



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE

**CARATTERIZZAZIONE DI BIOMASSA
RESIDUALE DESTINATA AD IMPIANTI
TERMICI**

**CHARACTERIZATION OF RESIDUAL BIOMASS INTENDED FOR
HEATING SYSTEMS**

TIPO TESI: sperimentale

**Studente:
NICCOLÒ CINTI**

**Relatore:
DOTT. ALESSIO ILARI**

**Correlatore:
PROF. ESTER FOPPA PEDRETTI**

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SOMMARIO

SOMMARIO	2
ELENCO DELLE TABELLE.....	4
ELENCO DELLE FIGURE	5
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	7
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	8
CAPITOLO 1 LE BIOMASSE.....	11
1.1 Le biomasse nel contesto europeo ed italiano.....	13
1.2 Classificazione delle biomasse.....	16
1.3 Composizione chimica delle biomasse	17
1.3.1 Acqua.....	18
1.3.2 Componente organica	19
1.3.3 Componente inorganica	20
1.4 Caratterizzazione delle biomasse solide a scopo energetico.....	21
CAPITOLO 2 IMPIEGO DEI BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI.....	29
2.1 Combustione	30
2.1.1 Tecnologie per la combustione delle biomasse solide	31
2.2 Gassificazione	32
2.2.1 Sistemi tecnologici di gassificazione	32
2.3 Pirolisi	36
2.3.1 Sistemi di pirolisi	37
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI	38
3.1 Biomasse selezionate per la caratterizzazione	38
3.2 Campionamento	41
3.3 Caratterizzazione delle biomasse residuali oggetto di studio	43
3.3.1 Umidità	44
3.3.2 Preparazione del sotto-campione per le analisi chimico-fisiche	44
3.3.3 Ceneri.....	45

3.3.4 Fusibilità delle ceneri.....	45
3.3.5 Potere calorifico.....	47
3.3.6 Analisi del contenuto in carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno.....	48
3.3.7 Analisi del contenuto in cloro e zolfo	49
3.3.8 Determinazione della sostanza volatile.....	50
CAPITOLO 4 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	51
CAPITOLO 5 DIMENSIONAMENTO.....	63
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI	67
RINGRAZIAMENTI.....	69
BIBLIOGRAFIA	70

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1 Esempi di biomasse potenzialmente utilizzabili ad uso energetico	11
Tabella 1-2 Composizione di alcune biomasse, modificato da (Anwar et al., 2014).....	19
Tabella 4-1 Valori di umidità espressi in percentuale sul tal quale dei campioni analizzati	51
Tabella 4-2 Contenuto in ceneri espresso in percentuale su sostanza secca dei campioni analizzati	53
Tabella 4-3 Valori percentuali di ceneri espressi in percentuale su sostanza secca di biomassa.....	53
Tabella 4-4 Temperature di deformazione, emisferica e di fusione.....	56
Tabella 4-5 Valori percentuali di Cloro (Cl) e Zolfo (S) espressi in percentuale su sostanza secca di biomassa.....	56
Tabella 4-6 Valori di azoto espressi in percentuale su sostanza secca di biomassa.....	58
Tabella 4-7 Distribuzione percentuale delle classi dimensionali del campione di cippato analizzato	61
Tabella 5-1 Caratteristiche costruttive abitazione oggetto del caso studio	64
Tabella 5-2 Superficie esposta e Potenza minima richiesta per soddisfare le perdite di calore	65

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1 Consumo interno lordo di bioenergia (Sx) e consumo pro capite (Dx) degli Stati membri UE 2016 Fonte: Eurostat 2018	13
Figura 1-2 Contributo delle diverse fonti ai consumi lordi finali (CFL) di energia da FER (2016-2020) Fonte: GSE.....	14
Figura 1-3 Contributo delle diverse FER nel 2021 nei diversi settori Fonte: GSE.....	15
Figura 1-4 Dati regionali sulla produzione di energia elettrica da bioenergie nel 2021 Fonte: Terna	15
Figura 1-5 Esempi di biomasse solide residuali e dedicate da sinistra: frazione organica dei rifiuti urbani, paglia, sorgo, mais da biomassa.....	16
Figura 1-6 Biodiesel, colture oleaginose dedicate (colza e girasole).....	17
Figura 1-7 Esempio di impianto di produzione biogas	17
Figura 1-8 Cippato con granulometria media di 16 mm (sinistra) e 45 mm (destra).....	22
Figura 1-9 Esempi di biocombustibili con forme diversificate (bricchette, cippato e balle di paglia)	22
Figura 1-10 Cumulo di biomassa legnosa.....	24
Figura 1-11 Aggregati di ceneri.....	25
Figura 2-1 Reattore downdraft.....	33
Figura 2-2 Reattore updraft.....	34
Figura 2-3 Reattore cross-draft	35
Figura 3-1 Cippatrice accoppiata al trattore.....	38
Figura 3-2 Cippatrice in funzione (sx) Operazione di cippatura diretta in cantiere (dx) ..	39
Figura 3-3 Processo schematizzato di produzione della farina da frumento. Per insilaggio, nel caso specifico, si intende lo stoccaggio di scarti secchi in sili verticali.	40
Figura 3-4 Vista frontale cumulo cippato	42
Figura 3-5 Vista laterale (Sx) e vista dall'alto (Dx) cumulo di cippato	42
Figura 3-6 Cumulo di potature.....	43
Figura 3-7 stufa utilizzata per la determinazione del contenuto di umidità	44

Figura 3-8 Rappresentazione grafica delle variazioni di forma di un provino di ceneri sottoposto a gradiente termico da sx campione originale, contrazione, deformazione, emisferica e fusione	46
Figura 3-9 Strumentazione per la preparazione del provino a sinistra, Syllab IRF 1600Fa destra	47
Figura 3-10 Analizzatore elementare	49
Figura 3-11 Cromatografo ionico e autocampionatore	50
Figura 4-1 Confronto dei livelli di umidità dei campioni di cippato di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe A1 e A2	52
Figura 4-2 Confronto del contenuto in ceneri dei campioni di cippato e di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe A1 (1,0), A2 (1,5) e B (3,0)	54
Figura 4-3 Esempi di sistemi di vagliatura: vibrovaglio (sopra) e vaglio a tamburo cilindro (sotto)	55
Figura 4-4 Confronto del contenuto in Cloro (Cl) dei campioni di cippato e di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe B (1,0)	57
Figura 4-5 Confronto del contenuto in azoto dei campioni di cippato e di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe B (1,0)	59
Figura 4-6 Contenuto in Carbonio (C), Idrogeno (H) ed Ossigeno (O)	60
Figura 4-7 Potere calorifico superiore e Potere calorifico inferiore	60
Figura 5-1 Modello 3D abitazione oggetto caso studio	64

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

CLS	CONSUMI LORDI FINALI
FER	FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI
GSE	GESTORE SERVIZI ENERGETICI
TEP	TONNELLATA DI PETROLIO EQUIVALENTE (energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo pari a 42 GJ).

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Nel corso degli ultimi anni, le risorse energetiche rinnovabili hanno registrato un crescente interesse a livello globale per una concomitanza di fattori di varia natura. L'incremento della domanda energetica globale dovuto allo sviluppo industriale e all'aumento della popolazione mondiale, unitamente alla minaccia del cambiamento climatico, alla necessità di ridurre le emissioni di gas serra e le attuali tensioni geopolitiche hanno evidenziato nel loro complesso la necessità di ricercare fonti di energia riproducibili ed illimitate per sostituire i combustibili fossili.(Jafri et al., 2018).

L'esigenza di promuovere, sviluppare ed impiegare progressivamente forme energetiche rinnovabili (FER) e tecnologie compatibili con l'ambiente è testimoniata già dal Protocollo di Kyoto della Convenzione sui Cambiamenti Climatici.

Quando si parla di FER ci si riferisce a forme di energia come il fotovoltaico, il moto ondoso, la geotermia, l'eolico e le biomasse, che possono rifornirsi naturalmente, in un arco di tempo tale da non pregiudicarne le risorse per le generazioni future. (Owusu & Asumadu-sarkodie, 2016)

A livello europeo, la legislazione sulla promozione delle energie rinnovabili si è evoluta in maniera significativa soprattutto nell'ultimo decennio. Grazie alla direttiva 2009/28/CE sono stati fissati degli obiettivi vincolanti per i paesi membri, affinché potesse essere raggiunta la quota del 20% di energia derivante da fonti rinnovabili, rispetto al totale dei consumi, e quella del 10% per quanto concerne il settore dei trasporti.

Successivamente, in seguito all'accordo di Parigi dove l'Unione Europea (UE) si è impegnata a ridurre le emissioni di gas ad effetto serra, per limitare l'aumento della temperatura al di sotto dei 2° Celsius, e nel quadro del pacchetto "Energia pulita per tutti gli europei" è entrata in vigore la nuova direttiva 2018/2001, che pone dei nuovi obiettivi vincolanti. Questi riguardano il raggiungimento, sempre in termini di energie rinnovabili, di almeno il 32% dei consumi energetici e la quota del 14% nel settore dei trasporti entro il 2030. Tuttavia, la Commissione Europea ha proposto recentemente delle modifiche alla direttiva affinché vengano raggiunti nuovi target vincolanti, portandoli dal 32% ad oltre il 42,5%, con un'accelerazione nell'ambito della transizione energetica.

All'interno di questo quadro politico e normativo, è possibile evidenziare un ruolo di primo piano per quanto riguarda la promozione per l'impiego della biomassa, come FER, ed in particolar modo della biomassa residuale, in ottica del raggiungimento degli obiettivi fissati per il 2030, cioè l'aumento della sostenibilità e la realizzazione di un'economia circolare. Le biomasse sono ubiquitarie, contrariamente a quanto accade con le altre forme di energia rinnovabile. Queste ultime sono infatti risorse sito specifiche ed intermittenti, a disposizione solo di alcune comunità che possono produrle ed impiegarle in maniera non continuativa. Al contrario, le fonti di approvvigionamento di biomasse potenzialmente impiegabile come materia prima per la produzione di bioenergia sono numerose con ambiti privilegiati quali i settori agricolo e forestale, le filiere ad esso connesse, la manutenzione del verde. Inoltre, a queste fonti poi si aggiungono anche biomasse residuali rappresentate da rifiuti industriali ed urbani, che in questa trattazione non verranno presi in considerazione.

È stata stimata in Italia dall'agenzia ENEA una disponibilità proveniente dai settori elencati in precedenza, escludendo il comparto zootecnico, di circa 25 Mt di sostanza secca di biomassa, pari approssimativamente a 10 milioni di tonnellate di energia termica equivalente. (Montola et al., 2009).

In aggiunta le attuali difficoltà del comparto agroalimentare italiano mettono in luce la necessità di cogliere le opportunità offerte dall'economia circolare, utilizzando in maniera efficiente e razionale le risorse disponibili riducendo gli impatti ambientali. (Buttol et al., 2019) Come testimoniato anche dalla tradizione contadina, il settore agricolo è storicamente legato all'applicazione dei principi dell'economia circolare proprio per la necessità intrinseca di dover dare valore ad ogni scarto della produzione. Basti immaginare una piccola azienda agricola marchigiana, dove i sottoprodotti della cerealicoltura venivano impiegati per l'alimentazione del bestiame, ed il letame ricavato veniva distribuito in campo con indubbi vantaggi in termini di fertilità chimica, fisica e biologica. (Singh et al., 2020)

Questo lavoro di tesi si ispira proprio ai principi dell'economia circolare e alla necessità di valorizzare gli scarti produttivi, provenienti nel caso specifico, sia dal settore della manutenzione del verde, che dal mondo agroalimentare nell'ambito della molitura del frumento duro.

La prima tipologia di biomassa non trova nessun tipo di reimpiego nell'area coinvolta dallo studio, se non il conferimento ad aziende di gestione di rifiuti, il compostaggio non controllato e la combustione in cumuli all'aperto (nei limiti previsti dalla legislazione). Alcuni studi hanno dimostrato che quest'ultima pratica, nonostante sia molto comune nel settore agricolo per favorire l'eliminazione in grandi quantitativi di potature e residui colturali, è in realtà una fonte

di emissioni di particolato ed altri composti come idrocarburi policiclici aromatici (IPA) ed ossidi di azoto (NOx). (Nugraha et al., 2023)

La biomassa derivante dal settore di manutenzione del verde comprende materiali solidi ligno-cellulosici altamente eterogenei come ramaglie, tronchi di vario diametro, fogliame e può presentarsi come tale o in forma di cippato.

Nel caso di residui della molitura, invece, si evidenzia una elevata disponibilità presso alcune realtà marchigiane di sfarinati di diversa tipologia, derivanti soprattutto dalla lavorazione del frumento duro e non reimpiegati nel settore zootecnico.

Data l'elevata eterogeneità delle biomasse considerate, è stato svolto un lavoro di caratterizzazione secondo le normative vigenti, determinando parametri chimici, fisici ed energetici, con l'obiettivo di valutarne un potenziale impiego in impianti per la produzione di energia termica.

I parametri analizzati possono darci informazioni in merito al quantitativo energetico, la composizione chimica ed essere degli indicatori utili per prevedere le emissioni di polveri, la formazione di incrostazioni e di alcuni inquinanti come ossidi di azoto, anidride solforosa e acido cloridrico durante i processi di combustione. Questi dati sono utili anche nella gestione di eventuali pretrattamenti come l'essiccamento, la vagliatura o la pellettizzazione che possono migliorare le caratteristiche qualitative della biomassa in entrata nei dispositivi di utilizzazione energetica. (Fournel et al., 2015)

Nello specifico la valorizzazione energetica potrebbe coinvolgere sia gassificatori, che sistemi tradizionali di combustione. La gassificazione si pone all'interno dei processi di conversione termochimica e, attraverso l'interazione della biomassa solida con aria, ossigeno o vapore d'acqua (agente di gassificazione), ad alte temperature (700-900°C), permette di ottenere un combustibile gassoso (syngas) composto principalmente da monossido di carbonio (CO), anidride carbonica (CO₂), idrogeno (H₂) e metano (CH₄). (Briones-Hidrovo et al., 2021)

Sono sistemi molto interessanti, che possono essere impiegati anche presso aziende agricole particolarmente attente alle tematiche dell'economia circolare e dell'autosufficienza energetica, in quanto sono in grado di gestire biomasse in entrata molto diversificate come residui agricoli, fanghi, colture energetiche dedicate e residui forestali. (Mishra & Upadhyay, 2021)

Capitolo 1

LE BIOMASSE

Le attuali sfide climatiche, politiche ed economiche, pongono le FER al centro dei dibattiti e della ricerca su scala globale. Tra queste le FER biomasse stanno assumendo sempre maggiore importanza come possibile fonte di energia “verde” in sostituzione dei combustibili fossili tutt’ora impiegati massicciamente.

A livello legislativo, ai sensi della Direttiva 2009/28/CE e del Decreto Legislativo 28/2011 è possibile definire la biomassa come “la frazione biodegradabile di prodotti e residui di origine biologica provenienti dall’agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla selvicoltura 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 ed urbani”.

All’interno di questa definizione sono quindi incluse diverse tipologie di materiali, di natura estremamente diversificata, reperibili in grandi quantità anche all’interno dei settori agricolo (compresa la zootecnia), forestale ed industriale, presenti in maniera piuttosto uniforme sul territorio.

Alcuni esempi di biomasse potenzialmente valorizzabili in sistemi energetici sono riportati nella tabella sottostante, suddivisi sulla base della loro origine (risorse naturali, coltivazioni energetiche o dedicate, residui organici o materiale residuale).

Tabella 1-1 Esempi di biomasse potenzialmente utilizzabili ad uso energetico

Biomasse e potenziale uso energetico		
Risorse naturali Forestali/Acquatiche	Coltivazioni Energetiche Terrestri/Acquatiche	Residui organici Da processi di trasformazione/Agricoli
Forestali: Legna Cimali Ramaglie	Arboree: Pioppo Robinia Salice Eucalipto	Alimentari e non alimentari: Scarti ortofrutticoli Sanse Panelli Oli esausti

Acquatiche: Alghe	Erbacee: Colza Mais Girasole Canna da zucchero	Agricoli: Residui di potatura/ espianti Paglie Reflui zootecnici Sottoprodotti macellazione
----------------------	--	---

Come è possibile evincere dalla Tabella 1.1 alcune biomasse, definite residuali, si possono ricavare da sottoprodotti quali paglie, residui ortofrutticoli, potature, reflui zootecnici, mentre altre, definite dedicate, sono rappresentate da colture energetiche arboree dedicate, come pioppeti, o erbacce come nel caso di mais, sorgo, girasole e barbabietola.

L'elevata eterogeneità del materiale rappresenta però una delle principali problematiche nell'impiego, in quanto può influenzare negativamente le caratteristiche tecnologiche, i parametri energetici, i sistemi di utilizzazione finale, ed alcuni aspetti quali la formazione di incombusti, sottoprodotti vari, componenti di neoformazione, nonché i livelli di inquinamento legati all'impiego della biomassa. (Nunes et al., 2019).

