



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto sull'Inquinamento Atmosferico

STUDIO SUGLI EFFETTI AMBIENTALI CONNESSI ALL'IMPIEGO DELLA BIOMASSA SOLIDA PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA



CNR - IIA, ISTITUTO SULL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

GIUGNO 2019



CNR – Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto sull'Inquinamento Atmosferico

STUDIO SUGLI EFFETTI AMBIENTALI CONNESSI ALL'IMPIEGO DELLA BIOMASSA SOLIDA PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

2019

STUDIO SUGLI EFFETTI AMBIENTALI CONNESSI ALL'IMPIEGO DELLA BIOMASSA SOLIDA PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

a cura di

Mauro Rotatori, Sabina Di Franco, Rosamaria Salvatori, Silvia Mosca

2019

Il presente manuale tecnico-scientifico è stato prodotto nell'ambito di una convenzione tra l'associazione EBS e l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Manuale tecnico-scientifico a cura del
CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE
Istituto sull'Inquinamento Atmosferico
Via Salaria km. 29,300
00015 Monterotondo, Roma
e-mail: direzione@iia.cnr.it

ISBN 978-88-6224-017-8

Studio sugli effetti ambientali connessi all'impiego della biomassa solida per la produzione di energia elettrica

Indice

1. Introduzione	5
Cenni di normativa	8
3. Le tecnologie per la produzione di energia da biomassa solida	26
Processi di conversione	31
Processi termochimici	32
Impianti in Italia	45
4. Le tecnologie per il contenimento delle emissioni da impiego di biomassa solida	49
5. Analisi delle emissioni tipiche	63
Confronto emissioni impianti a seconda della taglia	65
Casi di studio CNR sugli impatti di impianti a biomasse	67
I piccoli impianti	79
6. Considerazioni ambientali e conclusioni	86
Glossario	92
Bibliografia	99

1. Introduzione

L'obiettivo principale di questo rapporto è la valutazione delle implicazioni ambientali legate all'utilizzo di biomasse solide come combustibile, con particolare attenzione al loro uso per la produzione di energia elettrica, in un'ottica di miglioramento del sistema, alla luce delle varie tecnologie di produzione e di trattamento delle biomasse impiegate nel ciclo produttivo, nonché degli impatti ambientali indotti nei territori in cui queste iniziative sono collocate.

Le tematiche ambientali e fabbisogno energetico devono essere affrontate tenendo conto sempre di più della loro connessione reciproca, mettendo in pratica strategie di sviluppo sostenibile per tutte le nuove sfide poste dalla società. Il fabbisogno energetico è in costante aumento sia a livello mondiale, sia a livello locale, ed è forte inoltre la necessità di diminuire la percentuale di prodotti energetici acquistati all'estero. Da dati ISTAT e del Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) risulta, infatti, che nel 2014 in Italia il consumo interno lordo di energia ammontava a 172,99 Mtep (milioni di tonnellate equivalenti di petrolio) di cui 142,83 Mtep importati dall'estero, pari all'82,5% del consumo totale.

Sulla base di questo dato e delle considerazioni che lo sfruttamento, la conseguente diminuzione della disponibilità e la crescente difficoltà di approvvigionamento di fonti fossili, come petrolio e gas naturale, insieme anche ad una accresciuta sensibilità al contesto energetico-ambientale, si è giunti, già da diversi anni, all'incremento dell'uso delle cosiddette fonti di energia rinnovabili. Tra queste ultime ha assunto un'importanza crescente l'impiego delle biomasse, non solo per la diffusione sul territorio italiano di risorse quali ad esempio il legname, ma anche perché dal punto di vista tecnico sono stati effettuati numerosi studi, sia per quel che riguarda l'efficienza energetica sia per quel che riguarda gli impatti ambientali; le tecnologie di utilizzo, inoltre, sono mature ed evolute.

La filiera agroenergetica in Italia è vista come un settore in evoluzione sia nella parte più direttamente agricola, sia in quella relativa a tutti gli aspetti della gestione forestale. Dal punto di vista energetico questi settori sono guardati con particolare interesse per il risparmio notevole rispetto ai combustibili fossili, non solo dal punto di vista economico, ma anche da quello della neutralità dell'emissione della CO₂ e delle ricadute positive sul territorio dovute ad una corretta e sostenibile gestione delle risorse forestali. Infatti un bosco

ben gestito svolge importanti compiti di difesa dal dissesto idrogeologico e da eventi catastrofici come gli impatti di incendi che in stagioni siccitose possono distruggere migliaia di ettari.

Riassumendo i termini della questione, si può affermare che le biomasse, e in special modo le cosiddette biomasse solide, siano una risorsa pulita e rinnovabile di energia, con una buona disponibilità potenziale sul territorio. In generale l'abbondanza delle biomasse in termini quantitativi nel mondo, le pone al quarto posto nell'utilizzo dopo il petrolio, il gas naturale e il carbone (Report IEA 2016).

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica, l'immagine seguente illustra l'andamento della potenza e della produzione lorda di energia dalle FER (fonti di energia rinnovabili) tra il 2004 e il 2017. Le bioenergie, che comprendono anche le biomasse, il cui andamento è tratteggiato in rosso nel grafico, hanno visto un costante aumento dal 2008 al 2014 per poi stabilizzarsi (Fig. 1).

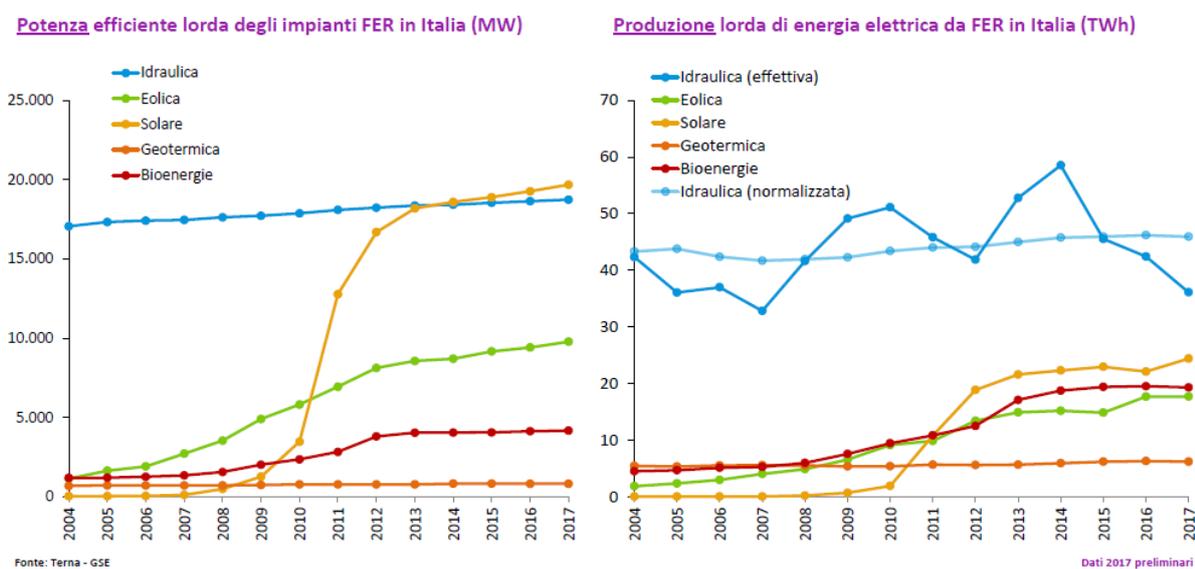


Fig. 1. Le rinnovabili nel 2017. GSE, rapporto statistico 2017

Nel rapporto statistico GSE del 2017, per quanto riguarda le FER del settore elettrico, agli impianti che utilizzano biomasse solide viene attribuita una potenza efficiente lorda pari a 1667 MW, con una produzione effettiva di 6,6 TWh (568,8 ktep), con un aumento dell'1,2% rispetto al 2016.

Inoltre, la biomassa è anche fonte di energia rinnovabile più utilizzata nel settore termico, dal rapporto statistico GSE 2017, risulta che l'energia termica complessiva ottenuta in Italia dall'impiego della biomassa solida per riscaldamento (legna da ardere, pellet, carbone

vegetale/charcoal) ammonti a circa 320.000 TJ, corrispondenti a 7,64 Mtep, con gran parte della biomassa solida - 6,75 Mtep, utilizzata per il consumo residenziale, mentre gli apparecchi in esercizio sono circa 7milioni, con un mercato annuale di 0,2 - 0,4 milioni di apparecchi.

L'Italia è, quindi, ben posizionata nel segmento industriale delle rinnovabili termiche, in particolare, nell'ambito delle biomasse. In questo settore circa il 65% della tecnologia, anche quella ad alto contenuto tecnologico è di produzione italiana. Anche la produzione di biomassa ha raggiunto un livello di produzione locale prossimo al 100%, tranne situazioni particolari, con ulteriori interessanti margini di crescita. Per quanto riguarda l'approvvigionamento, le tendenze in atto negli impianti di taglia industriale prevedono un crescente ricorso alla biomassa nazionale grazie alle politiche di sviluppo basate sul criterio della filiera corta/nazionale. Per quanto riguarda il segmento domestico delle rinnovabili termiche, con particolare riferimento al crescente mercato del pellet, permane il prevalente approvvigionamento dall'estero.

Nella Strategia Energetica Nazionale (SEN) del 2017 si ravvisa l'esigenza dello "sviluppo di processi e materiali innovativi per la produzione e la conversione energetica di biomasse e biocombustibili". Tale approccio è sostanzialmente confermato anche con il recente documento di consultazione Piano Integrato Clima Energia.

Inoltre l'utilizzo di energie rinnovabili, fra cui quella prodotta dalle biomasse, contribuisce alla stabilità del sistema elettrico, come elemento per la regolazione della continuità nel servizio di distribuzione dell'energia elettrica.

L'interesse per le biomasse comprende anche le altre materie prime di origine vegetale e animale, in un'ottica di economia circolare che ambisce al recupero completo di tutte le risorse disponibili: combustibili legnosi di origine forestale e agricola, effluenti degli allevamenti zootecnici e reflui organici agroindustriali che producono biogas, biocarburanti di "nuova" concezione quali il biodiesel, il bioalcol e il biometano. Ai fini di questo studio, però' verranno analizzate prevalentemente lo stato dell'arte e le prospettive future dell'utilizzo delle biomasse solide.

