



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E
AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN: SCIENZE
FORESTALI DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO

EMISSIONI DI POLVERI DA IMPIANTI
TERMICI A BIOMASSE SOLIDE

PARTICULATE MATTER EMISSIONS
FROM SOLID BIOMASS THERMAL
PLANTS

TIPO TESI: Compilativa

Studente:
Michele Giardini

Relatore:
PROF. GIUSEPPE TOSCANO

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

*Un ringraziamento speciale va a tutte le persone che mi hanno supportato in questo
difficile percorso di Laurea dalla mia famiglia alla mia cara nonna
agli amici più cari e dal mio caro zio che mi sostiene e mi conforta dall'alto*

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE.....	6
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE.....	7
CAPITOLO 2: COMBUSTIONE DELLE BIOMASSE SOLIDE.....	9
2.1. Biomasse: aspetti generali.....	9
2.2. La combustione delle biomasse solide.....	10
2.3. Il processo della combustione.....	11
2.3.1. I requisiti del processo della combustione.....	12
2.4. Aspetti ambientali della combustione delle biomasse.....	13
2.4.1. Emissioni da combustione completa.....	13
2.4.2. Emissioni da combustione incompleta.....	16
2.4.3. Interazione degli inquinanti con la salute umana.....	18
CAPITOLO 3: BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI & IMPIANTI TERMICI DOMESTICI.....	20
3.1. Introduzione.....	20
3.2. Biocombustibili solidi.....	21
3.2.1. Le tipologie di biocombustibile.....	21
3.2.2. La normativa tecnica (UNI EN ISO 17225).....	23
3.2.3. Le filiere di produzione.....	25
3.2.3.1. La produzione della legna da ardere.....	26
3.2.3.2. La produzione del cippato.....	28
3.2.3.3. La produzione dei densificati: pellet e bricchette.....	31
3.3. Impianti termici domestici.....	37
3.3.1. Aspetti generali.....	37
3.3.2. Camini e termocamini.....	39
3.3.3. Stufe.....	42
3.3.4. Caldaie domestiche.....	46
3.3.5. Sistemi di abbattimento degli impianti termici domestici.....	49
CAPITOLO 4: MATERIALI & METODI.....	52
4.1. Fonti bibliografiche per i fattori di emissione.....	52
4.2. Analisi dati fattori di emissione.....	53
4.3. Dati di consumo di biocombustibili in Italia.....	54
4.4. Calcolo delle emissioni prodotte dai diversi sistemi combustibile-impianto.....	54

CAPITOLO 5: RISULTATI.....	56
5.1. Introduzione.....	56
5.2. Fattori di emissione dei PM.....	56
5.3. Consumo dei biocombustibili in Italia.....	57
5.4. Emissione prodotte dai sistemi combustibile-impianto.....	59
CAPITOLO 6: CONSIDERAZIONI.....	61
6.1. Valore di emissione dei PM per i diversi impianti termici domestici e combustibili legnosi.....	61
6.2. Numero di impianti in Italia.....	62
6.3. Consumo dei biocombustibili legnosi in Italia.....	63
6.4. Consumo nei sistemi biocombustibile-impianto.....	64
6.5. Valore PM totale nei sistemi biocombustibile-impianto.....	65
6.6. Possibili soluzioni.....	66
CAPITOLO 7: CONCLUSIONI.....	69
CAPITOLO 8: BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA.....	70

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Interazione dei principali composti della combustione sulla salute umana.....	18
Tabella 3-1: Quadro generale delle norme tecniche UNI EN ISO 17225 sui biocombustibili solidi.....	25
Tabella 3-2: Costo al quintale e al metro stero del cippato umido e secco sul mercato nazionale.....	31
Tabella 4-1: Elenco delle fonti prese in letteratura per i valori di emissione dei PM.....	53
Tabella 5-1: Sintesi dei valori min – medi – max dei vari PM per tutte le categorie biocombustibile-impianto.....	56
Tabella 5-2: Numero complessivo impianti per la combustione domestica stimato dall' Indagine campionaria nel nostro Paese (AIEL, 2018).....	57
Tabella 5-3: Consumi in tonnellate di legna da ardere, pellet, cippato nel nostro Paese (AIEL, 2018).....	58
Tabella 5-4: Dati sui consumi dei biocombustibili rapportati sul totale del numero degli Impianti.....	58
Tabella 5-5: Dati presunti di potere calorifico netto (PCN) dei diversi biocombustibili.....	59
Tabella 5-6: Incidenza del PM totale sulle varie categorie biocombustibile-impianto.....	59

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2-1: Schema di sintesi del processo di combustione della biomassa solida.....	11
Figura 2-2: Reazione generale di combustione.....	12
Figura 3-1: Pellet.....	23
Figura 3-2: Bricchette.....	23
Figura 3-3: Schema di cippatrice a disco.....	30
Figura 3-4: Schema di cippatrice a vite senza fine.....	30
Figura 3-5: Schema dell'impianto di produzione del pellet.....	34
Figura 3-6: Schema generale del generatore di calore.....	37
Figura 3-7: Esempi di pannelli radianti con tubazione a spirale a sinistra e a serpentina a destra.....	39
Figura 3-8: Camino aperto.....	40
Figura 3-9: Camino chiuso.....	40
Figura 3-10: Stufa a legna.....	43
Figura 3-11: Schema di funzionamento di una stufa a pellet.....	45
Figura 3-12: Schema di funzionamento della caldaia tradizionale a sinistra e della caldaia a condensazione a destra.....	47
Figura 3-13: Schema di funzionamento della caldaia a pellet.....	48
Figura 3-14: Ciclone a sinistra e multiciclone a destra.....	50
Figura 3-15: Filtri a maniche.....	51
Figura 6-1: Numero di impianti termici domestici a combustibile legnoso presenti in Italia.....	62
Figura 6-2: Consumi biocombustibili-impianti in Italia in Mt.....	64
Figura 6-3: Percentuale di emissione del PM totale per i sistemi impianto-biocombustibile.....	65
Figura 6-4: Scenario 1 di diversa ripartizione del PM totale tra i vari impianti e biocombustibili (evidenziati in rosso i valori cambiati).....	66
Figura 6-5: Scenario 2 di diversa ripartizione del PM totale tra i vari impianti e biocombustibili (evidenziati in rosso i valori cambiati).....	67

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni si è sviluppato un interesse sempre maggiore riguardo l'utilizzo delle biomasse, in particolare le cosiddette biomasse legnose, dovuto dal fatto che, se utilizzate in modo sostenibile in tutte le fasi – dalla raccolta alla conversione energetica – rappresentano una fonte importante di energia rinnovabile.

Rispetto all'utilizzo dei combustibili fossili, la combustione delle biomasse, in appositi impianti termici, può consentire la produzione di energia termica e, nei grandi impianti, anche la forma elettrica contribuendo alla riduzione delle emissioni CO₂, considerato il gas maggiormente responsabile dell'effetto serra globale. D'altro canto però, la combustione delle biomasse legnose non è esente da inquinanti, emissioni in atmosfera quali NO_x, CO e soprattutto materiale particolato (PM) particolarmente noto anche ai non addetti ai lavori e spesso considerato dagli organi di comunicazione in relazione alle situazioni ambientali.

In proposito, la maggior urgenza sotto il profilo ambientale ed energetico che il nostro Paese deve affrontare riguarda proprio la qualità dell'aria, in particolare nei contesti urbani e nella Pianura Padana, considerata una delle regioni più inquinanti in Europa a causa della sua alta densità, sia di popolazione che di attività economiche.

Per questo motivo, negli ultimi anni, nell'area del Bacino Padano gli amministratori pubblici sono intervenuti con emanazioni di Regolamenti e delibere come fine ultimo riguardante il contenimento delle polveri emesse e del miglioramento della qualità dell'aria.

A titolo di esempio, si riporta che la giunta regionale Regione Piemonte ha imposto, come sottoscritto nell' "Accordo di Programma per l'adozione coordinata e congiunta di misure di risanamento della qualità dell'aria nel Bacino Padano", delle limitazioni all'uso ed all'installazione dei generatori di calore a biomassa legnosa, con potenza nominale inferiore a 35 kWh.

Inoltre, nella presente delibera sono presenti anche divieti riguardanti il pellet che deve essere realizzato con materiale vegetale prodotto dalla lavorazione meccanica del legno vergine e costituito da cortecce, segatura, trucioli, chips e tondelli di legno vergine, non contaminati da inquinanti e che siano certificati come conformi alla classe A1 della norma UNI EN ISO 17225-2 da parte di un Organismo di certificazione accreditato.

Per quanto riguarda gli impianti domestici, la deliberazione della Giunta impone il divieto di utilizzo di generatori di calore domestici alimentati a biomassa legnosa aventi prestazioni energetiche ed emissive che non sono in grado di rispettare i valori previsti almeno per la classe 3 stelle. In zone con tasso di inquinamento maggiore, il limite di utilizzo degli impianti termici si fa più stringente con

utilizzo di generatori di calore aventi prestazioni energetiche ed emissive in grado di rispettare valori previsti per la classe 4 stelle.

Negli ultimi anni le statistiche nazionali dell'ISPRA evidenziano che il settore che contribuisce maggiormente al peggioramento della qualità dell'aria in Italia è quello del riscaldamento domestico dove, nonostante i miglioramenti delle prestazioni dei dispositivi, si assiste ad un incremento delle emissioni nocive causate anche dall'uso non corretto delle biomasse legnose in primis legno, pellet e cippato.

Ovviamente anche i diversi impianti termici domestici presenti nel nostro Paese contribuiscono alla maggiore diffusione di polveri sottili nell'aria ma è necessario fare delle distinzioni e chiarimenti su questo tema, troppo spesso raccontato in forma approssimativa. Infatti, oramai è ben noto – attraverso vari studi tecnici e scientifici sulle emissioni – che sono perlopiù impianti obsoleti e di vecchia generazione come i camini aperti e le stufe generiche a legna a provocare la maggior parte dell'inquinamento atmosferico con valori di emissione più elevate in confronto a sistemi più moderni ed efficienti quali possono essere stufe o caldaie a pellet e caldaie a cippato.

Data questa premessa, l'obiettivo della tesi è perciò – attraverso l'analisi di alcuni dati presenti in letteratura scientifica e tecnica su fattori di emissione degli impianti termici a biomasse legnose e sui consumi di questi prodotti energetici – di mettere in evidenza il peso dei diversi sistemi di riscaldamento domestico nella produzione di polveri sottili emessi in atmosfera. Sulla base di questa prima analisi segue una breve discussione per tracciare delle possibili soluzioni capaci di dare risposta nel breve periodo.

Capitolo 2

COMBUSTIONE DELLE BIOMASSE SOLIDE

2.1. Biomasse: aspetti generali

Prendendo in riferimento la direttiva europea 2009/28/CEE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, si definisce biomassa come *“la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”* [13].

La biomassa in generale, è costituita da varie componenti chimiche: cellulosa, emicellulosa, lignina, estrattivi, lipidi, grassi, proteine, zuccheri semplici, amidi, acqua, idrocarburi, cenere ed altri composti. La composizione di questi componenti varia in relazione alla tipologia di biomassa. Ad esempio, nelle biomasse di origine animale proteine e lipidi saranno i costituenti principali, emicellulosa, cellulosa e lignina saranno i costituenti tipici invece della biomassa lignocellulosica. Questo aspetto è ovviamente importante nell'ambito della scelta di una corretta valorizzazione sia energetica che industriale.

Le biomasse sotto l'aspetto dello stato fisico possono suddividersi in:

- **solide:** sono la maggior parte delle biomasse ad uso energetico di natura lignocellulosica, dove il legno è la materia principalmente utilizzata;
- **liquide:** costituite da oli vegetali estratti da semi delle specie vegetali oleaginose;
- **gassose:** prodotte da processi fisici-biochimici come ad esempio il gas di gassificazione (syngas) ed il biogas ottenuto dalla fermentazione anaerobica.

Si sottolinea come nell'ambito della presente tesi le biomasse considerate sono quelle di tipo solido e in particolare di origine forestale, quindi fondamentalmente di tipo legnoso.

Va ricordato comunque come le biomasse si classificano anche relativamente al settore di provenienza:

- **settore forestale:** è la biomassa composta dal legno riconducibile alle utilizzazioni forestali utilizzate per l'ottenimento di energia rinnovabile durante operazioni selvicolturali;
- **settore agricolo:** i materiali qui presenti sono determinati da matrici dominanti differenti (lignocellulosica, zuccherina e oleaginosa);
- **settore zootecnico:** includono reflui animali degli allevamenti intensivi;
- **settore industriale:** includono materiali derivanti dai residui di prima lavorazione industriale dei prodotti forestali e agricoli;

- **settore urbano:** includono materiali residuali provenienti dalle operazioni di manutenzione del verde urbano e frazione organica dei rifiuti solidi urbani.

Nella concezione energetica, la biomassa è definibile come materia organica non fossile, sia prodotta che residuale, applicabile come fonte energetica in processi di generazione di calore e/o elettricità in funzione delle tecnologie adottate. Prima della conversione negli impianti, le biomasse sono trasformate in biocombustibili attraverso opportune lavorazioni di miglioramento della qualità. Essendo prodotta dalla fotosintesi, dove l'energia radiante viene convertita in energia chimica, la biomassa rappresenta una forma di stoccaggio elaborata dell'energia solare riproducibile in tempi molto brevi. Questa peculiarità la rende quindi rinnovabile. Pertanto, la biomassa è una fonte energetica definita neutrale ai fini dell'incremento delle emissioni di gas a effetto serra. La combustione della biomassa infatti potenzialmente genera emissioni di CO₂ che tuttavia viene emessa in quantità simili a quella assorbita dalle piante, rientrando così nel ciclo naturale.

Nei paragrafi successivi della combustione, verrà analizzato il processo termochimico di base per la conversione energetica dei biocombustibili solidi. Inoltre, si determineranno i fattori che vanno ad influire sul processo e ritenuti importanti ai fini dell'efficienza energetica e soprattutto della qualità ambientale.

2.2. La combustione delle biomasse solide

Le biomasse possono produrre energia elettrica e/o termica a seconda del sistema di conversione utilizzato. Il modo più utilizzato è la combustione diretta dei biocombustibili solidi (pellet, cippato o legna da ardere). Oppure, la trasformazione può avvenire con metodi termochimici che dispongono dell'energia termica per la conversione come la gassificazione per la produzione di syngas e la pirolisi per la produzione di oli pirolitici. Syngas e oli pirolitici possono poi essere combusti in sistemi termici specifici (prevalentemente motori endotermici). Come specificato precedentemente la combustione diretta riveste maggior rilevanza nel campo dei biocombustibili solidi in quanto prevede sistemi più semplificati rispetto alla gassificazione e pirolisi. Tuttavia, il fatto di bruciare un biocombustibile solido in modo diretto è più impattante sotto il profilo ambientale delle emissioni gassose prodotte dall'impianto a causa di molteplici variabili.

Nei prossimi paragrafi sarà discusso il processo di combustione e le possibili variabili che vanno ad incidere in tale processo.

2.3. Il processo della combustione

Come si può osservare dalla figura 1, alla combustione sono associati quattro fasi di processo ben distinguibili tra loro:

- **Essiccazione:** è la prima fase del processo di combustione dove la biomassa subisce un riscaldamento determinando l'eliminazione, riduzione della massa iniziale dell'acqua contenuta all'interno della biomassa. Essendo un processo endotermico dispone di una parte di calore che generato dalla combustione influenza temperatura e cinetica di reazione entrambi elementi chiave per gli aspetti di efficienza energetica e ambientale. In questa fase l'umidità è un parametro importante soprattutto nella scelta del combustibile. Il valore limite purchè la combustione sia sostenibile è pari al 60% sul tal quale.
- **Pirolisi:** in questa fase la temperatura si innalza fino a 160 – 250°C portando la biomassa a degradarsi termicamente con rilascio di composti volatili, una miscela di tar e gas infiammabili. La frazione volatile, con la sua quantità e composizione, va ad influenzare la temperatura finale e la velocità di riscaldamento e del combustibile non ancora degradato.
- **Combustione dei composti volatili:** in presenza di una sufficiente temperatura, la miscela dei gas combustibili prodotta precedentemente a contatto con l'aria si incendia generando una fiamma a diffusione intorno alla particella di combustibile. La combustione produce calore che riscalda il sistema facendo accelerare la cinetica di volatilizzazione.
- **Combustione del char:** l'ultima fase del processo di combustione è la produzione di idrocarburi gassosi e viene lentamente ridotta fino ad esaurirsi portando alla formazione di char, un composto solido ad elevato contenuto di carbonio. Il char è molto influente nel processo di combustione tanto che rappresenta all'incirca il 10 – 30% della massa iniziale del combustibile ma può generare fino il 50% dell'energia totale sviluppata nella combustione. Il char prosegue con una combustione senza fiamma producendo gas volatili combustibili e in una reazione completa si esaurisce.

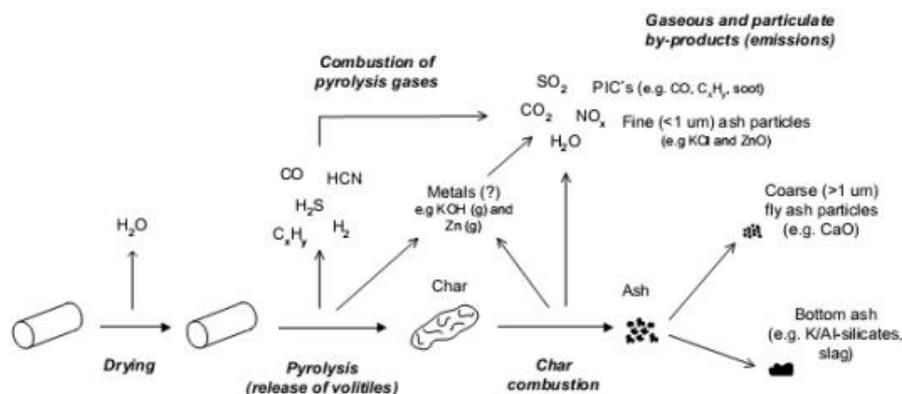


Figura 1: Schema di sintesi del processo di combustione della biomassa solida [6].

Se inquadrassimo la combustione da un punto di vista chimico e stechiometrico, l'energia chimica immagazzinata nel combustibile viene trasformata in energia termica mediante ossidazione; il C e l'H presenti nella biomassa vengono ossidati dall'O₂ dell'aria (il comburente) in CO₂ e H₂O con rilascio di calore. Il processo è complesso, sono presenti una serie di reazioni che portano alla formazione di molti sottoprodotti e composti intermedi (Figura 2).

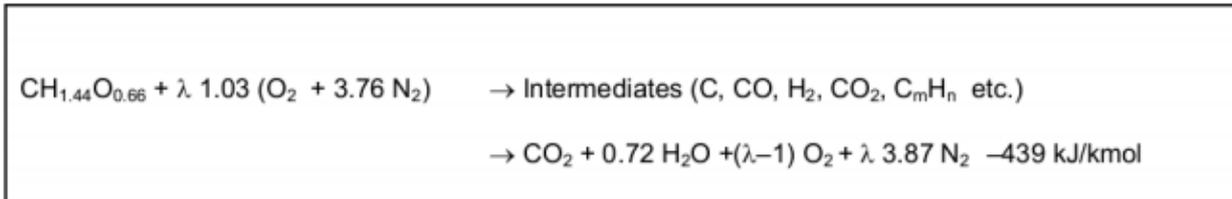


Figura 2: Reazione generale di combustione [29].

2.3.1. I requisiti del processo della combustione

L'ossidazione totale della frazione organica della biomassa può avvenire se vengono rispettate dei requisiti che sono fondamentali nella combustione ovvero:

- **l'aria comburente:** deve essere fornita in giusta quantità affinché si possa consentire la completa ossidazione del combustibile. Questo deve garantire il rispetto di un buon rapporto aria/combustibile. Se in difetto la combustione sarebbe incompleta e le reazioni produrrebbero composti indesiderati. Se in eccesso si perderebbe calore dal sistema di combustione nei gas di emissione;
- **le temperature generate:** devono essere sufficientemente alte per sostenere le reazioni chimiche ad una certa cinetica; quindi combustibili umidi portano ad un abbassamento della temperatura a seguito della presenza di acqua;
- **il tempo di permanenza alle alte temperature:** il più possibile lungo affinché lo scambio termico e l'ossidazione possa avvenire;
- **miscelazione tra combustibile e comburente:** è bene che sia presente in modo da far evitare zone locali in assenza di ossigeno. Dipende dalla giusta dose di aria comburente e portata di combustibile.

Nel processo di combustione la quantità di aria comburente può essere considerato uno dei parametri di maggiore rilevanza. Esso rappresenta il rapporto tra la disponibilità di ossigeno nell'ambiente di reazione e la quantità di ossigeno necessaria per la completa ossidazione. Nel caso che l'ossigeno sia presente in quantità sufficienti, la temperatura è il secondo parametro più importante in quanto assume una certa influenza nelle cinetiche di reazione. Il giusto equilibrio tra

le due variabili consente di ridurre le emissioni inquinanti derivanti da condizioni di combustione incompleta.

Nei prossimi paragrafi si discuterà sulle emissioni che la combustione produce, elencando e descrivendo tutti i principali composti che si formano con le emissioni di combustione completa e incompleta ed inquadrando i possibili effetti che questi composti possono avere sulla salute umana.

2.4. Aspetti ambientali della combustione di biomasse

Durante il processo di combustione delle biomasse si possono produrre classi di composti e particelle indesiderate che una volta rilasciati in atmosfera possono produrre un impatto negativo a livello ambientale ed essere tossici per la salute umana. Pertanto, tali composti vengono definiti inquinanti.