È dunque fondamentale valutare, attraverso specifiche tecniche analitiche, regolate da normative e standard internazionali, la qualità del materiale, in particolare per quello residuale, impiegato nei sistemi energetici. (Hoang et al., 2021)

La biomassa rappresenta una fonte energetica versatile, in grado di generare energia termica, elettrica e biocarburanti (solidi, liquidi o gassosi); tuttavia, l'uso estensivo può essere condizionato dagli impatti ecologici legati alla catena di approvvigionamento, alla coltivazione (concimazioni, consumo idrico), soprattutto per quanto riguarda le colture dedicate, alle problematiche legate perdita della biodiversità e alla competizione per l'uso agricolo con colture alimentari o ad uso zootecnico

È importante considerare che questi materiali stanno riscuotendo un interesse sempre maggiore, non solo nel settore energetico, ma anche nella produzione di molecole chimiche. Le biomasse, infatti, possono rappresentare fonti preziose per l'estrazione di un'ampia gamma di molecole bioattive impiegabili nel settore agroalimentare, farmaceutico e cosmetico. Ad esempio, prendendo in considerazione gli scarti della lavorazione di prodotti ortofrutticoli, quali bucce di carote, cetrioli e mele, si possono ricavare moltissime molecole bioattive, come β -carotene, clorofilla e polifenoli. (Jena & Singh, 2022). In altri casi steli e foglie dei cavolfiori, essendo ricchi di vitamine, fitosteroli e composti fenolici, possono essere utilizzati per la produzione di farine bioattive impiegabili come ingredienti nella preparazione di prodotti da forno. (Nartea et al., 2023)

1.1 Le biomasse nel contesto europeo ed italiano

A livello europeo la “bioenergia” prodotta dalle biomasse ha raggiunto, nel 2016 valori di 116 Mtpce dei consumi lordi annui, corrispondenti al 10% della totalità delle fonti energetiche e al 59% di quelle rinnovabili. In questo contesto l’Italia, insieme a Francia Germania e Svezia, è tra i primi quattro paesi dell’Unione Europea in termini di consumo interno lordo di biomasse, con un incremento dei consumi nel periodo compreso tra il 2005 e il 2016 pari al 60% mentre per quanto riguarda il consumo di bioenergia pro-capite i paesi più virtuosi sono Austria, Paesi Baltici e Penisola Scandinava (Fonte Eurostat 2018)

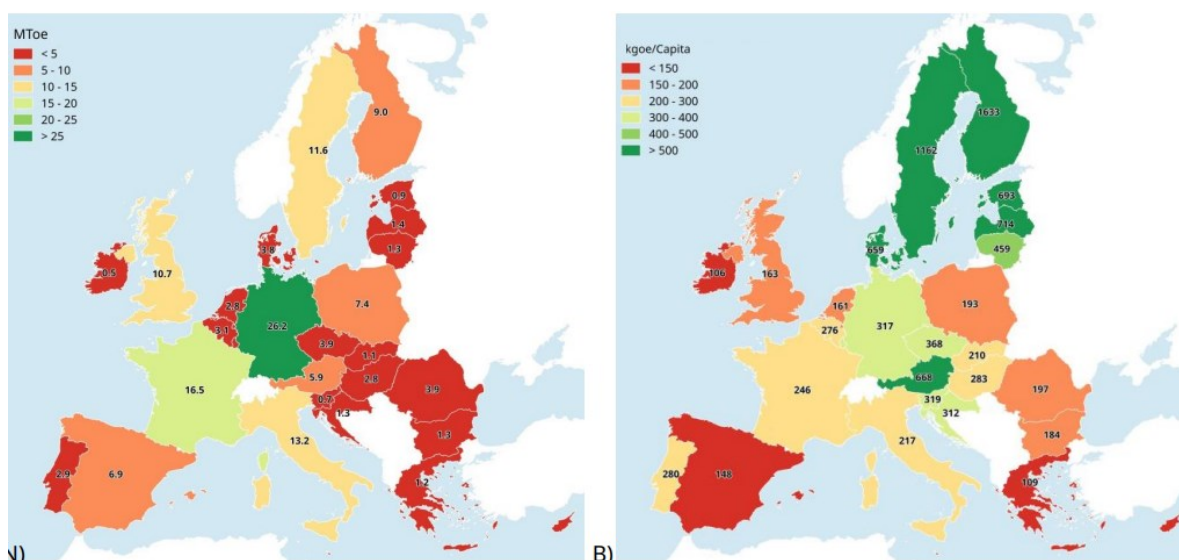


Figura 1-1 Consumo interno lordo di bioenergia (Sx) e consumo pro capite (Dx) degli Stati membri UE 2016 Fonte: Eurostat 2018

Alcuni dati riportati da EurObserv’ER mostrano nel 2021 il superamento, per la prima volta, della soglia dei 100 Mtpce di energia prodotta a partire da biomassa solida, con un incremento dell’8,3% rispetto all’anno precedente. Le motivazioni alla base di una variazione così elevata sono state imputate principalmente all’aumento dei prezzi dei biocombustibili fossili oltre che ad un inverno 2020-2021 più rigido. Tuttavia, le biomasse hanno trovato una diffusione di molto superiore ai settori dell’eolico, dell’idroelettrico e del fotovoltaico, confermandosi nuovamente come principale FER.

Le biomasse impiegate a scopo energetico dai paesi membri sono principalmente di origine europea, come dimostrato dal tasso di importazione molto basso attestatosi in tutta l’Unione su valori intorno al 3,5% dei consumi, legato all’importazione di biocombustibili, come nel caso del pellet, dal Nord America.

In dettaglio, i biocombustibili solidi nel 2020 erano rappresentati per il 78,8% da legno, residui e sottoprodotti legnosi, seguiti dai sottoprodotti dell'industria della carta, materiali e residui vegetali (4,3%), rifiuti industriali (1,8%), bagassa (0,8%) e scarti animali (0,3%).(93.0 TWh SOLID BIOFUELS BAROMETER 2022, n.d.)

In Italia la quota di fonti rinnovabili, sul mix energetico totale, è progressivamente aumentata passando dal 6,3% nel 2004 raggiungendo il 20,4% nel 2020, per poi attestarsi al 19% nel 2021 (Dati Eurostat). Osservando il Rapporto Statistico 2021 Energia da fonti rinnovabili, pubblicato dal GSE nel marzo del 2023, si evidenzia un importante contributo delle bioenergie all'interno dei consumi finali lordi di energia da fonti rinnovabili, con valori intorno ai 11,2 Mtpce pari a circa il 9,3% dei consumi lordi annui nazionali di 120,5 Mtpce, e quasi la metà di quelli di FER per il 2021. In dettaglio degli 11,2 Mtpce prodotti a partire dalle bioenergie, 6,8 Mtpce sono rappresentati dall'impiego di biomassa solida, ad esclusione della frazione biodegradabile dei rifiuti, per il riscaldamento nel settore domestico grazie a dispositivi come caldaie, stufe e camini.

Nonostante il lieve decremento registrato nel 2021 nei consumi di bioenergie a livello nazionale, è possibile evidenziare come queste si collochino al primo posto nella quota di FER nell'arco temporale tra il 2016 ed il 2021 (si veda figura 1-2 e figura 1-3)

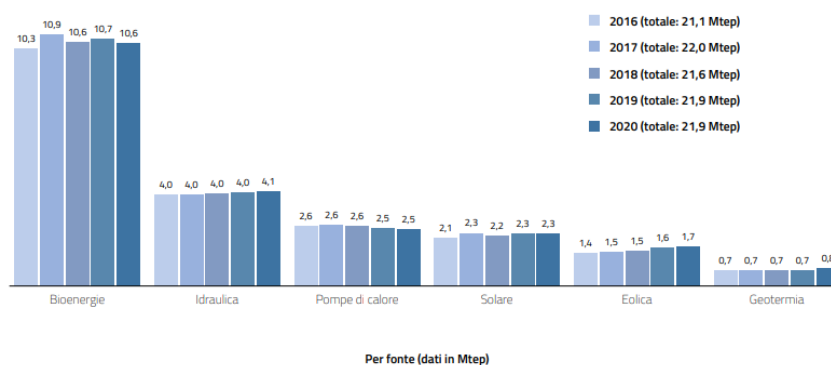


Figura 1-2 Contributo delle diverse fonti ai consumi lordi finali (CFL) di energia da FER (2016-2020) Fonte: GSE

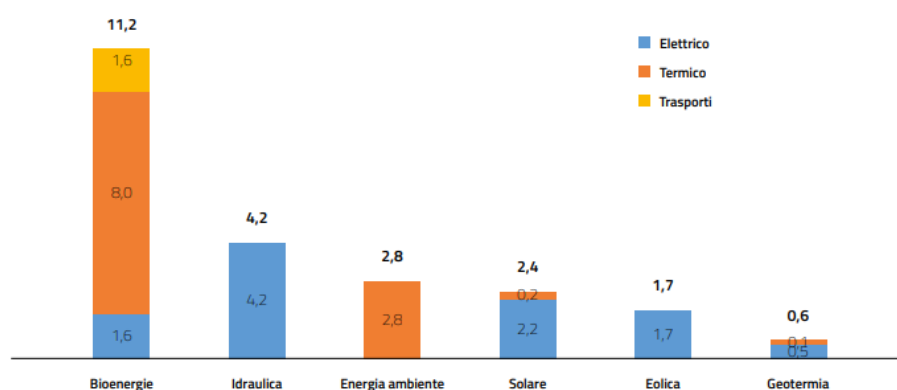


Figura 1-3 Contributo delle diverse FER nel 2021 nei diversi settori Fonte: GSE

Secondo i dati 2021 la produzione di energia elettrica da impianti alimentati da bioenergie coinvolge come fonti energetiche principali il biogas (da discarica e biomasse) e le biomasse solide (rispettivamente 42,6% e 35,9%), ed ha raggiunto valori pari a 19.071 GWh rispetto ai 5.257 GWh del 2007 con un incremento medio annuo che si attesta intorno al 7%. A livello regionale la Lombardia è al primo posto per il contributo delle bioenergie nella produzione di energia elettrica con valori di 4.231 GWh, mentre la regione Marche si ferma a 143,3 GW posizionandosi dietro Umbria (216 GWh) e Molise (161 GWh).

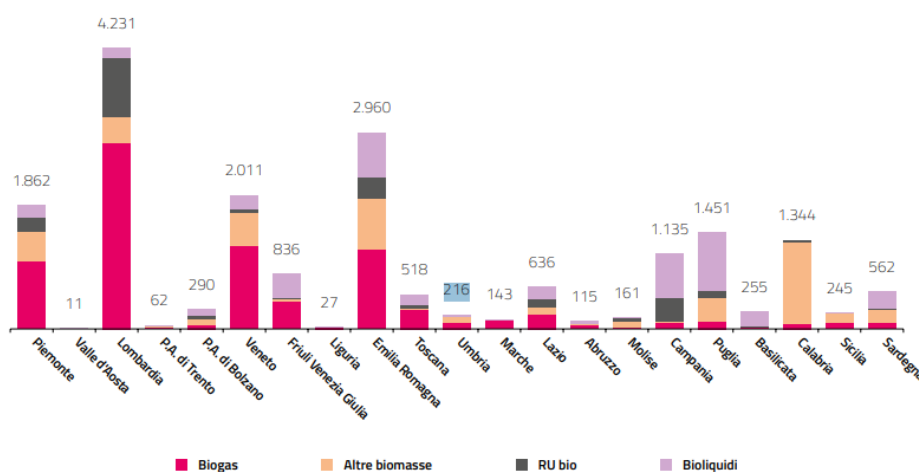


Figura 1-4 Dati regionali sulla produzione di energia elettrica da bioenergie nel 2021

Fonte: Terna

Per quanto riguarda il settore termico la FER più impiegata è stata la biomassa solida raggiungendo consumi diretti pari a 6,8 Mtpce corrispondenti al 66% dei consumi totali senza tener conto della frazione biodegradabile dei rifiuti. Di questi consumi circa il 97% è associato

al settore residenziale, mentre la restante quota viene suddivisa all'interno dei settori agricolo, industriale e dei servizi. L'impiego di biomassa solida per il riscaldamento di ambienti domestici è ampiamente diffuso su scala nazionale, contrariamente a ciò che avviene per gli altri settori caratterizzati invece da una distribuzione regionale molto diversificata. Questa diversa distribuzione può essere spiegata tenendo conto del fatto che non vi è una presenza uniforme sul territorio nazionale di impianti industriali che impiegano biomassa per la produzione di energia termica. (*RAPPORTO STATISTICO 2021 ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI IN ITALIA*, n.d.)

1.2 Classificazione delle biomasse

La classificazione delle biomasse più intuitiva è quella che può basarsi sullo stato fisico del materiale nel momento della conversione energetica. Quest'ultima precisazione si riferisce alla possibilità di eseguire trattamenti sulle biomasse di partenza che consentono di ottenere dei prodotti finali completamente diversi, ma ugualmente classificabili come biomasse. È possibile dunque distinguere:

- Biomasse solide (palabili): sono la categoria più rappresentata all'interno delle biomasse ad uso energetico, comprende tutte le biomasse lignocellulosiche come legno e scarti legnosi, materiale vegetale proveniente da colture energetiche dedicate o residuale come nel caso di paglie, materiali di scarto derivanti dal settore agroalimentare ed industriale, reflui zootecnici e molti altri materiali residui. Nella tesi verranno prese in considerazione principalmente le biomasse lignocellulosiche e amidacee provenienti dal settore di manutenzione del verde e alcuni residui di molitura del frumento duro.



Figura 1-5 Esempi di biomasse solide residuali e dedicate da sinistra: frazione organica dei rifiuti urbani, paglia, sorgo, mais da biomassa.

- Biomasse liquide: costituite da oli estratti da semi di specie oleaginose, e più limitatamente ricavate dalla trasformazione delle matrici amidacee fermentate per la produzione di bioetanolo;



Figura 1-6 Biodiesel, colture oleaginose dedicate (colza e girasole)

- Biomasse gassose: sono formate da composti chimici come CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2 , derivanti da processi fisici o biochimici di degradazione di composti liquidi o solidi. I maggiori rappresentanti sono il biogas e il syngas (gas di gassificazione).



Figura 1-7 Esempio di impianto di produzione biogas

1.3 Composizione chimica delle biomasse

Lo sviluppo e l'adozione di tecnologie sempre più efficienti nella conversione della biomassa in energia, biocarburanti e prodotti chimici, si basa necessariamente sulle caratteristiche chimico-fisiche ed energetiche della materia prima.

La biomassa legnosa è caratterizzata dalla presenza di acqua, sostanza organica e sostanza inorganica. Tuttavia, la composizione chimica può variare notevolmente ed è influenzata da alcuni aspetti:

- **Specie vegetali diverse** possono mostrare differenze sostanziali legate alla capacità di alcune di assorbire selettivamente composti specifici dall'aria, dal suolo e dall'acqua che poi verranno trasportati ed accumulati nei tessuti;
- **Porzioni diverse di una stessa biomassa** possono mostrare composizioni diversificate, ad esempio, nelle specie arboree il fusto e i rami principali hanno un contenuto in cellulosa e lignina maggiore rispetto alle foglie ed ai rami secondari;
- **L'età del materiale** può influenzare alcune componenti, ad esempio biomasse legnose caratterizzate da un quantitativo elevato di azoto possono derivare da legno di piante giovani;
- **Aspetti agronomici** legati alla distribuzione di fertilizzanti utilizzati, disponibilità naturale di elementi nutritivi, pH e presenza di inquinanti nel suolo;
- **Presenza di materiale esterno** trascinato durante le fasi di movimentazione e trasporto della biomassa;
- **Tempi e tecniche di raccolta, nonché condizioni di trasporto e stoccaggio** possono portare alla presenza di materiali estranei, o innescare processi di degradazione microbica con conseguente riduzione della frazione organica presente nella biomassa.(Vassilev et al., 2010)

1.3.1 *Acqua*

L'acqua rappresenta un costituente sempre presente, in percentuale estremamente variabile in relazione alla tipologia di biomassa e alle condizioni di lavorazione, ad esempio biomasse legnose possono presentare un'umidità tendenzialmente minore rispetto alle biomasse vegetali fresche. L'acqua può essere presente nelle biomasse in due forme:

- **Acqua di idratazione**, parametro che rappresenta il rapporto percentuale tra la massa di acqua contenuta nella biomassa e la massa totale della stessa, detto anche umidità. In dettaglio rappresenta l'acqua presente all'interno della biomassa, trattenuta dalle forze di coesione, adesione e capillarità instauratesi nella micro e macroporosità del materiale, può essere quindi eliminata più o meno facilmente per evaporazione;

- Acqua molecolare, e rappresenta l'acqua presente come costituente nelle molecole della frazione organica delle biomasse. Viene definita anche acqua di combustione perché liberata solo per degradazione termica della sostanza organica. L'allontanamento per evaporazione dell'acqua di combustione comporta una sottrazione di energia, espressa dalla differenza tra il potere calorifico superiore (PCS) e il potere calorifico inferiore (PCI). In generale se la biomassa presenta elevati quantitativi di idrogeno e ossigeno la quantità di acqua di combustione liberata sarà maggiore.

La presenza di acqua nella biomassa può influenzare negativamente caratteristiche tecniche, logistiche, energetiche..., che verranno presi in considerazione in seguito più dettagliatamente.