Per una corretta valutazione della potenzialità della filiera bioenergetica si deve tener conto oltre che di criteri ambientali ed energetici anche di opportunità economica. Questo criterio è valido anche per l'utilizzo delle biomasse, che, come ogni sistema di produzione energetica, presenta vantaggi e svantaggi che vanno presi in esame e tenuti da conto.

Per definire lo stato dell'arte e comporre una review esaustiva, sono stati analizzati rapporti tecnici, norme italiane ed europee, best practices, casi di studio, articoli divulgativi e pubblicazioni scientifiche.

In dettaglio, dopo una introduzione con cenni sulla normativa, lo studio si articola nelle seguenti parti, ognuna delle quali ha obiettivi specifici:

- La filiera e i combustibili
- Le tecnologie per la produzione di energia da biomassa solida
- Le tecnologie per il contenimento delle emissioni da impiego di biomassa solida
- Analisi delle emissioni tipiche
- Considerazioni ambientali

Cenni di normativa

Le politiche sulle energie rinnovabili in ambito comunitario e nazionale, hanno visto uno sviluppo continuo dalla fine degli anni novanta ad oggi. Di fatto l'Europa sollecita gli Stati dell'Unione ad incrementare l'uso delle fonti rinnovabili a fronte di una diminuzione dell'utilizzo delle fonti fossili, per motivi di sostenibilità ambientale ed economica, tra i quali ridimensionare l'importazione da paesi non UE. Delle misure emanate fa parte il noto "pacchetto 2020", una serie di norme vincolanti volte a garantire che i paesi membri dell'Unione europea raggiungano alcuni obiettivi fissati in materia di clima ed energia entro il 2020.

Il pacchetto definisce tre obiettivi principali:

- taglio del 20% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990)
- 20% del fabbisogno energetico ricavato da fonti rinnovabili
- miglioramento del 20% dell'efficienza energetica.

Più recentemente, il 30 novembre 2016, la Commissione europea ha presentato un pacchetto di azioni in tema di energia, con il titolo "Energia pulita per tutti gli europei". Questo insieme di provvedimenti riguarda alcune modifiche ad aspetti della normativa energetica tra cui l'efficienza, le fonti rinnovabili e l'eco design. Altra norma fondamentale della politica europea in questo settore è la direttiva 2009/28/CE, recepita in Italia con il D.lgs. 28/2011. Tra le altre cose in questo decreto si trova la definizione di biomassa come di seguito riportata: ««biomassa»: la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali),

dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”.

Riassumendo il D.lgs. 28/2011 definisce strumenti, meccanismi, incentivi e quadro istituzionale, finanziario e giuridico, per il raggiungimento degli obiettivi fissati nel pacchetto 2020 in materia di energia da fonti rinnovabili.

Proseguendo in questo rapido excursus legislativo, in Europa in generale e in Italia in particolare, si è registrata una crescita graduale dell'interesse verso le energie rinnovabili come descritto a partire dal Libro Bianco del 1997 fino al Piano d'azione per la biomassa del 2005 ed oltre. Questa spinta verso le energie rinnovabili è scaturita soprattutto dalle criticità di approvvigionamento energetico e dalla lotta al cambiamento climatico. Di fatto negli ultimi anni l'Unione Europea ha emanato una serie di provvedimenti per indirizzare e rafforzare le azioni dei paesi membri in tali ambiti. Già nel 1997 nel Libro bianco delle rinnovabili (COM(97) 599), si individuavano delle misure per raddoppiare la percentuale di energia proveniente dalle energie rinnovabili al fine di arrivare alla soglia del 12% entro il 2010. A seguito del “Libro Bianco” fu emanata la Direttiva 2001/77/CE dove si fissavano gli obiettivi nazionali compatibili con l'obiettivo globale del 12%, all'Italia fu assegnato l'obiettivo del raggiungimento per il 2010 del 25% di elettricità prodotta da fonti rinnovabili. Nel 2005 il Piano d'azione per la biomassa (COM (2005) 628) stabilì alcune misure per promuovere l'uso delle biomasse per il riscaldamento, la produzione di energia elettrica e la ricerca. Nel 2006 con il pacchetto clima-energia si fecero altri passi in avanti nella programmazione di una politica europea comune, evolutosi nel 2007 con la comunicazione della Commissione (COM (2007)1) che mette al centro delle attività politiche dell'UE la lotta al cambiamento climatico. Il Consiglio dell'Unione Europea adottò, sempre nel 2007, un piano d'azione globale nel settore dell'energia per gli anni 2007-2009, in cui era previsto che ogni stato membro si assumesse l'obbligo di target vincolanti per la produzione di energia da fonti rinnovabili, a fronte di sanzioni in caso di mancato raggiungimento degli obiettivi. Gli obiettivi fissati erano i seguenti: 20% di energie rinnovabili sul totale dei consumi negli usi finali di energia per il 2020; quota minima del 10% di biocarburanti nel totale dei consumi di benzina e gasolio per autotrazione entro il 2020.

Con il COM (2008)30, la Commissione propose una serie di normative tra cui: una proposta di direttiva sulle energie rinnovabili; la modifica del sistema di scambio delle quote di emissione; proposte per la definizione del quadro per la cattura e lo stoccaggio della CO₂; la valutazione dell'impatto economico per ogni Stato.

Su queste basi venne promulgato nel 2009 il famoso pacchetto "Clima-energia" noto anche come "20-20-20". I sei provvedimenti compresi nel pacchetto trattano di: 1. riduzione delle emissioni di CO₂ delle auto (Reg. (CE) 443/2009); 2. aumento della quota di energia da fonti rinnovabili fino al 20% sul consumo finale lordo di energia al 2020 e fino al 10% nei trasporti (Dir. 2009/28/CE); 3. revisione del sistema di scambio delle emissioni di gas a effetto serra (Dir. 2009/29/CE); 4. riduzione dei gas a effetto serra derivanti dal ciclo di vita dei combustibili (Dir. 2009/30/CE); 5. cattura e stoccaggio geologico della CO₂ (Dir. 2009/31/CE); 6. ripartizione tra gli Stati membri degli sforzi comunitari per ridurre le emissioni di gas serra e la conferma dell'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica del 20% (Dec. 2009/406/CE).

In particolare la Dir. 2009/28/CE perseguiva due obiettivi vincolanti entro il 2020:

- fonti rinnovabili per il 20% del consumo comunitario di energia negli usi finali; con un obiettivo nazionale specifico che, nel caso dell'Italia, era del 17%;
- 10% del consumo di energia nei trasporti da fonti rinnovabili (biocarburanti, ecc.).

Inoltre la direttiva mirava a sviluppare la produzione di energia termica da biomasse ed introduceva anche una serie di criteri di sostenibilità ambientale da applicare alla produzione di biocarburanti e bioliquidi.

Nel 2010 gli Stati membri hanno comunicato alla Commissione Europea il proprio Piano di Azione Nazionale sull'energia rinnovabile (PAN) in cui si definiva il percorso per il raggiungimento degli obiettivi per il 2020. Nel PAN del 2010 l'Italia ha ripartito tra i settori dei trasporti, elettricità e riscaldamento l'obiettivo nazionale del 17% e contiene il potenziamento dell'uso delle rinnovabili nel riscaldamento/raffrescamento e una accresciuta attenzione all'utilizzo delle biomasse. Nel Piano, infatti, le biomasse vengono individuate come le fonti di energia rinnovabile con più ampie possibilità di sviluppo in quanto non ancora ampiamente sfruttate. Entro il 2020 è previsto che l'Italia produca +7,6 Mtep di energia dalle biomasse.

Il decreto legislativo n. 28 del 3 marzo 2011, è stato pubblicato nel Supplemento Ordinario n. 81 alla G.U. n. 71 e prevede l'attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili. Nell'art. 1 si definiscono gli strumenti, i meccanismi e gli incentivi per il raggiungimento degli obiettivi indicati per il 2020. Il decreto è entrato in vigore il 29 marzo 2011 e detta norme anche per: i trasferimenti tra gli Stati membri di quote di energia rinnovabile; i progetti comuni tra gli Stati membri e paesi terzi; le procedure amministrative; l'informazione e la formazione; l'accesso alla rete elettrica ed infine la sostenibilità per i biocarburanti e i bioliquidi.

Il testo di legge principale che governa gli impianti a biomasse è il “TUA”, il Testo Unico per l'Ambiente, ovvero il D.Lgs 3 aprile 2006, N. 152 “Norme in materia ambientale”; in dettaglio nella sua parte Quinta “Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera”. Gli impianti sono disciplinati dal Titolo I e dal Titolo II della parte Quinta, mentre nel Titolo III vengono trattati i combustibili consentiti negli impianti termici sia domestici, sia industriali. I combustibili vengono specificamente indicati nell'Allegato X alla parte Quinta, alle condizioni ivi previste. Inoltre i materiali e le sostanze elencati nell'allegato X alla parte quinta del decreto, non possono essere utilizzati come combustibili se costituiscono rifiuti, secondo quanto indicato dalla parte quarta del decreto. In dettaglio nell'allegato X, Parte I, Sezione 1, “Combustibili consentiti negli impianti di cui al Titolo I (impianti industriali)”: l) legna da ardere alle condizioni previste nella parte II, sezione 4; n) biomasse combustibili individuate nella parte II, sezione 4, alle condizioni ivi previste; e nell' allegato X, Parte I, Sezione 2, “Combustibili consentiti negli impianti di cui al Titolo II (impianti termici)”, f) legna ardere alle condizioni previste nella parte II, sezione 4;

h) biomasse combustibili individuate nella parte II, sezione 4, alle condizioni ivi previste.

Il decreto legislativo n. 183 del 2017, in attuazione della direttiva europea 2015/2193 del 25 novembre 2015, tratta la limitazione delle emissioni nell'atmosfera di taluni inquinanti originati da impianti di combustione medi, nonché il riordino del quadro normativo degli stabilimenti che producono emissioni nell'atmosfera, ai sensi dell'art. 17 della l. 12 agosto 2016, n. 170 (G.U. n. 293 del 16 dic. 2017). Il decreto apporta significative modifiche ai titoli I, “Prevenzione e limitazione delle emissioni in atmosfera di impianti e attività”, e II, “Impianti termici civili”, della parte Quinta del TUA, nonché agli allegati della stessa parte Quinta.

