. Biomass & Bioenergy, Fuel 76 (5): 431-434.
- DEVOTO G., OLI G. C. (1971) - Dizionario della lingua italiana - Le Monnier. Firenze.
- Edelman 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.
- 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
- ENEA. Energia dalle biomasse. Tecnologie e prospettive. 2008. ENEA. Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente A cura di: Francesco P. Vivoli Contributi di: E. Benanti, G. Braccio, N. Colonna, V. Motola.
- Facciotto G., Giorcelli A, Vietto L. Allegro G, Castro G. Picco F., (2006)–Nuovi cloni di pioppo. Inserto Agricoltura n°71.
- Facciotto G., Mughini G., 2003 – Modelli culturali e produttività della selvicoltura da biomassa. L'Informatore Agrario, 10: 95-98.
- Fiala, M. Energie da biomasse agricole, Collana ImpresaAgricola, Maggioli Editore, 2012, p. 400.

- 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.
- Foresta-Legno-Energia, 2007–Linee guida per lo sviluppo di un modello di utilizzo del cippato forestale a fini energetici. cap. 3: 68-100.
- 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
- 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.
- Francescato V., Antonini E., 2004–Legno-Energia, quando l'agricoltura è protagonista. Alberi e Territorio 1(3): 38-44
- Francescato V., Antonini E., 2009–Contenuto energetico del legno. In: Manuale Pratico Legna e Cippato-Produzione, Requisiti qualitativi, Compravendita. Biomass Trade Centres, ed. AIEL.
- Franz N., 1958–An analysis of the wood cutting process [Phd thesis]. Ann Arbor: University of Michigan;
- Fuller W.S., 1991–Chip quality, a key to pulping and productivity. "Paper presented at the 24th pulp and paper annual meeting, ABTCP, Sao Paulo, SP-Brazil, November 25 to 29.
- GELLINI R., GROSSONI P. (1996) - Botanica forestale (vol. I: Gimnosperme). CEDAM. Padova.
- Giordano G (1980). Il legno. Caratteristiche e lavorazioni fondamentali, Vol.1. Edizioni Utet. Torino.
- Giordano G., 1981–Tecnologia del legno. Vol. 1., La materia prima. Ed. UTET, Torino: 1256 pp.
- Grigolato S., Hellrigl B., 2009–Legno da energia. Prezzi e indici in Austria e Italia. Sherwood 152: 13-18
- 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

- Hall, D.O., House, J.I., 1994. Trees and biomass energy: Carbon storage and/or fossil fuel substitution? *Biomass and Bioenergy* 6, 11±30
- Hall, D.O., Scrase I., (1998). Will biomass be the environment friendly for the future? *Biomass & Bioenergy* 15: 357-367.
- Hartler N.,–1986 Achievement and significance of optimal chip quality. *TAPPI J* 79(2):259-264.
- 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.
- Hartmann H., Böhm T., Jensen P.D., Temmerman M., Rabier F., Golser M., 2006–Methods for size classification of wood chips. *Biomass & Bioenergy* 30: 944-953.
- Hellrigl B. (2006). La Commissione Europea rivaluta le biomasse. *Sherwood*, 124, 33-38.
- Hellrigl B., 2001–La pezzatura del legno combustibile. Speciale “Bosco e Territorio” 2002.
- Hellrigl B., 2004–Convegno di Studio “Le biomasse agricole e forestali nello scenario energetico nazionale” Progetto Fuoco, Verona 18-19 Marzo.
- 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.
- Hernandez R, Jacques B. Effect of the rotation speed on the size distribution of black spruce pulp chips produced by chipper-canter. *For Prod J* 1997;47(4):43e9.
- HIPPOLITI G. (1997) - Appunti di meccanizzazione forestale - Studio Editoriale Fiorentino, Firenze
- ISCO (1991). Calorimetro di Berthelot-Mahler, istruzioni per l’uso. Milano, Italia.
- ITABIA, 2002–Contributo delle biomasse alla tutela del territorio. Roma: Maggio 2002
- Jain RK, Singh B (1999). Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. *Bioresource Technology* 68: 305-308.
- 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.