L'impiego di combustibili ligno-cellulosici, ad esempio, può ridurre fortemente l'emissione di CO₂ rispetto all'utilizzo di gas naturale e combustibili fossili, di contro questi composti però possono portare alla formazione di gas e particelle altrettanto dannose, come ad esempio ossidi di azoto (NO_x) e il particolato sottile (PM₁₀).

Per quanto riguarda le emissioni inquinanti derivanti dalla combustione del legno, si possono dividere in due gruppi: emissioni da combustione completa (inquinanti ossidati) e emissioni da combustione incompleta (inquinanti incombusti). Nella combustione completa quasi tutto il materiale organico è trasformato in CO₂ e H₂O di contro solo poche particelle di natura inorganica si possono formare e queste sono legate alle ceneri, quindi la frazione inorganica è presente sempre nei biocombustibili solidi. Nella combustione incompleta invece si verifica un netto aumento della produzione di volatili, particelle solide derivanti da materiale organico condensato e gas inorganici. Perciò in questo gruppo sono presenti i vari composti organici volatili (VOC), gli idrocarburi aromatici policiclici (IPA), le varie particelle di combustione incompleta (soot, char, tar) oltre al particolato (PM).

2.4.1. Emissioni da combustione completa

Di seguito si analizzano per ciascuno paragrafo i principali composti inquinanti prodotti nel corso della combustione delle biomasse.

Anidride carbonica (CO₂)

E' il prodotto principale riguardante la combustione delle biomasse; è originario dall'ossidazione del C, elemento di cui sono ricche le strutture dei materiali vegetali. Per quanto riguarda l'anidride carbonica rilasciata in atmosfera, le biomasse sono considerate neutrali dal momento che la quantità di composto rilasciata è ritenuta pari a quella fissata dalla pianta durante la fotosintesi, ciò comporta un beneficio per l'ambiente. Pertanto, il gas viene effettivamente emesso nel corso del processo ma può ritenersi non inquinanti, quindi non in grado di aumentare la concentrazione in atmosfera.

Ossidi di Azoto (NO_x)

Nella combustione delle biomasse, il NO_x si forma attraverso ossidazione dell'azoto presente nel combustibile. La frazione di azoto che volatilizza è dipesa dal tipo di biomassa e dalle condizioni operative. Si può notare che l'azoto a basse temperature rimane generalmente legato al residuo carbonioso mentre ad alte temperature viene rapidamente rilasciato. Il composto azotato che viene maggiormente rilasciato è NO che viene poi convertito in NO₂. Gli ossidi di azoto si formano anche per effetto termico, legato alla presenza di azoto atmosferico nell'aria comburente. Ciò dipende dalle temperature di combustione. Il peso di questa componente non sembrerebbe essere significativo se non in impianti che utilizzano processi ad elevate temperature. Infine, va ricordato che gli NO_x causano inquinamento secondario, producendo nuovi composti inquinanti per effetto di reazioni che avvengono in atmosfera.

Ossidi di Zolfo (SO_x)

Gli ossidi dello zolfo sono il risultato della completa ossidazione dello zolfo nel combustibile. E' giusto affermare però che lo zolfo presente nel materiale può non essere interamente trasformato in SO_x, una frazione importante infatti può rimanere nelle ceneri mentre una frazione più piccola è emessa come sale (K₂SO₄) o come H₂S ad alte temperature. La % di S nelle ceneri è strettamente rapportata dalla presenza di metalli alcalini (come il Ca).

In genere le emissioni possono provocare problemi quando le concentrazioni di S supera il 0,2% (s.s.). L'incremento nella concentrazione dello zolfo può derivare anche da una contaminazione chimica della biomassa (es: insetticidi, colla, additivi, vernici e coloranti). Va detto che la legge nazionale vieta l'uso di biomasse trattate chimicamente, eccetto per impianti che dispongono di abbattitore delle emissioni. In generale, lo zolfo è poco presente nella biomassa solida e quindi questo aspetto si ritiene trascurabile.

Acido Cloridrico (HCl)

Il cloro nel legno solitamente ha valori molto bassi, mentre in piante erbacee, paglia, granella e residui dei frutti può assumere valori più elevati. Con la combustione dal cloro si libera un gas con acido cloridrico, Cl_2 e metalli alcalini del cloro. Dopo un successivo raffreddamento del gas parte del Cl condensa in forma di sale sugli scambiatori di calore o sulle particelle contenute nei fumi che si possono depositare. Effetti importanti del Cl riguardano processi di corrosione dei sali e dell'acido cloridrico sulle pareti di metallo, la presenza di HCl e particolato nei fumi di combustione liberati in atmosfera, oltre l'influenza nella formazione di diossine, furani (PCCD/F) e composti organici cancerogeni. Su questi ultimi composti la letteratura comunque non evidenzia particolari problemi in quanto trattasi di composti che si formano in condizioni di temperatura e presenza di metalli specifici.

Polveri totali

Le polveri totali riguardano le particelle solide che si formano durante la combustione. Quando la combustione è completa la natura di queste componenti è inorganica (ceneri leggere). In generale vengono emesse a camino considerata la loro piccola dimensione. Le polveri più importanti ed impattanti per la salute umana sono quelle al di sotto dei 10 micron (PM 10) in quanto più capaci di essere respirate dal nostro sistema respiratorio. Data la loro leggerezza, specie per le PM 1, possono spostarsi a grandi distanze e rimanere in sospensione nell'atmosfera per molto tempo.

Metalli pesanti

I combustibili provenienti dalle biomasse possono contenere metalli pesanti a valori variabili; ciò dipende dal tipo e parte di pianta, dalla sede di crescita e dal terreno. Normalmente le biomasse legnose presentano valori molto bassi di metalli pesanti e quando presenti ad elevate concentrazioni si può pensare ad un prodotto residuale di trattamenti chimici (rifiuto). I metalli sono presenti sulle particelle corpuscolari (polveri) e si disperdono nell'ambiente in concomitanza con le ceneri leggere.

2.4.2. Emissioni da combustione incompleta

Come per le emissioni da combustione completa di seguito verranno elencate i composti che riguardano le emissioni da combustione incompleta. E' giusto affermare però che le emissioni causate da una combustione incompleta sono il frutto di una serie di fattori che sono collegati tra loro attraverso la cinetica dei processi alla base della combustione e quindi da fattori già considerati precedentemente:

- miscelazione non adeguata dell'aria di combustione e carburante nella camera di combustione;
- mancanza generale di O₂ disponibile;
- temperature di combustione troppo basse;
- tempi di residenza non ottimali.

Monossido di Carbonio (CO)

Il CO è un prodotto intermedio della conversione del carbonio nel combustibile. Indica che la combustione è incompleta a causa di diversi fattori, tra cui la carenza d'aria, le basse temperature di combustione ed il rapporto sfavorevole aria/combustibile. Il monossido di carbonio può essere considerato tra i principali indicatori della qualità della combustione: se si registrano alte produzioni di questo composto è il segnale che la combustione è povera e le condizioni non sono ideali. La presenza di elevate concentrazioni di CO è spesso accompagnata da altri inquinanti organici carboniosi volatili e da polveri carboniose evidenziando l'incompletezza del processo combustivo.

Composti organici volatili (VOC)

I VOC sono un insieme di composti di natura organica caratterizzati da basse pressioni di vapore a temperatura ambiente e da una elevata volatilità, che si trovano quindi in atmosfera principalmente in forma gassosa. Chimicamente con una natura idrocarburica sono prodotti intermedi nella trasformazione del carbonio del combustibile in CO₂ e dell'idrogeno in H₂O. Alcune famiglie dei composti organici volatili possono essere altamente cancerogene per l'uomo (benzene, formaldeide, composti alogenati).

Idrocarburi aromatici policiclici (IPA)

Sono rappresentati da una serie di composti complessi aromatici e considerati come una classe di VOC a parte per la loro elevata tossicità. Nello specifico gli IPA sono composti policiclici (con più anelli aromatici) che hanno un alto effetto cancerogeno per l'uomo. Questi composti vengono ottenuti dalla ricombinazione dei frammenti radicalici prodotti dalla scissione termochimica degli idrocarburi generati dalla devolatilizzazione del legno alle alte temperature della fiamma. Come per CO anche per gli IPA tutti i fattori che rallentano la cinetica delle reazioni determinano un aumento di questi componenti.

Particelle da combustione incompleta

Le particelle che si creano durante la combustione incompleta possono essere ulteriormente divise in:

- **soot**: è un agglomerato di particelle carboniose che si forma in forte carenza di O₂ nella zona della fiamma;
- **char**: è il residuo carbonioso con densità molto bassa; quindi il composto può essere trascinato dai fumi della combustione disperdendosi facilmente in atmosfera;
- **tar**: è la parte degli idrocarburi condensabili e può rappresentare la quota maggioritaria nel totale delle particelle emesse dalla combustione del legno.

Particolato (PM)

Il particolato (o polveri totali sospese – PTS) può essere considerato come l'insieme delle particelle organiche-inorganiche disperse in atmosfera sia solide che liquide con dimensioni dell'ordine di qualche nanometro. A causa delle loro ridotte dimensioni, il particolato può rimanere sospeso in atmosfera anche per lunghi periodi di tempo. La dimensione delle particelle che compongono il PM sono ritenute fondamentali per caratterizzare il loro comportamento inquinante e stabilire gli effetti sulla salute umana che queste comportano.

A seconda delle dimensioni il particolato presenta diversi livelli di pericolosità. Particelle piccole hanno più facile accesso al nostro organismo attraverso il sistema respiratorio. Un indicatore numerico stabilisce il valore del diametro aerodinamico della particella. I particolati più pericolosi sono al di sotto del PM 10 (inferiore ai diametri di 10 µm), ma da tempo si valutano PM 5 e PM 1.

2.4.3. Interazione degli inquinanti con la salute umana

L'inquinamento atmosferico ad opera dei composti indesiderati prodotti dalla combustione si ripercuote negativamente sulla salute umana e questo, oltre all'effetto sull'ambiente naturale, è uno degli aspetti più preoccupanti. L'esposizione agli inquinanti è stata associata ad una grande varietà di effetti dannosi dove la maggior parte di essi riguarda l'apparato respiratorio e quello cardiovascolare. Il problema dell'inquinamento talvolta è sottostimato dall'opinione pubblica, in quanto gli effetti più frequenti sono quelli meno gravi, che si presentano come asintomatici. Tuttavia, si possono presentare anche eventi gravi, che aumentano il rischio di mortalità e possono causare riduzione dell'aspettativa di vita.

La tabella 1 mostra l'interazione che possono avere i principali inquinanti emessi dalla combustione (completa/incompleta) di una biomassa con la salute umana specificando anche la loro provenienza. Sono riportati anche altri inquinanti che comunque solo in alcuni specifici casi possono formarsi.

Tabella 1: Interazione dei principali composti della combustione sulla salute umana.

Composto	Fonte	Impatto sulla salute umana
Monossido di carbonio	Combustione incompleta di biomasse	Ridotto consumo di O ₂ colpisce soprattutto persone affette da asma
Composti organici volatili (VOC)	Combustione incompleta di biomasse	Effetti negativi sulla salute umana
Idrocarburi aromatici policiclici (IPA)	Combustione incompleta di biomasse	Effetti cancerogeni
Particelle (soot, tar, char)	Combustione incompleta di biomasse	Problemi respiratori, effetti cancerogeni
Ossidi di azoto (NO, NO ₂)	Prodotto minore da tutti i combustibili che contengono azoto	Effetti negativi sul sistema respiratorio umano
Protossido di azoto (N ₂ O)	Prodotto minore da tutti i combustibili che contengono azoto	Effetti indiretti dovuti all'esaurimento di O ₃ in atmosfera
Ammoniaca (NH ₃)	Piccole quantità emesse dalla conversione incompleta di NH ₃	Effetti negativi sul sistema respiratorio umano
Ossidi di zolfo (SO ₂ e SO ₃)	Prodotto minore da tutti i combustibili che contengono zolfo	Effetti negativi sul sistema respiratorio umano. Effetti asmatici
Metalli pesanti	Contenuti nel combustibile rilasciati insieme alle ceneri	Si accumulano nella catena alimentare, alcuni sono tossici altri sono cancerogeni
Acido cloridrico (HCl)	Prodotto minore da tutti i combustibili che contengono cloro	Effetti negativi sul sistema respiratorio umano, tossico
Ozono (O ₃)	Prodotto secondario della combustione che si forma in	Effetti indiretti dovuti all'esaurimento di O ₃ in atmosfera,

	atmosfera a seguito di reazioni con CO, CH ₄ e NO _x	effetti negativi sul sistema respiratorio umano, effetti asmatici
Diossine e furani (PCDD/PCDF)	Piccole quantità possono essere emesse dalle reazioni che includono C, Cl e O ₂ in presenza di un catalizzatore	Altamente tossico, danni epatici, sistema nervoso centrale danneggiato, difese immunitarie ridotte, si accumulano nella catena alimentare

Nello specifico il particolato ad esempio produce principalmente una risposta di tipo infiammatorio e indebolimento dei meccanismi di difesa polmonare. Inoltre le particelle PM avrebbero proprietà genotossiche, che sarebbero alla base dei loro effetti cancerogeni. Il tratto respiratorio è la via d'ingresso principale per il PM inalato, ma non è l'unico a essere colpito, in quanto gli effetti possono essere riflessi anche ad altri sistemi come quello cardiovascolare.

Per quanto riguarda il biossido di azoto (NO₂), studi biochimici mostrano, dopo esposizione acuta ad alti livelli di questo composto, variazioni nel metabolismo lipidico polmonare e nella struttura delle cellule epiteliali bronchiali e alveolari. Inoltre si registrano effetti sulla funzione polmonare come aumento della frequenza respiratoria, riduzione della distensibilità del polmone e degli scambi gassosi.

Il biossido di zolfo (SO₂) data la sua alta solubilità, viene facilmente assorbito dalle mucose del naso e dal tratto superiore dell'apparato respiratorio, quindi soltanto quantità ridotte raggiungono gli alveoli polmonari, in cui gli effetti dannosi sarebbero maggiori.

La pericolosità del monossido di carbonio (CO) infine è determinata dalla sua capacità di legarsi all'emoglobina, per cui ha un'affinità di circa 200 volte superiore rispetto a quella dell'ossigeno e con cui forma un composto estremamente stabile, la carbossiemoglobina. Data la funzione dell'emoglobina, che è quella di trasportare l'ossigeno nel flusso ematico, la presenza di concentrazioni elevate di CO causa una limitata ossigenazione di organi e tessuti.

Capitolo 3

BIOCOMBUSTIBILI SOLIDI & IMPIANTI TERMICI DOMESTICI

3.1. Introduzione

Negli ultimi anni il mercato dei biocombustibili solidi quali legna da ardere, cippato, pellet e bricchette si è molto ampliato. Sempre più persone utilizzano biomasse legnose ad uso domestico tanto che secondo una stima condotta dall'Enea (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile) oggi oltre 4,5 milioni di famiglie in Italia utilizzano biocombustibili solidi per il riscaldamento domestico, in prevalenza legna da ardere e pellet.

Anche il settore degli impianti termici domestici negli ultimi anni hanno evidenziato un rapido accrescimento; oggi oltre ai tradizionali camini aperti o caldaie domestiche a gas non è raro trovare nelle case delle famiglie italiane impianti più moderni ed innovativi quali termocamini, stufe e caldaie alimentate a legna o a pellet con rendimenti termici nettamente maggiore e minore impatti ambientali rispetto ai sistemi tradizionali.

In generale possiamo affermare che i biocombustibili sono tutte quelle sostanze in grado di produrre energia che derivano direttamente o indirettamente da una biomassa. In altre parole sono tutti quei combustibili solidi, liquidi e gassosi provenienti da fonti rinnovabili come le piante e gli animali. Nello specifico della tesi i biocombustibili solidi sono caratterizzati da legno in pezzi, paglie in balle, pellets, cippato, bricchette che derivano da colture dedicate o dal recupero dei residui ligno – cellulosici (agricoli, forestali, agroindustriali).

Gli impianti termici domestici sono sistemi tecnologici con finalità di climatizzazione estiva ed invernale degli ambienti con o senza produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari o alla sola produzione centralizzata di acqua calda per gli stessi usi, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione e utilizzazione del calore. L'apporto di calore all'ambiente può avvenire attraverso numerosi sistemi e componenti che si differenziano sia per le modalità di generazione, sia per la modalità con cui avviene il trasferimento di calore (conduzione, convezione, irraggiamento).

Nei prossimi paragrafi verranno richiamati i principali biocombustibili solidi considerando i loro aspetti normativi e la loro filiera di produzione; mentre nella seconda parte verrà proposta una panoramica sui principali impianti termici domestici.

3.2. Biocombustibili solidi

3.2.1. Le tipologie di biocombustibili

I biocombustibili solidi possono essere distinti in legna da ardere, cippato, pellet e bricchette, ognuno caratterizzate dalle proprie caratteristiche, funzionalità, vantaggi e svantaggi nell'uso energetico e nella loro gestione lungo la filiera produttiva sino all'utenza.

La legna da ardere può essere considerato il biocombustibile più semplice perché prodotto attraverso semplici operazioni meccaniche. Di fatto è un combustibile che richiama molto la forma originale della biomassa che l'ha generata (es: grossa branca o fusto). Questa è la differenza ad altri biocombustibili a base di legno come il pellet.

Il riscaldamento con legna da ardere è abbastanza diffuso – specie in aree rurali ma non solo – perché presenta alcune caratteristiche che lo rendono vantaggioso rispetto ad altre tipologie di combustibile a biomassa. Innanzitutto, si tratta di un biocombustibile di facile reperimento che presenta costi inferiori rispetto ad altri tipi di combustibile legnoso, specie rispetto ai combustibili cosiddetti “densificati” (pellet, bricchette) che prevedono delle operazioni meccaniche preliminari di pressatura e compattamento della materia. Si tratta, inoltre di un materiale il più delle volte reperibile in luoghi vicini dalla sua destinazione d'uso e di un combustibile di facile utilizzo. Non sono rari i casi di utenti che provvedono a recuperare legna da boschi del territorio (es: usi civici).

Rispetto ad altri combustibili presenta però anche degli svantaggi: innanzitutto la legna da ardere necessita di un luogo apposito per il suo accatastamento, a differenza dei combustibili densificati che sono più facilmente trasportabili per il loro volume e non necessitano di molto spazio per essere conservati in vista del loro utilizzo. Inoltre, rispetto ad altri combustibili, la legna da ardere presenta una densità energetica inferiore dovuta da una maggiore presenza di umidità. Ciò causa anche una riduzione di efficienza energetica. Il problema può essere risolto parzialmente con utilizzo di impianti moderni come camini chiusi o caldaie a fiamma inversa, che funzionano in modo da ridurre tutti gli sprechi energetici tipici dei camini aperti. Ma il problema primario del riscaldamento con legna da ardere è l'impossibilità di utilizzare questo combustibile in sistemi automatici. La scelta di un riscaldamento a legna comporta infatti, la necessità di un caricamento manuale dell'impianto termico, sia esso un camino, una stufa o una caldaia. Di conseguenza, la legna da ardere risulta particolarmente adatta in tutti quei sistemi che non è necessario un processo di automazione come avviene ad esempio nelle classiche caldaie a tiraggio naturale o nelle più moderne ed efficienti caldaie a fiamma inversa.

Il cippato è un combustibile legnoso non densificato, ottenuto attraverso la riduzione del legno in scaglie di dimensione variabile tra 15 e 50 mm. Il processo di cippatura, a differenza di quanto avviene per il pellet, non prevede triturazione della biomassa originaria ma semplicemente il suo taglio.

Grazie alle sue caratteristiche fisiche e geometriche, il cippato è un materiale particolarmente adatto ad essere utilizzato in impianti ad alimentazione automatica. Inoltre, si tratta di un biocombustibile che può essere realizzato sfruttando anche quelle porzioni di bosco poco utilizzate (rami e foglie secche) oltre che scarti da potatura dei giardini, delle aiuole, del verde presente nei

cigli stradali. Tra gli svantaggi vi è la necessità per questi biocombustibili di ampi spazi coperti per l'essiccazione indispensabili per evitare che l'umidità esterna non provochi fenomeni di degradazione biologica con problematiche di vario genere: tra queste perfino l'autocombustione.

A causa della necessità di stoccaggio in grossi silos lo si preferisce in impianti di riscaldamento industriali o in sistemi di riscaldamento ad elevata potenza, come avviene in caldaie condominiali e industriali o in sistemi di riscaldamento per scuole, uffici ed alberghi (reti di teleriscaldamento).

Il pellet (Figura 2) è un combustibile densificato di derivazione legnosa. E' formato da piccoli cilindretti di diametro inferiore a 1 cm e lunghezza di 1-1,2 cm, realizzati mediante la compressione della biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di leganti. Durante il processo di pressione e compattamento, si generano elevate temperature che permettono il più delle volte di evitare l'utilizzo di collanti. Le alte temperature infatti, comportano una parziale fluidificazione e polimerizzazione della lignina, che diventa essa stessa il collante tra le particelle.