Le modifiche comprendono, ad esempio, la nuova definizione di “Medio impianto di combustione”, che viene differenziato dal “Grande impianto” ovvero quello con una potenza termica nominale superiore ai 50 MW e dal “Piccolo impianto con una potenza termica nominale inferiore ad 1 MW. Il medio impianto viene definito come: “impianto di combustione di potenza termica nominale pari o > a 1 MW e < a 50MW, inclusi i motori e le turbine a gas alimentato con i combustibili previsti all'allegato X alla parte quinta o con le biomasse rifiuto previste all'allegato II alla parte quinta”. Gli impianti vengono poi distinti in “esistente”, qualora “il medio impianto di combustione messo in esercizio prima del 20 dic. 2018 nel rispetto della normativa all'epoca vigente o previsto in una autorizzazione alle emissioni o in una AUA o in una AIA che il gestore ha ottenuto o alla quale ha aderito prima del 19 dic. 2017 a condizione che sia messo in esercizio entro il 20 dic. 2018”, oppure in “nuovo”, se “il medio impianto di combustione ... non rientra nella definizione...” precedente (lett. GG-bis, art. 268, c.1, d.lgs. n.

152/2006). Vengono anche modificate le autorizzazioni; in particolare, la disciplina autorizzatoria, di cui all'art. 269, D.lgs. n. 152/2006, risulta modificata con una norma di raccordo alla disciplina sull'AUA, se applicabile, ai sensi del D.lgs. n. 59/2013, nonché con il richiamo, nel caso di autorizzazione per un "Medio impianto", alla nuova parte IV-bis dell'Allegato I, parte quinta del D.lgs. n. 152/2006, recante "Elementi minimi dell'autorizzazione e della registrazione dei medi impianti di combustione e dei medi impianti termici civili" (c.2-bis, art.269 cit.). Vengono individuati gli elementi minimi dell'autorizzazione e della registrazione dei medi impianti di combustione e dei medi impianti termici civili: In dettaglio, per l'impianti di combustione: a) Nome e sede legale del gestore e sede dello stabilimento in cui sono ubicati gli impianti, se fissi; b) Classificazione secondo le definizioni dell'art. 268, c. 1.; c) Classificazione dei combustibili utilizzati (biomassa solida, altri combustibili solidi, gasolio, altri combustibili liquidi, gas naturale, altri combustibili gassosi) e relativi quantitativi; d) Potenza termica nominale; e) Numero previsto di ore operative annue; f) Carico medio di processo; g) Data di messa in esercizio o, se tale data non è nota, prove che la messa in esercizio dei medi impianti di combustione esistenti sia antecedente al 20 dic. 2018. h) Settore di attività dello stabilimento o del medio impianto di combustione secondo il codice NACE. Inoltre l'autorizzazione stabilisce il periodo che deve intercorrere tra la messa in esercizio e la messa a regime dell'impianto. La messa in esercizio, fermo restando quanto previsto all'art. 272, c. 3, deve essere comunicata all'autorità competente. con un anticipo di almeno 15 giorni. L'autorizzazione stabilisce la data entro cui devono essere trasmessi all'autorità competente i risultati delle misurazioni delle emissioni effettuate in un periodo rappresentativo delle condizioni di esercizio dell'impianto, decorrente dalla messa a regime, e la durata di tale periodo, nonché il numero dei campionamenti da realizzare; "(art.269, nuovo c.6, cit.), • la riaffermazione, anche per la disciplina sulle emissioni in atmosfera, dell'obbligo di assistenza del Gestore a favore dei controlli dell'autorità competente, con aggiunta del passaggio tipizzante tutti i PMC delle AIA, quanto all'obbligo per il Gestore di assicurare "in tutti i casi l'accesso in condizioni di sicurezza, anche sulla base delle norme tecniche di settore, ai punti di prelievo e di campionamento"(nuovo c.9, art.269, D.lgs. cit.). È stato modificato anche l'art. 270, "Individuazione degli impianti e convogliamento delle emissioni", ora applicabile anche ai Grandi Impianti di Combustione (GIC) ed ai Medi Impianti di Combustione (MIC), "...ferme restando le ulteriori disposizioni in materia di aggregazione degli impianti previste all'art. 273, cc. 9 e 10 ("...Si considerano come un unico GIC, ai fini della determinazione della potenza termica nominale in base alla quale stabilire i v.l. di emissione, più impianti di combustione di potenza termica pari o > a 15 MW e la somma delle cui potenze è pari o > a 50 MW che sono

localizzati nello stesso stabilimento e le cui emissioni risultano convogliate o convogliabili, sulla base di una valutazione delle condizioni tecniche svolta dalle autorità competenti, ad un solo punto di emissione. La valutazione relativa alla convogliabilità tiene conto dei criteri previsti all'art. 270. Non sono considerati, a tali fini, gli impianti di riserva che funzionano in sostituzione di altri impianti quando questi ultimi sono disattivati". Per quanto riguarda invece i Valori Limite di emissione di cui all'art. 271, d.lgs. n. 152/2006 e al D.Lgs n. 183 del 15 novembre 2017, in attuazione della direttiva (UE) 2015/2193 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 25 novembre 2015, risultano particolarmente importante i rinvii alla disciplina dei BAT – AEL, cioè i livelli di emissione associati alle Best Available Techniques - alle tecniche previste nelle conclusioni sulle BAT pertinenti per tipologia di impianti e attività, ora applicabili a tutti gli impianti con emissioni in atmosfera anche se non necessariamente ricadenti anche nella disciplina AIA. Si rinvengono in queste norme anche i criteri riguardanti il monitoraggio sia per i controlli da parte dell'autorità, sia per il monitoraggio delle emissioni da parte del gestore. Altra novità riguarda le emissioni odorigene. Si rinvia alla normative regionali piuttosto che alle singole autorizzazioni che potranno prevedere misure per la prevenzione/limitazione di tale tipo di emissioni, includendo ove opportuno: a) valori limite di emissione espressi in concentrazione (mg/Nm^3) per le sostanze odorigene; b) prescrizioni impiantistiche e gestionali e criteri localizzativi per impianti e per attività aventi un potenziale impatto odorigeno, incluso l'obbligo di attuazione di piani di contenimento; c) procedure volte a definire, nell'ambito del procedimento di autorizzazione, criteri localizzativi in funzione della presenza di ricettori sensibili nell'intorno dello stabilimento; d) criteri e procedure volti a definire, nell'ambito del procedimento di autorizzazione, portate max o concentrazioni max di emissione odorigena espresse in unità odorimetriche (ouE/m^3 o ouE/s) per le fonti di emissioni odorigene dello stabilimento; e) specifiche portate massime o concentrazioni massime di emissione odorigena espresse in unità odorimetriche (ouE/m^3 o ouE/s) per le fonti di emissioni odorigene dello stabilimento. Inoltre è previsto che il Coordinamento ISPRA/ARPA regionali, potrà disporre indirizzi interpretativi nonché valori limite e prescrizioni per la prevenzione e la limitazione delle emissioni odorigene degli stabilimenti, inclusa la definizione di metodi di monitoraggio e di determinazione degli impatti.

Per quello che riguarda il monitoraggio, ed in particolare i sistemi di monitoraggio in continuo (SME), secondo il paragrafo 4, allegato II alla parte quinta del D.lgs. n. 152/2006, negli impianti di combustione con potenza termica nominale totale \geq a 100 MW le misurazioni delle concentrazioni di biossido di zolfo, ossidi di azoto e polveri nell'effluente gassoso sono effettuate in continuo. Se l'impianto con una potenza termica nominale totale pari o superiore

a 100 MW è alimentato con combustibili gassosi, anche la misurazione della concentrazione di CO nell'effluente gassoso è effettuata in continuo.

I sistemi di misurazione continua sono soggetti a verifica mediante misurazioni parallele secondo i metodi di riferimento, almeno una volta all'anno. I gestori informano l'autorità competente dei risultati di tale verifica. Le autorità competenti stabiliscono, in sede di autorizzazione, le modalità e la periodicità secondo cui i gestori devono informare le stesse autorità circa i risultati delle misurazioni continue, i risultati della verifica del funzionamento delle apparecchiature di misurazione, i risultati delle misurazioni discontinue, nonché circa i risultati di tutte le altre misurazioni effettuate per valutare il rispetto delle pertinenti disposizioni del D.lgs. N. 152/2006 (par.4.9, allegato II).

Nella immagine seguente vengono mostrati i limiti emissivi per le varie sostanze negli impianti a biomasse solide, con diverse potenze nominali, secondo quanto indicato nel D.Lgs 183 del 2017 (Fig. 2).

Allegato I Parte III Paragrafo 1.1	Biomasse solide – Impianti esistenti							
	Fino ad adeguamento Tenore di ossigeno del 11%				dal 1.1.2030 Tenore di ossigeno del 6%		dal 1.1.2025 Tenore di ossigeno del 6%	
	P.T.N. (MW)	> 0,15 - ≤ 3	> 3 - ≤ 6	> 6 - ≤ 20	> 20	> 0,15 - < 1	≥ 1 - ≤ 5	> 5 - ≤ 20
Polveri (mg/Nm ³)	100 200 mg/ Nm ³ se PTN ≥ 0,035 MW ed ≤ 0,15 MW	30	30	30	75(5) 150 mg/Nm ³ impianti 0,035 MW ≥ PTN ≤ 0,15 MW	45(5) 150 mg/Nm ³ impianti 0,035 MW ≥ PTN ≤ 0,15 MW	45 30 (3)(5) 150 mg/Nm ³ impianti 0,035 MW ≥ PTN ≤ 0,15 MW	30 (5) 150 mg/Nm ³ impianti 0,035 MW ≥ PTN ≤ 0,15 MW
NOx (mg/Nm ³)	500	500	400 300 (vmg)	300 200 (vmg)	650 525 (3) (5)	650 450 (3)(5)	600 300 (3)(5)(7)	450 300 (3)(5)(7)
SOx (mg/Nm ³)	200	200	200	200	225 (5)(8)	200 (5)(8)	200 (5)(8)	200 (5)(8)
CO (mg/Nm ³)	350	300	200 150 (vmg)	200 100 (vmg)	525	450	300	300
COT (mgC/Nm ³)			30	20 10 (vmg)			45	30
NH ₃ (mg/Nm ³)					7,5 DeNOx	7,5 DeNOx	7,5 DeNOx	7,5 DeNOx