1.3.2 Componente organica

I componenti della frazione organica sono rappresentati in quantitativi variabili da cellulosa, emicellulosa, lignina, pectina ed altri componenti.

La cellulosa è il componente principale della parete cellulare, ed è un polisaccaride costituito da ripetute unità di glucosio (unità costituente) legate tramite legami β 1-4, essendo una molecola lineare a differenza dell'amido non può essere demolita per idrolisi e quindi può essere considerata un ottimo materiale strutturale.

Le emicellulose sono invece rappresentate da un gruppo di polisaccaridi complessi a catena ramificata come xiloglucani, xilani che interagiscono con le microfibrille di cellulosa. Le emicellulose sono igroscopiche e amorfe, a causa delle ramificazioni presenti, e presentano proprietà adesive ma non strutturali.

Tabella 1-2 *Composizione di alcune biomasse, modificato da (Anwar et al., 2014)*

Biomassa lignocellulosica	Lignina (%)	Emicellulosa (%)	Cellulosa (%)	Fonte
Sorgo zuccherino	21	27	45	Kim e Day (2011)
Pannocchie di mais	15	35	45	Prasad et al (207)
Stocchi di mais	19	26	38	Zhu, Lee ed Elander (2005)

Gusci di noci	30-40	25-30	25-30	Howard, Abotsi, Van Rensburg e Howard (2003)
Paglia di grano	16-21	26-32	29-35	McKendry (2002)
Paglia di riso	18	24	32,1	Prasad et al. (2007)
Legno di latifolia	18-25	24-40	40-55	Malherbe e Cloete (2002)

La lignina è un polimero complesso ad elevato peso molecolare, costituito per lo più da composti fenolici. Esso è presente nella parete cellulare interponendosi negli spazi interstiziali tra le microfibrille di cellulosa. La lignina ha capacità impermeabilizzanti e, oltre a conferire resistenza agli attacchi microbici, fornisce funzioni strutturali simili a quelle della cellulosa, per questi motivi tessuti ricchi di lignina sono caratterizzati da proprietà di resistenza meccanica elevate.

1.3.3 *Componente inorganica*

La componente inorganica, o inerte, è rappresentata dalle ceneri, ovvero il residuo generato dalla completa combustione della biomassa. Le ceneri sono sempre presenti nelle biomasse solide (es. biomasse lignocellulosiche) in quantità variabile in relazione agli elementi chimici assorbiti dal terreno, alle impurità frammiste alla materia prima, oltre che alla tipologia di biomassa considerata. Gli elementi chimici più rappresentati sono macroelementi (K, Ca, Mg, P) e microelementi (Na, B, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb...).

Le ceneri sono tare energetiche in quanto non contribuiscono ad aumentare il contenuto energetico della biomassa e non rilasciano calore nel processo di combustione. Inoltre, le ceneri rappresentano uno dei parametri qualitativi più importanti, e limitanti, per la biomassa in quanto contribuiscono indirettamente all'emissione di polveri, e problemi operativi quali formazione di scorie, corrosione ed incrostazioni, problematiche per le quali si rimanda ad un'analisi più dettagliata nel paragrafo 1.4.1. (Deboni et al., 2019)

1.4 Caratterizzazione delle biomasse solide a scopo energetico

La caratterizzazione delle biomasse consente di individuare, secondo specifiche metodiche standardizzate, i parametri qualitativi delle biomasse ad uso energetico e dei biocombustibili. Le normative prendono in considerazione diverse tipologie di parametri per poter definire la qualità del biocombustibile. Tra i parametri presi in esame ci sono: tracciabilità della materia prima, proprietà geometriche e dimensionali, proprietà fisico-meccaniche, proprietà energetiche e chimiche. Attraverso la misurazione dei parametri associati a tali proprietà si possono descrivere i comportamenti che potrebbero precludere alcuni utilizzi della biomassa in determinate condizioni. Di seguito verranno descritti brevemente i principali parametri da determinare nella caratterizzazione delle biomasse solide.

Parametri geometrici dimensionali

I fattori geometrici e dimensionali, sono diversi in relazione al tipo di combustione, e possono variare in relazione ai processi di lavorazione e trasformazione subiti dalla materia prima. Tra questi ci sono:

- **Lunghezza, diametro:** parametri misurabili per i combustibili regolari come la legna da ardere, il pellet. Questi parametri consentono di regolare componenti degli impianti termici come i sistemi di alimentazione e di movimentazione, oltre che favorire il dimensionamento dei sistemi della logistica delle biomasse.
- **Granulometria:** può fornirci molte informazioni sulla maneggevolezza, trasportabilità, durabilità microbiologica e comportamento in fase di combustione della biomassa. Viene definita come la distribuzione dimensionale (percentuale in massa) delle particelle che compongono del materiale (es. cippato), misurata in classi omogenee. Consente di avere una misura dell'omogeneità del prodotto, e può essere influenzata dal sistema impiegato per la produzione del biocombustibile. Nel caso della produzione di cippato, le cippatrici possono presentare metodi di lavoro e meccanismi di taglio diversificati che portano all'ottenimento di un prodotto di dimensioni variabili.

A livello pratico può influenzare i processi di essiccazione (maggiore dimensione della particella comporta tempi di essiccazioni più lunghi), e fenomeni fisici come l'effetto ponte della biomassa nelle fasi di scarico, ovvero può provocare l'interruzione dei sistemi di alimentazione come tramogge e coclee per ostruzione delle stesse.



Figura 1-8 Cippato con granulometria media di 16 mm (sinistra) e 45 mm (destra)

- **Forma:** parametro che si riferisce alla forma con il quale il biocombustibile viene commercializzato, influenza i costi di produzione, oltre a influenzare aspetti logistici e di utilizzo finale.



Figura 1-9 Esempi di biocombustibili con forme diversificate (bricchette, cippato e balle di paglia)

- **Massa volumica:** corrisponde a rapporto tra la massa del biocombustibile e il volume occupato dallo stesso. È influenzata dal contenuto di umidità e dalle caratteristiche dimensionali, ed è importante per l'efficienza dei trasporti e dello stoccaggio lungo tutta la filiera produttiva, oltre che per le scelte impiantistiche (spazi dei sistemi di alimentazione e degli impianti).

Parametri fisico-meccanici

- **Umidità**

Può essere espressa come rapporto percentuale tra la massa di acqua contenuta nella biomassa, e la massa di quest'ultima:

$$Umidità \% = \frac{Massa H_2O}{Massa Biomassa} \times 100$$

L'umidità è un parametro qualitativo della biomassa molto importante, in quanto può influenzare molteplici aspetti delle biomasse quali:

- **Contenuto energetico delle biomasse:** la presenza di acqua nella biomassa, comporta una **riduzione del contenuto energetico**, sia perché comporta una diminuzione del quantitativo di sostanza organica utile nella biomassa (più sarà elevato il valore dell'umidità e minore sarà la massa della biomassa secca) sia perché l'acqua di combustione riduce il quantitativo di energia liberata, a causa del calore sensibile e del calore latente di evaporazione (2,2 MJ/kg H₂O). Vale a dire che per ogni kilogrammo di acqua vengono assorbiti 2,2 MJ di energia affinché possa realizzarsi il cambio di stato da liquido a gassoso.
- **Costi di logistica;**
- **Stabilità nello stoccaggio:** lo stoccaggio di biomasse molto umide può comportare fenomeni di degradazione microbica che si riflettono negativamente sulla perdita di biomassa effettiva, in quanto la degradazione comporta la perdita della sostanza organica. A questo processo si associa un aumento della temperatura del cumulo con il raggiungimento talvolta di valori che comportano l'innescare di combustioni spontanee (fenomeni di self-ignition). Bisogna tuttavia considerare che l'aumento di temperatura del cumulo è legato anche ad altri aspetti come la dimensione del cumulo, la circolazione di aria e la dimensione del materiale stoccato.(Cepeda, 2020)
- **Comportamento nei processi termochimici:** l'impiego di biomassa molto umida in sistemi di combustione provoca una diminuzione della temperatura di fiamma, con effetto deprimente della combustione stessa. A questo è associata anche una minore efficienza del processo, che si traduce in un minor quantitativo di energia prodotta e cinetiche di reazione non ottimali.
- **Massa volumica:** la presenza di acqua libera (umidità) all'interno della biomassa comporta l'aumento di peso di un volume noto rispetto ad uno stesso volume di biomassa secca o con quantitativi di umidità inferiori senza che a tale aumento si associ una quantità di energia maggiore (semmai l'energia utile è minore per effetto del calore latente di evaporazione).



Figura 1-10 Cumulo di biomassa legnosa

- **Ceneri**

Le ceneri sono rappresentate dalla frazione inorganica del biocombustibile, presente come residuo della completa combustione. Esse, come già evidenziato (paragrafo 1.3.1), rappresentano una tara energetica in quanto non contribuiscono ad aumentare il contenuto energetico della biomassa e non rilasciano calore nel processo di combustione. Le ceneri sono rimosse calde in impianti di grandi dimensioni tramite dei sistemi di rimozione automatica, comportando una potenziale sottrazione del calore utile che riduce l'efficienza globale del sistema di combustione. Le ceneri possono influenzare negativamente altri aspetti quali:

- Emissioni: i fumi che si generano nei sistemi di combustione possono trasportare all'esterno le componenti volatili delle ceneri. Ciò comporta la produzione di emissioni di particolato che possono influire gravemente sui processi atmosferici e sulla salute umana.
- Corrosione: la presenza di elementi nella composizione chimica della biomassa come il cloro (Cl), lo zolfo (S) ed il potassio (K) possono influenzare positivamente questo fenomeno soprattutto se associata alla presenza di vapore.

Il cloro, durante il processo di combustione, si trasforma principalmente in acido cloridrico (HCl) gassoso, Cloro (Cl₂) ed alcuni cloruri alcalini come cloruro di potassio (KCl). La formazione di questi composti genera fenomeni corrosivi sulle superfici degli scambiatori di calore e degli elementi interni dell'impianto, impattando notevolmente sui costi di gestione dell'impianto.

- **Incrostazione:** fenomeno legato alla formazione di aggregati stabili sul letto di combustione in caldaia o sulla superficie dei tubi degli scambiatori. La presenza di questi aggregati sui tubi di scambio genera un effetto isolante, con conseguente riduzione di efficienza della caldaia, in quanto il calore dei fumi non riesce a passare ai fluidi presenti all'interno dello scambiatore.

Gli aggregati formatisi sul letto di combustione della caldaia possono occludere le vie di ingresso dell'aria primaria a cui si aggiungono danni economici diretti legati gli interventi di manutenzione volti a rimuovere le incrostazioni e danni indiretti legati al fermo dell'impianto.

- **Smaltimento:** aspetto negativo per impianti di medie e grandi dimensioni, che devono provvedere al trasporto in discarica, con un conseguente costo aggiuntivo. Nel caso in cui le ceneri contengano metalli pesanti o altri composti, è necessario sostenere dei costi maggiori per assicurare uno smaltimento adeguato. Va specificato che recentemente è stata concessa la possibilità di utilizzare tali ceneri per costituire fertilizzanti agricoli in co-formulazione con altri prodotti.

Le ceneri possono essere distinte in ceneri leggere, eliminate dal camino con le emissioni poiché volatilizzano durante la combustione, e ceneri pesanti, che vengono espulse dal basso dell'impianto, rimanendo solide durante la combustione.

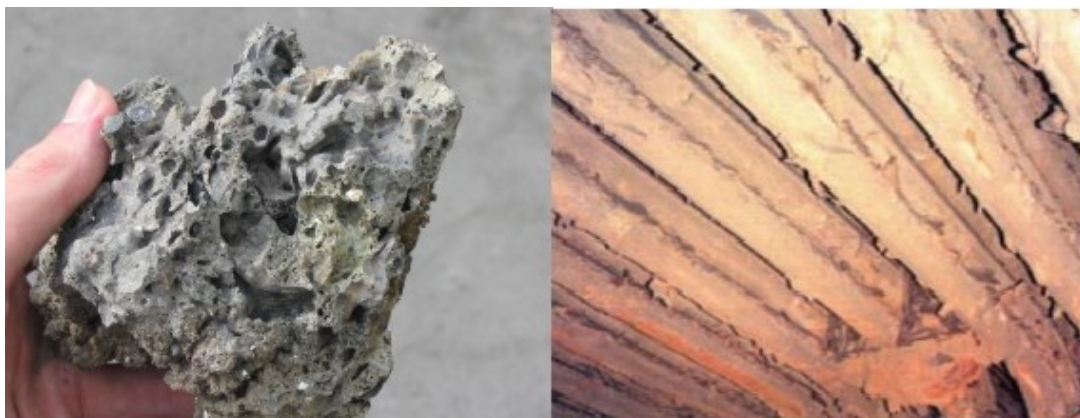


Figura 1-11 Aggregati di ceneri

- **Fusibilità delle ceneri**

Parametro che descrive il comportamento plastico delle ceneri, a temperature superiori a quelle di fusione.

Le ceneri possono essere distinte in relazione al loro comportamento in alto fondenti (fondono ad elevate temperature $>1400^{\circ}\text{C}$) e basso fondenti (fondono a temperature comprese tra i $700-$

800°C). Queste ultime sono considerate negative per le motivazioni esposte nel paragrafo precedente ed hanno risvolti economici negativi sia diretti, come il deterioramento di porzioni dell'impianto, sia indiretti, come il fermo dell'impianto per permetterne la rimozione.

Parametri energetici

- **Potere calorifico**

Il potere calorifico rappresenta l'energia che un combustibile può liberare durante il processo di combustione. Esso è influenzato fortemente dalla composizione chimica della biomassa ed è uno dei parametri più significativi di un combustibile (fossile o rinnovabile). Può avere impatti in termini di valore energetico ed economico del prodotto, sul comportamento nel sistema di utilizzazione, ed influire su alcuni costi indiretti legati al trasporto o allo stoccaggio del materiale.

Possiamo distinguere potere calorifico superiore (PCS), inferiore (PCI) ed infine netto (PCN).

- Il PCS descrive il contenuto energetico complessivo potenziale generato dalla completa combustione in condizioni ottimali (le tipiche condizioni analitiche) dove il combustibile è ossidato da ossigeno puro all'interno della bomba calorimetrica;
- Il PCI esprime la quantità di energia disponibile al netto del contributo dell'acqua che si forma durante la combustione, assumendo che questa rimanga tutta nello stato di vapore. Rappresenta il parametro energetico più utilizzato ed è calcolato come differenza tra il PCS e il calore latente di condensazione del vapore acqueo formatosi;

$$PCI = PCS - c_{ev} * H_2O$$

- Il PCN esprime la reale energia sviluppata dal combustibile, e si ricava dal PCI al netto dell'umidità e può essere impiegato per valutare l'efficienza dell'impianto nella conversione termica.

$$PCN = PCI * (1 - U) - C_{ev} * H_2O$$

Parametri chimici

- **Contenuto in carbonio, idrogeno e ossigeno**

I quantitativi di carbonio, idrogeno e ossigeno, sono parametri strettamente legati al tipo di biomassa considerata, in quanto questi elementi compongono la gran parte delle molecole organiche presenti. Questo parametro ci permette di misurare indirettamente l'energia ottenibile della biomassa considerata. La concentrazione di carbonio è proporzionale al potere calorifico, mentre la concentrazione di idrogeno ci consente di valutare la produzione di acqua nel processo di combustione, valutando fattori correttivi per il calcolo del PCI.

- **Sostanza volatile**

La sostanza volatile rappresenta la frazione di combustibile che si sviluppa e brucia in forma gassosa ed è quindi la componente più reattiva della biomassa che si libera nelle prime fasi del riscaldamento (pirolisi/devolatilizzazione). Questo parametro può influenzare l'accensione, la stabilità e la temperatura di fiamma.

- **Contenuto in azoto**

L'azoto è un elemento presente in quasi tutte le biomasse in quantitativi variabili, sia in forma organica che in forma inorganica. Le biomasse erbacee e gli scarti provenienti dal settore industriale mostrano in genere un contenuto in azoto più elevato rispetto a quelle lignocellulosiche che ne contengono generalmente bassi quantitativi, fatta eccezione per il legno giovane. Valori di azoto molto elevati e anomali si associano ad inquinanti, eventuali trattamenti chimici, presenza di plastica o di colle. Durante la combustione l'azoto presente nel combustibile viene trasformato quasi interamente in azoto gassoso e ossidi di azoto (NO_x). Questi ultimi sono particolarmente dannosi, e dunque da monitorare costantemente, a causa dell'impatto che hanno a livello ambientale, con effetti climalteranti molto più elevati rispetto a quelli della CO₂

Dalla valutazione del rapporto tra carbonio ed azoto (C/N) della biomassa è possibile scegliere il processo di valorizzazione energetica più adeguato; infatti, quando questo rapporto è molto basso, con valori inferiori a trenta, sarebbe opportuno destinare il materiale a processi di trasformazione biochimica come la digestione anaerobica per la produzione di biogas.

- **Contenuto in zolfo**

All'interno della biomassa si può riscontrare la presenza di zolfo, in quantitativi generalmente piuttosto limitati, ad eccezione di biocombustibili trattati con prodotti chimici e delle potature dei vigneti a causa del massiccio impiego dello zolfo come anticrittogamico. Questo elemento può ritrovarsi all'interno molecole organiche quali amminoacidi, o in forma inorganica.