- Jonas A., Hadener H., 2001.–Energie aus Holz. Niederösterreichische Landeslandwirtschaftskammer, St. Pölten
- Kataki R. and Konwer D. 2002. Fuelwood characteristics of indigenous tree species of north-east India. *Biomass and Bioenergy* 22(6): 433–437.
- Kivimaa E., Murto J.O., 1949–Investigation on factors affecting chipping of pulp wood; Statens Tekniska Forskningsanstalt, Finland Publ. 9
- La Marca O., et al., (1983). Possibilità di impiego del legname di cerro in Italia. Indagini preliminari su alcuni popolamenti e prove sperimentali per l'industria dei compensati. *L'Italia Forestale e Montana*, 1: 34-62
- La Marca O., et al., (1996). Prove di diradamento in fustaie di cerro: risultati sperimentali relativi al periodo 1988-1994. *Legno Cellulosa e Carta*, 3: 16-26
- Ledin, S., Willebrand, E., 1995. Handbook on how to grow shortrotation coppice. IEA Bioenergy, Tasks VIII and XII
- Maglia S., 2010. Biomasse, una normativa in evoluzione. *Ecoscienza* 1: 66-67
- Makeschin F., 1999. Short rotation forestry in Central and Northern Europe ± introduction and conclusions. *Forest Ecology and Management* 121 (1999) 1±7.
- Marland G., Schamadinger, B., (1997). Forest for carbon sequestration or fossil fuel substitution: a sensitivity analysis. *Biomass & Bioenergy* 13: 389-397.
- Martin K., Weber M., 2006–Markets for solid biofuels within the EU-15. *Biomass & Bioenergy* 30: 897-907
- 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
- McKendry P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Review paper. *Bioresource technology* 83, 37-46.
- McKenzie WM, Karpovich H., 1968–The Frictional behaviour of wood. *Wood Science & Technology* 2:139-52.
- McLauchlan T.A., Lapointe J. A., 1979–Production of chips by disc chippers. In: Pulp and paper technology Series. Chips quality monograph. Ed. Hatton J.V. pag. 15-32.
- Mitchell C. P., Kofman P. D., Angus-Hankin C.M., 1997–Guidelines for conducting harvesting trials in short rotation forestry. Aberdeen University, Forestry reserch paper, 1: 1-50

- Mitchell, C.P., Stevens, E.A., Watters, M.P., 1999. Short rotation forestry ± operations, productivity and costs based on experience gained in the UK. *For. Ecol. Manage.* 121, 123±136.
- 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.
- 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*
- Nati C., Spinelli R., 2010–How blade wear of chippers can affect fuel consumption and wood chip size distribution. *Forest Engineering: Meeting the Needs of the Society and the Environment* July 11–14, Padova – Italy.
- Nati C., Spinelli R., Fabbri P., 2008–Classificazione merceologica del cippato. *Effetti dell’usura delle lame. Sherwood* 148: 31-35.
- Nati C., Spinelli R., Fabbri P., 2010–Wood chips size distribution in relation to blade wear and screen use. *Biomass & bioenergy* 34: 583-587.
- Negrin M., 2008-2009–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.
- 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
- Neri F., 2007–Indagine sull’impiego delle macchine scippatrici, 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
- Nocentini S. (1995). La rinaturalizzazione dei rimboschimenti. Una prova su pino nero e laricio nel complesso di Monte Morello (Firenze). *Italia Forestale e Montana* 4: 211-218.
- Nord-Larsen T., Bergstedt A., Faver O., Heding N., 2011–Drying of firewood – the effect of harvesting tiime, tree species and shelter of stacked wood. *Biomass and Bioenergy* 35, 2993-2998