Fig.
2.
Limiti

(3) VG in attuazione art. 271, c.3,4,5 in caso di stabilimenti localizzati in zone dove sono stati registrati sup. di un VL di qualità dell'aria in almeno uno degli ultimi 3 anni civili

(5) Per l'utilizzo di pollina si applicano, indipendentemente dalla PTN, 10 mg/Nm³ per le polveri, 200 mg/Nm³ per NOx e 50 mg/Nm³ per SOx

(7) Se è presente uno SME il valore guida si applica come media giornaliera. Se non c'è uno SME il valore guida si applica come media oraria

emissivi impianti a biomasse. Da Margerita Tiberio

Inoltre, nel 2017 sulla Gazzetta Ufficiale del 18 dicembre 2017, n. 294 è stato pubblicato il Decreto n. 186, 7 novembre 2017, "Regolamento recante la disciplina dei requisiti, delle procedure e delle competenze per il rilascio di una certificazione dei generatori di calore alimentati a biomasse combustibili solide". Tale norma (art.1) stabilisce i requisiti, le procedure e le competenze per il rilascio di una certificazione ambientale dei generatori di calore alimentati

con legna da ardere, carbone di legna e biomasse combustibili, come individuati alle lettere f), g) e h) della parte I, sezione 2, dell'allegato X alla parte quinta del D.lgs. 152/2006. Individua, inoltre, le prestazioni emissive di riferimento per le diverse classi di qualità, i relativi metodi di prova e le verifiche da eseguire ai fini del rilascio della certificazione ambientale, nonché appositi adempimenti relativi alle indicazioni da fornire circa le corrette modalità di installazione e gestione dei generatori di calore che hanno ottenuto la certificazione ambientale.

La Commissione Europea nel gennaio del 2019 ha pubblicato la versione rivista della Direttiva sulle Energie Rinnovabili (RED2).

Gli obiettivi della politica europea sulle rinnovabili sono:

- mantenere il ruolo guida dell'Europa a livello mondiale con l'obiettivo di almeno il 32 % di energie rinnovabili entro il 2030
- aiutare l'Europa a contrastare il cambiamento climatico e a raggiungere gli obiettivi dell'accordo di Parigi sul clima
- proteggere l'ambiente e ridurre l'inquinamento atmosferico nelle città e nelle comunità in Europa
- permettere alle famiglie, alle comunità e alle imprese di diventare produttori di energia pulita
- ridurre la dipendenza dalle importazioni di energia e aumentare la sicurezza energetica
- creare più posti di lavoro e attrarre nuovi investimenti nell'economia europea

Il nuovo quadro strategico per le energie rinnovabili:

- offre agli investitori certezza nel lungo periodo e snellisce le procedure di rilascio dei permessi per i progetti
- pone il consumatore al centro della transizione energetica riconoscendogli esplicitamente il diritto di produrre la propria energia rinnovabile
- accresce la competitività dell'energia elettrica da fonti rinnovabili e l'integrazione dei suoi mercati
- accelera l'uso delle energie rinnovabili nei settori del riscaldamento/raffrescamento e dei trasporti
- rafforza la sostenibilità della bioenergia e promuove tecnologie innovative

2. Filiera e produzione energetica

La filiera

Per filiera si intende quell'insieme di attività (compresi i flussi materiali e informativi), tecnologie, risorse e aziende che partecipano alla creazione, trasformazione, distribuzione, commercializzazione e fornitura di un certo prodotto.

La filiera delle biomasse solide, quella di interesse in questo studio, appartiene al gruppo delle filiere agroenergetiche, assieme alla filiera di biogas/biometano e bioliquidi o biocarburanti così come indicato nel PAN (Piano d'Azione Nazionale), che traccia il percorso, a livello comunitario, per, gli ormai prossimi obiettivi del 2020. L'interesse per questa filiera, come produzione elettrica, viene confermato nella "Proposta di Piano Nazionale Integrato per L'Energia e il Clima", mentre si afferma la necessità di un maggiore controllo sulle emissioni degli impianti domestici in e piccoli impianti per la produzione di calore. In sostanza il piano propone di mettere in atto dei meccanismi di promozione che "favoriranno gli impianti ad alta qualità ambientale e ad alta efficienza. Al fine di stimolare il rinnovo dei vecchi impianti con tecnologie efficienti e a ridotte emissioni, i meccanismi descritti saranno aggiornati, introducendo requisiti prestazionali e ambientali più stringenti per i generatori di calore a biomassa".

La proposta di piano è attualmente (aprile 2019) in fase di consultazione pubblica.

In generale, il piano recepisce gli obiettivi europei ambientali ed energetici per il 2030, i cui aspetti principali sono i seguenti:

- una riduzione almeno del 40% delle emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990;
- la copertura del 27% dei consumi finali lordi di energia con le fonti rinnovabili;
- un miglioramento almeno del 27% dell'efficienza energetica, rispetto allo scenario tendenziale PRIMES 2007 (nella proposta di revisione della Direttiva 2012/27/CE sull'efficienza energetica, formulata alla fine del 2016, la Commissione propone di innalzare l'obiettivo al 30%)

Le cosiddette biomasse solide agroforestali comprendono prodotti o sottoprodotti forestali (legna da ardere e scarti di produzione), agricoli (es. tutoli di mais, colture lignocellulosiche, residui di potatura ecc.) o agroindustriali (es. scarti di lavorazioni come gusci, noccioli, cippato, lolla di riso) adatti alla produzione di energia termica ed elettrica, direttamente, attraverso processi di combustione, oppure mediante gassificazione.

A fronte di una diminuzione a livello mondiale delle superfici forestali, come illustrato anche nel "Libro Bianco sui Boschi d'Italia" del 2017, l'Europa mostra una netta controtendenza;

secondo il rapporto State of Europe's Forest del 2015 le aree forestali sono aumentate di 17,5 milioni di ettari dal 1990 al 2015, con una media di 700 mila ettari l'anno e coprono attualmente circa un terzo del territorio europeo. In particolare in Italia circa il 39% della superficie è coperto da terre boscate e coltivazioni arboree arrivando a quasi 12 milioni di ettari. Negli ultimi ottant'anni la superficie forestale si è triplicata essenzialmente per effetto della naturale espansione verso i terreni agricoli e i pascoli abbandonati, così come verso gli spazi periurbani interstiziali e degradati (Sallustio et al. 2017), nel dettaglio, 34,7 % in più come risulta dai dati IFNC - Inventario Forestale Nazionale, con un aumento costante negli ultimi anni (dai 10,5 milioni di ettari del 1950 ai circa 11 milioni del 2015) (Fig. 3 e Fig. 4).

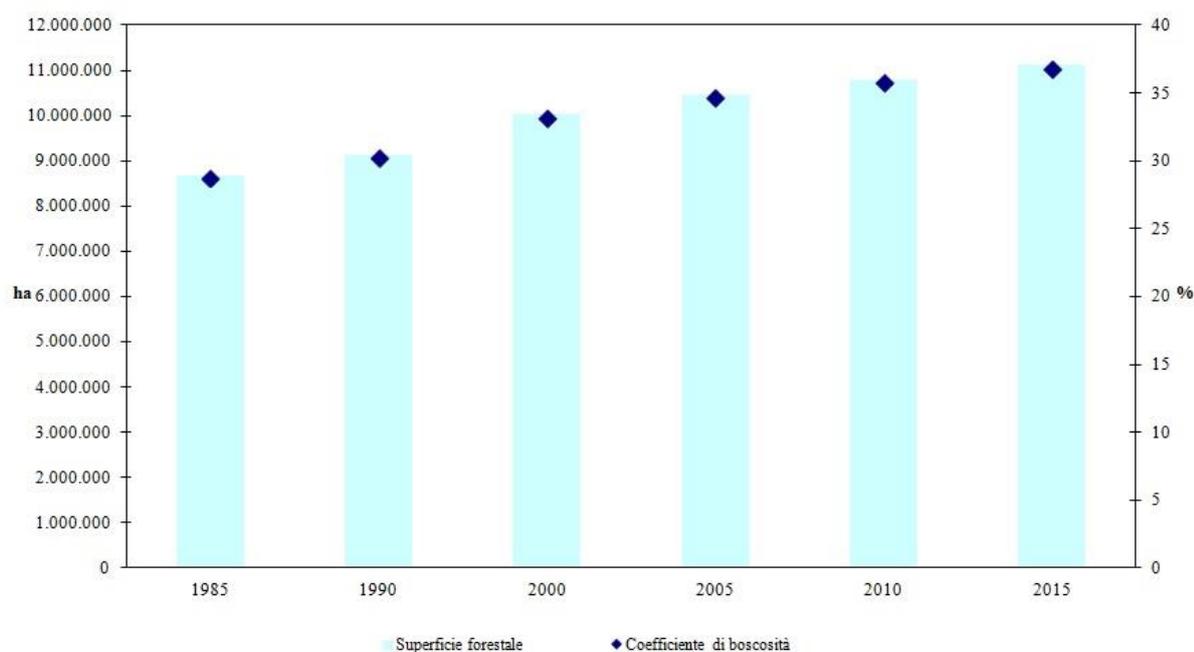


Fig. 3. Superficie forestale: stato e variazioni - Indicatori 2016 - Ispra

Se da una parte questi dati evidenziano il grande potenziale della filiera forestale, dall'altra alcune criticità ne limitano l'utilizzo, ad esempio il 95% delle zone boscate è in aree collinari se non addirittura decisamente montane. La maggior parte delle zone sono dedicate alle pratiche agricole e agropastorali. Inoltre, il patrimonio forestale è estremamente frammentato dal punto di vista delle proprietà e spesso, per motivi orografici, difficilmente raggiungibile utilizzabile.



Fig. 4. Distribuzione geografica del patrimonio forestale nazionale - Libro Bianco. Documento realizzato nell'ambito del Programma Rete Rurale Nazionale 2014-2020, Piano Biennale 2017-2018, dal CREA-Centro Politiche e Bioeconomia

Una foresta correttamente gestita rappresenta, un'importante ricchezza sotto diversi punti di vista, ambientali ed economico-sociali.