La presenza di zolfo nella biomassa è da considerarsi negativa sia in termini di emissioni di ossidi di zolfo, anch'essi ad elevato impatto ambientale, sia per i fenomeni corrosivi che possono instaurarsi sulle superfici dei tubi degli scambiatori oltre che sugli elementi interni della caldaia.

- **Contenuto in cloro**

La presenza di cloro nella biomassa è molto variabile; in genere si riscontrano bassi valori in quelle legnose, mentre in quelle erbacee i quantitativi sono significativamente più elevati. Analogamente allo zolfo, il cloro è responsabile di corrosione all'interno dei sistemi di valorizzazione termochimica, a causa della produzione di HCl e Cloruri ad elevate temperature.

In aggiunta la formazione di HCl può dar luogo allo sviluppo di policlorodibenzo-p-diossine (PCDD) e policlorodibenzo-furani (PCDF), limitabili grazie all'utilizzo di sistemi di valorizzazione moderni e di legno vergine come biocombustibile.(Liu et al., 2000)

I biocombustibili che mostrano un elevato contenuto di cloro, possono essere lavati (lisciviazione) per ridurre il quantitativo e quindi limitare la produzione di HCl ad alte temperature. In aggiunta la limitazione delle emissioni di HCl può essere limitata tramite sistemi di lavaggio dei gas di scarico o mediante adsorbimento a secco con idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). (Oberberger et al., 2006)

- **Contenuto in macroelementi**

Questi elementi costituiscono principalmente le ceneri, appartengono ai gruppi dei metalli e dei metalli alcalino-terrosi. Tra i più comuni ritroviamo: calcio, magnesio, sodio, alluminio, fosforo e ferro. Alcuni elementi di questo gruppo possono essere utilizzati come indicatori di eventuali trattamenti chimici effettuati sui materiali vergini. Normalmente sono presenti in concentrazioni più elevate rispetto ai microelementi, e la loro composizione determina il comportamento termico (fusibilità) delle ceneri. Elevate quantità di calcio e magnesio provocano un aumento della temperatura di fusione, mentre sodio e magnesio favoriscono l'abbassamento della temperatura di fusione, causando la formazione di incrostazioni.

- **Contenuto in microelementi**

I microelementi sono in genere contenuti in quantitativi molto bassi ad eccezione di biomasse provenienti dalla fitodepurazione dei terreni o a causa di inquinamento, presenza di materiali plastici o impiego di agenti preservanti. Questi elementi sono quasi esclusivamente metalli, in alcuni casi metalli pesanti, come Cromo, Cadmio, Rame e Piombo. In alcuni casi possono volatilizzare creando delle polveri molto fini che vengono trasportate a camino dalle correnti calde dei fumi.

Capitolo 2

IMPIEGO DEI BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI

I biocombustibili solidi possono trovare impiego per la produzione di energia in processi di trasformazione di tipo termochimica e biochimica.

Nella prima tipologia di processo si osserva la liberazione di energia di legame immagazzinata all'interno delle molecole organiche che costituiscono la biomassa, attraverso l'azione del calore. I processi termochimici coinvolgono la combustione diretta, la pirolisi e la gassificazione.

Nel caso dei processi di conversione biochimica, l'energia viene ricavata attraverso reazioni chimiche enzimatiche operate a specifiche condizioni ambientali da batteri o funghi. Tra le principali soluzioni è possibile ritrovare: digestione anaerobica (avviene in assenza di ossigeno, ottenendo biogas), digestione aerobica (avviene in presenza di ossigeno), fermentazione (diffusa per la produzione di etanolo a partire da biomasse ricche in zuccheri fermentescibili).

A livello operativo, sono presenti dei parametri che consentono di individuare il processo di trasformazione più adeguato per una determinata tipologia di biomassa. Questi parametri sono: la composizione molecolare, il contenuto di umidità, il rapporto tra il contenuto in carbonio e il contenuto in azoto (C/N).

In generale biomasse molto umide ($U > 30\%$) con quantitativi in azoto elevati ($C/N < 30$) e caratterizzate da componenti amidacee o zuccherine, come residui dell'industria agroalimentare, reflui zootecnici, e colture dedicate (mais, sorgo, barbabietola da zucchero), sono indirizzate a processi biochimici. Per quanto riguarda biomasse con rapporto $C/N < 30$, quindi caratterizzate da bassi livelli di azoto, e valori di umidità inferiori al 30% possono essere valorizzate in processi termochimici. Caratteristiche simili a quelle appena elencate sono spesso associate a biomasse ligno-cellulosiche (legno, trucioli, polvere di legno), o altri sottoprodotti dell'attività agricola come paglie, stocchi, pula e gusci.

Nei paragrafi successivi si prenderanno in considerazione le diverse tipologie di dispositivi di conversione termochimica, facendo riferimento in maniera più dettagliata al processo di

gasificazione in quanto l'impianto che si intenderà applicare per la valorizzazione della biomassa caratterizzata sfrutta questa tecnologia.

2.1 Combustione

La combustione rappresenta una delle vie più comuni per la produzione di energia a partire dalla biomassa; è una reazione chimica in cui un combustibile si combina con un comburente sviluppando energia termica sottoforma di calore. Si presuppone che vi sia in proporzione la presenza delle due componenti, oltre che valori adeguati di temperatura.

A livello termodinamico possiamo definire la combustione un'ossidazione esotermica in cui un composto si ossida mentre un altro si riduce con il rilascio di energia e formazione di nuovi prodotti principalmente anidride carbonica e vapore acqueo. Nel caso in esame la biomassa rappresenta il combustibile, mentre il comburente o agente ossidante è rappresentato dall'ossigeno atmosferico.

Il processo coinvolge nel complesso una serie di reazioni che possono essere distinte in diverse fasi:

- Riscaldamento, fase di ridotta durata, in cui si osserva una parziale evaporazione dell'acqua (processo che avviene anche a temperature inferiori ai 100°C).
- Essiccazione, fase in cui si verifica l'allontanamento della maggior parte dell'acqua, con conseguente perdita di peso. Processo endotermico (assorbe calore) con conseguente diminuzione delle temperature nella camera di combustione. Biomasse con contenuti di umidità superiori al 65% non possono essere utilizzate, perché l'energia sottratta per l'evaporazione comporterebbe un'interruzione dell'autoalimentazione del processo. In alcuni casi l'impiego di biomasse con contenuti di umidità elevati viene preso in considerazione per diminuire volontariamente le temperature all'interno della camera di combustione ($100 < T < 150$).
- Pirolisi, in cui si assiste alla scissione dei componenti a catena lunga in composti più semplici, producendo tar (catrame liquido), char (composti carboniosi solidi), idrocarburi gassosi e gas di combustione parziale come, ad esempio, il monossido di carbonio ($150 < T < 230$).
- Prima gassificazione, (prima fase esotermica del processo) raggiunto il punto di ignizione (230°C) inizia la degradazione della sostanza organica. È una fase in cui viene immessa, in quantità sotto stechiometrica, aria primaria (ossigeno) all'interno

della camera di combustione, con l'obiettivo di ossidare parte dei composti che si sono formati in modo da autoalimentare il processo ($230 < T^{\circ} < 500$)

- Seconda gassificazione, fase a carico del char (composti carboniosi solidi) che non è stato degradato precedentemente ($500 < T^{\circ} < 700$)
- Ossidazione, fase finale in cui tutti i composti volatili prodotti in precedenza vengono ossidati, con liberazione di energia sotto forma di calore (si libera circa il 70% del calore complessivo). La degradazione completa dei componenti viene favorita dall'immissione di aria secondaria (ossigeno). Produzioni elevate di monossido di carbonio (CO) e di idrocarburi possono indicare una combustione non completa, causando inquinamento atmosferico oltre ad influenzare la resa energetica del processo.

2.1.1 *Tecnologie per la combustione delle biomasse solide*

La combustione della biomassa può avvenire in impianti molto diversificati, sia a livello domestico, con potenze piuttosto limitate, sia a livello aziendale, con potenze medie (es. agriturismi) sia infine a livello industriale raggiungendo potenze elevate in grado di soddisfare interi centri abitati come nel caso dei sistemi di teleriscaldamento. Le tecnologie più diffuse nei sistemi di combustione riguardano:

Caldaie a letto fisso e mobile: utilizzano diverse tipologie di griglie o grate per sostenere il combustibile durante le fasi della combustione. La biomassa viene introdotta lateralmente e spostata poi per gravità o tramite vibrazione in modo da garantire una sorta di separazione delle varie fasi del processo. All'interno di questa categoria rientrano diverse varianti impiantistiche sia di piccola dimensione come camini aperti o chiusi e stufe, sia sistemi più complessi a griglia fissa, a griglia mobile e a griglia rotante.

Caldaie a letto fluido: questa tecnologia ci consente di massimizzare la superficie di reazione tra il combustibile, aria e un materiale inerte granuloso (sabbia silicea, dolomite) allo scopo di trasmettere il calore necessario per le reazioni endotermiche del processo di combustione. Questi sistemi presentano inoltre un'elevata versatilità per quanto riguarda la tipologia della biomassa impiegata. Attualmente sono presenti due principali varianti impiantistiche:

- Caldaie BFB (bubbling fluidized bed)
- Caldaie CFB (circulating fluidized bed)

I sistemi a letto sospeso o “pulverized bed”, sono caratterizzati dall’assenza di separazione delle varie fasi di combustione, e sono impiegati per la combustione di biomasse con bassi quantitativi di umidità, omogenee e di piccole dimensioni.

2.2 Gassificazione

La gassificazione rappresenta un processo termochimico nel quale la biomassa -o in generale un biocombustibile solido- entra in contatto ad alte temperature (700-1200°C) con un agente di gassificazione, in quantità sotto stechiometriche, come aria, vapore d’acqua, CO₂, O₂, o una combinazione di questi, in modo da ottenere una miscela di gas (syngas) contenente CH₄, CO ed altri idrocarburi. Questa miscela gassosa può subire diverse destinazioni, tra queste si ricordano: impiego diretto come combustibile; destinato a processi di sintesi per la produzione di metanolo ed idrogeno; convertito in combustibile sintetico tramite specifici trattamenti. Le fasi che comunemente caratterizzano il processo di gassificazione sono:

- Essiccamento: processo endotermico nel quale si verifica la perdita di acqua libera;
- Pirolisi: rappresenta la fase in cui si assiste alla scissione dei componenti molecolari a catena lunga in composti più semplici in assenza di ossigeno. I prodotti ottenuti sono tar (catrame liquido), char (composti carboniosi solidi), idrocarburi gassosi e altri. Questa fase è analoga agli altri processi termochimici di pirolisi e combustione.
- Combustione: processo esotermico, al quale è associata la produzione di anidride carbonica, monossido di carbonio e vapore acqueo, legate all’ossidazione del char formatosi precedentemente.
- Riduzione: fase fortemente endotermica in cui l’anidride carbonica reagisce per formare nuovamente monossido di carbonio.

L’idrogeno e una quota della CO vengono prodotti per decomposizione della sostanza organica in presenza di vapore acqueo, mentre il metano viene prodotto tramite articolate reazioni che coinvolgono i composti formati negli step precedenti.

2.2.1 Sistemi tecnologici di gassificazione

I sistemi di gassificazione si possono classificare in due categorie principali: sistemi a letto fisso, e sistemi a letto fluido. Di seguito saranno analizzate le diverse soluzioni tecnologiche presenti all’interno di ogni singola categoria.

Gassificatori a letto fisso

I gassificatori a letto fisso rappresentano un insieme di soluzioni tecnologiche molto diffuse, di semplice utilizzo ed in genere di bassa potenza. Il gas prodotto con questi sistemi ha in genere una composizione in CH₄ (3-5%), CO₂ (10-15%), CO (10-15%), H₂ (15-20%) e N₂ (40-50%).(Mishra & Upadhyay, 2021)

I gassificatori a letto fisso possono essere ulteriormente classificati in relazione al movimento del flusso dell'agente di gassificazione rispetto a quello subito dal combustibile e si possono quindi distinguere:

- Gassificatori equicorrente (downdraft): sono sistemi nel quale la biomassa introdotta dall'alto si muove attraversando le varie zone verso il basso, nella stessa direzione del gas prodotto, rimosso dal fondo del reattore. Il gassificatore presenta una particolare conformazione legata alla presenza di un restringimento in cui la biomassa può concentrarsi, oltre a favorire l'introduzione di aria. Tuttavia, la presenza del restringimento può favorire la formazione di intasamenti del biocombustibile e per evitare che questo accada è richiesta una maggior attenzione alla granulometria della biomassa in entrata. Altre limitazioni di questo sistema sono legate alla presenza di particolato nel gas e ad una efficienza termica ridotta del dispositivo, a causa della necessità di raffreddamento del gas prodotto (fuoriesce a temperature intorno 900-1000°C) per il successivo impiego.

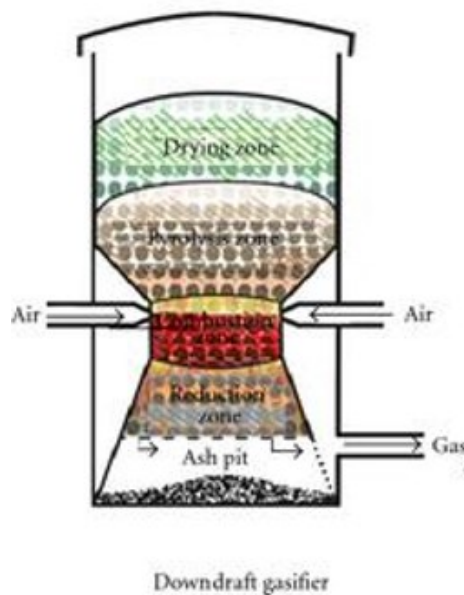


Figura 2-1 Reattore downdraft

- Gassificatori controcorrente (updraft): sono sistemi molto semplici, caratterizzati dal movimento in direzione opposta della biomassa rispetto all'agente comburente. Il combustibile con tessitura piuttosto grossolana per favorire il passaggio del gas viene introdotto dall'alto del reattore, dove è localizzato anche il foro di uscita del gas prodotto. Sul fondo è presente invece una griglia che sostiene il combustibile e al di sotto della quale viene introdotto l'agente di gassificazione. Questi sistemi sono caratterizzati da una elevata efficienza termica, grazie all'ottimo scambio termico interno, e dalla capacità di gestione di biomasse molto umide. Tuttavia, sono tutt'oggi presenti limitazioni nell'impiego di materiali ligno-cellulosici a causa della produzione di un gas di bassa qualità caratterizzato da impurità e presenza di catrami.

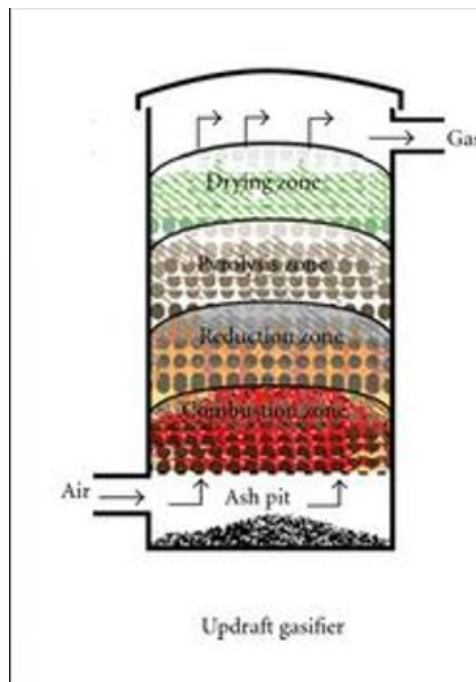


Figura 2-2 Reattore updraft

- Gassificatori a flusso incrociato (cross-draft): noti anche come sistemi a tiraggio laterale, comprendono soluzioni tecniche in cui il biocombustibile si muove verso il basso, mentre l'aria è introdotta da ugelli posti lateralmente (qui si formerà la zona di combustione) in posizione opposta all'uscita del gas. I rendimenti termici sono assimilabili ai sistemi downdraft vista l'elevata temperatura alla quale fuoriesce il gas

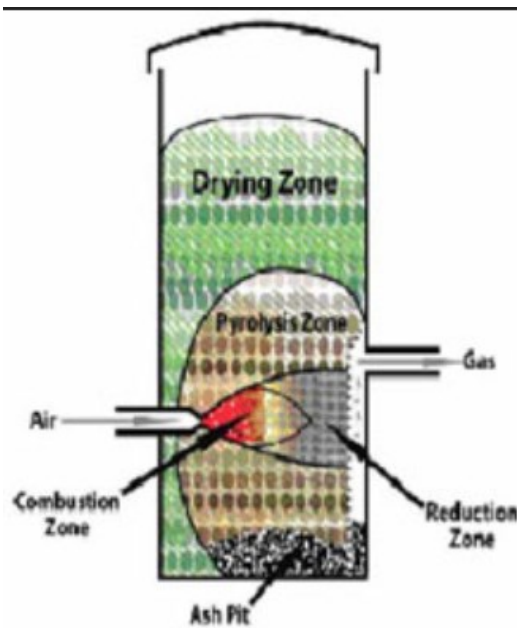


Figura 2-3 Reattore cross-draft

Gassificatori a letto fluido

I gassificatori a letto fluido rappresentano soluzioni impiantistiche dove è presente una sospensione di particelle solide all'interno di una corrente di gas che si comporta come un liquido. In passato questi sistemi venivano utilizzati per la gassificazione del carbone, mentre oggi hanno trovato diffusione anche con alcuni biocombustibili.