Il pellet negli ultimi anni sta acquisendo sempre maggior mercato per la moltitudine dei vantaggi che il combustibile può offrire. In primis, trattandosi di materiale realizzato mediante pressatura e compressione, presenta una elevata densità e di conseguenza un potere calorifico molto superiore alla legna da ardere. Questo elevato potere calorifico (netto) è determinato dal fatto che si tratta di un combustibile con bassa umidità il che amplifica ulteriormente la sua resa energetica. L'elevata densità e la forma in piccoli cilindretti inoltre, permette al pellet di comportarsi in modo simile ad un liquido facilitando di molto il trasporto e lo stoccaggio del materiale. Ma il maggior pregio che il pellet può comportare, grazie alle sue caratteristiche (densità, forma cilindrica, omogeneità dei singoli pezzi), è che questo materiale può essere considerato il più idoneo per essere utilizzato negli impianti a caricamento automatico. Questo significa che gli impianti di riscaldamento che utilizzano il pellet come combustibile non devono essere caricati manualmente dagli utenti, come avviene ad esempio con la legna da ardere, ma di fatto presentano un silo di stoccaggio che, una volta caricato, alimenta autonomamente l'impianto immettendo, tramite una coclea, la quantità di combustibile necessaria di volta in volta.

Perciò il pellet trova applicazione in tutti gli impianti sia a caricamento manuale che quelli ad alimentazione automatica, dalle stufe casalinghe alle caldaie domestiche, dalle caldaie industriali fino ai più grandi impianti di teleriscaldamento a biomasse.



Figura 1: Bricchette [19]



Figura 2: Pellet [20]

Le bricchette (Figura 1) è l'altro tipo di biocombustibile densificato come il pellet; sono dei piccoli cilindri o parallelepipedi ottenuti tramite triturazione e pressatura di materiali legnosi o di biomasse come paglia, segatura, cotone o gusci di caffè. Hanno molte similitudini con il pellet, modalità di realizzazione e basso contenuto di umidità (intorno al 6-8%). Differiscono da questi ultimi per forma e dimensione; essendo più grandi, le bricchette possono essere utilizzati anche in caminetti aperti e in stufe a legna.

Possono essere adoperati anche negli impianti automatici, ma la principale destinazione d'uso è l'ambito domestico, motivo per il quale è sempre ben accertarsi della provenienza del materiale, il quale deve essere privo di sostanze tossiche come colle e vernici o scarti derivanti dalle lavorazioni industriali del legno (e questo vale per tutti i biocombustibili solidi). Inoltre grazie alla bassa presenza di umidità, presenta una elevata efficienza nella combustione, quindi alta resa energetica. Un elemento critico delle bricchette, e ciò vale anche per il pellet, è la difficoltà di ottenere garanzie sull'origine del prodotto, quindi comprendere il tipo di materia prima, e il costo più elevato rispetto ad altri combustibili legnosi.

3.2.2. La normativa tecnica (UNI EN ISO 17225)

Tutte i biocombustibili appena descritti, ai fini della classificazione, identificazione e valutazione sono regolamentati da una serie di norme e aspetti normativi. Il CEN (il Comitato Europeo di Standardizzazione) ha da tempo iniziato un percorso di standardizzazione e sviluppo di norme tecniche nel settore delle biomasse combustibili. Il punto di riferimento di questo insieme di norme è la UNI EN ISO 17225 – 1 *“Biocombustibili solidi – Specifiche e classificazione del combustibile – Parte 1: Requisiti generali”*. Questa norma descrive un metodo per classificare i biocombustibili solidi basandosi sull'origine della biomassa utilizzata per produrli e su caratteristiche qualitative

giudicate essenziali per ogni specifica tipologia di prodotto. La norma applica ai biocombustibili solidi prodotti da una serie di materie prime:

- a) prodotti derivanti dall'agricoltura e dalle foreste;
- b) residui vegetali dell'agricoltura e delle foreste;
- c) residui vegetali delle lavorazioni dell'industria alimentare;
- d) residui legnosi ad eccezione di quelli che possono contenere componenti organici alogenati o metalli pesanti risultanti dai trattamenti per la conservazione del legno;
- e) rifiuti di sughero.

La norma in maniera generica permette di classificare e distinguere i prodotti utilizzati per fini energetici. I sistemi si basano sulla definizione della forma commerciale, della dimensione e della modalità di produzione (es: segatura, polvere, cippato, pellet ecc.).

La norma fornisce inoltre, un sistema di classificazione basato sulla natura della biomassa stessa (legnosa, erbacea, da frutti e semi) e sulle differenti origini in cui può essere suddivisa (biomassa vergine, sottoprodotti e residui dell'industria di prima lavorazione). Segue poi un ulteriore livello di dettaglio relativo allo stato originario in cui si trova la materia prima: per la biomassa vergine ad esempio si parla di pianta intera con o senza radici, tronchi, residui di potatura, mentre per i residui legnosi si distinguono quelli trattati chimicamente da quelli non trattati e per le biomasse erbacee c'è una distinzione tra i cereali dagli erbai, dalle colture oleaginose, dai fiori o da altre forme quali radici e tuberi. Un ulteriore livello infine, definisce la materia prima consentendo di specificare se si tratta di conifere o latifoglie, o di coltivazioni dedicate (es: short rotation forestry).

La normativa europea UNI EN ISO 17225 è composta da più parti dove vengono regolamentati e classificati i vari tipi di biocombustibili solidi:

- UNI EN ISO 17225 – 2: è la norma che definisce le classi di qualità del pellet di legno (tre classi di qualità: A1, A2, B); la classe A1 e A2 si rivolge al pellet derivante da residui non trattati chimicamente (legna vergine), mentre la classe B consentirebbe anche l'utilizzo di residui legnosi trattati chimicamente.
- UNI EN ISO 17225 – 3: definisce tra classi di qualità (A1, A2, B) per le bricchette di legno per uso non industriale e per ogni classe sono riportati specifiche chimico-fisiche di alcune grandezze considerate rilevanti.
- UNI EN ISO 17225 – 4: la norma definisce quattro classi di qualità (A1, A2, B1, B2) per il cippato ad uso non industriale con relative specifiche chimico-fisiche per ogni classe.
- UNI EN ISO 17225 – 5: questa norma europea definisce tre classi di qualità (A1, A2, B) per legna da ardere ad uso non industriale e per ogni classe sono presenti anche qui caratteristiche chimico-fisiche considerate importanti.
- UNI EN ISO 17225 – 6: in questa norma sono presenti due classi di qualità (A, B) per il pellet ad uso non industriale derivante da biomassa erbacea, frutta o semi e residui della lavorazione. Sono specificate per ogni classe caratteristiche chimico-fisiche ritenute rilevanti. Inoltre in questa parte sono presenti specifiche per il pellet prodotto da alcune biomasse erbacee maggiormente utilizzate a livello europeo come paglia di cereali, miscanto e phalaris arundinacea (un'erba della famiglia delle graminacee).
- UNI EN ISO 17225 – 7: norma recente che sostituisce la precedente (UNI EN 14961) e classifica le bricchette da materiale diverso dal legno.

Tabella 1: quadro generale delle norme tecniche UNI EN ISO 17225 sui biocombustibili solidi.

NORMA UNI EN ISO	TITOLO GENERICO (Fuel specifications and classes)	VECCHIA NORMA
UNI EN ISO 17225-1: 2014	Part 1: General requirements	UNI EN 14961-1: 2010
UNI EN ISO 17225-2: 2014	Part 2: Graded wood pellets	UNI EN 14961-2: 2011
UNI EN ISO 17225-3: 2014	Part 3: Graded wood briquettes	UNI EN 14961-3: 2011
UNI EN ISO 17225-4: 2014	Part 4: Graded wood chips	UNI EN 14961-4: 2011
UNI EN ISO 17225-5: 2014	Part 5: Graded firewood	UNI EN 14961-5: 2011
UNI EN ISO 17225-6: 2014	Part 6: Graded non-woody pellets	UNI EN 14961-6: 2012
UNI EN ISO 17225-7: 2014	Part 7: Graded non-woody briquettes	Nessuna norma

3.2.3. Le filiere di produzione

Le filiere energetiche del legno prevedono l'uso di vari sistemi, mezzi, risorse economiche e naturali; ciò impone un'analisi attenta di carattere tecnico, economico e ambientale che miri a verificare la reale fattibilità e sostenibilità dei processi. Nelle filiere di produzione, la logistica è considerata come uno degli aspetti di maggior considerazione in quanto rappresenta lo stoccaggio dei materiali e l'organizzazione di mezzi e del personale. La variabilità dei materiali raccolti, il diverso comportamento fisico, meccanico, biologico, le modalità di trasporto e conservazione della biomassa sono solo alcuni degli esempi di importanti fattori che rendono complessa l'ottimizzazione delle fasi operative e riducono la possibilità di standardizzazione dei processi. In questo "percorso" che porta la pianta a diventare combustibile vede la presenza di determinati attori, ossia tutte le realtà produttive e commerciali che ricoprono un ruolo dalla sua origine (approvvigionamento della materia prima) sino alla sua fine (utilizzatore del combustibile nei generatori): i principali sono i produttori (le aziende agroforestali/selvicolturali) poi vengono i venditori e/o distributori all'ingrosso, i quali vanno a rifornire i grossi impianti di produzione energetica; un ruolo importante è rivestito senz'altro dai fabbricanti di generatori, soprattutto in ambiti territoriali nel quale la produzione prevalente di biocombustibile può condizionare la produzione di determinate tipologie di generatore; infine si arriva all'utenza finale ovvero il privato che acquista il prodotto/biocombustibile per realtà più piccole (ad uso domestico).

Nei prossimi paragrafi verranno discussi diversi aspetti riguardanti le filiere energetiche dei principali combustibili solidi (legna da ardere, cippato, pellet e bricchette).

3.2.3.1. La produzione della legna da ardere

Di norma, prendendo in riferimento l'ambito forestale, la filiera della legna da ardere è composta da diverse fasi:

- Abbattimento ed allestimento del legno (prelievo del materiale)
- Movimentazione materiale (concentramento, esbosco e trasporto)
- Stoccaggio del materiale (stagionatura)
- Immissione sul mercato

Abbattimento ed allestimento del legno

L'abbattimento consiste nel taglio al piede dell'albero e nella sua collocazione a terra. E' un'operazione che può essere fatta con attrezzature relativamente semplici (motosega) o complesse (harvester). Esistono numerosi modelli di motosega in commercio e la scelta è legata principalmente alle caratteristiche dimensionali dell'elemento che si andrà a tagliare (diametro del tronco).

In genere, la motosega è una macchina sempre presente nei cantieri forestali, tuttavia, in condizioni operative ed economiche favorevoli la raccolta del legname può essere svolta da macchinari più complesse e produttive della motosega ovvero gli harvester.

Gli harvester sono macchine di grandi dimensioni e costo che permettono di effettuare una serie di operazioni combinate: abbattimento ed allestimento del legno (sramatura e depezzatura del tronco). La macchina ha la base di una trattoria agricola con braccio articolato che nella parte terminale dispone della testata che esegue tutte le operazioni considerate. La sola testata potrebbe essere montata su un escavatore, in questo caso si parla di processor. Il risultato con harvester è identico ma con performance produttive minori.

Tuttavia, nella filiera della legna da ardere le macchine utilizzate sono meno complesse. In genere deriva da piccoli tronchi non utili per l'industria del legno o da grosse branche che vengono lavorate con spaccalegna di vario genere (a vite e a cuneo).

Stoccaggio del materiale (stagionatura)

Avvenuta la fase della movimentazione, in genere con fascinatrici per agevolare la gestione del prodotto, la legna da ardere viene accatastata all'aria aperta, preferibilmente sotto una tettoia per proteggerlo dalle intemperie, e viene lasciato stagionare per qualche tempo.

La stagionatura è un processo fondamentale poiché la legna appena tagliata ha un elevato contenuto di umidità (intorno al 60% del suo peso), quindi di acqua e per poter essere venduta o

utilizzata efficacemente per il riscaldamento è necessario che una parte di questa umidità venga persa mediante la stagionatura, la quale può durare un'intera estate oppure addirittura due anni. Nel primo caso, l'umidità scende in genere al 25% mentre nel secondo caso si può arrivare ad un contenuto di umidità pari a 15-20% valore ottimale per poterla utilizzare per scopi energetici. Infatti durante la combustione, viene liberata una certa quantità di energia presente nei legami chimici riguardanti le sostanze che compongono il legno, energia chimica che viene liberata sotto forma di calore. Se all'interno del legno in combustione è presente molta umidità, una larga parte di questa energia viene utilizzata per far evaporare l'acqua e non per fornire riscaldamento. Se, al contrario, il contenuto di umidità è inferiore, sarà necessaria una quantità inferiore di energia per farla evaporare, energia che potrà essere utilizzata in modo più efficace per il riscaldamento.

Immissione sul mercato legna da ardere

Rispetto ad altri combustibili solidi, la legna da ardere è soggetta maggiormente a fenomeni di abusivismo e commercio illegale. L'Unione Europea negli ultimi anni è intervenuta per risolvere il problema promulgando il Regolamento UE n.995/2010 – noto come UE Timber Regulation (EUTR) – che ha l'obiettivo di contrastare il commercio di legname e di prodotti di legno tagliati abusivamente [17].

Il Regolamento prevede:

- divieto di immettere sul mercato UE legname di provenienza illegale e tagliato abusivamente e i prodotti da esso derivati;
- obbligo, per gli operatori responsabili della prima immissione dei prodotti legnosi nel mercato europeo, di adottare un sistema di “dovuta diligenza” o adeguata verifica (Due Diligence System – DDS);
- obbligo di tracciabilità di fornitori e clienti per i commercianti rivenditori.

Il Regolamento UE n.995/2010 definisce quindi due soggetti specifici:

1. Operatore: come la persona fisica o giuridica che commercializza legno o suoi prodotti derivati. Ai fini del presente regolamento, l'operatore è il soggetto che importa o immette per primo il legname ed i prodotti da esso derivati nel mercato comunitario. Gli operatori non possono immettere e utilizzare sul mercato comunitario legname di provenienza illegale e devono tenere un registro con il nome dei fornitori.
2. Commerciante rivenditore: come persona fisica o giuridica che, nell'ambito di un'attività commerciale, vende o acquista legno o prodotti da esso derivati già immessi sul mercato interno. Questi soggetti devono conservare le informazioni dell'azienda da cui acquistano il legname e i prodotti da esso derivati e quelle del cliente a cui li vendono.

Gli operatori applicano il DDS a ciascun tipo specifico di legname, acquistato da un determinato fornitore entro un periodo non superiore a 12 mesi, a condizione che le specie di alberi, il Paese o i Paesi da cui il legname proviene rimangano invariati.

Per quanto riguarda i prezzi della legna ardere sul mercato italiano i dati aggiornati alla data dell'odierna stesura della tesi mostrano [11]:

- Legna mista, taglio camino (legna spaccata in pezzi di lunghezza variabile tra i 40 – 50 cm): 12€/q
- Legna mista, taglio stufa (legna riguardante pezzi più piccoli di lunghezza tra i 20 – 25 cm e più sottili): 12€/q
- Legna tipo singolo, taglio camino (legna di un solo tipo pregiato quindi legni pesanti con alta resa termica per quintale): 15 - 20 €/q

3.2.3.2. La produzione del cippato

Il cippato ha avuto una notevole diffusione nel corso degli ultimi anni grazie all'opportunità di rendere automatizzata l'alimentazione delle caldaie per effetto della riduzione della legna in pezzi di piccole dimensioni. Per mezzo della cippatura si ha un migliore sfruttamento della biomassa a disposizione, dato che si può cippare anche quel materiale che non può essere trasformato in alcun assortimento convenzionale perché piccolo o difettoso. Difatti con la cippatura si riesce a recuperare un 15-20% di biomassa che altrimenti sarebbe abbandonata in bosco come residuo. Cippare anche questo materiale non solo aumenta la resa ad ettaro, ma risolve anche il problema dei residui di utilizzazione, che le misure di prevenzione degli incendi boschivi impongono di asportare o eliminare.

La cippatura perciò è definita come quella lavorazione meccanica del materiale ligno-cellulosico che riduce il prodotto originario in scaglie di materiale omogeneo le cui dimensioni possono variare da alcuni millimetri a 50-60 mm circa. Le macchine che si utilizzano (cippatrici) agiscono tagliando il materiale o legno perpendicolarmente alla direzione della fibra.

La cippatura consente di ridurre il volume apparente degli scarti forestali, agevolandone la movimentazione e il trasporto. Ad esempio, una tonnellata di cippato fresco occupa circa tre metri cubi, contro i dieci necessari per contenere la stessa quantità di ramaglia tal quale. Questo vale solo per il materiale minuto, perché il volume occupato dal cippato è viceversa sempre superiore, mediamente il doppio, all'ingombro di un peso equivalente di legname tondo. La conseguenza logica è che conviene cippare ramaglia, scarti e piante di piccole dimensioni, mentre è meglio allestire tondelli le piante medio-grosse, in particolare con distanze di trasporto elevate.

Il cippato è quindi una riduzione del legno in scaglie e presenta una serie di caratteristiche morfologiche e qualitative:

- **Dimensione:** la dimensione (e forma) dei chips dipende molto dal tipo di macchina utilizzata; il cippato in funzione della prevalenza di certi valori di pezzatura si può distinguere in:
 - fine: cippato inferiore a 20 mm;
 - grossolano: cippato superiore a 50 mm.

- **Omogeneità:** un aspetto importante del cippato è la sua omogeneità di pezzatura che deve essere garantita tramite vagliatura, in quanto ciascun sistema di trasporto del combustibile alla caldaia opera in sicurezza nell'ambito di alcune tolleranze dimensionali che è opportuno soddisfare.
- **Qualità:** per quanto riguarda gli aspetti qualitativi, in relazione al legno di partenza, è possibile distinguere:
 - cippato bianco (legna scortecciato);
 - cippato marrone (legna con corteccia);
 - cippato verde (legna con corteccia e foglie).
- **Umidità:** altro aspetto rilevante per quanto riguarda il cippato è l'umidità che è bene che non sia superiore al 30%. Il cippato forestale opportunamente prodotto e messo in cumulo riesce a raggiungere più rapidamente i valori di umidità indicati, rispetto al legno che lo ha generato. I microrganismi xilofagi si sviluppano solo con certe temperature ed umidità, e la diminuzione della stessa rappresenta sempre una forte limitazione al loro sviluppo. Inoltre il grado di deterioramento del cippato è strettamente collegato ai seguenti aspetti:
 - pezzatura: il cippato sottile è più facilmente degradabile rispetto a quello grossolano che si essicca meglio grazie ad una maggiore presenza di spazi vuoti e quindi una maggiore aerazione;
 - condizioni di stoccaggio: deve avvenire in ambienti aperti, ventilati (meglio se coperti da tettoia), in cumuli non molto grandi per garantire un rapido deflusso di aria;
 - specie legnosa: il cippato soggetto a compattazione come per il pino (specie per quelli a short rotation forestry a cicli brevi) è maggiormente degradabile rispetto alle conifere; le conseguenti perdite di massa possono raggiungere il 15 – 25% della s.s.

Esistono diverse cippatrici sul mercato di varia potenza e in grado di lavorare dimensioni di tronchi fino a 35 cm di diametro; in genere abbiamo tre tipologie: a disco, a tamburo e a vite senza fine.

La cippatrice a disco (Figura 3) dispone di 3 – 4 coltelli in posizione radiale di un disco metallico; la biomassa passa attraverso una fessura regolabile e incontra il coltello che preme il materiale su un elemento di battuta. L'alimentazione di questo mezzo è manuale.

Nella cippatrice a tamburo è presente un cilindro rotante con diametro minimo di 30 cm sul proprio asse longitudinale, e monta in periferia una serie di coltelli; la sporgenza dei coltelli rispetto al tamburo condiziona le dimensioni delle scaglie.

La cippatrice a vite senza fine (Figura 4) si dispone come una spirale tagliente che ruota intorno ad un asse orizzontale; in questa macchina non è possibile la regolazione ed il prodotto ottenuto è sempre di grandi dimensioni (in genere superiori a 50 mm).

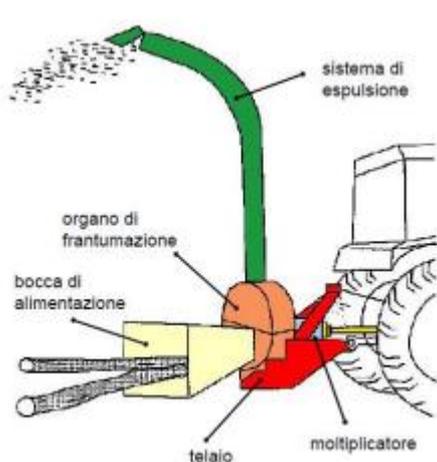


Figura 3: Schema di cippatrice a disco [3].

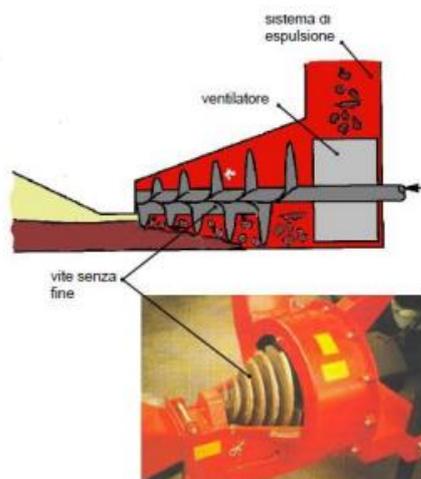


Figura 4: Schema di cippatrice a vite senza fine [3].