Ad esempio i boschi svolgono un ruolo importante nel bilancio idrologico equilibrando i flussi in entrata (precipitazione, intercettazione, infiltrazione) con l'evapotraspirazione. In particolare, per quello che riguarda il controllo degli eventi di piena, riducono la laminazione superficiale e aumentano i tempi di corrivazione. Per quanto riguarda la stabilità dei versanti, il sistema radicale contribuisce a rinforzare il suolo in termini geo-meccanici, poiché crea una rete di deflusso dell'acqua nel suolo. Gli alberi, inoltre diminuiscono anche l'erosione superficiale, trattenendo le particelle di terreno.

Inoltre il bosco svolge un ruolo fondamentale come "carbon sink", cioè nel sequestro della CO₂, le piante assorbono un'elevata quantità di carbonio nella biomassa e rilasciano l'ossigeno nell'atmosfera.

Una foresta è una risorsa di primaria importanza per l'industria di trasformazione e i suoi sottoprodotti diventano competitivi come combustibile per la produzione di energia. La

produzione ufficiale annua della selvicoltura si può stimare in media intorno agli 8-9 milioni di metri cubi, con un percentuale di legna da ardere, superiore al 60%. Questo legname non rientra nelle filiere industriali (né di manifattura, né di produzione energetica). Resta molto elevata l'importazione dall'estero della legna da ardere, circa tre volte ossia 1,4 milioni di metri cubi, mentre persiste una quota, difficilmente misurabile, d'importazione illegale (RaFIItalia - Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia 2017 - 2018). Inoltre, gran parte della biomassa per uso energetico proviene da "sottoprodotti" del legname forestale come legna di scarso pregio e ramaglie, ma anche da materiale di risulta derivante da operazioni di ripulitura e diradamento delle foreste.

Per quanto il principale canale di approvvigionamento per gli impianti a biomassa solida di taglia industriale sia rappresentato dalle biomasse residuali, da non escludere il potenziale contributo delle coltivazioni arboree (da foresta e non) quando promosse in ambiti marginali evitando la competizione con le produzioni alimentari rappresentando un'importante opportunità di sviluppo per alcune zone rurali, sia dal punto di vista socio-economico sia per alcuni aspetti fondamentali di gestione del territorio, tra cui gli interventi per la manutenzione e il miglioramento del bosco, la tutela idrogeologica dei versanti in generale e in particolare la ripulitura degli alvei fluviali, nonché per la prevenzione dagli incendi boschivi.

Il resto della filiera comprende il comparto agricolo con il materiale derivante dalle patate (vigneti, oliveti e frutteti ed altri) e da colture dedicate ad esempio i cedui da biomassa con la cosiddetta "short rotation forestry" che prevede la coltivazione ad elevata densità di specie arboree caratterizzate da rapidità di crescita come il pioppo, la robinia o il salice (Fig. 5).

La filiera che riguarda le coltivazioni arboree (da foresta e non) non si chiude con la raccolta dei materiali, ma prevede la loro lavorazione in derivati che abbiano caratteristiche ottimali per l'utilizzo energetico, tra cui:

- pezzatura omogenea e dimensioni idonee ai sistemi di conversione energetica moderni;
- umidità relativa estremamente ridotta che consenta di ottenere un elevato potere calorifico inferiore;
- contenuto in ceneri basso;
- creazione di un sistema di packaging capace di creare le stesse opportunità di distribuzione sul mercato tra cippato e pellet commercializzato.

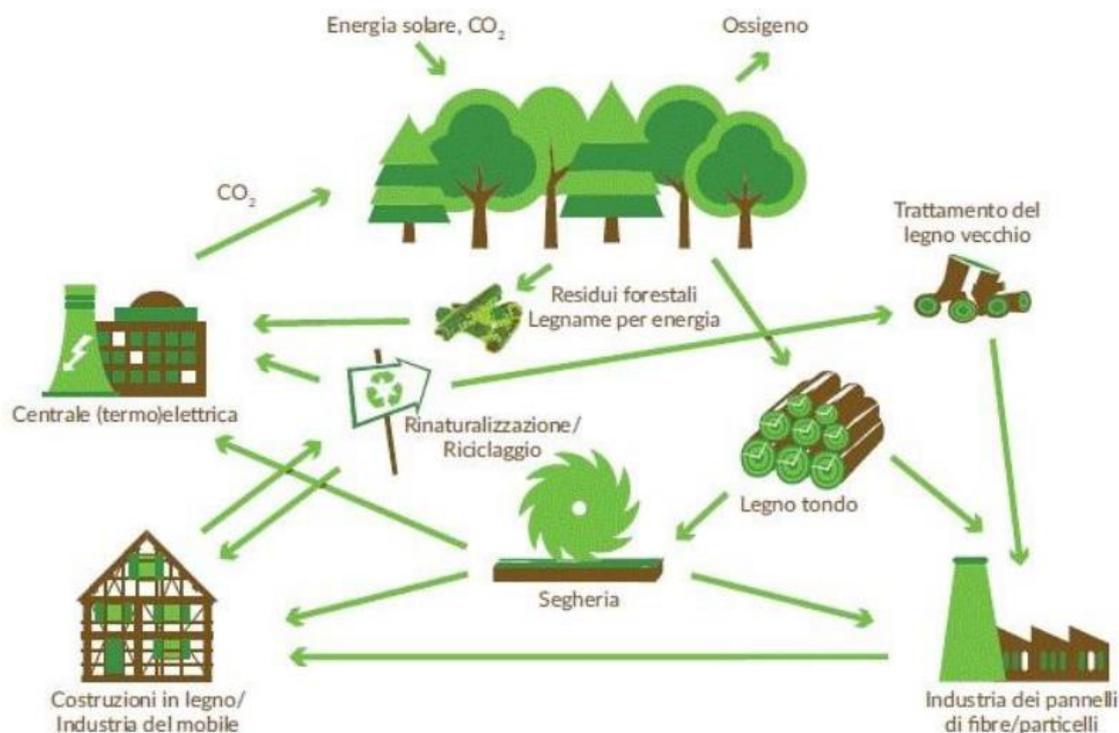


Fig. 5. Filiera del legno da Libro Bianco Foreste 2017

Nella tabella seguente uno schema riassuntivo delle principali biomasse solide utilizzate a scopi energetici (Fig. 6).

Filiera del legno	Essenze impiegate per scopi energetici	Pioppo, salice, eucalipto e legna da ardere in genere
	Residui industriali della lavorazione della cellulosa	black-liquor
	Residui industriali della lavorazione del legno	Segatura e trucioli da segherie
Filiera dell'agricoltura	Essenze coltivate per scopi energetici	Girasole, mais, cardo, ricino, colza, soia, discanto
	Residui di piantagioni e lavorazioni agricole	Fieno e paglia, bagasse, gusci di nocciole, mandorle e noci, potatura viti (sarmenti) e alberi da frutto, raccolta legumi, residui di canapa e cotone
	Scarti da prodotti agro-alimentari	Lolla, pula, sansa esausta, vinaccioli, semi d'olive, noccioli e scarti lavorazione frutta

Fig. 6. Biomasse dalla filiera del legno e dell'agricoltura. Modificato da Quale energia.

La produzione energetica

Da dati Terna, società che gestisce la rete di trasmissione italiana in alta tensione, risulta che la produzione della energia elettrica da biomasse solide dal 2010 al 2017 ha visto un incremento costante con una lieve flessione nel 2017, come risulta dalla tabella e dal grafico seguente (Fig. 7 e Fig. 8).

GWh	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
biomasse solide	1.543,1	1.667,7	1.545,0	2.132,1	2.010,7	2.076,2	2.223,1	2.196,4

Fig. 6. Dati Terna 2017

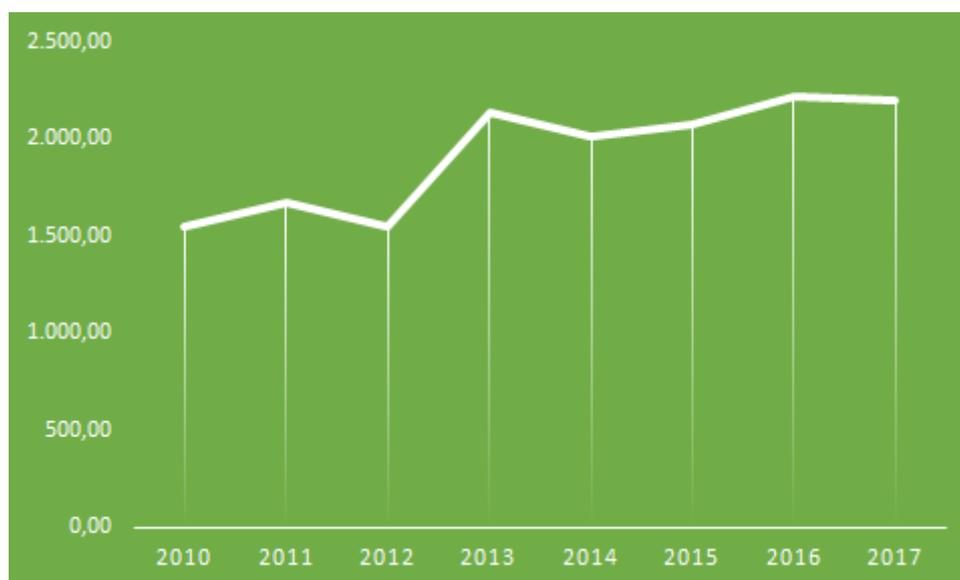


Fig. 7. Produzione energia elettrica in GWh anni 2010-2017. Dati Terna 2017

In particolare i consumi finali lordi di energia prodotta da biomasse solide hanno registrato un aumento costante dal 408 a 562 Ktep tra il 2012 e il 2016.