Questi sistemi sono caratterizzati dalla produzione di gas a più alto contenuto di particelle solide rispetto ai tradizionali gassificatori a letto fluido, e non mostrano particolari esigenze in termini di caratteristiche della biomassa introdotta risultando particolarmente flessibile per l'utilizzatore.

Per favorire gli scambi termici e garantire un'uniformità della temperatura all'interno del reattore vengono inseriti componenti inerti come ossidi refrattari, allumina e sabbia silicea. Tuttavia, la presenza ad elevate temperature dei materiali inerti e di biomasse caratterizzate da ceneri con un contenuto elevato di elementi alcalini può portare alla sinterizzazione della sabbia silicea.

A livello impiantistico il gas viene introdotto dal basso con una pressione tale da favorire il mantenimento dello stato fluido del letto, mentre la biomassa viene introdotta dall'alto.

Tra i gassificatori a letto fluido si possono distinguere quelli:

- A letto fluido circolante (CFB)
- A letto fluido bollente (BFB)

2.3 Pirolisi

La pirolisi viene definita come un processo di degradazione termica del biocombustibile che avviene in assenza di agenti ossidanti e per mezzo di calore a temperature comprese tra 400 e 800°C.(Castelli Silvana, 2010)

I prodotti che si originano dalla pirolisi del biocombustibile sono:

- Gassosa non condensabile (miscela costituita da idrocarburi leggeri ed altri gas come CO, H₂ e CH₄);
- Volatili condensabili (definiti tar, frazione costituita da una miscela di idrocarburi che costituiscono un combustibile noto come olio pirolitico);
- Solidi (definiti char, costituito da un residuo carbonioso ed altri composti non degradati ad alto peso molecolare)

Questi prodotti possono essere presenti in proporzioni diverse in relazione ad alcuni parametri come la temperatura, la pressione di esercizio, la velocità di riscaldamento, forma e dimensione delle particelle e tipologia di processo pirolitico.

Tra le diverse modalità di trattamento di biomassa si possono distinguere sulla base della temperatura di lavorazione e sui tempi di residenza del materiale nel reattore:

- Pirolisi intermedia
- Pirolisi veloce
- Pirolisi lenta

La pirolisi si compone di una serie di reazioni che possono essere distinte in reazioni primarie (includono la formazione di carbone, frammentazione e depolimerizzazione) e reazioni secondarie (cracking e ricombinazione a carico delle molecole non ancora stabili formatesi nella fase precedente). Le condizioni di esercizio possono anche dar luogo a reazioni diversificate che portano ad una distribuzione dei prodotti diversificata.(Collard & Blin, 2014)

In dettaglio si possono distinguere tre fasi:

- Pre-pirolisi
- Pirolisi, nella quale si assiste alla decomposizione della frazione organica per effetto della temperatura;
- Post pirolisi, in cui si verifica la rottura dei legami chimici rappresentando la fase terminale del processo

2.3.1 Sistemi di pirolisi

Attualmente sono disponibili sistemi tecnologici che utilizzano il processo di pirolisi per il trattamento di materiali vari; tra queste soluzioni è possibile ritrovare (Hu & Gholizadeh, 2019):

- Pirolisi a letto fisso;
- Pirolisi a letto fluido;
- Pirolisi a letto fluido circolante;
- Pirolisi di macinazione;
- Processo ablativo (pirolisi ablativa);
- Cono rotante;
- Pirolisi con avanzamento a coclea.

Obiettivo di questa tesi è la caratterizzazione chimico, fisico ed energetiche di biomasse residuali provenienti dal settore di manutenzione del verde e di sottoprodotti della molitura del frumento duro, al fine di poter determinare una eventuale valorizzazione in sistemi di produzione di energia termica di diversa tipologia, impiegabili sia presso attività agricole o agrituristiche sia in abitazioni.

I parametri delle biomasse legnose saranno confrontati con la normativa di riferimento UNI EN ISO 17225 per valutarne la conformità e suggerire eventuali soluzioni tecnologiche per risolvere eventuali criticità durante le varie fasi di lavorazione.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Biomasse selezionate per la caratterizzazione

La biomassa residuale da caratterizzare è rappresentata da materiale proveniente dalla manutenzione del verde urbano (pubblico e privato), presente sia come ramaglie tal quali sia come cippato industriale, e da sottoprodotti dell'industria molitoria del frumento duro.

Nel primo caso i campioni sono stati prelevati da una azienda di medie dimensioni specializzata nella manutenzione del verde sia pubblico che privato sita nel comune di Fermo. Dalle sue attività di potatura ed abbattimento, l'azienda ricava materiale verde e legname provenienti da diverse essenze arboree. Una quota del legname, di dimensioni maggiori, viene ridotta in ciocchi e recuperato per autoconsumo come legna da ardere, mentre la quota residua e il materiale di dimensioni minori (ramaglie, tronchi di piccolo diametro) vengono trattati a mezzo di una cippatrice a tamburo accoppiata ad un trattore.



Figura 3-1 Cippatrice accoppiata al trattore

Questa operazione può avvenire direttamente all'interno del cantiere (es. campeggi), ed essere seguita dal trasporto in azienda, o in alternativa il materiale prodotto viene trasportato tal quale presso la sede operativa per essere processato in un secondo momento. In ambedue i casi il materiale viene stoccato in cumulo e destinato al compostaggio non controllato; al termine di questa fase il compost prodotto viene distribuito nei terreni di proprietà.

In altre situazioni, quando si raggiungono i massimi livelli produttivi, l'azienda ricorre alla bruciatura del materiale, rispettando i quantitativi fissati per legge, o al conferimento del materiale presso la piattaforma locale di gestione dei rifiuti.



Figura 3-2 Cippatrice in funzione (sx) Operazione di cippatura diretta in cantiere (dx)

L'impresa è alla ricerca di soluzioni alternative all'attuale gestione del materiale residuale, in modo da sfruttare le risorse disponibili più efficacemente come, ad esempio, la produzione di biocombustibili impiegabili in impianti termici, eventualmente anche su scala industriale.

È bene sottolineare che anche altre aziende operanti nello stesso settore sono alla ricerca di valide alternative che consentano una gestione più razionale della biomassa residuale prodotta, senza che questa gravi di fatto solo come un costo aggiuntivo per le stesse.

A tal proposito, a seguito della valutazione dei risultati ottenuti, è stata verificata la conformità del biocombustibile caratterizzato, all'attuale normativa UNI EN ISO 17225-4 che sancisce i principali parametri qualitativi e i valori limite entro le quali un determinato cippato possa rientrare all'interno di una precisa classe qualitativa.

Per valutare quantitativi maggiori potenzialmente disponibili sul territorio, è stata contattata una società di gestione di rifiuti che svolge attività di raccolta sia di materiale di manutenzione del verde che rifiuti solidi urbani a livello provinciale. Tuttavia, nonostante gli elevati quantitativi gestiti dalla piattaforma, questa biomassa non è utilizzabile per una valutazione in impianti termici "esterni", in quanto considerata a livello legislativo un rifiuto e come tale deve essere gestito da aziende specializzate.

Le altre biomasse residuali di interesse sono rappresentate dai sottoprodotti della macinazione del frumento duro dal quale è possibile ottenere la semola impiegabile nei processi di pastificazione.

Il processo molitorio si compone di una serie di operazioni consecutive che permettono la separazione dell'endosperma dalle frazioni corticali della cariosside.

Durante la lavorazione si formano sottoprodotti diversi ed in quantità variabile con caratteristiche interessanti per un eventuale valorizzazione energetica quali:

- Crusca (10%) costituita principalmente dal tegumento esterno;
- Cruschello (4-5%) ottenuto dalla molitura di grano pulito in precedenza, ed è caratterizzato dalla presenza di frammenti di tegumento esterno, e ridotti quantitativi di porzioni del seme private della mandorla (presente in quantitativi minori rispetto alla crusca);
- Tritello (4%) rappresentato da frammenti di crusca, farina e di germe il colore è tendenzialmente biancastro o grigiastro;
- Farinaccio (4%) di colore bruno in quanto contiene piccoli frammenti di crusca;
- Farinetta (2%) in cui è possibile ritrovare parti della mandorla farinosa, frammenti del tegumento esterno e dei chicchi. (Progetto MiPAAF Bando Settore Bioenergetico DM 246/07 Convegno I SOTTOPRODOTTI AGROFORESTALI E INDUSTRIALI A BASE RINNOVABILE, 2013)

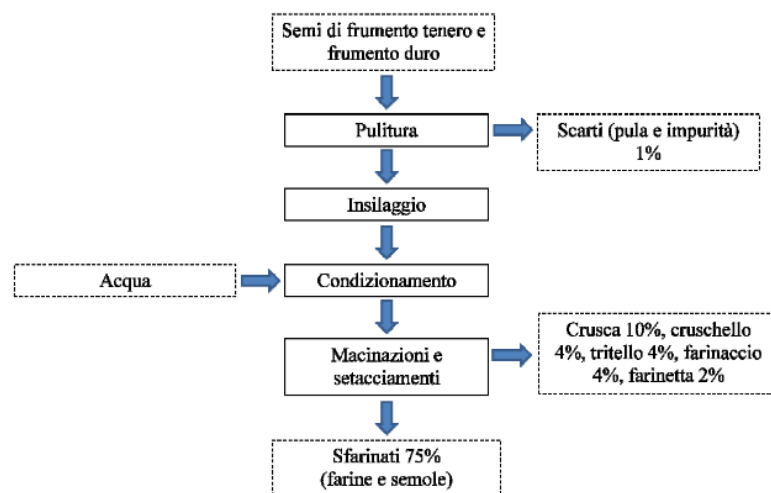


Figura 3-3 Processo schematizzato di produzione della farina da frumento. Per insilaggio, nel caso specifico, si intende lo stoccaggio di scarti secchi in sili verticali.

3.2 Campionamento

Il materiale residuale prodotto dall'azienda di gestione del verde, così come per i sottoprodotti della molitura del frumento, sono stati campionati personalmente facendo riferimento alla normativa EN ISO 18135 che regola il campionamento di biocombustibili solidi.

In entrambi le casistiche, il materiale veniva stoccato in cumuli di dimensioni inferiori alle quaranta tonnellate. Per l'ottenimento di un campione sufficientemente rappresentativo della variabilità presente all'interno del cumulo, è stato necessario suddividere visivamente quest'ultimo in tre strati orizzontali all'interno dei quali sono stati effettuati con l'aiuto di un badile dei sub-campionamenti (incrementi) in numero proporzionale al volume di ogni singolo strato (maggiore è il volume dello strato orizzontale maggiori saranno i sub-campionamenti). È necessario far attenzione durante la fase di campionamento nella porzione più bassa del cumulo in quanto possono verificarsi fenomeni di segregazione o prelievo di impurità.

Il campione così costituito è stato posto in un sacco di plastica, chiuso accuratamente in modo da evitare modifiche del contenuto di umidità ed infine trasportato presso il Laboratorio Biomasse per le analisi di caratterizzazione.

Per quanto riguarda la biomassa residuale derivante dalla manutenzione del verde i campionamenti sono stati svolti ogni 15-20 giorni presso il centro operativo dell'azienda sito nel comune di Lapedona (FM). In dettaglio sono stati effettuati cinque campionamenti nel periodo compreso tra febbraio e maggio dell'anno corrente allo scopo di valutare la variabilità del materiale processato dall'azienda. All'interno di ogni campionamento, sono state prelevate separatamente potature miste tal quali (non triturate) e biotriturato, ottenendo quindi due campioni diversi per singola uscita.



Figura 3-4 Vista frontale cumulo cippato



Figura 3-5 Vista laterale (Sx) e vista dall'alto (Dx) cumulo di cippato



Figura 3-6 Cumulo di potature

La biomassa proveniente dalla molitura del frumento duro è stata prelevata una sola volta presso l'azienda molitoria. I campionamenti sono stati effettuati sui seguenti sottoprodotti: farinaccio, farinetta e sottovaglio.

3.3 Caratterizzazione delle biomasse residuali oggetto di studio

Le biomasse residuali delle quali è stato valutato un potenziale impiego in impianti termici, sono state caratterizzate attraverso l'esecuzione delle principali analisi riportate nei paragrafi sottostanti. Tutte le analisi sono state svolte presso il Laboratorio Biomasse dell'Università Politecnica delle Marche ed i risultati ottenuti sono stati riportati per ciascun campione all'interno di un foglio Excel.

3.3.1 Umidità

La determinazione del contenuto di umidità permette di conoscere la quantità di acqua presente all'interno di una biomassa. L'analisi avviene per via gravimetrica esponendo il campione in stufa a 105°C della marca INSTRUMENTS s.r.l. modello 250-VF

A livello operativo si utilizza un vassoio di alluminio di peso noto, all'interno del quale viene inserito un quantitativo di campione non inferiore ai 300g (nel caso in cui porzioni di grandezza superiore ai 31,5 mm devono essere tagliati). Il vassoio ed il campione vengono quindi pesati (peso lordo) e posti in stufa a 105°C fino a costanza di peso, in genere per 24 ore (per le paglie 12 ore). Al termine di questo intervallo di tempo il vassoio contenente il materiale essiccato viene estratto facendo attenzione a non far cadere nulla, e ne viene misurato nuovamente il peso. Una volta raccolti i dati per la determinazione del contenuto di umidità viene utilizzata la formula riportata in normativa:

$$M = \frac{m2 - m3}{m2 - m1} * 100$$

Dove:

m1= massa del vassoio vuoto;

m2= massa del campione e del vassoio prima dell'ingresso in stufa;

m3= massa del vassoio e del campione dopo 24 ore



Figura 3-7 stufa utilizzata per la determinazione del contenuto di umidità

3.3.2 Preparazione del sotto-campione per le analisi chimico-fisiche

Per la determinazione dei parametri presi in considerazione nei paragrafi sottostanti è necessario prelevare un'aliquota del campione originario, stabilizzata in stufa a 40° per circa

8 ore. Una volta eseguita la stabilizzazione il materiale è stato macinato grazie all'impiego di mulino a taglienti della Retsch, modello SM2000. Il prodotto finemente macinato, con pezzatura inferiore ad 1 millimetro, è stato raccolto ed omogeneizzato manualmente per poi essere introdotto all'interno di una provetta Falcon da 50ml (circa 15-10 grammi di biomassa).

3.3.3 *Ceneri*

L'analisi del contenuto in ceneri avviene per via termo-gravimetrica trattando il campione in muffola a 550°C e permette di determinare la frazione inorganica presente all'interno della biomassa.

In dettaglio è possibile osservare la variazione della massa del campione in funzione della variazione di temperatura, all'interno di un programma di riscaldamento che avviene velocità costante fino al raggiungimento della temperatura preimpostata. I dati ottenuti sono poi riportati in un termogramma che mette in luce la perdita di massa del campione a seguito dell'aumento di temperatura.

Per lo svolgimento dell'analisi è stato impiegato un analizzatore termo-gravimetrico automatico della Leco (modello TGA701) in grado di analizzare fino a 19 campioni contemporaneamente. Lo strumento si compone di crogiuoli disposti su di un carosello girevole nei quali vengono inseriti i campioni da processare (1-1,2g), da una muffola e da una bilancia per la misura ad intervalli regolari del peso dei campioni.

È stato poi impostato un programma di riscaldamento specifico, che nel caso della suddetta tesi prevedeva inizialmente il raggiungimento della temperatura di 105°C (utile per la determinazione dell'umidità di correzione) e un ultimo step nel quale si è raggiunta la temperatura di 550°C necessaria per determinare il quantitativo delle ceneri.

La determinazione del contenuto in ceneri è molto importante in quanto, come già evidenziato dettagliatamente nel paragrafo 1.4, queste tendono a ridurre le prestazioni dell'impianto termico.

3.3.4 *Fusibilità delle ceneri*

La conoscenza del comportamento termico ad elevate temperature delle ceneri permette di studiare le prestazioni del biocombustibile all'interno dell'impianto impiegato. L'analisi viene svolta per mezzo di una muffola con fotocamera (Sylab IRF 1600F) collegata ad un computer, che permettono la determinazione di quattro temperature caratteristiche mediante la

registrazione fotografica automatica delle variazioni di forma di un provino di cenere sottoposto ad un gradiente di temperatura crescente. Le temperature individuate sono:

- Temperatura di contrazione (diminuzione del volume senza modifiche della forma del campione);
- Temperatura di deformazione (il campione subisce un arrotondamento degli angoli superiori);
- Temperatura emisferica (il campione assume una forma emisferica);
- Temperatura di fusione (completa fluidificazione del campione).

A livello operativo è necessario preparare un provino cilindrico a partire dalla cenere ottenuta trattando il campione macinato in muffola. La cenere viene poi schiacciata con un mortaio in modo da renderla uniforme, ed aggiungendo alcol etilico è possibile ottenere un composto che potrà essere posto in un apposito stampo per la formazione del provino di forma cilindrica.