Normalmente le cippatrici sono macchine collegate alla presa di potenza del trattore come avviene per le cippatrici a vite senza fine, o diversamente, dispongono di un proprio motore a scoppio o a diesel. La scelta del macchinario può dipendere dalle dimensioni della materia grezza. Ad esempio, nel caso dei grossi tronchi occorre valutare la dimensione della bocca di alimentazione della macchina. La scelta deve includere anche la potenza richiesta dalla cippatrice. I legni più duri e secchi richiedono più potenza e generano maggiori consumi rispetto a legni teneri e freschi. Esistono vari modelli, anche di potenze inferiori a 35 kW, normalmente in ambito forestale le macchine si attestano su potenze comprese tra 50 e 60 kW fino ad arrivare a potenze di 120 kW per materiali con diametri superiori ai 35 cm.

Considerazioni del mercato del cippato

Il cippato ben si inserisce nella categoria delle biomasse vegetali costituendo un combustibile alternativo al pellet, ma vantando un costo di apprezzabile interesse economico pari al prezzo attuale della legna da ardere. In Italia, la produzione di cippato è piuttosto vasta e in commercio sono disponibili numerose essenze di cippato che vantano prezzi piuttosto economici soprattutto se il combustibile viene acquistato in grandi quantità. Inoltre, la domanda di cippato è aumentata con il progressivo sviluppo della coltivazione di piantagioni a corta rotazione, come il pioppo e altre specie di piante dalla crescita veloce.

In Italia la produzione di cippato è operata dall'Unione Montane, Aziende Agricole che utilizzano il combustibile per gli impianti e le centrali termiche di riscaldamento. Il prezzo del cippato è influenzato da una serie di fattori o variabili tecniche e operative:

- il grado di umidità, fattore importante in base al quale varia il rendimento calorico e di conseguenza di prezzo;

- l'essenza di legno da cui è costituito che vanno dal legno di conifere come il larice, l'abete e il pino, alle latifoglie come faggio, pioppo e salice; altra distinzione da tenere in considerazione è se il cippato è prodotto da legno proveniente dallo scarto di lavorazioni industriali o proviene dal bosco;
- dalla distanza del luogo di produzione.

Di seguito in tabella sono riportati i prezzi indicativi sul mercato nazionale del cippato umido e secco in riferimento al costo in quintale e a metro stero (si prende in considerazione cippato di media qualità e costi di trasporto esclusi).

Tabella 2: Costo a quintale e al metro stero del cippato umido e secco sul mercato nazionale [37].

	Costo a quintale	Costo al metro stero [1]
Cippato umido	3,00 euro circa	25,00 euro circa
Cippato secco	3,50 – 4,00 euro circa	28,00 euro circa

[1] Il Metro stero è l'unità di misura per conteggiare il costo del cippato che corrisponde a circa 350 – 400 kg, ma molto variabile in base alla stagionatura. Un metro stero di cippato secco pesa circa 500 – 600 kg.

3.2.3.3. La produzione dei densificati: pellet e bricchette

Pellettizzazione

L'origine del pellet è del settore dell'alimentazione animale successivamente a seguito della crisi energetica mondiale degli anni '70 l'utilizzo del pellet passa dall'ambito tipico della mangimistica a quello dei combustibili per il riscaldamento. Tra gli anni '70 e '80 nascono così negli Stati Uniti e in Canada i primi insediamenti industriali ed inizia la produzione di pellet di legno.

Il termine pellet è riferito ad una forma specifica, più opportunamente si tratta di "Biocombustibile addensato in genere di forma cilindrica ottenuto comprimendo della biomassa sminuzzata finemente con o senza l'ausilio di additivi di pressatura" (Probio, 2004). Quindi la composizione del pellet può essere la più varia possibile e tale variabilità influisce anche marcatamente sulle caratteristiche del biocombustibile finale.

Il pellet di legno viene ottenuto attraverso il processo di pellettizzazione. Tale processo si sviluppa in più fasi operative che caratterizzano l'intera filiera produttiva e vengono riportate di seguito:

Raccolta della materia prima

In Italia, la produzione di pellet di legno avviene utilizzando della materia prima rappresentata essenzialmente da scarti e residui della lavorazione industriale del legname (segherie) o delle utilizzazioni forestali quando sono disponibili tronchi interi non adatti per l'industria del legno. In sostanza si tratta di materiali di scarsa qualità ma anche con costi ridotti per quanto riguarda l'approvvigionamento.

Raffinazione

E' la prima fase industriale dove il materiale deve essere prima sottoposto all'asportazione dei materiali contaminanti (terra, sassi e particelle meccaniche), per evitare usura e danneggiamento degli organi di taglio del raffinatore. Si tratta di una fase di macinazione, che può avvenire con doppio sistema: prima un macinatore grossolano e poi un raffinatore vero e proprio per ottenere un materiale il più possibile omogeneo per composizione e dimensioni (pochi mm) utile per produrre il pellet. La raffinazione è inoltre molto importante perché permette di incrementare la superficie delle piccole particelle di legno. In questo modo si favorisce la rottura della lignina che è il legante presente nel legno che agisce nella fase di densificazione vera e propria.

Essiccazione

E' una fase importante in quanto il materiale per essere ben pellettizzato deve essere portato ad una umidità mediamente compresa tra 10 e il 15%. L'essiccazione è una fase che incide molto sul costo della produzione, e pertanto deve essere ben ottimizzata. Sono presenti due tipi di sistemi di essiccazione: a nastro e a tamburo.

Nel sistema a nastro il materiale – soggetto ad aria calda e secca – è posto sopra ad un nastro in tessuto plastico che scorre tra due rulli. L'aria passa attraverso il materiale e il nastro, è lo stesso che fa da supporto e filtro delle particelle. In questo sistema si arriva a temperature nell'ordine degli 80°C.

Nel sistema a tamburo è presente un cilindro che ruota intorno al proprio asse; si possono raggiungere temperature molto elevate fino a 300°C. In questo caso non si ha filtro come nel sistema a nastro, perciò c'è il rischio che insieme all'aria vengano via particelle solide. Quindi a differenza del sistema a nastro dove si ha aria pulita derivante da uno scambiatore, nel sistema a tamburo l'aria che si forma diretta alla caldaia è contaminata da sostanze incombuste.

Rendimento e consumo elettrico migliore per il sistema a tamburo ma la qualità finale del prodotto è maggiormente garantita nel sistema a nastro.

Condizionamento

Questa fase viene utilizzata per preparare nel miglior modo il materiale alla pressatura. In particolare viene effettuata una rivelazione del contenuto idrico, in modo da stabilire se la materia prima deve subire nuovamente un'essiccazione (se il contenuto idrico è superiore al 15%) oppure

una umidificazione (se il contenuto idrico è inferiore al 10%). Con il condizionamento si attivano le capacità leganti della materia prima che garantiscono un aumento della qualità del pellet, in particolare la sua durabilità.

Aggiunta di additivi

Qualora il materiale di partenza presenti delle caratteristiche qualitative non idonee alla pellettizzazione per difficoltà di compattazione, si può eseguire miscelazione di sostanze additive al materiale stesso. L'acqua è l'additivo per eccellenza e viene aggiunta nella fase di condizionamento. Oltre a questo, vi sono altre sostanze che possono essere utilizzate per migliorare le capacità leganti della biomassa e la capacità di far uscire agevolmente il prodotto dalla trafila della pellettatrice (es. amido). Generalmente si utilizzano additivi naturali, biologici, in quantitativi non superiori al 2% in peso che comportano un aumento della durabilità del pellet.

Pressatura (pellettizzazione)

E' la fase produttiva principale, con la quale il materiale precedentemente preparato subisce una trasformazione fisica e meccanica, che porta ad un cambiamento sostanziale di forma, dimensioni e densità. La biomassa viene pressata all'interno di una trafila forata con internamente due rulli. Questa matrice forata, consente al materiale pressato di passare oltre e di dare origine al pellet. In particolare, i fori della matrice, presentano la parte più superficiale di forma conica che favorisce l'ingresso del materiale e la compressione, e la parte finale di forma cilindrica che dà la forma al pellet.

Raffreddamento e vagliatura

Una volta che il pellet fuoriesce dalla trafila, è ancora morbido e a temperature molto elevate che dipendono dal calore che si sviluppa durante la pressatura e in particolare all'attrito tra le diverse componenti. Per questo motivo, per assicurare l'indurimento del pellet e la perdita ulteriore di acqua, è necessario un raffreddamento immediato del prodotto. L'ideale sarebbe quello di portare il pellet ad una temperatura di circa 25°C.

Il raffreddamento avviene in un raffreddatore contro corrente o comunque grazie ad un dispositivo che soffia aria tra i pellet permettendo la perdita di calore. Dopo il raffreddamento avviene la fase di vagliatura, dove il pellet prodotto è sottoposto ad un vaglio vibrante che permette l'allontanamento delle particelle fini residue o del materiale che non è stato perfettamente pressato. Tutto quello che viene raccolto e separato dal pellet con la vagliatura viene in genere reinserito nel processo produttivo, in modo da limitare gli scarti di produzione.

Confezionamento, stoccaggio e trasporto del pellet

Una volta che il pellet è stato raccolto, hanno luogo le ultime fasi della filiera produttiva. Il pellet può essere confezionato in pacchi o in sacchi da 15 kg oppure in big-bag da 500 kg circa e consegnato grazie a un'autobotte. Il trasporto del materiale avviene quindi in funzione della tipologia di confezionamento utilizzata. Il pellet sfuso può subire una fase di stoccaggio intermedia in appositi magazzini. Prima della consegna finale il materiale viene sottoposto ad un'ulteriore vagliatura.

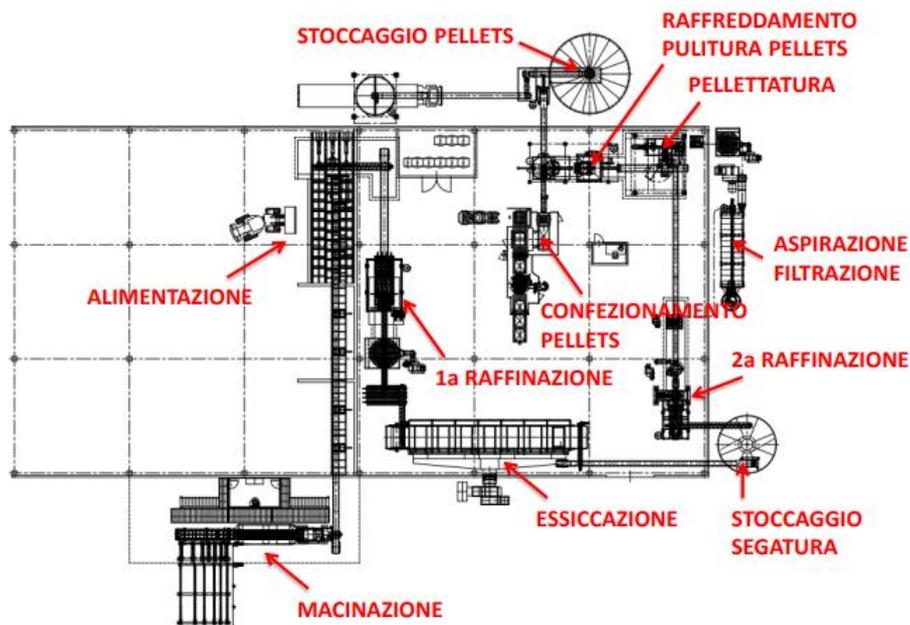


Figura 5: Schema dell'impianto di produzione del pellet [36].

Considerazioni del mercato del pellet

Nello scenario energetico mondiale, il pellet di legno rappresenta uno dei biocombustibili più tecnologicamente avanzati presenti attualmente sul mercato. È sicuramente quello che ha avuto negli ultimi anni il più ampio sviluppo sia a livello produttivo che di commercializzazione e di vendita. Il motivo principale di questa grande diffusione è da ricercare nel cambiamento degli standard e degli interessi di produzione dell'energia. Le biomasse hanno pian piano preso piede nel mercato globale dei combustibili, sostituendo in parte i tradizionali combustibili fossili. Questi ultimi infatti, sono diventati insostenibili sia a livello economico che ambientale.

Per quanto riguarda l'evoluzione dei consumi, secondo le ultime stime di AIEL (Associazione italiana Energie Agroforestali), la quantità di pellet utilizzata in Italia è raddoppiata negli ultimi dieci anni. Con oltre 3 milioni di tonnellate, l'Italia oggi è prima in Europa per consumo di pellet legato alla produzione di calore nel segmento residenziale, mentre in valore assoluto si piazza al terzo posto,

cedendo il passo ai grandi consumatori di pellet ad uso industriale come il Regno Unito e la Danimarca.

L'attenzione del mercato alla qualità del pellet è confermata dai dati del monitoraggio tra le aziende certificate ENplus in Italia (ENplus è un marchio di qualità del pellet ispirato al regolamento europeo e alla necessità della certificazione di qualità dell'impianto di produzione, la tracciabilità dei legnami e di tutta la filiera di produzione del pellet): la classe di qualità ENplus A1 rappresenta oltre il 90% delle quantità totali commercializzate in Italia. Considerando solo la distribuzione in autobotte, la classe A1 rappresenta addirittura il 97,8%. Per quanto riguarda le modalità di distribuzione del pellet si osserva l'assoluta prevalenza dei sacchetti, a seguire l'autobotte, mentre gli altri metodi di consegna del pellet sfuso (big-bag, cassone ribaltabile ecc.) presentano numeri residuali.

Infine per quanto riguarda i costi, il prezzo del pellet varia in base all'essenza del legno, alla sua purezza, alla certificazione del marchio (ENplus, Pellet Gold) e alla quantità di acquisto, partendo da un minimo di 3 euro ad un massimo di 5 euro per un sacchetto di 15 kg. Un basso costo rispetto ai prezzi sul mercato, potrebbe indicare una bassa resa calorica: un giusto prezzo è 30-32 euro al quintale, con picchi di 50 euro al quintale, in base alla quantità acquistata, e 200-300 euro a tonnellata se il pellet viene acquistato in bancali o aggregandosi in gruppi di acquisto.

Bricchettatura

Un'altra forma di combustibile ligno-cellulosico densificato di dimensioni superiori al pellet sono le bricchette, che vengono realizzati con diversi materiali e in diverse forme. Nel dettaglio abbiamo:

- prodotto della compressione di biomassa essiccata (10-15% di umidità) e tritata/polverizzata;
- materiali utilizzati (segatura, paglia, pula di riso, gusci di noci, gusci di caffè, cippato ecc.) con più o meno presenza di additivi.

Mediamente le bricchette hanno densità doppia rispetto alla legna da ardere e soprattutto bassa umidità, questo ne caratterizza l'ottima resa energetica. Peculiarità delle bricchette perciò è quella di trattenere maggiormente il calore rispetto alla legna da ardere, tutto a vantaggio del mantenimento delle elevate temperature all'interno della stufa o caldaia.

Il processo di produzione di bricchette, è molto simile a quella del pellet, necessita di trattamenti e condizionamenti delle matrici di partenza. In genere si tratta di mescole, magari con un prodotto prevalente, che quindi richiedono una omogeneità della mescola, aspetto che deve eventualmente interessare anche gli additivi. Le mescole (o i materiali che la compongono) devono essere precedentemente essiccate prima della compressione.

Considerazione del mercato delle bricchette

Per il mercato delle bricchette valgono le stesse considerazioni di complessità fatte per il pellet. Rispetto a quest'ultimo però presenta un dinamismo di mercato inferiore, ma la maggior variabilità del prodotto porta ad elementi di complessità superiori che rendono il mercato e la formazione del prezzo attualmente più aleatoria. Dal punto di vista della proposta logistico-commerciale, all'ingrosso è diffusa la vendita a bancali delle stesse dimensioni della legna a pezzi, quasi sempre incellofanati; al dettaglio le bricchette vengono proposte in scatole o sacchi di plastica tendenzialmente trasparenti del peso di 5 – 15 kg.

Il prezzo delle bricchette sul mercato nazionale si aggira tra [7]:

- prezzo all'ingrosso: 120 – 150 euro/t (accatastate su pellet);
- prezzo al dettaglio: 130 – 180 euro/t (sfuse o in cartoni di 10 – 15 kg).

3.3. Impianti termici domestici

3.3.1. Aspetti generali

Gli impianti termici in ambito residenziale si riferiscono in genere ad un insieme integrato di componenti e dotazioni impiantistiche con cui è possibile regolare la temperatura degli ambienti.

La più recente definizione di impianto termico è stata introdotta dalla Legge n°90/2013 che riporta: *“impianto tecnologico destinato ai servizi di climatizzazione invernale o estiva degli ambienti, con o senza produzione di acqua calda sanitaria, indipendentemente dal vettore energetico utilizzato, comprendente eventuali sistemi di produzione, distribuzione e utilizzazione del calore nonché gli organi di regolarizzazione e controllo. Non sono considerati impianti termici apparecchi quali: stufe, caminetti, apparecchi di riscaldamento localizzato ad energia radiante; tali apparecchi, se fissi, sono tuttavia assimilati agli impianti termici quando la somma delle potenze nominali del focolare degli apparecchi al servizio della singola unità immobiliare è maggiore o uguale a 5 kW”.*

La finalità principale dell'impianto termico è quindi quella di raggiungere e mantenere il comfort abitativo tramite l'apporto del vettore energetico richiesto.

Gli impianti termici nel complesso, ciò vale anche per quelli alimentati a biocombustibili solidi, sono costituiti da tre componenti principali: generatore di calore, terminali scaldanti, tubazioni e materiali vari.

Generatori di calore

Il generatore di calore (Figura 6) è la macchina che opera la produzione di calore per combustione per poi cederlo al fluido termovettore, ovvero al fluido che consente la distribuzione del calore ai terminali scaldanti. Il fluido termovettore utilizzato negli impianti termici ad uso civile è l'acqua.

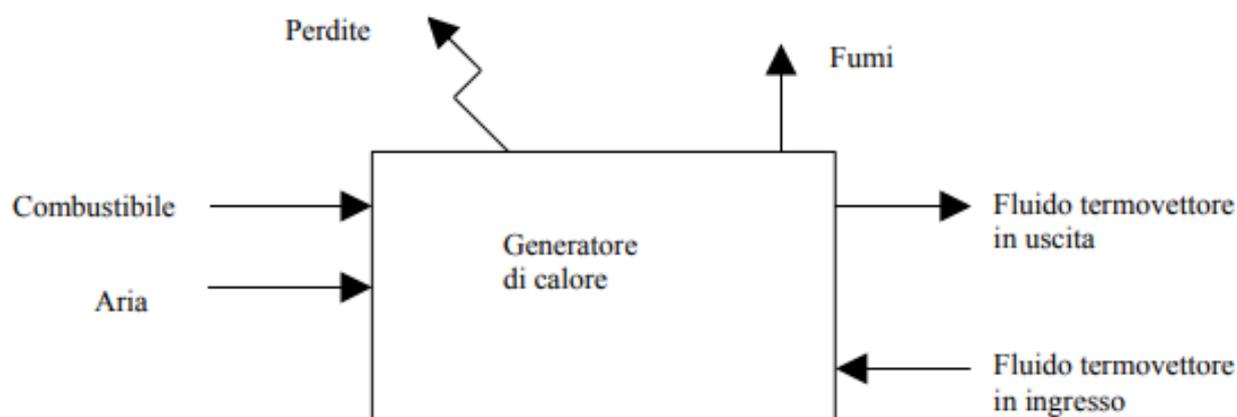


Figura 6: Schema generale del generatore di calore [10].

Prendendo in considerazione l'analisi energetica della macchina le perdite principali di questa sono:

- Perdite al camino: sono dovute dal fatto che i fumi abbandonano la macchina ad una temperatura superiore a quella ambiente asportando calore.
- Perdite al mantello: sono dovute ai difetti di isolamento della camera di combustione; in altre parole del calore che si sviluppa internamente alla macchina viene ceduto all'ambiente circostante anziché al fluido termovettore.
- Perdite per incombusti: sono dovute al fatto che una percentuale, seppur minima, del combustibile non partecipa alla combustione e viene espulso direttamente con i fumi.

I generatori di calore di medio-grandi potenze sono costituiti in linea di principio da due componenti fondamentali: il bruciatore, dove viene preparata e accesa la miscela aria/combustibile, e la caldaia dove avviene lo scambio di calore tra fumi e fluido termovettore.

Terminali scaldanti

Sono quei dispositivi che trasferiscono all'ambiente in cui sono installati il calore prodotto dai generatori di calore. Le principali tipologie di terminali scaldanti sono di seguito riportati:

- Radiatori: sono corpi scaldanti (ad elementi, a piastra, a tubi o a lamelle) che cedono calore per convezione naturale ed irraggiamento. La percentuale di potenza termica ceduta per irraggiamento è di circa il 30% della potenza del radiatore. In base al materiale con cui sono costruiti, i radiatori possono essere suddivisi in vari tipi (in ghisa, in acciaio e in alluminio).
- Termoconvettori e ventilconvettori: sono terminali che cedono o sottraggono calore all'ambiente per convezione naturale e forzata rispettivamente. Sono costituiti essenzialmente da:
 - uno o due batterie alettate di scambio termico;
 - ventilatori centrifughi o tangenziali;
 - un filtro dell'aria;
 - una bacinella di raccolta condensa e
 - un involucro di contenimento (mobiletto).

Si utilizzano per riscaldare e raffreddare abitazioni, uffici, sale riunioni, alberghi, ospedali ecc.

- Pannelli radianti: si ottengono annegando nelle strutture murarie del pavimento o della parete dei tubi in materiale plastico all'interno dei quali scorre acqua calda intorno ai 40°C. Lo sviluppo della tubazione può essere a spirale o a serpentina come riportato in figura sotto (Figura 7). I principali vantaggi del riscaldamento a pannelli radianti rispetto all'utilizzo di radiatori o termoconvettori vanno dal risparmio energetico, miglior qualità dell'aria, date le basse temperature di esercizio che evitano la cottura del pulviscolo atmosferico, un miglior benessere termico e un minor impatto ambientale. Per conto si ha un maggior costo sia in fase di realizzazione che di progettazione.