	2012	2013	2014	2015	2016
CONSUMI FINALI LORDI DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI (A)	19.618	20.737	20.245	21.286	21.081
Energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (settore Elettrico)	8.026	8.883	9.248	9.435	9.504
Idraulica (normalizzata)	3.795	3.868	3.935	3.950	3.972
Eolica (normalizzata)	1.066	1.214	1.280	1.315	1.420
Solare	1.622	1.856	1.918	1.973	1.901
Geotermica	481	487	509	532	541
Biomasse solide	408	506	532	541	562
Biogas	397	640	705	706	710
Bioliquidi sostenibili	256	312	369	418	398
Consumi finali di energia da FER (settore Termico)	9.635	9.765	8.968	9.783	9.611
Consumi finali di energia geotermica	118	119	111	114	125
Consumi finali di energia solare termica	155	168	180	190	200
Consumi finali della frazione biodegradabile dei rifiuti	218	189	213	225	231
Consumi finali di energia da biomasse solide nel settore residenziale	6.637	6.633	5.676	6.393	6.173
Consumi finali di energia da biomasse solide nel settore non residenziale	46	92	164	231	229
Consumi finali di energia da bioliquidi sostenibili	0	0	0	0	0
Consumi finali di energia da biogas e biometano immesso in rete	44	45	45	45	44
Energia rinnovabile da pompe di calore	2.415	2.519	2.580	2.584	2.609
Calore derivato prodotto da fonti rinnovabili (settore Termico)	592	838	966	905	928
Immissione in consumo di biocarburanti (settore Trasporti)	1.366	1.250	1.063	1.164	1.039

Fig.8. Valori calcolati applicando la metodologia di cui all'Allegato I del DM 14/1/2012 (Ktep). GSE 2017 - Il GSE ha, inoltre, rilevato che tra il 2015 e il 2016 il numero degli impianti alimentati da biomasse solide, non provenienti da rifiuti, per la produzione di energia elettrica, è aumentato del 13% (dai 300 si è arrivati ai 339), con una produzione di bioenergia (comprendente biomasse solide, bioliquidi e biogas) da 3862,1 GWh del 2015 ai 4088,8 del 2016 con un incremento di produzione pari al 5,9%, incremento confermato anche tra il 2016 e il 2017 con il 2,6% (Fig. 9).

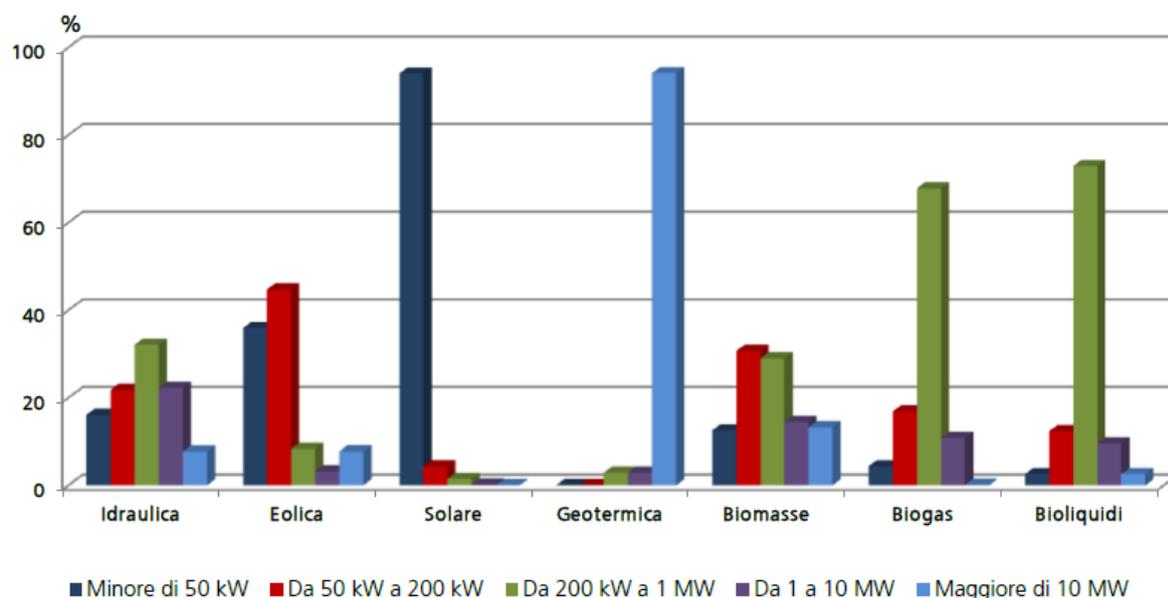


Fig. 9. Distribuzione percentuale per numero di impianti e classi di potenza per le energie rinnovabili. GSE 2017

I dati Terna riguardanti tutti gli impianti a bioenergie – comprendenti biomasse solide e non, bioliquidi e biogas - evidenziano che al 2017 il loro numero totale era di 2.913 di cui un'ampia maggioranza, pari all'87%, aventi una potenza inferiore/uguale ad 1 MW, l'10% costituito da impianti di taglia media (con una potenza compresa tra 1 e 10 MW), e il restante 3% circa costituito dai impianti con una potenza superiore ai 10 MW (Fig. 10).

Classi di potenza	n°	Potenza (MW)	Energia (GWh)
P ≤ 1 MW	2.543	1.338	8.197
1 MW < P ≤ 10 MW	303	853	2.714
P > 10 MW	67	1.945	8.467
Totale	2.913	4.135	19.378

Fonte: Terna

Fig. 10. Potenza e numero di impianti alimentati a bioenergie (biogas, bioliquidi, biomasse). GSE 2017 da Terna

In generale al 2017 la potenza degli impianti alimentati con le bioenergie risultava essere pari al 7,9% della potenza complessiva degli impianti alimentati da fonti rinnovabili. Gli impianti alimentati con bioenergie installati in Italia alla fine del 2017 erano 2.913, con un aumento pari a +3,3% rispetto agli anni precedenti. Gli impianti, considerando una potenza di 4135 MW totali, erano alimentati per il 40% con biomasse solide, 35% con biogas e 25% con bioliquidi, dove la potenza media per gli impianti a biomasse solide è poco maggiore di 4 MW, ma scende alla media di 1 MW per gli impianti a biogas (Fig. 11).

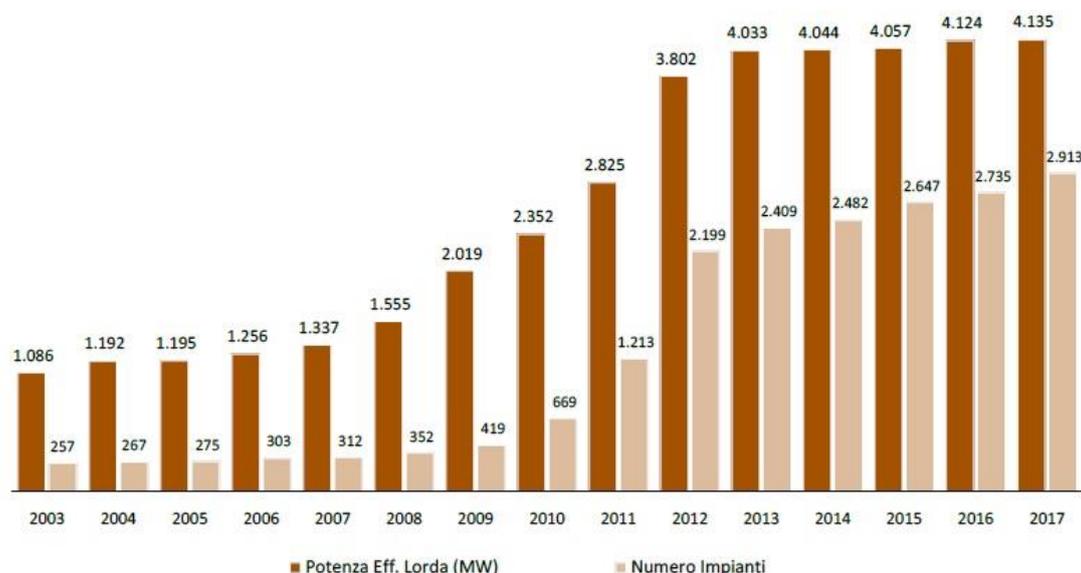


Fig. 11. Potenza e numero di impianti a bioenergia. GSE 2017

Tra il 2003 e il 2017 la potenza installata degli impianti a biomasse è aumentata con un tasso medio annuo del 10,0%. Dopo la crescita continua e sostenuta che proseguiva dal 2008, dal 2014 si è verificato un rallentamento, con incrementi annuali piuttosto contenuti sia del numero sia della potenza degli impianti (Fig. 12).



Fig. 12. Evoluzione della produzione elettrica degli impianti alimentati da bioenergia. GSE 2017

Tra il 2003 e il 2017 l'elettricità generata con le bioenergie è cresciuta mediamente del 12% l'anno, passando da 3.587 GWh a 19.378 GWh. La produzione realizzata nel 2017 proviene per il 42,8% dai biogas, per il 34,1% dalle biomasse solide (12,5% dalla frazione biodegradabile dei rifiuti e 21,6% dalle altre biomasse solide) e per il 23,0% dai bioliquidi.

La distribuzione regionale della produzione da biomasse solide diverse dai rifiuti, mostra una buona diffusione nell'Italia settentrionale, (Emilia Romagna 14%, Piemonte 13%, Lombardia 10%). In Italia centrale emergono il Lazio, l'Umbria e il Molise con una quota del 2,0%. Tra le regioni meridionali si distingue invece la Calabria, che detiene il primato nazionale con il 27,0% (Fig. 13).

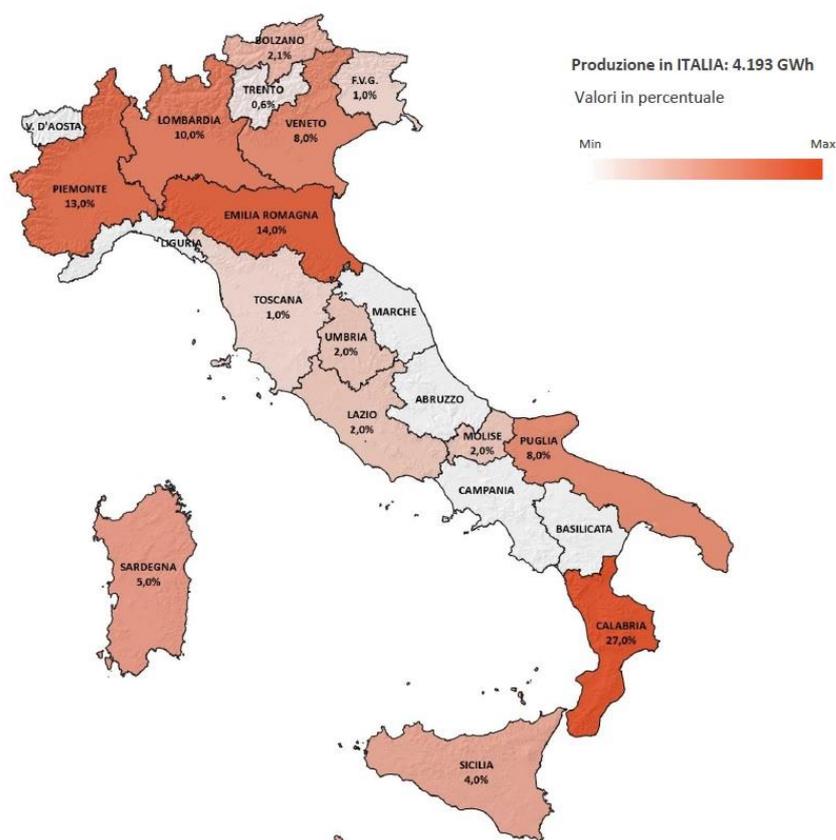


Fig. 13. Distribuzione regionale della produzione elettrica impianti alimentati con biomasse solide diverse dai rifiuti. GSE 2017

3. Le tecnologie per la produzione di energia da biomassa solida

Biomassa: *“frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica proveniente dall’agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l’acquacoltura, gli sfalci e le potature provenienti dal verde pubblico e privato, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani”* (Decreto Legislativo 28/2011).