Il campione o eventualmente i campioni da processare possono essere inseriti così all'interno della muffola e dopo aver posizionato correttamente la telecamera in modo che metta a fuoco il campione è possibile avviare l'analisi.

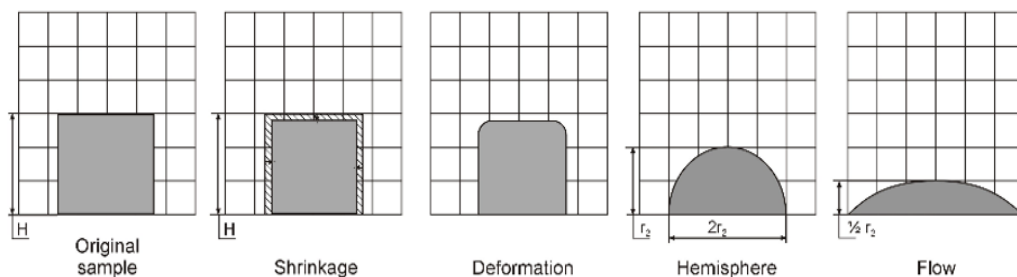


Figura 3-8 *Rappresentazione grafica delle variazioni di forma di un provino di ceneri sottoposto a gradiente termico da sx campione originale, contrazione, deformazione, emisferica e fusione*



Figura 3-9 Strumentazione per la preparazione del provino a sinistra, Syllab IRF 1600Fa destra

3.3.5 Potere calorifico

La misura del potere calorifico si basa sulla determinazione dell'energia liberatasi dalla combustione completa di un combustibile, in presenza di elevata concentrazione di ossigeno. È possibile risalire all'energia liberata espressa in Joule/grammo, mediante la misura dell'incremento di temperatura di una massa nota di acqua. L'analisi viene effettuata utilizzando un calorimetro C2000 Basic IKA. A livello operativo si possono distinguere una prima fase in cui vengono introdotti in cicli differenziati un campione di biodiesel (per la pulizia della bomba) ed una o più pastiglie di acido benzoico di potere calorifico noto (standard analitico). Nel caso in cui lo strumento fornisca un risultato diverso rispetto a quello atteso per la pastiglie di acido benzoico ($24460 \pm 100 \text{ J/g}$) si dovrà procedere alla ricalibrazione dello strumento utilizzando nuovamente una pastiglia di acido benzoico. Nella seconda fase il campione viene pesato (circa 0,7g), pressato al fine di ottenere una pasticca di materiale compatto, e posizionato all'interno del crogiuolo della bomba di Mahler. In seguito, viene preparato l'innesco rappresentato da un filo di cotone a potere calorifico noto (viene sottratto dallo strumento) legato ad un archetto di tungsteno (trasmette scarica elettrica), facendo ben attenzione che le estremità libere del filo siano all'interno del crogiuolo e ben a contatto con il campione. Una volta preparata la miccia, la bomba viene posta all'interno di un quantitativo di acqua noto alla temperatura di 18°C . Lo strumento è in grado per mezzo di un termometro di rilevare la variazione di temperatura (Temperatura Finale-Temperatura iniziale) generatasi a seguito del calore liberato durante il processo di combustione e trasmesso all'acqua circostante.

È bene evidenziare che la bomba calorimetrica è un contenitore chiuso con volume costante dove tutta l'acqua prodotta durante la combustione ricondensa cedendo la stessa quantità di calore sottratto per evaporare.

Nella realtà impiantistica la combustione avviene invece a pressione costante (atmosferica) e il vapore non può essere trattenuto con conseguente sottrazione di calore al processo.

Il risultato ottenuto (J/g di s.s.) rappresenta in realtà la misura dell'energia totale contenuta dal combustibile, dunque il valore del PCS.

dal PCS per sottrazione del calore latente di condensazione è possibile ricavare il PCI. Da quest'ultimo, tenendo in considerazione il contenuto di umidità della biomassa tal quale, è possibile risalire al PCN.

3.3.6 *Analisi del contenuto in carbonio, idrogeno, azoto e ossigeno*

La determinazione del contenuto di carbonio, idrogeno e azoto all'interno dei biocombustibili fornisce indicazioni sulla qualità energetica del materiale. Dai risultati ottenuti si possono trarre delle indicazioni utili circa l'attitudine di un biocombustibile alla combustione, ma ci consente di calcolare il PCI (a partire dal contenuto di idrogeno e ossigeno) e fare delle valutazioni in merito alle emissioni inquinanti (NOx).

L'analisi è stata svolta con un analizzatore elementare marca Leco caratterizzato dalla presenza di tre colonne.

Il campione (4,5-3,5 mg) viene bruciato all'interno della prima colonna definita di combustione (ossidazione) caratterizzata dalla presenza di ossigeno alla temperatura di 925°C, formando dei gas ossidati come CO₂, H₂O e NO_x. Questi composti vengono successivamente fatti passare all'interno di una seconda colonna (di riduzione) alla temperatura di 640°C, dove gli NO_x vengono ridotti a N₂, mentre gli altri componenti attraversano una terza colonna, dove è presente una fase stazionaria in grado di adsorbire le molecole al loro passaggio, le quali saranno poi rilasciate con tempi diversi, in modo che proseguano la loro corsa verso il detector a termo-conducibilità permettendone così la rilevazione quantitativa.



Figura 3-10 Analizzatore elementare

3.3.7 Analisi del contenuto in cloro e zolfo

La conoscenza del contenuto in Cl e S delle biomasse impiegate nella produzione di energia termica ci consente di valutare sia le emissioni inquinanti, sia prestazioni in impianto (si veda paragrafo 1.4).

La determinazione del contenuto di Cl e S prevede nella fase preliminare la bruciatura del campione nella bomba di Mahler, all'interno della quale si forma una soluzione che viene recuperata con una provetta. Anche l'acqua ultra-pura impiegata per il lavaggio della bomba deve essere introdotta all'interno della provetta, la quale viene poi portata a volume sempre mediante acqua ultra-pura. La soluzione è stata poi filtrata e analizzata grazie ad un cromatografo ionico dotato di auto-campionatore. I risultati ottenuti in mg/L sono stati trasformati in valore percentuale su sostanza secca.



Figura 3-11 Cromatografo ionico e autocampionatore

3.3.8 Determinazione della sostanza volatile

L'analisi del contenuto di sostanze volatili viene effettuata mediante un analizzatore termogravimetrico (LecoTGA 701) trattando il campione in muffola a 900°C in atmosfera di azoto, e consente di determinare la frazione del combustibile che brucia in forma gassosa.

Una volta pesato il campione precedentemente macinato (circa 1-1,2g), viene posto all'interno di un crogiuolo pulito per poi avviare l'analisi. A termine di questa il risultato è espresso in percentuale su sostanza secca.

Capitolo 4

RISULTATI E DISCUSSIONE

Questo lavoro di tesi si concentra sulla caratterizzazione chimico, fisica ed energetica delle biomasse al fine di valutarne l'impiego all'interno di impianti termici. A tal fine i risultati ottenuti nel caso del cippato e delle ramaglie sono stati confrontati con alcuni dei parametri richiesti dalla normativa EN ISO 17225-4, in modo da valutarne la conformità ed eventualmente esporre soluzioni tecnologiche volte a garantire il miglioramento della qualità del materiale, affinché potesse rientrare all'interno di una delle classi qualitative riportate dalla medesima.

Sono riportati anche i risultati delle analisi effettuate sui campioni di scarti del frumento senza effettuare un confronto con parametri standardizzati che non sono presenti in normativa.

Umidità

Dalla tabella 4.1 è possibile evidenziare la presenza di campioni che presentano valori di umidità molto diversi. In generale il cippato presenta i quantitativi di umidità più elevati con valori minimi del 46,36% fino a raggiungere il 60,70%, mentre per le ramaglie i valori oscillano tra il 36,51% e il 47,84%. Dati così elevati sono legati alla presenza di materiale verde (es. foglie) e allo stoccaggio del materiale all'aperto in assenza di un adeguata copertura.

Per quanto riguarda gli scarti del frumento duro si osservano campioni con i quantitativi di umidità minori che si attestano tra il 10,04% ed il 13,86%.

Tabella 4-1 Valori di umidità espressi in percentuale sul tal quale dei campioni analizzati

Campione	Umidità (% sul tal quale)
Cippato 1	49,92
Cippato 2	60,70
Cippato 3	57,05
Cippato 4	46,36
Cippato 5	55,08

Ramaglie 1	47,14
Ramaglie 2	47,84
Ramaglie 3	53,03
Ramaglie 4	36,51
Sfarinati	14,00
Sfarinati	13,86
Sfarinati	10,04

Il grafico 4-1 mostra come in generale i quantitativi di umidità dei campioni di biomassa legnosa (cippato e ramaglie) siano tutti al di sopra dei limiti massimi fissati dalla normativa UNI EN ISO 17225-4 sia per la classe A1 (25) che per la classe A2 (35)

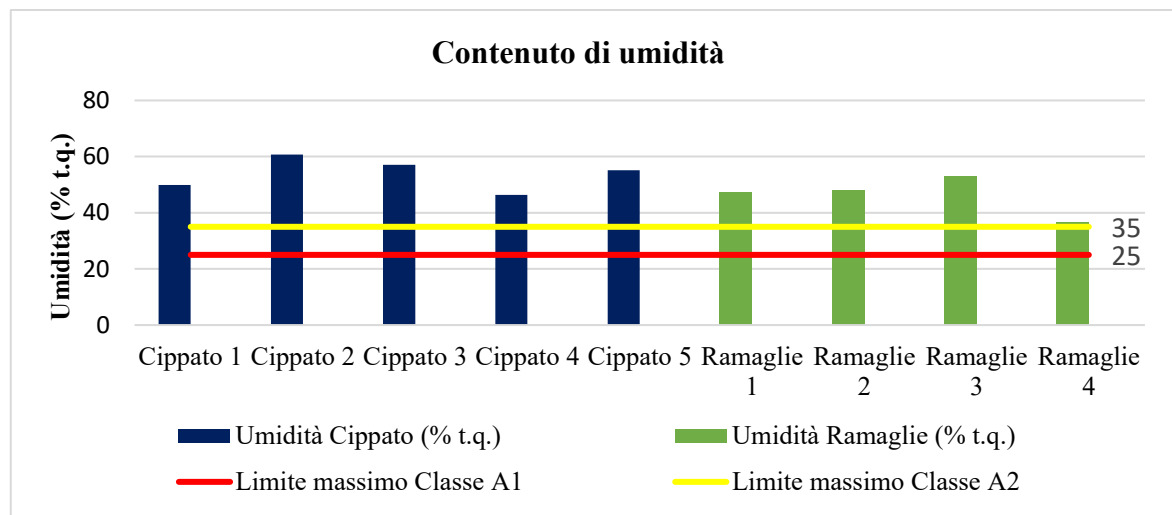


Figura 4-1 Confronto dei livelli di umidità dei campioni di cippato di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe A1 e A2

La riduzione del livello di umidità del materiale legnoso può essere ottenuta mediante uno stoccaggio del materiale da processare o già cippato, all'interno di depositi coperti evitandone l'esposizione alle intemperie. Tra le soluzioni disponibili sul mercato e più semplici da realizzare vi sono:

- Copertura di cumuli di cippato stoccato all'aperto mediante teli impermeabili all'acqua, ma permeabili al vapore acqueo;
- La costruzione di un semplice deposito di stoccaggio, o il recupero di strutture preesistenti (es. vecchi fienili) che dovranno comunque garantire una buona ventilazione passiva per garantire una corretta essiccazione.

In alternativa possono essere presi in considerazione sistemi più complessi in grado operare un'essiccazione forzata del materiale attraverso il riscaldamento dello stesso, come ad esempio essiccatori a container, essiccatori a nastro ed essiccatori a tamburo. È importante sottolineare che alcune aziende specializzate nel settore, sono in grado di offrire soluzioni tecnologiche che riuniscono in sistemi modulari l'operazione di essiccazione e vagliatura.

Ceneri

Nella tabella 4-2 è stato riportato il contenuto in cenere di ogni campione analizzato, espresso in percentuale su sostanza secca. Per quanto riguarda le biomasse legnose, il cippato presenta valori estremamente variabili compresi tra il 3,185% e l'8,920%, mentre le ramaglie sono caratterizzate da una minor variabilità con valori che oscillano tra il 3,640% ed il 5,3%.

Nel caso degli sfarinati si hanno valori tra il 2,780% ed il 6,215%.

Tabella 4-2 Contenuto in ceneri espresso in percentuale su sostanza secca dei campioni analizzati

Campione	Ceneri (% s.s)
Cippato 1	7,695
Cippato 2	7,535
Cippato 3	3,185
Cippato 4	8,980
Cippato 5	8,725
Ramaglie 1	4,945
Ramaglie 2	4,965
Ramaglie 3	5,310
Ramaglie 4	3,640
Sfarinati	5,735
Sfarinati	2,780
Sfarinati	6,215

Tabella 4-3 Valori percentuali di ceneri espressi in percentuale su sostanza secca di biomassa

Anche nel caso delle ceneri come evidenziato dal grafico 4-2 tutti i campioni superano i livelli fissati dalla normativa UNI EN ISO 17225-4 per tutte le tre classi qualitative, con valori medi del $7,224\% \pm 2,334\%$ nel caso del cippato, e di $4,725\% \pm 0,73\%$ nel caso delle ramaglie.

La presenza di quantitativi così elevati impatta negativamente sugli aspetti qualitativi del biocombustibile, che tuttavia possono essere legati al processamento della biomassa caratterizzata da elevati quantitativi di corteccia o di foglie, o fonti di inquinamento, come la terra, derivanti dalle operazioni di movimentazione e stoccaggio del materiale stesso.

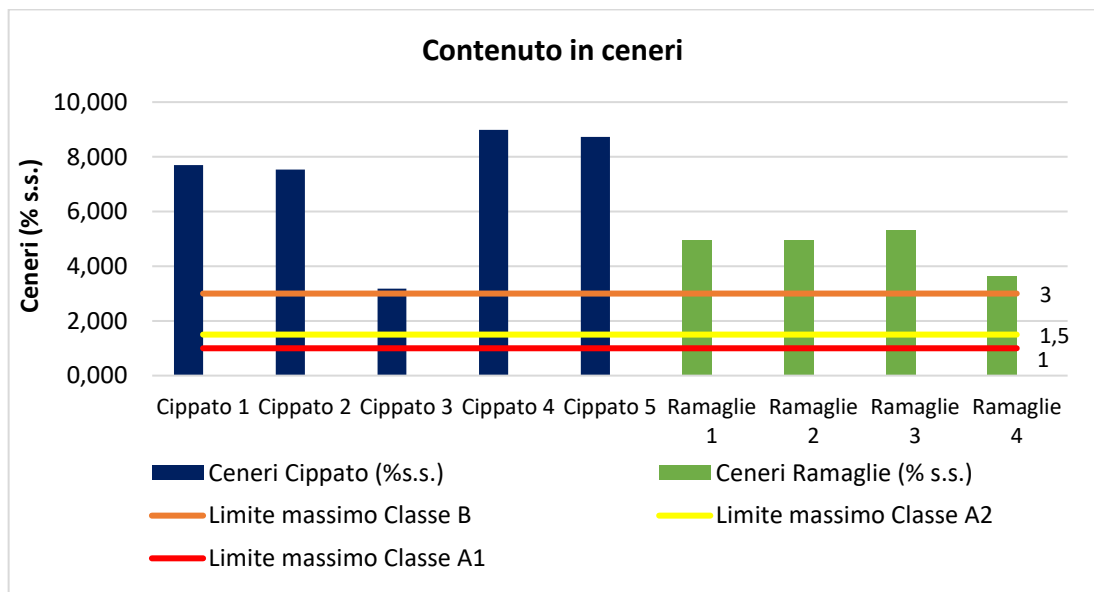


Figura 4-2 Confronto del contenuto in ceneri dei campioni di cippato e di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe A1 (1,0), A2 (1,5) e B (3,0)

È possibile ottenere una riduzione delle ceneri mediante l'applicazione di una vagliatura in modo da rimuovere la frazione granulometrica minore ed eventuali inquinanti come residui terrosi presenti (effetto positivo anche sulla granulometria).

Tra le soluzioni che possono essere impiegate vi sono:

- Vagli stellari;
- Vagli a tamburo;
- Vibrovaglio



Figura 4-3 Esempi di sistemi di vagliatura: vibrovaglio (sopra) e vaglio a tamburo cilindro (sotto)

Fusibilità delle ceneri

In tabella 4-4 sono stati riportati i valori di temperatura di deformazione (DT), temperatura emisferica (HT) e di fusione (FT) che permettono di descrivere il comportamento termico delle ceneri ad elevate temperature. La temperatura di contrazione non è stata riportata in quanto si tende a non considerare la fase di contrazione come una vera e propria fase del processo di fusibilità.

Nonostante la fusibilità delle ceneri non venga presa in considerazione dalla normativa UNI EN ISO 1722-4 per la definizione delle classi qualitative dei biocombustibili legnosi, è stato comunque valutato in quanto, come sottolineato nel paragrafo 1.4, è un parametro molto importante per eventuali danni economici sia diretti sia indiretti degli impianti termici coinvolti.