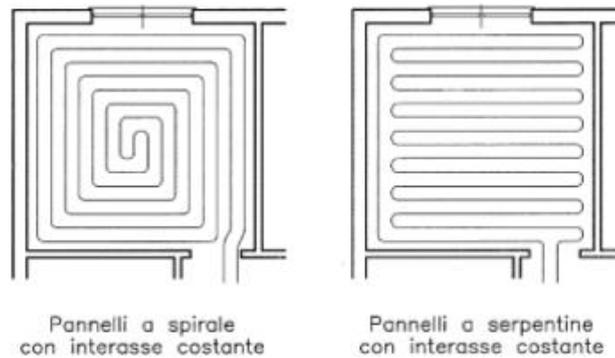


Figura 7: Esempi di pannelli radianti con tubazione a spirale a sinistra e a serpentina a destra [10].

Tubazioni e materiali

Per quanto riguarda le tubazioni degli impianti termici se ne possono trovare di vari materiali:

- Tubi in acciaio: a seconda da come vengono fabbricati, in commercio sono presenti in varie tipologie: tubi in acciaio trafilato senza saldatura, tubi saldati. La protezione contro corrosione è ottenuta, a seconda dei campi di impiego, mediante zincatura o ricoprendo il tubo con resine o bitume.
- Tubi in materiale plastico: sono utilizzati soprattutto negli impianti di riscaldamento, negli impianti idrici e di scarico. La scelta di questi tubi deve essere fatta con attenzione, in particolare si deve verificare l'attendibilità delle prove e dei collaudi attestanti la loro resistenza a lungo termine (di norma si fa riferimento ad un periodo di 50 anni).
- Tubi in rame: sono utilizzati sia per gli impianti termici (piccole potenze) che per gli impianti idrosanitari anche se ultimamente sono quasi completamente sostituiti dai tubi di materiale plastico. I raccordi fra tubi in rame avviene tramite "brasatura dolce" utilizzando cioè come materiale d'apporto lo stagno.

Nei prossimi paragrafi vengono descritti i principali generatori di calore a biomassa solida: camini e termocamini, stufe e caldaie domestiche (le caldaie a differenza di camini e stufe possono essere anche a gas).

3.3.2. Camini e termocamini

Camini

Il camino è considerato il sistema primordiale e il più semplice per il riscaldamento domestico. Essi sono costituiti da una struttura muraria e sono elementi inamovibili, richiedono sempre una presa d'aria esterna rispetto all'ambiente di installazione e una canna fumaria di grandi dimensioni, proporzionata alla potenza termica e quasi mai inferiore al diametro di 20 cm. La loro caratteristica principale è di avere il focolare aperto direttamente nell'ambiente di installazione il che li rende elementi esteticamente molto gradevoli pur con il loro scarso rendimento: la percentuale di calore

che viene effettivamente ceduta all'ambiente è infatti molto variabile tra il 10 e l'80%, inoltre la maggior parte del calore si disperde verso l'alto, nella cappa e nella canna fumaria generando una elevata perdita termica. In base alla camera di combustione si possono distinguere due tipi di camini: camini aperti e camini chiusi (Figura 8 - 9).

I primi presentano la camera di combustione aperta, pertanto il focolare è a diretto contatto con l'ambiente. La resa termica di questi camini è molto bassa nell'ordine di 10 – 15%; inoltre, la loro autonomia è assai limitata, in quanto non è possibile regolarne l'aria di combustione.

Per cercare di aumentare la loro resa, si possono utilizzare sistemi che recuperano calore, sia dalle fiamme che dai fumi, per cederlo poi all'ambiente sotto forma di aria calda. Oggigiorno sono presenti diversi sistemi innovativi che permettono di raggiungere risultati ottimali sia dal punto vista dei rendimenti che dei consumi. A titolo di esempio si prende in esame uno di questi sistemi: trasformare il tradizionale caminetto aperto in un caminetto termico mediante un apparecchio detto caminetto-stufa.

In questo modo si trasforma il camino tradizionale in un camino chiuso, lasciandone inalterata la struttura esistente e sfruttando non solo la funzionalità ritrovata ma la potenza termica che questo può cedere all'ambiente. La caratteristica di questi camini è che la camera di combustione, realizzata completamente in ghisa, permette di unire una grande stabilità ad un rapido accumulo di calore, fondamentale per lo scambio termico e quindi per la resa calorica ceduta all'ambiente. Infine la doppia combustione permette la riaccensione dei fumi o dei gas incombusti ottenendo due importanti risultati contemporaneamente: aumento di rendimento di combustione in caldaia e la diminuzione dell'emissione di monossido di carbonio in ambiente che permette di ottenere alti rendimenti coniugati con bassi consumi.



Figura 8: Camino aperto [21].



Figura 9: Camino chiuso [21].

I caminetti chiusi hanno la camera di combustione chiusa e separata dall'ambiente da uno schermo con portello in vetro. Sono realizzati con monoblocchi prefabbricati in ghisa o in acciaio. Le pareti

sono in intercapedine e al loro interno circola aria calda utilizzabile sia per riscaldare il locale del camino sia dei locali adiacenti (con l'uso di appositi canali flessibili).

Rispetto ai camini aperti, quelli chiusi offrono maggiori vantaggi quali:

- una migliore resa termica: si possono ottenere anche valori compresi tra il 70 e l'80%;
- una maggiore autonomia, che deriva dal poter regolare meglio l'aria di combustione.

Gli svantaggi sono invece dovuti dal fatto che i caminetti chiusi costano di più e possono imporre soluzioni, d'ordine estetico, meno valide di quelle ottenibili con i camini aperti.

Termocamini

Il termocamino può essere considerato come sistema alternativo al tradizionale camino a legna, il cui funzionamento si basa sullo sfruttamento di materiale come legno e pellet per un elevato rendimento termico.

Si presenta alla vista come un vero e proprio camino, ma dotato di uno sportello di vetro termico che genera una camera chiusa, incrementando l'efficienza rispetto a quella del camino tradizionale.

Questo sistema a camera chiusa si differenzia dal camino tradizionale, ma è caratterizzato dalle tipiche tre zone, la cui struttura varia a seconda che si tratti di un camino ad aria o ad acqua:

- **focolare:** fulcro del sistema in cui avviene il processo di combustione, rivestito di materiali termoisolanti;
- **cappa:** zona in cui vengono convogliati i fumi;
- **canna fumaria:** responsabile della raccolta e fuoriuscita dei fumi attraverso il comignolo.

I termocamini possono essere affiancati a un sistema tradizionale (es: caldaia ad uso domestico), oppure usati in modo autonomo, ma grazie alla combustione di legna o pellet, la quantità di energia consumata sarà minore; inoltre, si possono ottenere sia il riscaldamento domestico, che – nel caso di termocamino ad acqua – la produzione di acqua calda sanitaria.

Esistono due tipologie di termocamini, che si distinguono per il mezzo attraverso cui viene diffuso il calore all'interno degli ambienti domestici: termocamino ad aria e termocamino ad acqua.

Il termocamino ad aria è molto simile a quello tradizionale, in quanto il calore generato dalla combustione scalda dell'aria, che viene diffusa all'interno della casa. La differenza sta proprio nell'efficienza con cui svolge questa funzione: l'aria riscaldata, infatti, non viene dispersa direttamente nell'ambiente in cui si trova il camino, ma si riscalda all'interno di un'intercapedine, da cui viene distribuita attraverso apposite bocchette e canalizzazioni che mandano il calore a tutti gli ambienti di casa.

Nel termocamino ad acqua invece il calore prodotto dal processo di combustione viene utilizzato per riscaldare dell'acqua che può alimentare il riscaldamento a pavimento o i termosifoni. Il vantaggio principale del termocamino ad acqua è quindi quello di produrre calore e acqua calda con un unico strumento, che si presenta come una valida alternativa alle caldaie.

I termocamini, come detto in precedenza, possono essere alimentati mediante l'utilizzo di legna o pellet, materiali caratterizzati da rese e caratteristiche differenti.

Il termocamino a legna ha il vantaggio di utilizzare un combustibile economico e dall'elevato rendimento termico, capace di riscaldare in modo uniforme ed omogeneo il 70% dell'abitazione. Nello specifico, la tipologia di legno più adatta al riscaldamento domestico è il legno duro e stagionato, caratterizzato da una maggiore densità e da una combustione più lenta e duratura, nonché da una maggiore facilità di accensione dovuta al ridotto quantitativo di umidità. I termocamini a legna possono essere gestiti solo manualmente, senza possibilità di regolare la potenza in base alle temperature, a differenza di quanto avviene, invece, per i termocamini a pellet.

Il termocamino a pellet è caratterizzato da una camera di stoccaggio del pellet e da una coclea, che permette il passaggio del materiale da bruciare fino alla camera di combustione ed è accessibile per mezzo di un vetro termico che può resistere a temperature fino a 800°C.

Come conseguenza questa soluzione presenta diversi vantaggi rispetto a un sistema basato sulla combustione di legna tra cui maggior potere calorifico, maggior risparmio economico e facilità di trasporto e stoccaggio. Inoltre, i termocamini a pellet possono essere utilizzati collegandoli ad impianti di riscaldamento esistenti o in abbinamento a pannelli solari, garantendo massima efficienza energetica e sostenibilità.

3.3.3. Stufe

La stufa (Figura 10) è un apparecchio di combustione a legna e a pellet con focolare generalmente chiuso. Fornisce calore in forma radiante, in proporzioni diverse in relazione alle caratteristiche costruttive e allo schema di funzionamento adottati. E' utilizzata principalmente per il riscaldamento degli ambienti, per cucinare o scaldare cibo (in misura più ridotta), per produrre acqua calda ad uso domestico.

I vari tipi di stufa, al contrario del camino, possono risultare molto diversi fra loro in relazione alle concezioni costruttive, alle dimensioni ed ai materiali che le compongono. In genere però sono costituite da:

- **una presa d'aria**, con condotti o aperture per l'afflusso d'aria al focolare;
- **una camera di combustione**, ovvero un focolare composto di materiali ad alta resistenza termica, comunicante con il sistema di prelievo dell'aria e con quello di evacuazione dei fumi;
- **i giri di fumo**, cioè camere comunicanti posizionate nel corpo della stufa, fra il focolare e il raccordo fumario. In esse vengono convogliati i prodotti della combustione per sottrarre calore ai fumi, accumularlo e poi cederlo all'ambiente per radiazione e/o convezione;
- **intercapedini**, ricavate a ridosso del focolare o ai giri di fumo, che servono per riscaldare l'aria per contatto ed a immetterla nell'ambiente per convezione.

La diversità della stufa rispetto al caminetto risiede nella disponibilità di ampie superfici di scambio termico con l'ambiente, per la diffusione del calore sia in forma radiante che per convezione.

Le stufe ispirate alle forme tradizionali sostengono la forma di diffusione radiante del calore. Esse sono realizzate con materiali che accumulano nella loro massa grandi quantità di calore, da restituire poi con lentezza ai locali.

Funzionano invece per convezione, i modelli di più recente concezione, nei quali l'ampia vista del fuoco, entro camere di combustione chiuse da portelli di vetro, è associata ad una abbondante produzione di aria calda. L'aria calda può venire diffusa negli ambienti sia gradualmente per moto naturale (convezione naturale), oppure più velocemente (convezione forzata) con l'uso di elettroventilatori.

Esistono sul mercato due tipi di stufe ad aria che si distinguono in base al diverso modo di trasferimento del calore: stufe caminetto ad aria a convezione naturale e stufe caminetto ad aria a convezione forzata.



Figura 10: Stufa a legna [4].

Stufa caminetto ad aria a convezione naturale

La stufa caminetto ad aria a convezione naturale ha subito recentemente una serie di modifiche determinate da ragioni tecniche, normative e di efficienza, trasformandosi in stufa-caminetto e fondendo insieme i due sistemi di riscaldamento. Essa abbina infatti le caratteristiche del caminetto (funzionamento per irraggiamento, vista del fuoco), con quelli tipici della tradizionale stufa ad aria

calda (funzione prevalente per convenzione, maggiore possibilità di regolazione del calore, svincolamento dalla struttura muraria, combustione secondaria).

L'apparecchio è costituito fundamentalmente dalle seguenti parti:

- telaio portante in acciaio o in ghisa;
- prese distinte dell'aria primaria (comburente) e dell'aria per il riscaldamento dell'ambiente;
- focolare chiuso con braciere in ghisa, deflettori o rivestimento in ghisa o in materiale ceramico, porta in vetro ceramico;
- intercapedini per la convenzione dell'aria tra il focolare e il rivestimento esterno;
- raccordo fumario;
- rivestimento esterno ceramico o in acciaio.

Il funzionamento prevede la possibilità di afflusso dell'aria al focolare sia direttamente dall'esterno, con appositi condotti collegati alla presa dell'aria, sia dall'interno del locale. La produzione di aria calda avviene per convenzione naturale entro l'intercapedine tra focolare e rivestimento. Quest'ultimo assorbe ed accumula energia termica dall'aria surriscaldata per contatto e la irradia poi all'ambiente circostante. La diffusione dell'aria calda avviene invece attraverso griglie o aperture ricavate nella parete alta degli apparecchi.

Stufa caminetto ad aria a convenzione forzata

Questi apparecchi sono stati costituiti per aumentare efficienza e prestazioni della stufa-caminetto a convenzione naturale, mediante abbinamento con elettroventilatori.

La stufa-caminetto a convenzione forzata, oltre alle prestazioni di quella a convenzione naturale, ha il vantaggio di poter riscaldare i locali con maggiore velocità ed omogeneità, compresi quelli lontani dalla stufa o posti su altri piani.

I componenti sono gli stessi del modello precedente con l'aggiunta di:

- uno o più elettroventilatori capaci di trattare ingenti volumi d'aria (anche centinaia di metricubi/ora);
- sonde termostatiche;
- dispositivi elettronici di controllo e di comando.

Il principio di funzionamento è molto simile a quello del modello a convenzione naturale. Quando la temperatura dell'aria, rilevata da apposite termosonde, rientra entro i parametri programmati, mediante dispositivi elettronici automatici o radiocomandati si attivano uno o più ventilatori generalmente collocati nella parte inferiore dell'apparecchio. A seconda dei tipi e dei modelli, il flusso forzato di aria calda può essere immesso nell'ambiente dall'alto o dal basso.

Può anche essere convogliato entro apposite canalizzazioni isolate e distribuito negli ambienti attraverso pareti, solai, intercapedini, per venire immesso nei locali adiacenti. In questo caso è opportuno che le porte dei vani interessati siano dotati di aperture per consentire il riflusso dell'aria verso il generatore.

Stufe a pellet

Le stufe a pellet (Figura 11) è un tipo particolare di stufa-caminetto automatica con fuoco a vista, lunga autonomia e alto rendimento, funzionante con combustibile legnoso in forma di ovuli di legno (appunto i pellet). Ne esistono due distinte versioni:

- **stufa a pellet ad aria:** che fornisce calore utile prevalentemente in forma radiante e il rimanente per convezione;
- **stufa-caldia a pellet:** che riscalda acqua per il riscaldamento degli ambienti e per uso sanitario, applicando un adeguato scambiatore.

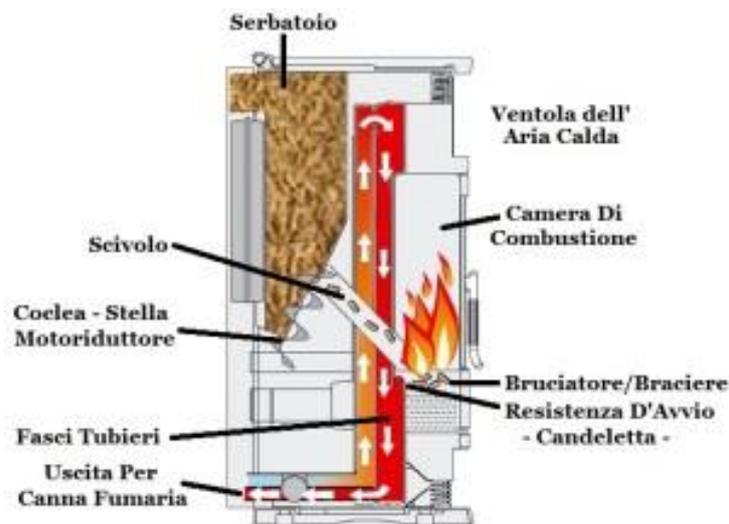


Figura 11: Schema di funzionamento di una stufa a pellet [32].

La lunga autonomia (fino a 100 ore di funzionamento) è resa possibile dall'utilizzo di combustibile a pezzatura omogenea che viene prelevato dal serbatoio, dosato e immesso nel focolare da un dispositivo completamente automatico. Previa opportuna regolazione, può funzionare anche con legna di piccola pezzatura.

L'apparecchio è composto da un focolare in ghisa ad alto spessore o in materiale ceramico refrattario le cui pareti funzionano anche da volano termico in modo del tutto simile alle stufe-camino o ai termocamini. Nei tipi ad irraggiamento, entro uno scambiatore di calore adiacente al focolare, per mezzo di un ventilatore, viene soffiata dell'aria che, riscaldata per contatto, viene poi diffusa nei locali per convezione. Nei tipi a caldaia invece, circa il 70% del calore prodotto dalla combustione viene ceduto all'acqua del circuito dei termosifoni.

La gestione dell'apparecchio avviene attraverso:

- **il caricamento:** che si effettua versando il combustibile nel serbatoio che si trova dietro il focolare;
- **l'accensione:** che avviene di norma attraverso un innesco di tipo elettronico (senza bisogno di fiammiferi o accendifuoco);

- **la regolazione:** che viene effettuata per mezzo di una centralina elettronica che permette di programmare la quantità di calore da erogare e le fasce orarie di riscaldamento giornaliero e settimanale.

Dopodiché la stufa continua a funzionare in completo automatismo interagendo con tutti i parametri della combustione fino all'eventuale spegnimento in caso di assenza di ricarica.

3.3.4. Caldaie domestiche

Un altro impianto termico domestico molto importante per riscaldamento degli ambienti e della produzione di acqua sanitaria sono le caldaie. Attualmente in commercio, esistono diverse tipologie di caldaie che possono essere distinte per:

1. collocazione: esterno o interno
2. tecnologia: tradizionali (camera aperta o camera stagna) o a condensazione
3. tipo di combustibile: gas (metano o gpl) o biomassa (legna o pellet)

A. per collocazione: caldaie da esterno o da interno

La caldaia può essere installata sia all'interno che all'esterno di un'abitazione in base alle esigenze di spazio.

Le caldaie da interno possono essere installate nella parete; sono caratterizzate da dimensioni ridotte e possono essere collocate e controllate all'interno dell'abitazione. Queste tipologie di caldaie sono dotate di una camera stagna (una camera chiusa che preleva l'aria dall'esterno) e di un condotto di scarico fumi dedicato o a parete. Per contenere dimensioni e spazi, in genere la caldaia da interno è disponibile sempre con un sistema istantaneo di produzione dell'acqua sanitaria che consente di avere una generazione dell'acqua calda più rapida anche se con un contenitore più piccolo ad esempio della caldaia tradizionale.

Le caldaie da esterno funzionano come quelle da interno ma sono realizzate con materiali idonei per resistere agli agenti atmosferici esterni. Oltre a dover essere necessariamente dotata della funzione antigelo; si distingue da una da interno per il fatto che è sottoposta al controllo di una centralina di comando a distanza, che consente di regolare la temperatura in base alle esigenze di riscaldamento (al fine di ridurre gli sprechi e le dispersioni termiche).

B. per tecnologia: caldaie tradizionali o a condensazione

Le caldaie tradizionali (Figura 12) sono distinte in due tipologie: a camera aperta e a camera stagna.

Le prime prelevano l'aria comburente dal locale in cui è installata con un tiraggio naturale e brucia l'aria presente all'interno del locale dove è installata. Perciò sono collegate ad una canna fumaria che permette, in sicurezza, che i fumi prodotta dalla combustione vengano scaricati all'esterno e

che non rientrano in casa o nel locale dove è stata installata. Necessitano quindi di una adeguata ventilazione per garantire un flusso d'aria sufficiente per il tiraggio della canna fumaria e che non si formi un eccesso di monossido di carbonio nel locale peraltro molto pericoloso e nocivo per la salute umana.

Le caldaie a camera stagna prelevano invece l'aria comburente dall'esterno con tiraggio forzato. La loro modalità di combustione è molto simile a quelle delle caldaie tradizionali a tiraggio naturale, la differenza consiste dal fatto che queste caldaie sono dotate di un ventilatore che serve ad incrementare e a tener controllata l'aria che attiva la combustione.

Un'evoluzione tecnica della caldaia tradizionale si è avuta con l'introduzione sul mercato della caldaia a condensazione (Figura 12). Questo tipo di generatore di calore può essere sia a basamento (posizionate a terra) che murale (posizionati a parete) ed ha come caratteristica principale quello del recupero del calore di condensazione. Difatti, i fumi prima di essere evacuati, vengono convogliati all'interno di uno scambiatore di calore che ne abbassa la temperatura così da recuperare calore. Questo tipo di caldaia ha un elettroventilatore che preleva l'aria esterna e forza l'espulsione dei prodotti della combustione verso il camino che si occuperà di disperderli. Grazie a questo meccanismo, la caldaia a condensazione garantirà un rendimento termico maggiore (superiore al 90%) del combustibile utilizzato e una riduzione sostanziale delle emissioni inquinanti disperse nell'atmosfera in virtù del recupero del calore di condensazione del vapore acqueo contenuto nei fumi della combustione.