Il termine biomassa, come già indicato nella definizione fornita nella normativa (D.lgs. 28/2011), comprende tutti i prodotti provenienti dalla forestazione e dall’agricoltura (sia le coltivazioni pensate appositamente a fini energetici sia gli scarti delle altre), i residui della lavorazione del legno e della carta e - come trasformazioni successive di sostanze vegetali da parte di organismi viventi - anche i prodotti organici dell’attività biologica ed i rifiuti urbani organici. Come abbiamo visto, parlando in termini di filiera, le biomasse derivano dalla filiera del legno, da quella dell’agricoltura e da quella dei rifiuti.

Al di là delle definizioni normative la biomassa comprende un ampio insieme di materiali eterogenei di matrice organica e derivati da organismi vegetali che è possibile utilizzare in processi di trasformazione termochimica. La biomassa che viene usata per la produzione di energia e calore, comprende sia quei materiali organici da utilizzare direttamente, sia quei materiali che possono venir trasformati in sostanze solide, liquide o gassose, da usare poi come combustibile negli impianti di conversione. I materiali più adatti alla conversione sono quelli ligneo-cellulosici e cellulosici, ricchi quindi in cellulosa. Questi materiali per essere usati ai fini energetici devono avere alcune caratteristiche, una di queste è il rapporto tra il carbonio e l’azoto in essi contenuti: meno azoto è presente nel materiale da usare come combustibile migliore sarà il suo rendimento. Altro parametro da considerare è l’umidità, infatti è energeticamente più vantaggioso utilizzare nei processi termochimici le biomasse con contenuto di umidità < 50% e un rapporto carbonio/azoto > 30 (meno di un atomo di azoto ogni trenta di carbonio) (Fig. 14).

Anche la quantità di ceneri caratteristica della combustione dei diversi materiali, ha un effetto negativo sul potere calorifico, all’aumentare delle ceneri è stato riscontrato infatti un aumento della durabilità e della difficoltà della combustione. In ogni caso in relazione alla

temperatura della camera di combustione, le ceneri possono formare superfici vetrificate nelle fornaci riducendo l'efficienza complessiva del sistema.

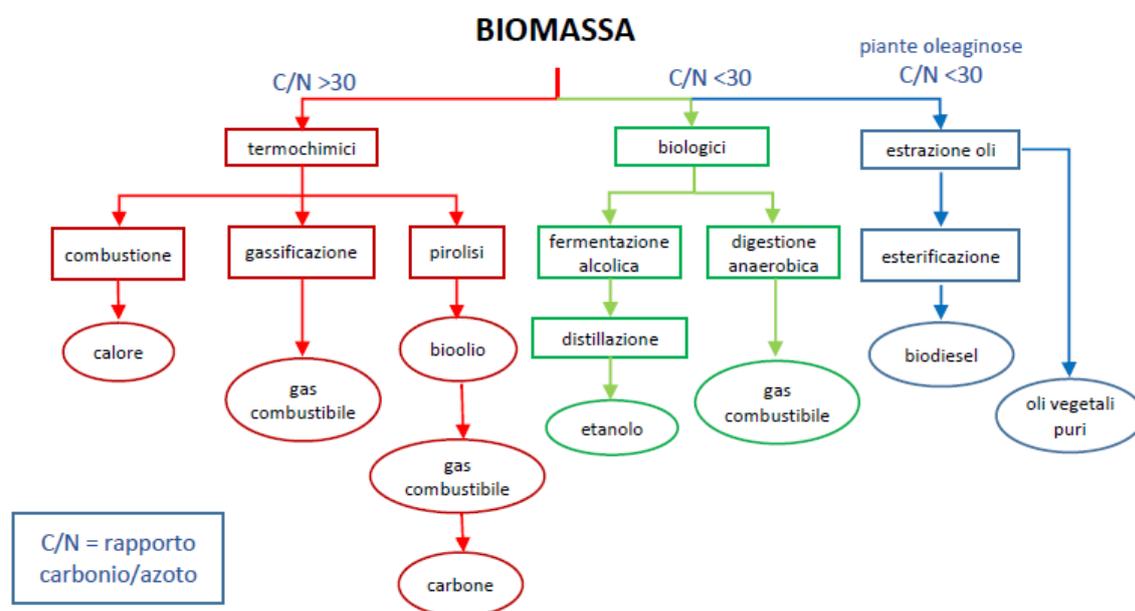


Fig. 14. Processi di trasformazione delle biomasse

I biocombustibili solidi sono caratterizzati da alcuni parametri che influenzano il loro comportamento dal punto di vista energetico e condizionano la scelta delle tecnologie più adatte al loro utilizzo.

Questi parametri sono:

- Potere calorifico superiore (PCS), misura l'energia prodotta dalla combustione completa di una quantità unitaria di combustibile, quando i prodotti della combustione vengono riportati alla temperatura iniziale del combustibile e del comburente
- Potere calorifico inferiore (PCI), è il potere calorifico superiore diminuito del calore di condensazione del vapore d'acqua durante la combustione. Di solito nel legno il potere superiore di combustione è maggiore del 6-7% rispetto a quello PCI.
- Umidità, è espressa in percentuale di peso su biomassa fresca o secca. Ad un contenuto di umidità maggiore corrisponderà un minore potere calorifico per unità di peso, perché durante la combustione solo la sostanza organica produce energia.
- Densità, è la massa di biocombustibile nell'unità di volume, è espressa in kg/m³. Il cippato ha una densità media di circa 250 kg/m³, mentre nel pellet la densità è di circa 660 kg/m³.

- Dimensione delle particelle, questo parametro è importante per la movimentazione meccanica del combustibile.
- Contenuto di ceneri, dipende sia dalle caratteristiche del combustibile che dall'efficienza della combustione. Di media il legno ha un contenuto in ceneri inferiore dell'1-3% rispetto ai materiali erbacei. Nella camera di combustione possono vetrificare e creare residui che aderiscono alle superfici, diminuendo l'efficienza della combustione stessa.
- Contenuto in minerali, elementi come cloro e zolfo, se presenti nella biomassa, possono dar luogo alla formazione di sostanze acide nei fumi che contribuiscono all'usura, per corrosione, delle parti metalliche degli impianti.

Pretrattamenti

Per diventare un buon combustibile, prima di essere impiegata negli impianti di produzione energetica, la biomassa deve essere trattata. Mentre le tecniche per l'uso della biomassa solida legnosa sono ben sviluppate, sulla biomassa erbacea le tecniche sono ancora più innovative e in fase di evoluzione.

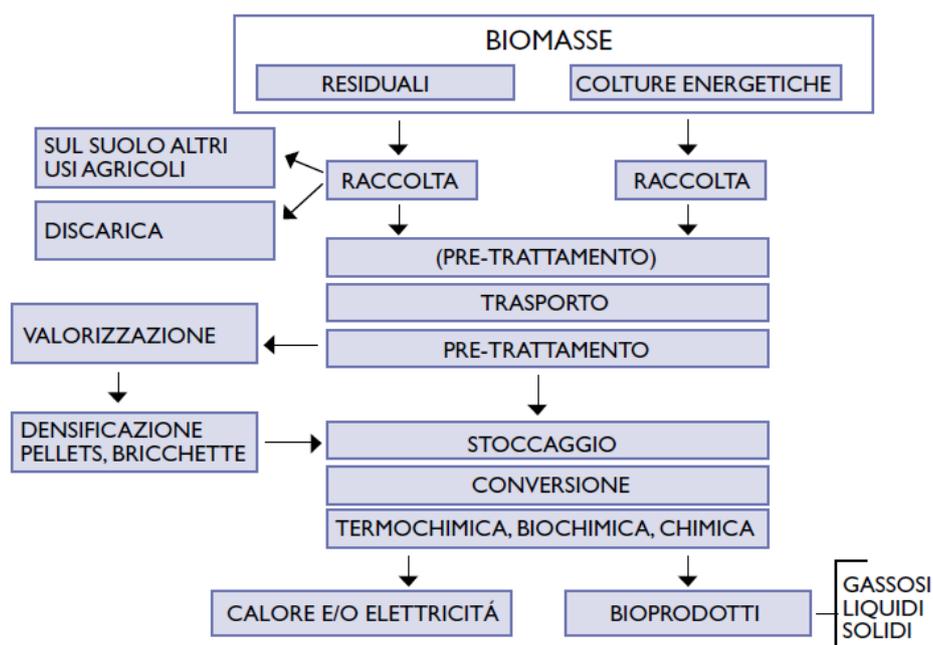


Fig. 15. Biomasse dalla raccolta alla trasformazione: fonte Energia dalle Biomasse - ENEA 2005

La figura soprastante riassume il percorso delle biomasse ligneo-cellulosiche dalla raccolta alla trasformazione (Fig. 15).

I pre-trattamenti sono influenzati dal tenore di umidità della biomassa, così come dalla forma e misura della biomassa stessa. Una pianta al momento del taglio, compreso il cippato delle piante provenienti dalla Short Rotation Forestry (SRF), ha un contenuto di umidità di circa il 50%, mentre gli scarti di lavorazione possono avere un contenuto di umidità variabile dal 15% al 40%. Le colture erbacee poliennali, raccolte in inverno e in primavera, danno origine ad un cippato con un'umidità tra il 20% e 30%, dove le colture annuali hanno un elevato tasso di umidità (60% - 70%).