I campioni di ramaglie e di cippato non presentano criticità in termini di temperatura di fusione.

Nei campioni 1 e 2 degli sfarinati sono da evidenziare temperature di fusione di 863°C e di 728°C che possono essere facilmente raggiunte in normali sistemi di combustione, un loro eventuale impiego potrebbe dunque richiedere interventi di manutenzione frequenti per la rimozione delle incrostazioni.

Tabella 4-4 Temperature di deformazione, emisferica e di fusione

Campione	Def. (DT) °C	Hemis. (HT) °C	Flow (FT) °C
Cippato 1	1432	1434	1450
Cippato 2	1452	1454	1474
Cippato 3	1478	1478	1478
Cippato 4	1414	1418	1440
Cippato 5	1480	1480	1480
Ramaglie 1	1478	1478	1478
Ramaglie 2	1288	1332	1405
Ramaglie 3	1480	1480	1480
Ramaglie 4	1478	1478	1478
Sfarinati	755	862	863
Sfarinati	620	718	728
Sfarinati	1186	1251	1317

Cloro e Zolfo

Dalla tabella 4-4 è possibile notare come tutte le biomasse presentino livelli bassi sia per i quantitativi di zolfo che per quelli di cloro, che non ne compromettono l'eventuale impiego in impianti termici.

Tabella 4-5 Valori percentuali di Cloro (Cl) e Zolfo (S) espressi in percentuale su sostanza secca di biomassa

Campione	Cloro (% s.s.)	Zolfo (%s.s.)
Cippato 1	0,0085	0,0397
Cippato 2	0,0122	-0,0161
Cippato 3	0,0064	-0,0040
Cippato 4	0,0032	-0,0644
Cippato 5	0,0318	0,0024
Ramaglie 1	0,0857	0,0195
Ramaglie 2	0,2670	-0,0525
Ramaglie 3	0,0488	-0,0335
Ramaglie 4	0,1026	0,0374
Sfarinati	0,0615	0,0589
Sfarinati	0,0459	0,0515

Sfarinati	0,1159	0,0616
-----------	--------	--------

Nella figura 4-3 si evince come tutti i campioni analizzati sia nel caso del cippato che nel caso delle ramaglie mostrano contenuti in cloro considerevolmente minori rispetto al limite fissato per la classe qualitativa B (1%)

I valori medi dei campioni sono rispettivamente $0,01 \pm 0,011$ per il cippato, e di $0,13 \pm 0,097$ per i campioni di ramaglie, a dimostrazione che il materiale impiegato è esclusivamente legno vergine, non trattato, e che lo stoccaggio in piazzale non comporta inquinamento esterno tale da compromettere la qualità del materiale.

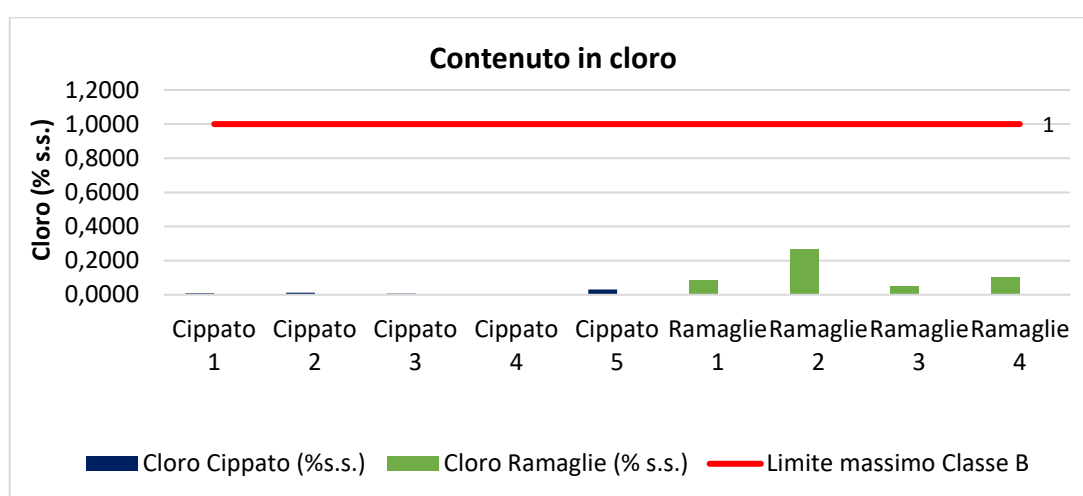


Figura 4-4 Confronto del contenuto in Cloro (Cl) dei campioni di cippato e di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe B (1,0)

Anche nel caso del contenuto in zolfo dei campioni di cippato e ramaglie non si evidenziano criticità tali da comprometterne l'impiego o da richiedere eventuali pretrattamenti.

Azoto

L'azoto è un elemento presente in tutti i materiali seppur in quantitativi diversi; in dettaglio nella totalità campioni di cippato di ramaglie analizzati il quantitativo di azoto di è dimostrato sensibilmente inferiore a quello degli sfarinati che hanno riportato valori compresi tra il 2,807% ed il 3,022% giustificabili dalla presenza di proteine che caratterizza la cariosside di frumento duro.

Tabella 4-6 Valori di azoto espressi in percentuale su sostanza secca di biomassa

Campione	Azoto (% s.s.)
Cippato 1	1,261
Cippato 2	1,106
Cippato 3	0,665
Cippato 4	0,906
Cippato 5	0,876
Ramaglie 1	1,135
Ramaglie 2	1,234
Ramaglie 3	1,068
Ramaglie 4	0,712
Sfarinati	2,896
Sfarinati	3,022
Sfarinati	2,807

Per quanto riguarda i campioni di cippato il contenuto medio di azoto è pari a $0,96 \pm 0,229$, molto vicino al limite massimo fissato per la classe qualitativa B (1%); in maniera più dettagliata si può affermare che solo tre dei cinque campioni analizzati presentano valori al di sotto di quella soglia. Nel caso delle ramaglie il valore medio è leggermente più elevato pari a $1,00\% \pm 0,210$ con solo un campione dei quattro analizzati che rientrerebbe nel limite prefissato dalla normativa.

In generale i quantitativi di azoto riscontrati nei campioni di ramaglie sono imputabili alla presenza di materiale piuttosto giovane con ridotti livelli di lignificazione.

Per quanto riguarda la diminuzione del quantitativo di azoto al di sotto della soglia fissata a livello normativo sarebbe opportuno non processare materiale eccessivamente verde e far attenzione ad un eventuale inquinamento durante le fasi di movimentazione del materiale legnoso.

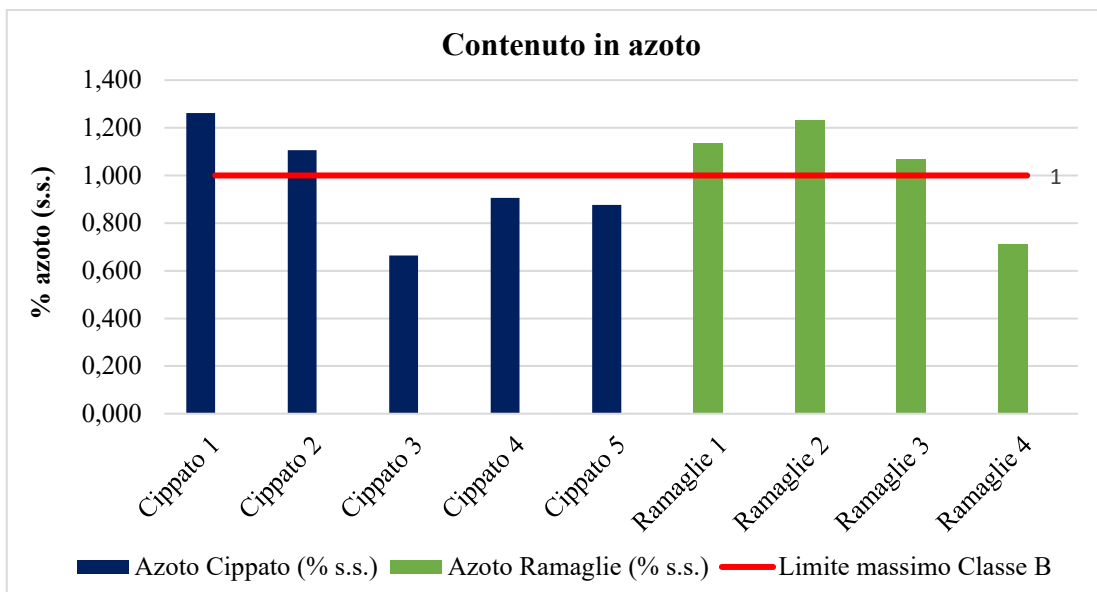


Figura 4-5 Confronto del contenuto in azoto dei campioni di cippato e di ramaglie con i valori massimi fissati per la Classe B (1,0)

Carbonio, Idrogeno e Ossigeno

Di seguito sono riportati i valori di Carbonio (C), Idrogeno (H) ed Ossigeno (O) che possono fornire informazioni utili nella previsione del contenuto energetico della biomassa oltre che valutare i quantitativi di acqua producibile nel processo di combustione.

Per il cippato la composizione media dei campioni è del 47,27% \pm 1,299% di C, il 6% \pm 0,321 di H, il 39% \pm 1,028% di O, per le ramaglie il 50,89% \pm 0,820% di C, il 6% \pm 0,330% di H ed il 37% \pm 0,653% di O. Per quanto riguarda gli sfarinati i valori medi sono 44,81% \pm 1,806% di C, il 7% \pm 0,255% di H ed infine il 41% \pm 3,695% di O.

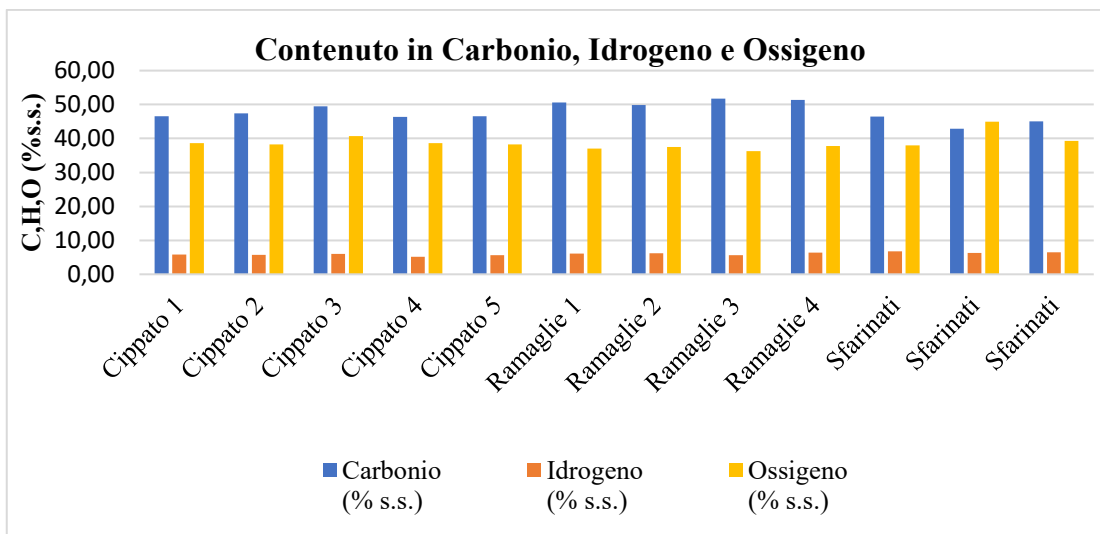


Figura 4-6 *Contenuto in Carbonio (C), Idrogeno (H) ed Ossigeno (O)*

Potere calorifico superiore, Potere calorifico inferiore e Potere calorifico netto

Nella figura 4-6 sono visibili i valori di potere calorifico superiore (PCS) e potere calorifico inferiore (PCI) espressi in Joule su grammo di sostanza secca.

I valori medi di PCS calcolati per i campioni sono: 18334 J/g \pm 905,958 J/g per i campioni di cippato, di 20374 J/g \pm 451,935 J/g per le ramaglie e di 18898 J/g \pm 581,093 J/g per gli sfarinati.

Per quanto riguarda i valori medi di PCI sono: 17104 J/g \pm 853,334 J/g per il cippato, 19057 J/g \pm 507,136 J/g per le ramaglie e di 17479 J/g \pm 545,302 J/g per gli sfarinati.

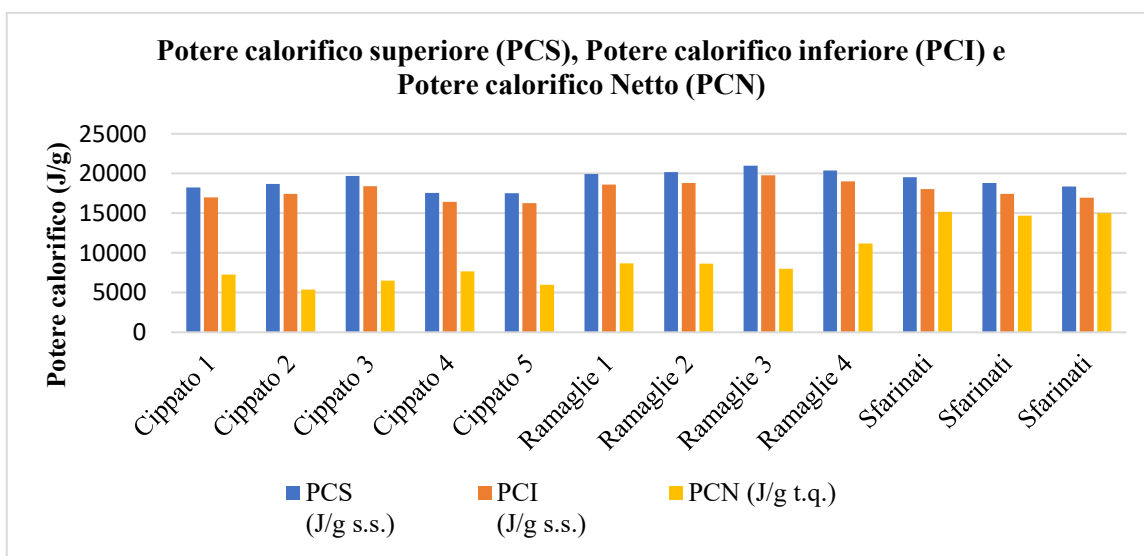


Figura 4-7 *Potere calorifico superiore e Potere calorifico inferiore*

Dal grafico 4-7 è si evidenzia una diminuzione pressoché costante dei valori passando dal PCS al PCI imputabile all' esclusione del contributo energetico derivante dall'acqua di evaporazione.

In merito ai valori di PCN si osservano nel caso del cippato e delle ramaglie dati sensibilmente inferiori rispetto a quelli del PCI a causa del quantitativo di umidità elevato, mentre per i campioni di sfarinati non sono presenti variazioni così marcate a causa dei ridotti contenuti di umidità che li caratterizzano.

Granulometria

La granulometria è stata espressa in termini di classi percentuali in peso caratterizzati da una determinata dimensione. Operativamente, l'analisi è stata effettuata solo per un campione di cippato, ipotizzando che la granulometria degli altri campioni fosse paragonabile a quanto misurato, avvalendosi l'azienda sempre della stessa cippatrice per il processamento del materiale.

Per le ramaglie e per gli scarti del frumento duro non è stata effettuata la determinazione della granulometria a causa delle dimensioni eccessivamente elevate nel caso delle ramaglie e di quelle eccessivamente ridotte per gli sfarinati.

I risultati ottenuti sono stati riportati nella tabella 4-6.

Tabella 4-7 Distribuzione percentuale delle classi dimensionali del campione di cippato analizzato

Classe dimensionale particelle (mm)	% materiale
>100	0,00
63-100	0,00
45-63	0,05
31,5-45	0,97
16-31,5	5,66
8-16	18,98
3,15-8	49,04
<3,15	23,16

Dal confronto con i valori presenti nella normativa UNI EN ISO 17225-4 che ci consentono di distinguere tre classi dimensionali di cippato (P16S, P31S, P45S), è possibile affermare che il campione analizzato non possa essere classificato in nessuna delle tre classi.

In dettaglio la classe dimensionale inferiore ai 3,15mm nel campione rappresenta una quota del 23% ampiamente al di sopra del 15% fissato come limite per la classe P16S e al 10% fissato per le restanti due.

A livello operativo per ridurre la quota di materiale caratterizzata di dimensioni inferiori ai 3,15mm potrebbe essere utile eseguire una vagliatura (eseguibile anche per la riduzione del contenuto in ceneri) o in alternativa eseguire una più accurata regolazione del processo di cippatura (es. riduzione della velocità di rotazione degli elementi di taglio).

Capitolo 5

DIMENSIONAMENTO

Sulla base dei materiali disponibili e delle caratteristiche energetiche derivanti dalle analisi effettuate è stata proposta una stima del numero dei sistemi di combustione alimentabili con la biomassa residuale oggetto della tesi.