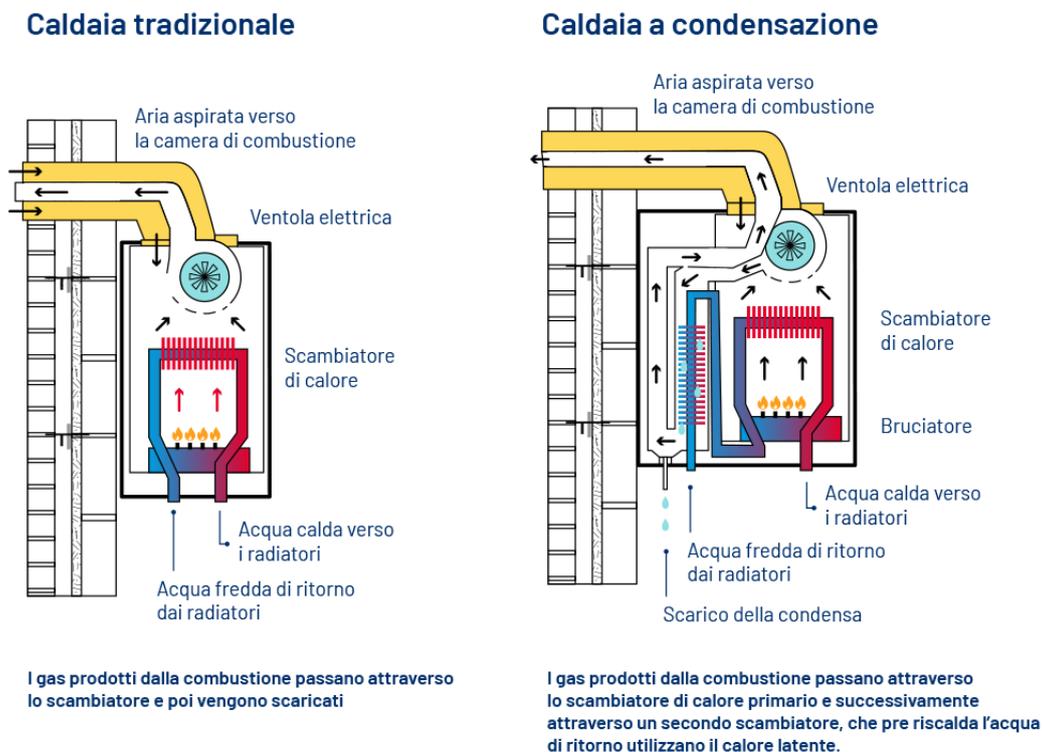


Figura 12: Schema di funzionamento della caldaia tradizionale a sinistra e della caldaia a condensazione a destra [5].

C. per combustibile: caldaie a gas o a biomasse

Le caldaie a gas sono attualmente quelle più diffuse nelle abitazioni perché il gas (in genere metano o gpl) è sempre stato il combustibile più utilizzato per alimentare gli impianti di riscaldamento. Se da un lato hanno l'inconveniente di aumentare la produzione di anidride carbonica dispersa nell'ambiente, dall'altro riducono drasticamente l'emissione di polveri sottili (PM₁₀ e PM_{2,5}) e di altri composti tossici e cancerogeni fino a 1000 volte rispetto agli apparecchi a biomassa.

Dal punto di vista ambientale, entrambi gli impianti a gas e a biomasse possono provocare inquinamento sebbene in maniera differente. La differenza la fa la tecnologia di installazione di nuovi impianti, con sistemi più efficienti e puliti, inoltre riveste grande importanza una manutenzione accurata e continua attua a ridurre al minimo gli impatti ambientali che questi impianti di riscaldamento possono provocare.

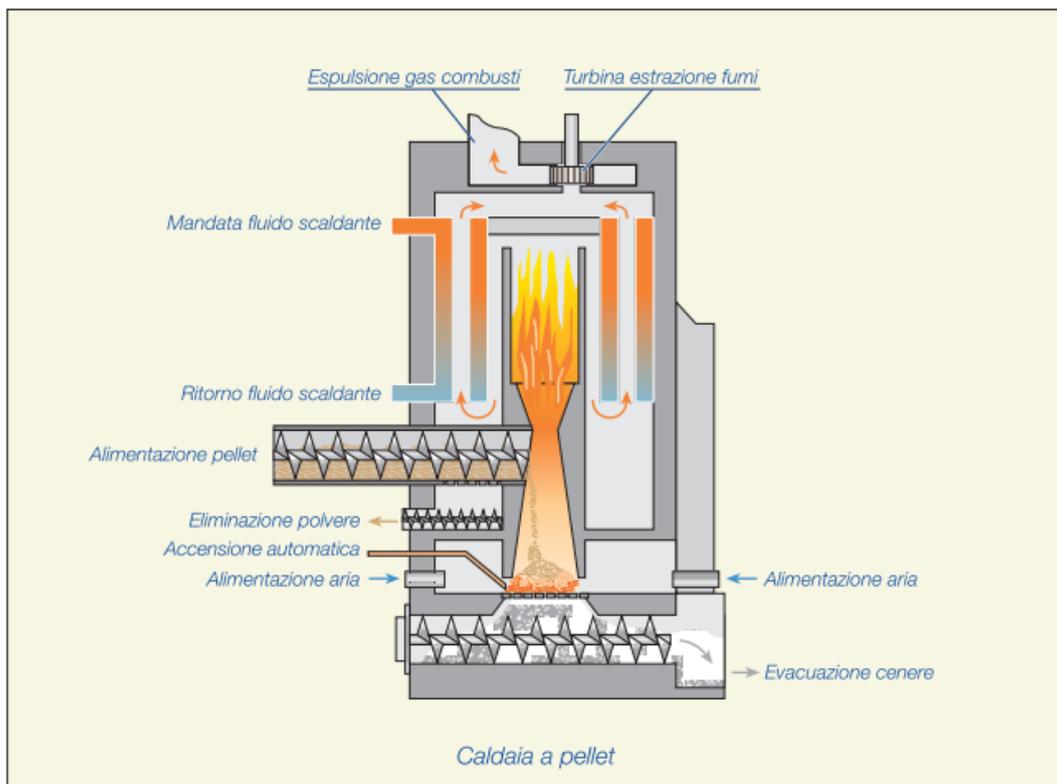


Figura 13: Schema di funzionamento della caldaia a pellet [21].

Le caldaie a biomassa hanno dimensioni maggiori rispetto alle caldaie a gas perché devono ospitare al loro interno una rilevante quantità di combustibile come la legna o il pellet. Per questo motivo devono essere installate in uno spazio molto grande in cui sia privo il rischio di incendio e possibilmente vicino al luogo in cui viene conservato il combustibile che le alimenta.

Nonostante le caldaie a biomasse abbiano un costo d'acquisto maggiore rispetto alle caldaie a gas, queste hanno il vantaggio di ridurre le spese di gestione perché il costo della legna o del pellet è

decisamente inferiore a quello del gas. In linea di massima, una caldaia a biomassa riesce, a far risparmiare in termini economici tra il 30 e il 50% rispetto agli impianti di riscaldamento tradizionali.

Per quanto riguarda la quantità di anidride carbonica prodotta, l'utilizzo di biomasse legnose è considerato uno dei sistemi più efficienti per la riduzione dei gas serra: a differenza dei combustibili fossili, infatti, la CO₂ emessa durante la combustione è compensata da quella assorbita dalle piante durante la crescita, e non si accumula quindi nell'ambiente come invece può avvenire con le caldaie a gas. Infatti, queste caldaie possono essere considerate ecologiche perché hanno basse emissioni di zolfo e altri inquinanti atmosferici e l'impiego di combustibili quali il pellet o la legna contribuisce a ridurre la dipendenza da fonti non rinnovabili quali il petrolio o i gas naturali stessi.

Per le caldaie a biomasse a titolo di esempio si prendono in esame le caldaie a pellet (Figura 13).

Sono caldaie completamente automatizzate e con regolazioni in genere facili e semplici da gestire. L'alimentazione è ottenuta con una vite senza fine che preleva il pellet dall'apposito contenitore e li trasporta fino al bruciatore; una vite senza fine prevede anche all'espulsione delle ceneri.

L'accensione, di tipo automatico, è molto rapida ed è ottenuta con l'aiuto di una resistenza elettrica. Nei sistemi più evoluti, l'alimentazione dell'aria e il flusso del pellet sono regolati con microprocessori. In mancanza di corrente elettrica o in caso di fermo della pompa di circolazione, il rischio che l'acqua vada in ebollizione è molto limitato sia perché è possibile il blocco immediato dell'alimentazione dei pellet, sia per il poco combustibile presente nel focolare.

Le rese termiche di queste caldaie sono in genere molto elevate, nell'ordine del 85 – 90%, e basso è il loro tasso di inquinamento all'ambiente, quindi possono essere considerate delle valide alternative alle tradizionali caldaie a gas.

3.3.5. Sistemi di abbattimento degli impianti termici domestici

La riduzione delle emissioni nocive attraverso i fumi e gli affluenti degli impianti termici domestici a biomassa può essere realizzata evitando la creazione di tali sostanze (misure primarie) o rimuovendo le sostanze dai fumi (misure secondarie). Perciò possiamo distinguere questi due metodi di base affermando che una misura primaria è una modifica del processo di combustione (es. iniezione di calcare nel forno) mentre una misura secondaria avviene dopo il processo di combustione (es. iniezione di ammoniaca nel canale dei fumi).

Le misure di riduzione delle emissioni primarie hanno l'obiettivo di prevenire o ridurre le formazioni/riduzioni delle emissioni all'interno della camera di combustione. Sono presenti diversi tecniche possibili ognuna con i propri metodi e caratteristiche:

- modifica della composizione, umidità, dimensione delle particelle del carburante;
- selezione del tipo di apparecchiatura di combustione;
- ottimizzazione del controllo del processo di combustione;
- combustione dell'aria in stadi;

- convertitori catalitici.

Per quanto riguarda le misure della riduzione delle emissioni secondarie, a seguito della combustione negli impianti termici, parte della cenere rimane sulla griglia mentre una parte non trascurabile viene trascinata dai gas di combustione; le polveri più fini si formano, per la maggior parte successivamente per effetto di reazioni chimiche. Le ceneri volanti grossolane sono caratterizzate da un diametro di 200-500 micron con composizione chimica simile a quella delle ceneri del letto di combustione. L'aerosol fine è generato invece dalla condensazione delle specie inorganiche, come metalli alcalini ed alcuni composti di metalli pesanti, che possono anche condensare sulla superficie delle particelle grossolane.

Come principali tecniche per la riduzione delle emissioni secondarie abbiamo:

- cicloni
- elettrofiltri (ESP)
- filtri a maniche

Nei **depolveratori a ciclone** (Figura 14) il gas inquinato viene sottoposto ad un movimento rotatorio, sotto l'azione della forza centrifuga, le particelle si dirigono verso le pareti dei cicloni dove si agglomerano e, sotto l'azione della forza peso, vengono a cadere nella tramoggia posta alla base del ciclone. Si tende a realizzare delle batterie formate da più cicloni posti in parallelo o gruppi di cicloni posti in serie (multicicloni). Questa tecnologia non permette di captare particelle di diametro inferiore ai 5 – 10 micron, lasciando così passare la maggior parte dei metalli pesanti condensati sulle particelle di diametro inferiore.

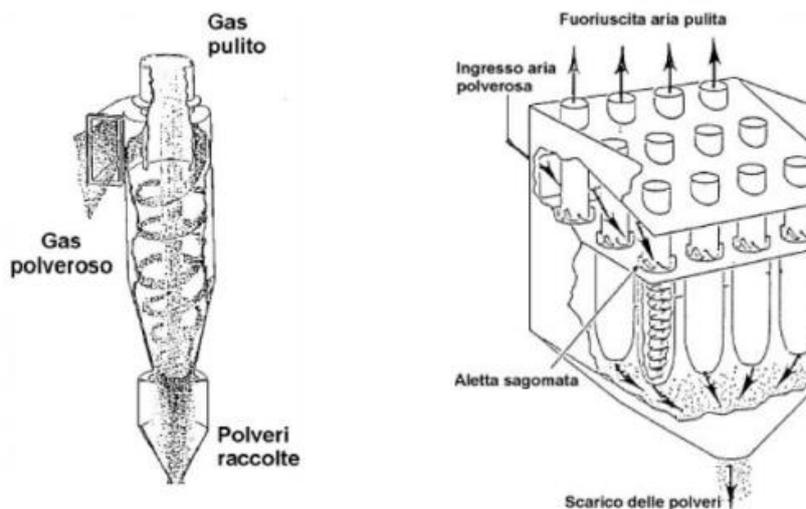


Figura 14: Ciclone a sinistra e multiciclone a destra [3].

Gli **elettrofiltri** (detti anche precipitatori elettrostatici) sono sistemi di depurazione che consentono la separazione di particolato, sia solido, che liquido, dal flusso di gas. Il sistema permette la

separazione delle particelle contaminanti sfruttando la differenza di potenziale indotta tra due elettrodi, attraverso i quali viene fatto fluire il gas contaminato. Il flusso di gas viene ionizzato e gli ioni tendono a spostarsi verso gli elettrodi di raccolta, entrano in collisione con le particelle in sospensione cedono la loro carica elettrica. Le polveri cariche vengono quindi attratte verso gli elettrodi dove sono trattenute e successivamente rimosse. Esistono anche precipitatori che lavorano in umido, tramite utilizzo di acqua riescono a catturare le particelle. I sistemi ad umido sono molto più efficienti perché riescono ad intrappolare anche le particelle più fini, di contro presentano il problema di smaltire il residuo inquinato liquido che si crea alla fine del processo.

I filtri elettrostatici sono caratterizzati da un'elevata efficienza di depolverazione (anche maggiore del 90%) che risulta tuttavia influenzata dalla granulometria e resistività delle particelle e dalla possibilità di recuperare i contaminanti in fase solida. Limiti all'impiego di questa tecnica sono rappresentati dagli alti costi, sia dal punto di vista dell'installazione che della gestione, e inoltre dagli ingombri non trascurabili determinati dalla necessità di impiegare più sezioni di trattamento per realizzare flussi di aria con velocità contenute.

I **filtri a maniche** (Figura 15) sono costituiti da un tessuto tubolare sostenuto da un cestello portante interno metallico. Il grado di separazione è influenzato dallo spessore dello strato filtrante, dal diametro delle fibre, dalle dimensioni e dalla velocità delle particelle. I vantaggi di questo tipo di tecnologia sono un'alta efficienza di captazione associata a bassi costi di installazione, mentre gli svantaggi sono una manutenzione con scadenze precise e la non idoneità per fumi caldi e umidi.

La resa maggiore per questo sistema si ha per basse concentrazioni di polveri, pertanto è pratica comune quello di installare un ciclone a monte del filtro a maniche. Per poter conservare la concentrazione delle polveri a valori inferiori a 30 mg/Nm^3 , tale sistema di abbattimento risulta quello più utilizzato avendo l'accortezza che i fumi che attraversano il materiale filtrante siano secchi o ad una temperatura tale che l'acqua presente sia allo stato gassoso.

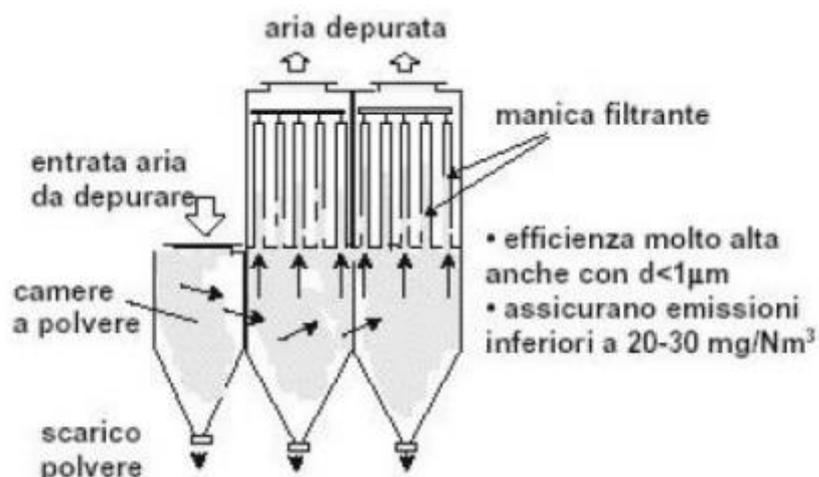


Figura 15: Filtri a maniche [3].

Capitolo 4

MATERIALI & METODI

4.1. Fonti bibliografiche per i fattori di emissione

Il lavoro di tesi – che mira a valutare gli impatti ambientali di apparecchi termici domestici – si basa esclusivamente sul recupero di dati di letteratura tecnica e scientifica del settore. In particolare: sono stati individuati alcune informazioni da testi scientifici relativamente ai valori di emissione dei PM a varie dimensioni (per semplicità il PM totale e il PM 10 sono stati considerati assieme riferendosi al valore più elevato) integrate di una serie particolareggiata di informazioni di contesto quali, il tipo di impianto termico domestico e la forma di biocombustibile utilizzato nello studio. La preferenza è ricaduta su quelle fonti che esprimono i valori di emissione del particolato solo per l'unità di misura di massa/energia (mg/MJ) convertendo il dato quando ne è stato necessario. Le pubblicazioni sono state reperite attraverso la banca dati Elsevier e da centri di ricerca che lavorano sui temi ambientali e sull'uso energetico di fonti rinnovabili a biomasse solide.

Al fine di fornire un'idea dell'origine dei dati di questa tesi di seguito in tabella sono riportati il titolo e gli autori delle fonti prese in letteratura per l'ottenimento dei primi valori di emissione dei PM.

Quanto riportato in tabella rappresenta dunque solo una parte dei lavori o documenti consultati, rispettando i requisiti sopra riportati ed essendo associati ad un quadro informativo sufficientemente coerente per l'indagine. In molti casi i dati sono stati scartati in quanto incompleti o relative a condizioni particolari di utilizzo degli impianti termici, come ad esempio test in programmi di ricerca, uso di combustibile non idoneo ecc.. Va detto infatti che anche i dati raccolti soffrono di relativa omogeneità e coerenza essendo provenienti da diverse fonti. Questo significa comparare dati ottenuti con tecniche di misura differenti, con metodologie anche non in linea con quelle attuali, in sistemi termici con livello differente di manutenzione e così e via.

Tabella n.1: Elenco delle fonti prese in letteratura per i valori di emissione dei PM

Titolo	Autore	Pubblicazione
An overview of particulate emissions from residential biomass combustion	Vicente et al. (2018)	Atmospheric Research 199
Emission reduction potentials of improved cookstoves and their issues in adoption	Sharma et al. (2017)	Journal of Environmental Management
Pollutants from the combustion of solid biomass fuels	Williams et al. (2011)	Progress in Energy and Combustion Science
Studio comparativo sulle emissioni di apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet	INNOVHUB (2016)	
Indagine sui fattori di emissione della combustione delle biomasse negli impianti per Nzeb	ENEA (2017)	
Inventory of fine particulate organic compound emissions from residential wood combustion in Portugal	Goncalves et al. (2011)	CESAM
Particulate, black carbon and organic emissions from small-scale residential wood combustion appliances in Switzerland	Meyer et al. (2012)	Biomass and Bioenergy 36
Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves	Bafver et al. (2011)	Biomass and Bioenergy 35
Influence of the type and output domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter	Horak et al. (2020)	Atmospheric Environmental 229
Emissions of particulate matter, carbon monoxide and nitrogen oxides from the residential burning of waste paper briquettes and other fuels	Xiu et al. (2018)	Environmental Research 167
Comparative emissions characterization of a small-scale wood chip-fired boiler and an oil-fired boiler in a school setting	Rector et al. (2017)	Biomass and Bioenergy 107

4.2. Analisi dati fattori emissione

I dati ottenuti dall'analisi delle fonti bibliografiche sono stati oggetto di lavoro su foglio di calcolo Excel applicando delle statistiche descrittive di base finalizzate a far emergere differenze tra i diversi combustibili ed i diversi tipi di impianti. In particolare, questi sono rappresentati da:

- Caldaia a cippato
- Caldaia a pellet
- Stufa a pellet
- Stufa moderna a legna
- Stufa tradizionale a legna
- Camino chiuso a legna

- Camino aperto a legna

L'analisi statistica è stata sviluppata al fine di confrontare dati medi, range e valori minimi e massimi per ciascuna di queste categorie di impianti e tenendo conto del prodotto combustibile utilizzato (pellet, legna da ardere, cippato). Per semplificare l'analisi i risultati di sintesi si riferiscono in modo particolare al PM totale lasciando in secondo piano i dati relativi al PM 2,5 e PM 1. Le differenti fonti sono omogenee e rischiano di sviluppare dei confronti fuorvianti. In generale l'analisi di sintesi – necessaria per avere un primo confronto dei dati - mostra i livelli medi di impatto come fattore di emissione prodotta dai singoli apparecchi termici e dal tipo di biocombustibile usato.

4.3. Dati di consumo di biocombustibile in Italia

In questo caso, è stata fatta una ricerca bibliografica per reperire dati sul numero di impianti termici domestici utilizzati in Italia e il relativo consumo totale delle diverse forme di biocombustibile legnose più utilizzate nel nostro Paese, ovvero legna da ardere, pellet e cippato di legno.