- Nurmi J., 1999 –The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy* 17, 41-47
- Pari L., Civitarese V., Del Giudice A., 2010–Qualità del cippato. Umidità e pezzatura in funzione della metodologia raccolta. Supplemento n°2 a *Sherwood* 168: pp. 14-18.
- Pari L., Fedrizzi M., Ciriello A. 2008–La migliore qualità del cippato si ottiene dal cumulo coperto. *L'Informatore Agrario*, n° 39: 52-55.
- Pari L., Fedrizzi M., Ciriello A. 2008–SRF poplar chips stocking methods comparison to lessen fuel depletion from production to utilization 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2-6 June Valencia
- Paulrud S., Nilsson C., 2004. The effects of particle characteristics on emissions from burning wood fuel powder. *Fuel* 83:813–21.
- Picchio R., Sirna A., BLASI S., Agozzino P. (2009). Aranci, distretti energetici con gli scarti di potatura. *TERRA E VITA*, ISSN: 0040-3776.
- Picchio R., Spina R., Sirna A., 2012–Sminuzzatrici o scippatrici fra tecnica e innovazione. *Terra e Vita* n° 43
- PICCHIO RODOLFO, STEFANO VERANI, GIULIO SPERANDIO, SERENA SAVELLI (2004) - Nozioni di base per la costituzione di microfiliere energetiche di autoconsumo. Pubblicazione eseguita all'interno del progetto sportello COFEA. Finanziamento MIPAAF, D.M. 487/7303/2004.
- Piccioni E., Bonari E., 2006. SRF di pioppo nella pianura litoranea toscana, principali risultati di alcune esperienze a lungo periodo. *Sherwood* 128: 31-36.
- Pignatelli V., Robertiello A., 2007–Biomasse per un'energia rinnovabile. In: *Enciclopedia degli idrocarburi* vol. III, Nuovi sviluppi: Energia, Trasporti, Sostenibilità pp.
- Pirazzoli C., Ragazzoni A., 2004–Gli impianti boschivi in pianura per la produzione di biomassa ai fini energetici: il caso della SRF (short rotation forestry). *Dossier, Genio Rurale* 11: 46-53.
- Pouët JC., 2007–Mise en place d'une chaufferie au bois. EDP Sciences ADEME edition
- Recchia L., 2003-2005– 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.

- Regione Lombardia, Comitato Termotecnico Italiano (CTI), 2004. Energia dall'agricoltura - Pellet (PROBIO).
- Richardson J. et al., 2002–Bioenergy from sustainable forestry. Guiding principle and practice, Dordrecht-Boston, Kluwer Academic.
- Romano D., (1986). I rimboschimenti nella politica forestale italiana. Monti e Boschi, XXXVII, n. 6.
- Royse D. J., Sanchez-Vazquez J.E., 2001–Influence of substrate wood-chip particle size on shiitake (*Lentinula edodes*) yield. Bioresource Technology 76: 229-233.
- 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
- Sperandio G., Verani S., 2000. Piantagioni a breve rotazione per la produzione di biomassa ad uso energetico. Elementi per un'analisi dei costi. Sherwood 62: 41-46.
- Spinelli R., 1995–Le cippatrici ed i frantumatori nelle utilizzazioni forestali. Macchine e motori agricoli 1-2: 40-45.
- Spinelli R., 2007–Cippatrici a disco, come regolare la pezzatura delle scaglie. Tecnico e pratico n° 34, Maggio.
- Spinelli R., 2008–CIPPATO: La raccolta della materia prima. Mondo Macchina 2: 56-59.
- Spinelli R., Hartsough B., 2001–Indagine sulla cippatura in Italia. Contributi scientifico-pratici, XLI, Firenze, pp. 112.
- 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).
- Spinelli R., Hartsough B., Magagnotti N., 2004b–Qualità del cippato. Confronto tra nove cippatrici mobili in commercio in Italia. Sherwood 99: 13-18.
- Spinelli R., Ivorra L., Magagnotti N., Picchi G., 2011–Performance of a mobile mechanical screen to improve the commercial quality of wood chips for energy. Bioresource Technology 102: 7366–7370.