In dettaglio sono stati presi in considerazione solo le biomasse provenienti dal settore della manutenzione del verde per le quali era disponibile un quantitativo complessivo di produzione, calcolato dai quantitativi medi giornalieri e le giornate lavorative annuali.

Per gli scarti della lavorazione del grano non è stato possibile determinare la disponibilità assoluta di materiale e, quindi, non sono stati considerati per il dimensionamento. Per questi ultimi va comunque specificato che date le caratteristiche chimiche (contenuto di azoto) e la possibile valorizzazione come alimento zootecnico il loro inserimento in sistemi di conversione termochimica potrebbe non essere completamente giustificabile.

Il caso studio di dimensionamento deve necessariamente partire da alcuni presupposti e, nel caso specifico, è stata presa in considerazione un'abitazione (ipotetica) caratterizzata da nove locali e della superficie complessiva di 143,27 m² localizzata nella fascia collinare della provincia di Fermo in zona climatica D (zona limitrofa a quella di produzione delle suddette biomasse).

I parametri presi in considerazione per l'area del progetto sono:

- 12 ore giornaliere di funzionamento massimo dell'impianto (ore massime ammesse di funzionamento delle caldaie in zona D);
- 1,67 W/m²K come coefficiente di trasmittanza termica (valore tabellare riferibile ad abitazioni di costruzione recente ma non perfettamente schermate);
- Periodo di funzionamento di 167 giorni annui (periodo compreso tra il primo novembre e il primo aprile di ogni anno);
- Temperatura interna invernale per gli edifici a destinazione residenziale di 19°C (292,15K) e temperatura esterna invernale di 3°C (276,15K) tipica della zona basso collinare fermana.

Di seguito si riportano, nel dettaglio, le caratteristiche dimensionali dell'abitazione considerata

Tabella 5-1 Caratteristiche costruttive abitazione oggetto del caso studio

Locale	Larghezza (m)	Lunghezza (m)	Superficie locale (m ²)	Altezza (m)
Soggiorno	8,09	4,27	34,54	2,73
Cucina	4,99	4,27	21,31	2,73
Bagno 1	3,07	1,86	5,71	2,73
Bagno 2	3,14	2	6,28	2,73
Camera 1	6,58	3,1	20,40	2,73
Camera 2	5,13	4,14	21,24	2,73
Camera 3	5,13	4,13	21,19	2,73
Disimpegno	6,2	1	6,20	2,73
Locale termico	3,14	2,04	6,41	2,73

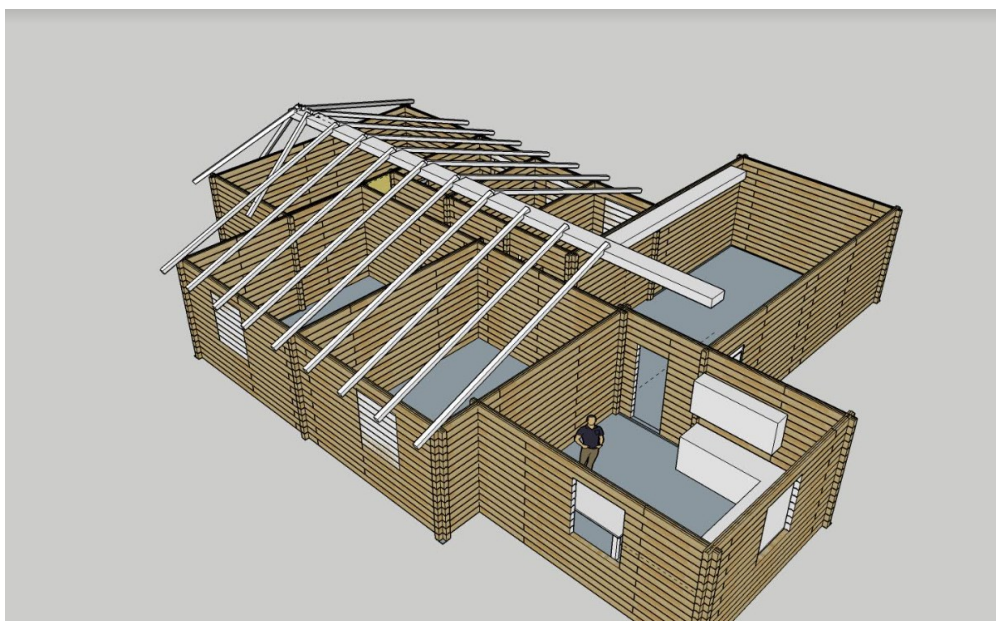


Figura 5-1 Modello 3D abitazione oggetto caso studio

Determinazione del quantitativo energetico disponibile

L'energia ricavabile dall'impiego delle biomasse di gestione del verde è stata determinata a partire dal potere calorifico netto medio dei campioni analizzati suddivisi in cippato e ramaglie e dai quantitativi stimati sulla base delle informazioni raccolte presso l'azienda.

Tenendo conto di una media giornaliera di 2 tonnellate di materiale processato di cui un terzo viene cippato e i restanti due terzi lasciati come ramaglie tal quali, e di un'attività annuale di circa 200 giorni, il quantitativo disponibile annualmente ammonta a 400 tonnellate.

Il potere calorifico netto medio dei campioni di cippato è di 6562 kJ/kg t.q. mentre per le ramaglie è di 9127 kJ/kg t.q.

L'energia media espressa in kWh ottenibile è stata calcolata secondo l'equazione:

$$\frac{\text{Potere Calorifico Netto Medio} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \text{ t. q.} \right) * \text{Massa disponibile (kg)}}{3600}$$

Nel complesso l'energia ottenuta è pari a circa 920 MWh

Considerando il rendimento di un dispositivo di combustione dell'80% i quantitativi disponibili si riducono a 736 MWh.

Determinazione della potenza minima richiesta per compensare le perdite di calore

Ai fini del dimensionamento è stata calcolata la potenza minima necessaria a compensare le perdite di calore che si realizzano sulle superfici esposte dell'abitazione, a seguito della presenza di un gradiente di temperatura che si crea tra l'ambiente esterno (3°C) ed interno (19°C) e sulla base di un coefficiente di trasmittanza specifico di 1,67 W/m²K.

Nel calcolo non sono considerati tutti i locali dell'edificio che non confinano con l'esterno, in quanto il trasferimento tra locali posti ad una medesima temperatura è neutro.

I risultati ottenuti sono presenti in tabella 5-2.

Tabella 5-2 Superficie esposta e Potenza minima richiesta per soddisfare le perdite di calore

Locale	Superficie Esposta (m²)	Potenza (W)
Soggiorno	44,39	1186,10
Cucina	33,20	887,02
Bagno1	5,08	135,68
Bagno2	5,46	145,89
Camera1	34,83	930,79
Camera2	18,89	504,78
Camera3	13,70	366,19
Disimpegno	0,00	0,00

Locale tecnico	5,54	148,08
Totale		4304,52

La potenza del dispositivo da installare al fine di compensare le perdite di calore è di circa 4,3kW.

Determinazione del numero di abitazioni riscaldabili

Il numero delle abitazioni oggetto del caso studio riscaldabili installando un dispositivo a combustione della potenza di circa 4kW con un'efficienza dell'80%, nella zona climatica D, considerando 12 ore giornaliere di funzionamento per un periodo di 167 giorni annui è stato calcolato mediante la seguente equazione:

$$n^{\circ} \text{ abitazioni} = \frac{\text{Ore di funzionamento totali (h)}}{\text{Ore funzionamento giornalire(h)} * \text{Periodo di funzionamento(g)}}$$

Dove le ore di funzionamento totali derivano:

$$\text{Ore funzionamento totali} = \frac{\text{Quantitativo energetico disponibile (kWh)}}{\text{Carico termico complessivo (kW)}}$$

In totale le abitazioni riscaldabili determinate sono 85.

Si deve però considerare che sul mercato non sono presenti dispositivi di così bassa potenza e che in generale vengono installati dispositivi di potenza compresa tra i 20kW ed i 30kW in modo da soddisfare la richiesta di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria.

Alla luce di queste considerazioni l'energia termica ottenibile dalla combustione dal materiale proveniente dal settore della manutenzione del verde sarebbe potenzialmente in grado di soddisfare in relazione alla potenza del dispositivo installato le esigenze di 12-18 unità abitative di 140m² in zona climatica D.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Dai risultati ottenuti dalla caratterizzazione delle biomasse analizzate è emerso che i materiali ligno-cellulosici derivanti dalle attività di gestione del verde (cippato e ramaglie) presentano caratteristiche non conformi a quanto riportato dalla normativa UNI EN ISO 17225-4 e non è dunque possibile definirli all'interno di una classe qualitativa precisa.

Il materiale presenta criticità relative principalmente in termini di contenuto di umidità, di ceneri e granulometria.

La prima criticità può essere superata grazie alla realizzazione di una copertura, che garantirebbe sia una corretta aereazione del materiale, sia una protezione dalle avversità climatiche, inoltre anche l'esclusione dal processo di valorizzazione di alcune biomasse eccessivamente umide potrebbe dar luogo ad un miglioramento della qualità del materiale.

L'adozione di un sistema di vagliatura può assolvere una duplice azione positiva legata sia all'allontanamento della frazione fine che di eventuali residui terrosi, con un effetto benefico in termini di contenuto in ceneri e di granulometria.

Una più adeguata regolazione degli organi di taglio della macchina impiegata per la produzione di cippato e della velocità di rotazione degli stessi può migliorare l'uniformità in termini dimensionali del prodotto finale.

Gli sfarinati provenienti dalla molitura del frumento duro sono caratterizzati da un basso livello di umidità ma allo stesso tempo si registrano valori elevati sia per il quantitativo in ceneri che per il contenuto in azoto.

Dall'impiego del materiale residuale proveniente dal settore di manutenzione del verde, in sistemi di valorizzazione termica della potenza compresa tra i 20kW ed i 30kW, si potrebbe ottenere un'energia (al netto dell'efficienza del dispositivo stesso) in grado di soddisfare mediamente le esigenze di 15 unità abitative di 140m² in zona climatica D.

Se si considerano dispositivi di potenza inferiore invece il numero di abitazioni che può essere soddisfatto risulta essere notevolmente superiore.

Volendo estendere le valutazioni ad altri sistemi di conversione termochimica, di grande interesse attuale, come i gassificatori o pirolizzatori si deve approcciare il dimensionamento

in maniera differente. In merito ai sistemi di gassificazione il dimensionamento non può essere effettuato prendendo in considerazione il potere calorifico netto, contrariamente a quanto fatto per i sistemi a combustione. Si deve infatti tener conto della composizione chimica del syngas prodotto dallo specifico sistema gasificazione, influenzato dalla sostanza volatile della biomassa impiegata e delle perdite energetiche derivanti dalla trasformazione del calore sprigionato in energia elettrica.

Come ultima considerazione è doveroso specificare che i dati ottenuti sono riferiti ad una singola azienda di medie dimensioni, mentre se si considerassero più aziende anche a livello regionale i numeri sarebbero sicuramente più elevati con indubbi vantaggi legati ad un minor utilizzo delle fonti fossili per la generazione di energia termica.

Dall'altro lato la valorizzazione termica si pone come opportunità per poter reimpiegare materiali che attualmente trovano un interesse piuttosto limitato sia per limiti tecnico qualitativi delle biomasse che normativi.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo elaborato vorrei ringraziare tutti coloro che hanno contribuito e che mi hanno sostenuto durante l'intero percorso accademico che ho avuto la fortuna di poter affrontare.

Vorrei ringraziare innanzitutto il Prof. Alessio Ilari per avermi guidato con estrema disponibilità, cordialità ed attenzione durante tutte le fasi di realizzazione di questa tesi.

Un sentito ringraziamento va anche alla Prof. Ester Foppa Pedretti che mi ha permesso di prender parte all'interno di questo lavoro, e che non ha mai mancato di offrirmi il suo supporto e consiglio.

Grazie anche ai ricercatori del Laboratorio Biomasse e dell'area di ingegneria agraria che si sono sempre dimostrati disponibili a chiarire ogni dubbio.

Ringraziamento speciale va anche a Lorenzo e Marco Mecozzi dell'azienda TemaVerde di Lapedona (FM) che hanno collaborato nella realizzazione di questo studio con passione, professionalità e disponibilità.

Grazie alla mia famiglia ed in primis ai miei genitori Gessica e Roberto che mi hanno dato la possibilità di inseguire i miei sogni, di proseguire gli studi assecondando le mie scelte, e che mi hanno supportato (aggiungo sopportato) anche nei momenti più difficili di questo percorso. Vorrei ringraziare anche i miei nonni Adele, Rita, Sergio, i miei zii e cugini che mi hanno aiutato a raggiungere questo traguardo.

Un grazie va anche a mio nonno Giuseppe (Peppe) che insieme alla mia famiglia mi ha trasmesso la passione per l'agricoltura, e che spero (e ne sono sicuro) possa essere orgoglioso di suo nipote nonostante tu non sia più qui accanto a me.

Grazie anche alla mia fidanzata Syria che mi ha accompagnato, incoraggiato, supportato (e sopportato) costantemente anche al di fuori del percorso universitario.

Vorrei esprimere anche un sincero ringraziamento a tutti gli amici ed i colleghi del corso di studi con i quali ho condiviso non solo un percorso formativo, ma anche passioni e soprattutto esperienze che ci hanno legato al di fuori dell'aula.

BIBLIOGRAFIA

- 93.0 TWh SOLID BIOFUELS BAROMETER 2022. (n.d.).
- Anwar, Z., Gulfraz, M., & Irshad, M. (2014). Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 7(2). <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>
- Briones-Hidrovo, A., Copa, J., Tarelho, L. A. C., Gonçalves, C., Pacheco da Costa, T., & Dias, A. C. (2021). Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion. *Journal of Cleaner Production*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125680>
- Buttol, P., Cortesi, S., & Colonna, N. (2019). *Valorizzare le biorisorse nelle filiere agroalimentari. 2019*, 118–121. <https://doi.org/10.12910/EAI2019-051>
- Castelli Silvana. (2010). *Biomasse ed energia*. Maggioli Editore.
- Cepeda, J. T. (2020). Influence of Moisture, Temperature and Microbial Activity in Biomass Sustainable Storage. Special Focus on Olive Biomasses. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 25(3). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2020.25.556165>
- Collard, F. X., & Blin, J. (2014). A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 38). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.013>
- Deboni, T. L., Simioni, F. J., Brand, M. A., & Lopes, G. P. (2019). Evolution of the quality of forest biomass for energy generation in a cogeneration plant. *Renewable Energy*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.039>
- Fournel, S., Palacios, J. H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M., & Savoie, P. (2015). Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.022>
- Hoang, A. T., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Chong, C. T., Cheng, C. K., Sakthivel, R., & Ok, Y. S. (2021). Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production

- toward environmental sustainability. In *Fuel Processing Technology* (Vol. 223). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106997>
- Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. In *Journal of Energy Chemistry* (Vol. 39). <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- Jafri, N., Wong, W. Y., Doshi, V., Yoon, L. W., & Cheah, K. H. (2018). A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells. In *Process Safety and Environmental Protection* (Vol. 118, pp. 152–166). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.036>
- Jena, S., & Singh, R. (2022). Agricultural crop waste materials – A potential reservoir of molecules. *Environmental Research*, 206. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112284>
- Liu, K., Pan, W. P., & Riley, J. T. (2000). Study of chlorine behavior in a simulated fluidized bed combustion system. *Fuel*, 79(9). [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00247-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00247-1)
- Mishra, S., & Upadhyay, R. K. (2021). Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters. *Materials Science for Energy Technologies*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.08.009>
- Montola, V., Colonna, N., Alfano, V., Gaeta, M., Sasso, S., De Luca, V., De Angelis, C., Soda, A., & Braccio, G. (2009). Censimento potenziale energetico biomasse, metodo indagine, atlante Biomasse su WEB-GIS. *Ricerca Sistema Elettrico, RSE/2009/1*.
- Nartea, A., Fanesi, B., Pacetti, D., Lenti, L., Fiorini, D., Lucci, P., Frega, N. G., & Falcone, P. M. (2023). Cauliflower by-products as functional ingredient in bakery foods: Fortification of pizza with glucosinolates, carotenoids and phytosterols. *Current Research in Food Science*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100437>
- Nugraha, M. G., Mozasurya, E. D., Hidayat, M., & Saptoadi, H. (2023). Evaluation of combustion characteristics in biomass residues open burning. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.098>
- Nunes, L. J. R., Godina, R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2019). Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers. *Journal of Cleaner Production*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.165>
- Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. *Biomass and Bioenergy*, 30(11). <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>

- Owusu, P. A., & Asumadu-sarkodie, S. (2016). CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING | REVIEW ARTICLE A review of renewable energy sources , sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, 15(1).
- Progetto MiPAAF Bando Settore Bioenergetico DM 246/07 Convegno I SOTTOPRODOTTI AGROFORESTALI E INDUSTRIALI A BASE RINNOVABILE. (2013). www.extravalore.it
- RAPPORTO STATISTICO 2021 ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI IN ITALIA. (n.d).
- Singh, T. B., Ali, A., Prasad, M., Yadav, A., Shrivastav, P., Goyal, D., & Dantu, P. K. (2020). Role of organic fertilizers in improving soil fertility. In *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41552-5_3
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89(5), 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>