Attraverso i dati dei consumi e del numero totale degli impianti sono stati calcolati, il totale dei consumi per i diversi biocombustibili solidi, ognuna rapportata in base al tipo di impianto termico. I dati sono stati recuperati da fonti bibliografiche di tipo tecnico divulgativo. Queste rappresentano delle stime di massima essendo quello dei biocombustibili un settore in cui ci sono difficoltà nel monitorare con precisione l'andamento del mercato. Spesso i dati dei consumi sono forniti in relazione al tipo di apparecchio. Nelle valutazioni del consumo specifico di combustibile per singolo impianto termico – poi utile per fare un conto sul fattore di emissione prodotto – si è tenuto conto del potenziale consumo di ciascun sistema. Nello specifico si è stabilito che le caldaie a pellet consumano 3 volte quello che è il consumo delle stufe a pellet (stima molto indicativa) cercando quindi di stimare al meglio la distribuzione dei consumi specifici partendo dal consumo totale di pellet in Italia rapportata al numero di apparecchi termici.

4.4. Calcolo delle emissioni prodotte dai diversi sistemi combustibile-impianto

La fase finale del lavoro è relativa al calcolo delle emissioni prodotte dalle diverse categorie di combustibile-impianto con l'ausilio dei dati medi di fattore di emissione e di consumo specifico per impianto ottenuti in precedenza. Il prodotto di questi due parametri ci consente di ottenere la produzione media specifica di PM per ciascun apparecchio e quindi valutare il contributo totale (in tonnellate) in relazione al tipo di apparecchio-combustibile. Anche in questo caso è stata necessaria una semplificazione definendo il valore del potere calorifico sulla base di dati statistici del Potere

calorifico inferiore – attraverso una statistica dei dati di questo parametro per diverse tipologie di legno – ed un indicativo contenuto di umidità in relazione al prodotto combustibile impiegato.

I dati di produzione di PM per ciascuna tipologia di apparecchio in combinazione con i dati di consumo del biocombustibile consentono di stimare per ciascuno apparecchio-combustibile il peso complessivo in termini di fattore di emissione mostrando quindi per ogni categoria il diverso grado di incidenza di inquinamento delle polveri sottili.

Capitolo 5

RISULTATI

5.1. Introduzione

Il presente capitolo riporta i risultati della tesi ottenuti sulla base delle indicazioni stabilite nel Capitolo 4 “Materiale e Metodi” e seguendo l’ordine della metodologia di lavoro riportata nello stesso. Va subito premesso che i dati che seguono sono da considerare come indicativi essendoci delle incertezze e elementi di variabilità delle informazioni ottenute dall’analisi bibliografica. Tuttavia, si ritiene che il quadro prodotto consente di poter sviluppare alcune considerazioni sul tema delle emissioni, in termini di particolato, prodotte dagli apparecchi domestici a biomasse.

5.2. Fattori di emissione dei PM

In tabella 1 sono presenti i valori minimi, medi e massimi dei diversi tipi di PM calcolati per ogni categoria di impianto e biocombustibile. I dati sono espressi come massa su energia per poter effettuare un confronto tra le diverse applicazioni e tipologie di combustibili.

Tabella 1: Sintesi dei valori min – medi – max dei vari PM per tutte le categorie biocombustibile-impianto

Biocombustibile / impianto	PM tot (mg/MJ)			PM 2,5 (mg/MJ)			PM 1 (mg/MJ)		
	min	medio	max	min	medio	max	min	medio	max
Cippato / Caldaia	65.8	92.4	127.5		15.0			10.0	
Pellet / Stufa	64.1	62.2	94.4	30.0	40.7	120.0		21.0	
Pellet / Caldaia	30.0	38.5	61.0	49.2	52.1	79.2	25.5	32.6	51.7
Legna / Stufa convenzionale	380.0	760.0	1520.0	370.0	740.0	1480.0	55.5	64.9	74.2
Legna / Stufa generica	229.3	434.5	521.7	167.4	437.2	733.9		279.0	
Legna / Stufa moderna		114.7			42.3		46.1	46.7	47.2
Legna / Camino aperto	628.3	722.8	1315.7	313.4	694.9	1225.7		385.0	
Legna / Camino chiuso	290.0	441.3	760.0	223.0	397.6	620.0		428.5	

Da una prima analisi si può notare che ci sono alcune categorie con valori di emissione molto più elevate rispetto alle altre. Ad esempio, prendendo come riferimento solo il PM totale, si osserva che i valori di emissione più elevati si riscontrano negli impianti alimentati dalla legna da ardere in particolare le stufe e i camini aperti con valori superiori ai 700 mg/MJ; nel caso di camini chiusi il

livello si abbassa di oltre il 40% raggiungendo valori medi attorno ai 440 mg/MJ in parte simili alle stufe generiche. La situazione cambia nelle stufe moderne dove le emissioni si attestano su un valore medio di 114,7 mg/MJ. Di contro gli impianti alimentati con pellet e cippato mostrano valori molto più bassi che vanno dai 38,5 mg/MJ per le caldaie a pellet ai 62,2 mg/MJ delle stufe a pellet fino ai 92,4 mg/MJ delle caldaie a cippato. Lo stesso andamento si ripercuote anche per i valori dei PM 2,5 e PM 1 con valori molto più elevati per gli impianti a legna rispetto a quelli alimentati con pellet e cippato. A titolo di esempio si prende in riferimento il valore medio del PM 2,5 della stufa convenzionale a legna che è di 740 mg/MJ con il valore medio della stufa a pellet che è invece di 40,7 mg/MJ, si nota che quest'ultimo è più basso di 18 volte il valore della stufa a legna. Facendo un altro esempio prendendo come riferimento il PM 1 ovvero le polveri più sottili, il valore medio di emissione del camino chiuso a legna (428,5 mg/MJ) rispetto al valore medio della caldaia a pellet (32,6 mg/MJ) è 13 volte più elevato, mentre per la stufa a pellet con valore medio di 21 mg/MJ è 20 volte più elevato.

Va comunque sottolineato come già detto in precedenza che i dati raccolti soffrono di una relativa omogeneità e coerenza essendo presi da fonti differenti. Tuttavia, i valori riscontrati consentono di fare dei confronti evidenziando differenze importanti tra le varie situazioni.

5.3. Consumo dei biocombustibili in Italia

Dopo l'analisi sul valore di emissione del particolato sui vari impianti-biocombustibile sono stati individuati dati sul numero degli impianti termici domestici in Italia come riportato nella tabella sottostante.

Tabella 2: Numero complessivo impianti per la combustione domestica stimato dall'indagine campionaria nel nostro Paese (AIEL, 2018)

Tipo di impianto	N° apparecchi
Stufe a pellet	480.000
Stufe tradizionali a legna	990.000
Stufe moderne a legna	90.000
Camini chiusi	460.000
Camini aperti	470.000
Caldaie a pellet	50.000
Caldaia a cippato	1.500
Totale	2.541.500

Dalla tabella si nota che la categoria di impianti termici a biomasse di tipo domestico ad essere più rappresentata è la stufa tradizionale a legna con 990.000 unità. Le stufe a pellet sono un po' meno della metà delle precedenti e simili ai camini aperti; la categoria più marginale risulta essere la

caldaia a cippato con circa 1.500 unità. Questi sono dati abbastanza in linea con i consumi dei diversi biocombustibili.

Infatti dai risultati presenti nella tabella 3 si evidenzia un totale annuo di 16,2 Mt di biomassa legnosa consumata di cui oltre il 70% di legna da ardere e appena il 20% di pellet.

Tabella 3: Consumi in tonnellate di legna da ardere, pellet, cippato nel nostro Paese (AIEL, 2018)

Tipo di prodotto	Consumo (Mt)	Percentuale
Legna da ardere	11,7	72%
Pellet	3,1	19%
Cippato	1,4	9%
Totale	16,2	100%

Attraverso il numero dei diversi impianti e il consumo annuo dei biocombustibili legnosi in tabella 4 è riportata una stima di massima dei consumi dei biocombustibili per ogni tipo di apparecchio termico. Si ricorda che per migliorare la distribuzione della massa legnosa consumata per tipologia di apparecchio termico si è stabilito che gli apparecchi termici a pellet consumino circa 3 volte tanto rispetto agli altri impianti.

Tabella 4: Dati sui consumi dei biocombustibili rapportati sul totale del numero degli impianti

Tipo di impianti	Consumi legna da ardere (Mt)	Consumi pellet (Mt)	Consumi cippato (Mt)
Camini aperti	2,7		
Camini chiusi	2,7		
Stufe tradizionali a legna	5,8		
Stufe moderne a legna	0,5		
Stufe a pellet		2,4	
Caldaie a pellet (peso 3)		0,7	
Caldaie a cippato			1,4
Totale	11,7	3,1	1,4

Partendo dal primo combustibile ovvero la legna da ardere, possiamo notare che la sola categoria stufa tradizionale a legna consuma circa la metà del consumo totale ovvero 5,8 Mt su 11,7. Un consumo pari di 2,7 Mt è stato stimato per i camini aperti e chiusi mentre le stufe moderne, in virtù di un minor numero di modelli presenti sul mercato, si ritengono consumare circa 0,5 Mt. Passando ai sistemi a pellet sono presenti due categorie le stufe e le caldaie a pellet che consumano nel complesso 3,1 Mt. Di questi le stufe a pellet consumano circa 2/3 ovvero 2,4 Mt lasciando l'altro 1/3 alle caldaie a pellet con 0,7 Mt.

Infine, per quanto riguarda il cippato è presente solo la categoria di caldaia a cippato che consuma 1,4 Mt.

5.4. Emissione prodotte dai sistemi combustibile-impianto

Sulla base dei risultati presenti sin qui, con la tabella 6, si definiscono i contributi e differenti impatto sulle polveri sottili – in particolare il PM totale – dei vari impianti e combustibili utilizzati.

Per il calcolo finale è stato necessario determinare per ogni combustibile il potere calorifico netto (MJ/Kg t.q.) come espresso in tabella 5.

Tabella 5: Dati presunti di potere calorifico netto (PCN) dei diversi biocombustibili

Tipo di combustibile	Pellet	Legna	Cippato
Umidità (%)	6	30	40
	16904	11964	9906
PCN (MJ/Kg t.q.)	16.9	12.0	9.9

Per il calcolo del potere calorifico netto è stato ipotizzato un valore di umidità del 6% per il pellet, 30% per la legna e 40% per il cippato.

Avendo a disposizione tutti i dati precedentemente calcolati si è determinato l'incidenza delle varie categorie di impianto-combustibile sul PM totale (tabella 6).

Tabella 6: Incidenza del PM totale sulle varie categorie biocombustibile-impianto

TIPO DI IMPIANTO	PM tot (mg/MJ)	Consumo (Mt)	PCN (MJ/kg t.q.)	Consumo (MJ)	PM tot (t)	PM tot (%)
Camini aperti	722.8	2.7	12.0	32.400.000	23.4	24.5%
Camini chiusi	441.3	2.7	12.0	32.400.000	14.3	15.0%
Stufe tradizionali a legna	760.0	5.8	12.0	69.600.000	52.9	55.4%
Stufe moderne a legna	114.7	0.5	12.0	6.000.000	0.7	0.7%
Stufe a pellet	62.2	2.4	16.9	40.560.000	2.5	2.6%
Caldaie a pellet	38.5	0.7	16.9	11.830.000	0.5	0.5%
Caldaie a cippato	92.4	1.4	9.9	13.860.000	1.3	1.3%
Totale		16.2			95.6	100%

206.650.000	(MJ)
4936	(Tep)

Al netto del fattore di emissione, dei consumi e del potere calorifico netto per ogni categoria impianto-combustibile calcolato si ha per ogni categoria un valore di incidenza del PM variabile.

Su un totale di 95,6 t di particolato calcolato la categoria più impattante con 52,9 t (55,4%) risulta essere le stufe tradizionali a legna seguito dai camini aperti con 23,4 t (24,5%), camini chiusi 14,3 t (15%), stufe a pellet con 2,5 t (2,6%), caldaie a cippato con 1,3 t (1,3%), stufe moderne a legna con 0,7 t (0,7%) ed infine le caldaie a pellet con 0,5 t (0,5%).

Capitolo 6

CONSIDERAZIONI

6.1. Valore di emissione dei PM per i diversi impianti termici domestici e combustibili legnosi

I risultati di questa tesi, evidenziano come i diversi impianti biocombustibili assumono valori di emissione dei PM molto differenti tra loro.

Prendendo in considerazione il PM totale – fattore chiave per la misura dell'inquinamento - si nota che le categorie più obsolete ovvero le stufe convenzionali a legna e i camini aperti mostrano valori di emissione molto elevati e in particolare, superiori a 700 mg/MJ in confronto ad impianti tecnologicamente più evoluti come ad esempio stufe e le caldaie a pellet o le caldaie a cippato. Le ragioni di tali differenze sono varie anche se ruotano attorno all'efficienza di combustione.

I camini a legna specialmente quelli con focolare aperto, dal punto di vista energetico, presentano una scarsa efficienza. Di fatto, la mancanza di un sistema di controllo e dosaggio dell'aria comburente e del biocombustibile rappresenta la principale ragione della scarsa efficacia dei camini tradizionali e del maggiore inquinamento ambientale che contraddistingue questi tipi di impianti rispetto ad altri. Va detto che l'efficacia con cui questi sistemi riscaldano gli ambienti è limitata e spesso i rendimenti sono inferiori al 40%. Quindi a mancare è il rapporto aria/combustibile mai bilanciato in modo corretto per consentire alla biomassa legnosa di procedere con cinetiche di combustione corrette.

Un altro fattore che incide sicuramente sul risultato finale è il tipo di biocombustibile utilizzato. La legna, è contraddistinta da una elevata quantità di umidità e da una pezzatura non adeguata per interagire con l'aria in modo efficace, come precedentemente considerato. La presenza di acqua ostacola lo sviluppo della combustione rallentando le normali cinetiche di ossidazione della biomassa legnosa e determinando una bassa resa dell'impianto. L'effetto è la produzione di reazioni indesiderate a carico della matrice lignocellulosica e quindi maggior rilascio di composti incombusti particolarmente inquinanti per l'ambiente, tra cui anche il PM.

Di contro tra gli impianti più innovativi e meno impattanti per l'ambiente ci sono le stufe e le caldaie a pellet. Quest'ultime presentano valori di emissione del particolato molto bassi soprattutto in quei modelli che utilizzano sistemi di regolazione automatica dell'aria comburente e del combustibile, in funzione della concentrazione di ossigeno che si registra nei fumi. Alcuni modelli di caldaie e stufe a pellet sono anche dotati di griglie mobili e autopulenti, in maniera da mantenere sempre libera dalle ceneri la zona di combustione, permettendo perciò una corretta distribuzione dell'aria comburente e quindi un'efficace ossidazione del combustibile. Alcuni apparecchi più moderni e che

si collocano sul mercato con prezzi più elevati presentano dispositivi integrati di abbattimento fumi, a valle della camera di combustione, come filtri a manica o precipitatori elettrostatici.

Tali sistemi riducono ulteriormente la produzione di inquinanti solidi emessi in atmosfera sebbene richiedono particolare attenzione nella progettazione e utilizzo.

6.2. Numero di impianti in Italia

Dal grafico a torta che segue in figura 1 si evince che in Italia sono ancora prioritari gli impianti più obsoleti ovvero i camini aperti e le stufe tradizionali a discapito di sistemi più evoluti come le stufe e le caldaie a pellet. Infatti, prendendo in considerazione i risultati precedentemente discussi, se si sommano le due categorie più obsolete possiamo notare che il 57% del totale degli impianti riguardano proprio questi apparecchi. Anche qui le ragioni sono diverse.

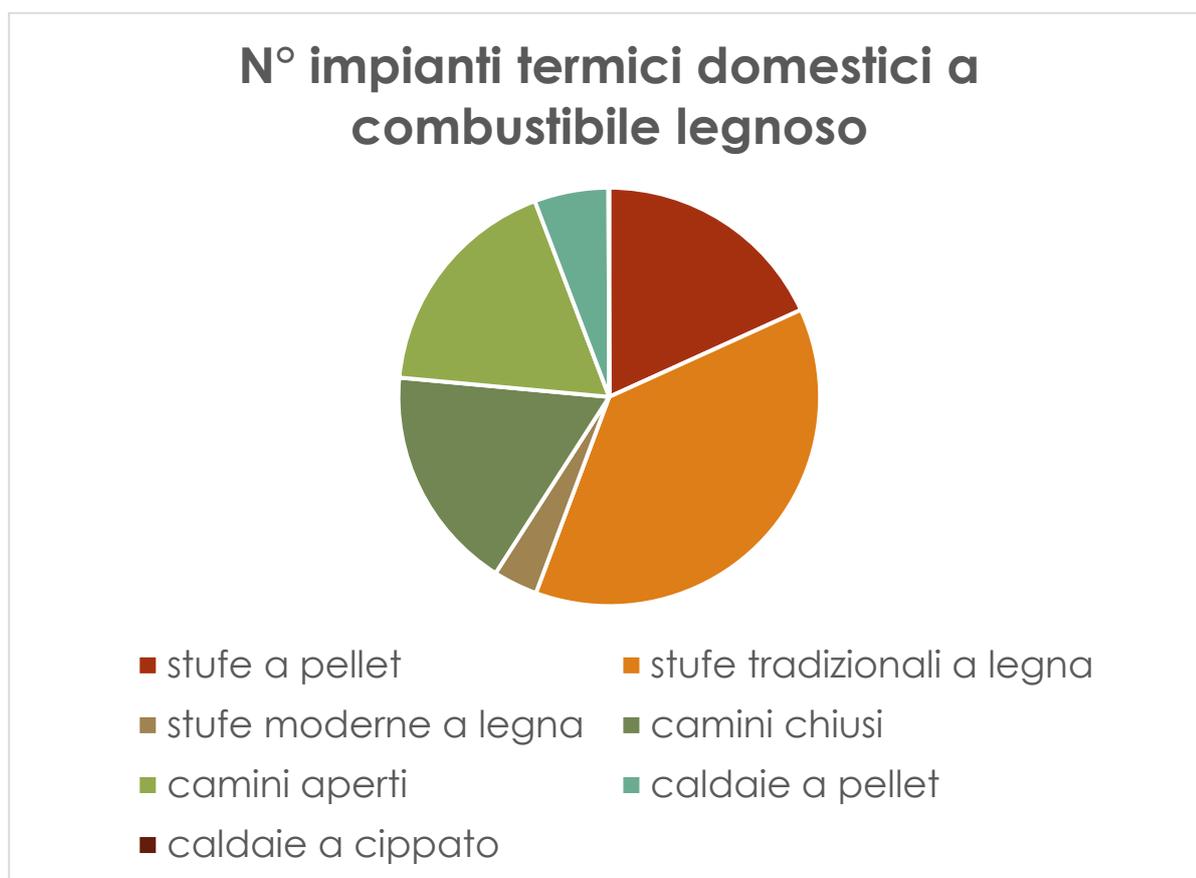


Fig.1: N° di impianti termici domestici a combustibile legnoso presenti in Italia

Una prima ragione dovrebbe riferirsi agli aspetti dei costi dell'impianto. Gli impianti più moderni e tecnologici sono molto più onerosi rispetto agli apparecchi più obsoleti quindi non sono accessibili a tutti per gli alti costi di listino nonostante negli ultimi anni la politica di incentivazione inizia a favorire – con misure quali il Conto termico – azioni di rottamazione degli apparecchi vecchi e poco efficienti con dei nuovi maggiormente performanti.

Un altro fattore da considerare nella ripartizione del parco degli impianti è l'aspetto sociale-culturale. Sono infatti ancora molte le famiglie che per tradizione preferiscono impianti come camini aperti o stufe a legna nonostante alcuni siano consapevoli che questi apparecchi siano maggiormente inquinanti rispetto ad impianti più innovativi. Va ricordato che un numero significativo di soggetti accede in modo diverso a quantità di legname talvolta senza alcun costo o con spese irrisorie (diritto di legnatico).

6.3. Consumo dei biocombustibili legnosi in Italia

Dai dati presi in precedenza in letteratura sui consumi dei biocombustibili legnosi in Italia si nota che la categoria di combustibile ancora maggiormente utilizzata in Italia è la legna da ardere, su un totale di 16,2 Mt di combustibile utilizzato, la legna ne comprende infatti 11,7 Mt (72%). Il pellet con i suoi 3,1 Mt (19%) rimane in una posizione meno privilegiata nonostante negli ultimi anni si è assistito ad una crescita esponenziale sul mercato dei combustibili legnosi grazie ai vantaggi strutturali ed operativi discussi in precedenza. Solo appena il 9% del consumo ricade sul cippato e anche esso come il pellet può essere considerato come un mercato emergente nel settore dei combustibili legnosi che sta ottenendo negli ultimi anni sempre più consensi favorevoli da parte dei consumatori.

I motivi del successo confermato della legna da ardere rispetto al pellet-cippato sono solo in parte di tipo economico. Basti pensare agli ultimi dati (Gennaio 2021) sui prezzi dei combustibili legnosi per vedere la differenza del valore di mercato: legna da ardere, con contenuto idrico medio del 30-35% a 157 euro/t contro i 223 euro/t per il pellet classe A1 ENplus e i 198 euro/t per il pellet classe A2 ENplus (AGRIFORENERGY, 2021). Quindi le differenze relativamente al costo su energia non sono importanti. Piuttosto bisogna considerare che la legna ha un prezzo più stabile durante la stagione a differenza del pellet che spesso varia la sua tariffa anche in relazione agli andamenti dell'energia.