- Spinelli R., Magagnotti N., 2005–L'utilizzo di macchine cippatrici per il trattamento del materiale legnoso. *Mondo macchina* 5-6: 56-63.
- 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
- 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.
- Spinelli R., Nati C., Magagnotti N., 2003–Raccolta di legno cippato dalle giovani peccete artificiali del Feltrino. *Associazione Montegrappa – Feltre, Belluno* pp. 26.
- 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.
- Spinelli R., Nati C., Sozzi L., Magagnotti N., Picchi G., 2011–Physical characterization of commercial woodchips on the Italian energy market. *Fuel* vol. 90, Issue 6, pag. 2198-2202.
- Spinelli R., Secknus M., 2005–Restituire competitività alla biomassa forestale. *Alberi e Territorio* 12.
- 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.
- Streheler A., 1988–Biomass combustion technologies, *FAO/ENEA*.
- 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
- 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*
- TODARO L., SCOPA A., DE FRANCHI A.S. (2007) - Caratterizzazione energetica di biomasse agro-forestali presenti in aree collinari e montane della Basilicata - *Forest@* 4 (1): 42-50. [online] URL.
- Trossero M., (2000). The current wood energy use in Europe. Lavoro presentato alla Conferenza *woody biomass as an energy source challenges in Europe*. *EFI*,

University of Joensuu, Ita Bioenergy, Cost E21, Silva Network. 25-28 Settembre 2000. Joensuu, Finlandia.

- Tumuluru J.S., Wright C.T., Hess J. R., Kenney K. L., 2011. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. View online October 6, 2011 at Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com); DOI: 10.1002/bbb.324; Biofuels, Bioprod. Bioref. 5:683–707.
- Tustin J., (2000). IEA Bioenergy Annual Report 1999: ExCo 2000:01, Rotorua, New Zealand.
- Twaddle A., 1997–The influence of species, chip length, and ring orientation on chip thickness. TAPPI J 80(6): 123-31.
- Uhmeier A. Some fundamental aspects of wood chipping. TAPPI J 1995;78(10):79-86.
- 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
- UNI EN 14774-2:2010 Biocombustibili solidi–Determinazione dell’umidità, Metodo di essiccazione in stufa–Parte 2: Umidità totale–Metodo semplificato
- UNI EN 14775: 2010 - "Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto di ceneri".
- UNI EN 14918:2010 - "Biocombustibili solidi - Metodo per la determinazione del potere calorifico".
- UNI EN 14961-1:2010 “Biocombustibili solidi–Specifiche e classificazione del combustibile” Parte 1: Requisiti generali.
- UNI EN 15103:2010 Biocombustibili solidi–Determinazione della massa volumica apparente
- UNI EN 15104:2011 - "Biocombustibili solidi - Determinazione del contenuto totale di carbonio, idrogeno e azoto - Metodi strumentali".
- Vesterinen P., 2003–Rapporto di Ricerca PRO 2/6107/03 “Wood ash re cycling- State of the Art in Finland and Sweden”. Progetto BIOCEN

- Wickham J., Rice B., Finnan J., McConnon R., 2010–A review of past and current research on short rotation coppice in Ireland and abroad. COFORD, National Council for Forest Research and Development, Dublin Ireland.
- Wihersaari M., 2005–Evaluation of greenhouse gas emission risk from storage of wood residue. *Biomass and Bioenergy* 28, 444-453
- Wooten J.R., Filip To S.D., Igathinathane C., Pordesimo L.O., 2011–Discrimination of bark from wood chips through texture analysis by image processing. *Computers and Electronics in Agriculture* 79: 13-19.
- Wu M.R., Schott D.L., Lodewijks G., 2011. Physical properties of solid biomass. *Biomass and bioenergy* 35: 2093-2105
- Wyeth D.J., Goli G., Atkins A.G., 2009–Fracture toughness, chip types and the mechanics of cutting wood. *Holzforschung* 63: 168-180.
- 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.