Alcuni utenti possono poi valutare una questione qualitativa del prodotto. Mentre la legna è riconoscibile come prodotto, il pellet essendo densificato non permette di risalire alla materia prima di origine, con dubbi quindi sulla provenienza.

6.4. Consumo nei sistemi biocombustibile-impianto

Dopo le considerazioni sul numero degli impianti e il consumo dei biocombustibili si analizzano i dati generali sui consumi di biocombustibili/impianti termici come riportato in figura 2.

Essendo la legna da ardere il combustibile maggiormente utilizzato, dal grafico si nota come tutte le categorie alimentate con questo combustibile sono tra quelle con i consumi maggiori. In particolar modo il consumo più elevato è raffigurato dalla stufa tradizionale a legna ovvero la peggior combinazione impianto-biocombustibile dal punto di vista della resa energetica e inquinante.

I consumi degli apparecchi più evoluti con i combustibili meno impattanti per l'ambiente come le stufe e le caldaie a pellet e le caldaie a cippato oltre alle stufe moderne sono presenti invece in numero minore.

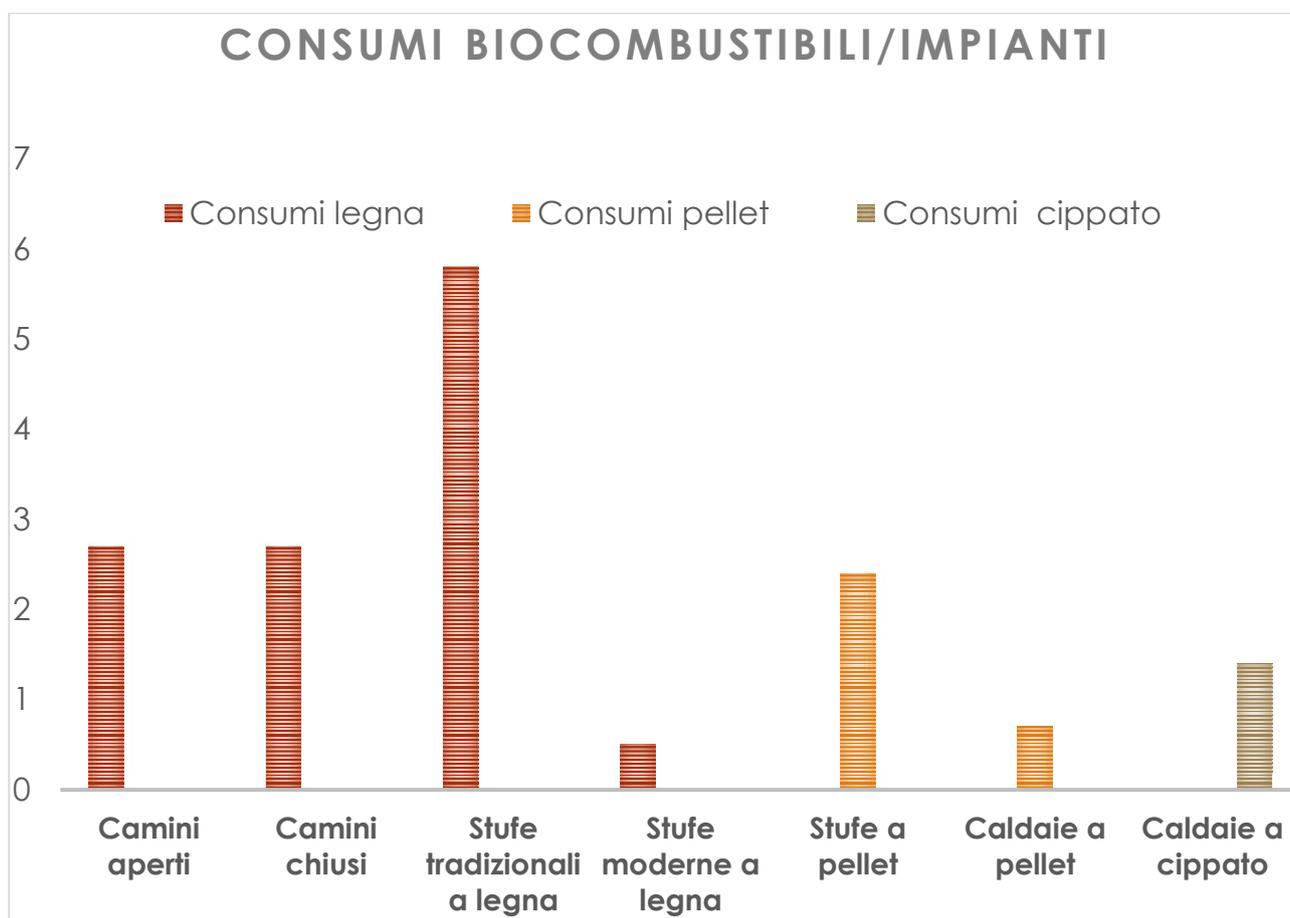


Fig.2: Consumi biocombustibili-impianti in Italia in Mt

6.5. Valore PM totale nei sistemi biocombustibile-impianto

L'ultima analisi del presente studio è rivolta all'emissione del PM totale nei vari sistemi impianto-biocombustibile.

Dal grafico sotto (figura 3) è possibile constatare che la categoria più impattante a livello di emissione di particolato sembrerebbe la stufa tradizionale a legna (55,4%). Ciò è avvalorato dal fatto che la stessa categoria ha le emissioni più alte dei vari PM nei dati presi in letteratura oltre ad avere consumi di biocombustibili più elevate delle altre. Se si sommano le tre categorie di impianti più obsoleti o con tecnologie meno moderne ovvero stufe tradizionali a legna, camini aperti e camini chiusi a legna si osserva una incidenza delle polveri complessivamente emesse pari al 95% sul totale contro il solo 5% rimanente degli impianti più evoluti quali stufe e caldaie a pellet e caldaie a cippato.

E' dunque chiaro l'effetto del mancato ammodernamento degli impianti termici con diffusione ancora elevata di generatori vecchi ed obsoleti oramai non più coerenti sotto l'aspetto ecologico ed ambientale.

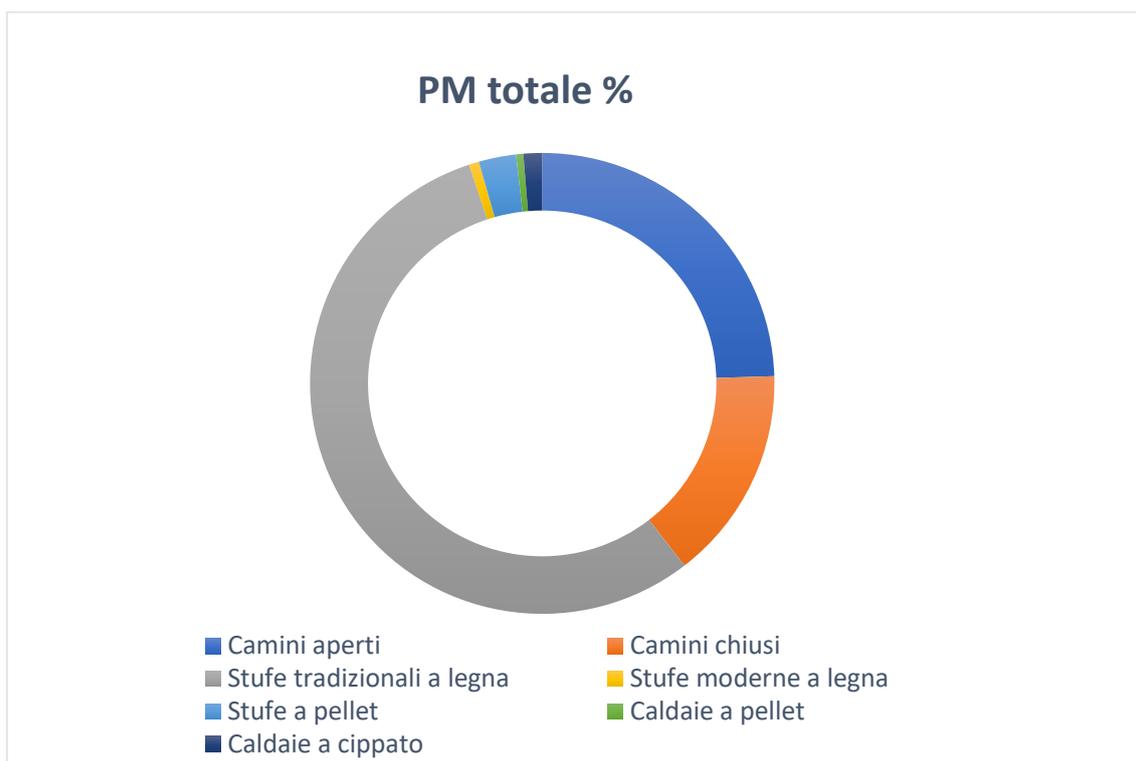


Fig.3: percentuale di emissione del PM totale per i sistemi impianto-biocombustibile

6.6. Possibili soluzioni

Per tutelare la qualità dell'aria nel nostro Paese c'è bisogno dell'impegno di più soggetti coinvolti direttamente o indirettamente nella filiera dei biocombustibili solidi e degli apparecchi termici. L'obiettivo comune è mettere in campo una serie di interventi ed azioni che tengano in considerazione da un lato, lo sviluppo di tecnologie ad alta efficienza e basso impatto e dall'altro azioni di vario genere per ridurre emissioni.

L'elemento che emerge dalla tesi è soprattutto il parco impianti termici domestici attivo nel nostro Paese che è indubbiamente troppo poco efficiente dal punto di vista della resa termica e del contenimento degli inquinanti. Una importante soluzione si trova dunque nella riconversione e ammodernamento degli apparecchi termici attraverso iniziative di incentivazione in modo tale da permettere ai vari utenti interessati alle soluzioni termiche da biomasse solide di favorire il turnover tecnologico degli impianti come soluzione alla riduzione di inquinanti emessi in atmosfera, tra cui le polveri sottili e le varie frazioni.

Al fine di disporre di una stima di massima degli effetti di questi interventi sul totale delle emissioni prodotte dai sistemi di riscaldamento a biomasse solide sono proposti di seguito due scenari possibili riguardanti una politica di riqualificazione degli impianti vecchi con soluzioni moderne.

Scenario 1 (figura 4)

TIPO DI IMPIANTO	PM tot (mg/MJ)	Consumo (Mt)	PCN (MJ/kg t.q.)	Consumo (MJ)	PM tot (t)	PM tot (%)
Camini aperti	722,8	1,3	12	15.600.000	11,3	16,5%
Camini chiusi	441,3	4,1	12	49.200.000	21,7	31,8%
Stufe tradizionali a legna	760	2,9	12	34.800.000	26,4	38,7%
Stufe moderne a legna	114,7	3,4	12	40.800.000	4,7	6,8%
Stufe a pellet	62,2	2,4	16,9	40.560.000	2,5	3,7%
Caldaie a pellet	38,5	0,7	16,9	11.830.000	0,5	0,7%
Caldaie a cippato	92,4	1,4	9,9	13.860.000	1,3	1,9%
Totale		16,2			68,4	100%
				206.650.000	(MJ)	
				4.936	(Tep)	

Fig.4: Scenario 1 di diversa ripartizione del PM totale tra i vari impianti e biocombustibili (evidenziati in rosso i valori cambiati)

Nello scenario 1 si è ipotizzato di convertire i consumi dei camini aperti (1,4 Mt) a favore di camini chiusi (sistema con ridotte emissioni rispetto ai camini aperti) e analogamente metà dei consumi della stufa tradizionale a legna (2,9 Mt) convertita a favore della stufa moderna.

Con opportuni calcoli si può notare che dal valore del PM totale di partenza ovvero 95,6 t si è passato ad un valore più basso di emissione ovvero 68,4 t.

Scenario 2 (figura 5)

TIPO IMPIANTO	DI	PM tot (mg/MJ)	Consumo (Mt)	PCN (MJ/kg t.q.)	Consumo (MJ)	PM tot (t)	PM tot (%)
Camini aperti		722,8	1,3	12	15.600.000	11,3	19%
Camini chiusi		441,3	2,7	12	32.400.000	14,3	24,1%
Stufe tradizionali a legna		760	2,9	12	34.800.000	26,4	44,6%
Stufe moderne a legna		114,7	0,5	12	6.000.000	0,7	1,2%
Stufe a pellet		62,2	3,3	16,9	55.770.000	3,5	5,9%
Caldaie a pellet		38,5	2,75	16,9	46.475.000	1,8	3%
Caldaie a cippato		92,4	1,4	9,9	13.860.000	1,3	2,2%
Totale			14,85			59,3	100%
					204.905.000	(MJ)	
					4.894	(Tep)	

Fig.5: Scenario 2 di diversa ripartizione del PM totale per i diversi impianti e biocombustibili (evidenziati in rosso i valori cambiati)

Nel secondo scenario si è invece scelto di decurtare la metà dei consumi dei camini aperti (1,4 Mt) a favore delle stufe a pellet che non sono aumentate di 1,4 Mt ma bensì di 0,9 Mt in quanto è stato calcolato con il diverso potere calorifico netto degli impianti a pellet (16,9 contro i 12 degli impianti a legna). La stessa operazione è stata proposta con le stufe tradizionali a legna in cui sono stati tolti la metà dei consumi (2,9 Mt) e trasferiti alle caldaie a pellet (2,05 Mt).

In questo scenario dopo i calcoli possiamo vedere che la differenza del PM totale emesso è ancora più basso rispetto al valore del PM totale di partenza raggiungendo il valore di 59,3 t e quindi ottenendo un abbassamento di circa il 37% delle polveri emesse in atmosfera.

Questi due scenari ipotizzati dimostrano l'importanza nell'operare in una riconversione moderna degli impianti nel nostro Paese in quanto attraverso politiche giuste da parte degli operatori del settore e dei politici e attraverso la sensibilizzazione dell'opinione pubblica si può ottenere una

considerevole diminuzione delle concentrazioni delle polveri emesse in atmosfera. Ovviamente oltre al PM gli effetti sono anche a carico di altri inquinanti quali CO e COV spesso associato alle polveri negli impianti a legna o di vecchia concezione.

Capitolo 7

CONCLUSIONI

In generale, nel nostro Paese prevale ancora la legna da ardere come principale biocombustibile legnoso consumato, ma secondo le statistiche di organismi del settore, il pellet negli ultimi 10 anni ha avuto un incremento dei consumi del 25% contro un calo del 20% da parte della legna da ardere. Basti pensare che in soli 5 anni (2013-2018), nel Bacino Padano, si è verificata una riduzione del consumo di legna da ardere pari a 1,3 Mt ed un incremento del consumo del pellet di 0,2 Mt (AIEL, 2018).

Questo successo del pellet è dovuto dal fatto, come espresso in precedenza, che questo combustibile a differenza della legna da ardere offre vantaggi tecnici-operativi importanti e oramai noti agli utenti. Il passaggio al consumo di pellet di fatto favorisce anche un miglioramento della situazione delle emissioni prodotte dalle biomasse solide per uso termico domestico. In proposito l'ARPAV Veneto segnala un miglioramento nel periodo 2010-2018 derivante da una riduzione del 23% delle emissioni della combustione del legno.

Questo è dovuto anche al turnover tecnologico degli impianti termici supportato negli ultimi anni anche dagli incentivi del Conto Termico (solo nel 2019 circa 70.000 interventi di rottamazione). Emerge quindi, una riqualificazione energetica del settore attraverso la dismissione e sostituzione degli apparecchi tradizionali a legna – tipicamente caminetti aperti e stufe tradizionali a legna – con impianti e caldaie domestiche più performanti – in particolare pellet – sotto l'aspetto energetico e di emissione degli inquinanti.

Dai risultati espressi nella presente tesi, si capisce però che si è ancora molto lontani da risultati soddisfacenti. In effetti i margini di miglioramento sono ancora molto ampi. In particolare, spostando la metà del consumo di legna da sistemi obsoleti a quelli moderni si potrebbe riscontrare un beneficio di oltre il 25% in termini di particolato, per arrivare a benefici oltre il 35-40% se si convertisse la metà della legna in pellet da utilizzare in stufe moderne, o meglio, caldaie. Queste ultime, soprattutto in forma di teleriscaldamento di un gruppo contenuto di utenti che sostituiscono vecchi impianti a legna, genererebbero un impatto positivo molto elevato.

La strada di favorire economicamente queste soluzioni consente di mantenere alto il livello di energia rinnovabile per il riscaldamento delle utenze domestiche, migliorando i bilanci ambientali in termini di CO₂ equivalente e, nello stesso tempo, innesca benefici in termini di ricadute economiche per un settore costituito da un'articolazione di aziende, operatori e professionisti dei nostri territori.

Capitolo 8

BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA

- [1] AGRIFOREENERGY – Rivista tecnica energia rinnovabile dall’agricoltura e dalle foreste: mercati & prezzi.
- [2] An overview of particulate emissions from residential biomass combustion – E.D. Vicente, C.A. Alves, Atmospheric Research 199 (2018).
- [3] Appunti di Trasformazione del Legno, Giuseppe Toscano Dipartimento D3A – Università Politecnica delle Marche.
- [4] APROS – Riscaldamento a biomasse legnose. Tipologie di generatori, normative e certificazioni di qualità.
- [5] Bluenergy – Funzionamento della caldaia a condensazione, caratteristiche e differenze.
- [6] Boman C. Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion Energy Technology and Thermal Process Chemistry. Umea, Sweden Umea University; 2005.
- [7] Bricchetti o tronchetti, una valida alternativa alla legna.
- [8] Come cambiano i consumi e le emissioni della combustione domestica del legno – Diego Rossi e Valter Francescato AIEL (2018).
- [9] Comparative emissions characterization of a small-scale wood chip-fired boiler and an oil-fired boiler in a school setting – Lisa Rector, Paul J. Miller, Steven Snook, Mahdi Ahmadi, Biomass and Bioenergy 107 (2017).
- [10] Componenti principali dell’impianto termico.
- [11] Costo della legna da ardere al quintale per camino o stufa.
- [12] Da pianta a combustibile: la filiera della biomassa legnosa.
- [13] Direttiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 aprile 2009 sulla promozione dell’uso dell’energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE.
- [14] Emission reduction potentials of improved cookstoves and their issues in adoption: An Indian outlook – Monikankana Sharma, S. Dasappa, Journal of Environmental Management (2017).

- [15] Emissions of particulate matter, carbon monoxide and nitrogen oxides from the residential burning of waste paper briquettes and other fuels – Meng Xiu, Svetlana Stevanovic, Md Mostafizur Rahman, Ali Mohammad Pourkhesalian, Lidia Morawska, Phong K. Thai, Environmental Research 167 (2018).
- [16] Esboschi e trasporti per via terrestre – Edagricole.
- [17] <https://www.mglobale.it/dogane/tutte-le-news/obbligo-due-diligence-commercio-legname.kl>
- [18] <https://www.qualenergia.it/articoli/pellet-enplus-dati-sull-mercato-italiano-primoin-europa-nel-residenziale/>
- [19] <http://www.quandofare.it/quando-fare-uso-delle-stufe-a-legna-e-di-quelle-a-pellet/>
- [20] <https://www.teknoring.com/guide/guide-sicurezza-e-ambiente/riscaldamento-a-biomassa-la-guida-di-mce-lab/>
- [21] Idraulica 40, Impianti termici alimentati da biomasse, Marco Caleffi.
- [22] Indagine sui fattori di emissione della combustione delle biomasse negli impianti per Nzeb – Luciano Terrinoni, Domenico Iatauro, Antonio Panvini (ENEA, 2017).
- [23] Influence of the type and output domestic hot-water boilers and wood moisture on the production of fine and ultrafine particulate matter – Jiri Horak, Vendula Laciok, Kamil Krpec, Frantisek Hopan, Milan Dej, Petr Kubesa, Jiri Rysavy, Oleksandr Molchanov, Lenka Kubonova, Atmospheric Environment 229 (2020).
- [24] Info Build Energy – Effetti degli inquinanti sulla salute umana.
- [25] Inventory of fine particulate organic compound emissions from residential wood combustion in Portugal – Catia Gonçalves, Celia Alves, Casimiro Pio (CESAM, 2011).
- [26] La filiera legno-energia: aspetti salienti dello stato dell'arte e prospettive – Università Politecnica delle Marche, ASSAM Regione Marche.
- [27] Le biomasse legnose a fini energetici in Italia: uno sleeping giant?
- [28] Legna, pellet, cippato e bricchetti – Quattro combustibili naturali per il riscaldamento.
- [29] Nussbaumer T. Energy & Fuels 2003, 17, 1510-1521.

- [30] Particle emissions from pellets stoves and modern and old-type wood stoves – Linda S.Bafver, Bo Leckner, Claes Tullin, Morten Berntsen, Biomass and Bioenergy 35 (2011).
- [31] Particulate, black carbon and organic emissions from small-scale residential wood combustion appliances in Switzerland – N.K. Mayer, Biomass and Bioenergy 36 (2012).
- [32] Planet Flame – Stufe a pellet: ecco come funzionano e come farle funzionare al meglio.
- [33] Pollutants from the combustion of solid biomass fuels – A. Williams, J.M. Jones, M. Pourkshanian, Progress in Energy and Combustion Science (2011).
- [34] Quanto costa il pellet? Confronto prezzi fra le diverse essenze.
- [35] Studio comparativo sulle emissioni di apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet – INNOVHUB stazioni sperimentali per l'industria (2016).
- [36] Trasformazione del Legno parte 9 – Trattamenti fisici, cippato e pellet – Giuseppe Toscano, Dipartimento D3A Università Politecnica delle Marche.
- [37] Tutto sul cippato: cos'è, certificazioni e costi.