Dal punto di vista delle dimensioni del materiale, le biomasse legnose possono essere preparate per l'utilizzo in pezzi di varia forma e dimensione: dai tronchi alle polveri passando, in ordine decrescente di grandezza, da ramaglie, cippato e segatura. Le biomasse erbacee possono essere ridotte in chips o preparate per essere utilizzate come balle.

Un contenuto di umidità elevato riduce la temperatura massima di combustione, aumenta il volume dei gas all'interno della camera di combustione e riduce l'efficienza di tutto il sistema. Per diminuire la quantità di umidità, l'industria adotta spesso una essiccazione naturale delle materie prime. In questo caso i tronchi e le ramaglie, a volte precedentemente tagliati in tronchetti, vengono lasciati essiccare direttamente sul luogo di raccolta per la cosiddetta fase di "stagionatura". Il grado di umidità finale dipende dalla durata della stagionatura, dopo il primo anno può arrivare al 55% - 40% mentre dopo due anni può raggiungere una quantità di umidità pari al 25% - 18%.

Le colture erbacee perenni invece vengono raccolte al termine della stagione vegetativa quando sono già naturalmente secche, mentre per le altre colture stagionali, come sorgo e panico, si applica una raccolta in due fasi che consente di ottenere balle con un'umidità compresa tra il 40% e il 35%. Anche per i materiali lavorati si possono adottare dei metodi di essiccazione naturale, in particolare il cippato di cedui da biomassa, con un contenuto di umidità elevato, viene stoccato all'aperto in estate e al coperto in inverno; dopo l'essiccazione il contenuto di umidità passa dal 50% al 30%. Il cippato viene stoccato in cumuli che non devono avere un'altezza superiore ai 6-7 metri per evitare l'innescò all'interno della massa di fenomeni di autocombustione. Inoltre bisogna tenere a mente che i microrganismi presenti all'interno del cumulo, consumano materiale organico e possono portare ad una perdita di massa pari anche al 20% della biomassa originaria per stoccaggi prolungati. Infine un'altra tipologia di trattamento è quella dell'essiccazione forzata o attiva, in cui la biomassa viene sottoposta ad una fonte di calore, di solito aria calda, che viene

fatta circolare all'interno dei cumuli di cippato. Questa metodologia aumenta però il costo finale della materia combustibile.

Per quanto riguarda il materiale cippato anche le dimensioni delle singole scaglie giocano un ruolo importante per l'efficienza della combustione, infatti gli impianti di potenza modesta hanno bisogno di un cippato a grana minore e più omogenea.

Tutte queste tecniche possono anche venir utilizzate in successione, per esempio produrre cippato da biomasse già lasciate stagionare nel luogo di raccolta.

Le biomasse prima di venire utilizzate per la combustione subiscono dei trattamenti per migliorarne le caratteristiche come combustibili, di seguito vengono illustrati alcuni di questi trattamenti.

Pellettizzazione

La fabbricazione dei pellet deriva dall'industria dei mangimi, la biomassa viene essiccata e tritata prima di venire compattata in piccoli cilindri detti appunto "pellet". Prima di essere macinata la biomassa viene passata attraverso dei magneti per eliminare le parti ferrose eventualmente presenti, che potrebbero danneggiare la trafilatura per la macinazione. La pellettizzatrice infine comprime la pasta ottenuta dalla biomassa trafilandola per estrusione, proprio durante questo processo la lignina si fluidifica legando le fibre tra loro. Il materiale estruso viene tagliato a lunghezze uniformi. Il contenuto di umidità nei pellet alla fine della produzione è del 10%.

Bricchettizzazione

I bricchetti invece sono cilindri o parallelepipedi che vengono prodotti pressando e compattando il legno o altre biomasse come paglia, pula segatura, gusci ecc. Come i pellet, hanno una bassa percentuale di umidità (6-8%).

Carbonizzazione

È un processo di pretrattamento del materiale vegetale che consiste nell'alterazione termochimica della biomassa mirata a conferire migliori caratteristiche attraverso la trasformazione delle molecole strutturate dei prodotti legnosi e celluloseici in carbone (carbone di legna o carbone vegetale); il pretrattamento prevede la somministrazione di

calore in presenza di poco ossigeno e la conseguente eliminazione dell'acqua e delle sostanze volatili non combustibili dalla materia vegetale.

Steam Explosion (SE)

È un trattamento a basso impatto ambientale e rispetto agli altri processi presenta il vantaggio fondamentale di separare le tre le frazioni che costituiscono i substrati vegetali (emicellulosa, cellulosa, lignina) rendendo possibile l'utilizzazione totale delle biomasse. La biomassa viene trattata con vapore ad alta pressione ad alta temperatura (180-230 °C) per un breve periodo, da uno a dieci minuti, quindi viene rapidamente depressurizzata. La struttura fibrosa viene così distrutta da questa decompressione esplosiva, l'emicellulosa viene idrolizzata e resa solubile. Questo processo produce però anche alcuni composti tossici che devono essere rimossi prima della fermentazione.

Processi di conversione

Il materiale organico per produrre energia deve essere utilizzabile in processi di conversione termochimica o biochimica. Di seguito verranno descritte entrambe le tipologie di processi entrando maggiormente nei dettagli dei processi termochimici.

Nell'immagine seguente lo schema dei processi di conversione delle biomasse (Fig. 16).

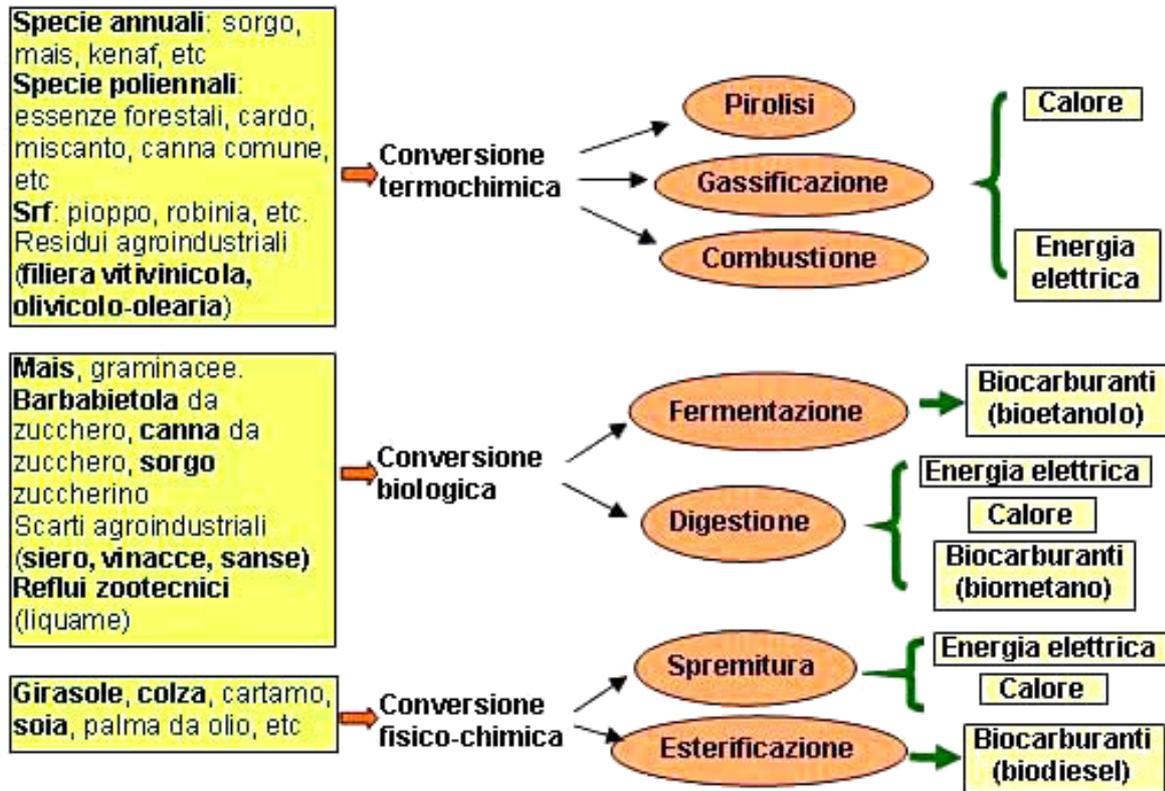


Fig. 16. Processi di conversione delle biomasse

Processi termochimici

Si dicono processi di conversione termochimica quei processi in cui l'azione del calore attiva reazioni chimiche che trasformano la materia in energia

I sistemi di conversione termochimica, e quindi di combustione, sono influenzati dalla presenza di una quantità variabile di aria. Di fatto il processo di combustione è una reazione in cui il carbonio e l'idrogeno presenti nella sostanza organica (combustibile) reagiscono con l'ossigeno dell'aria (comburente) per formare CO_2 e H_2O (prodotti di reazione) e liberando calore. Processi termochimici sono la gassificazione (in condizioni di limitata presenza di ossigeno) e la pirolisi (in assenza di ossigeno).

I processi termochimici vengono utilizzati non solo per produrre energia in modo diretto, ma anche per convertire la biomassa originale in forme più efficienti dal punto di vista energetico

come gas, olii o metanolo, materiali che hanno una più alta densità energetica e quindi più convenienti da trasportare o hanno delle caratteristiche più prevedibili per essere utilizzati tramite motori a combustione interna e turbine a gas.

I materiali che è più conveniente trattare con questi procedimenti ai fini della produzione di calore ed energia, sono quelli in cui il rapporto tra carbonio e azoto (C/N) nella biomassa, sia maggiore di 30 e che abbiano una umidità inferiore al 30%. Considerando questi parametri le biomasse più adatte per questi processi sono:

- la legna e tutti i suoi derivati (segatura, trucioli, etc.),
- i sottoprodotti delle colture ligno-cellulosiche (paglia, residui di potatura, etc.)
- scarti di lavorazione di vegetali (pula, gusci, noccioli, vinaccioli etc.).

Pirolisi

La pirolisi è il processo di trasformazione termochimica delle biomasse che avviene in assenza di ossigeno, è chiamata anche "piroscissione". La formazione degli idrocarburi come il petrolio mediante la decomposizione di materiale organico in assenza di ossigeno, è un processo di pirolisi naturale. La pirolisi, è un processo essenzialmente endotermico e avviene in ambiente riducente, ossia senza ossigeno o quasi, in cui la materia organica si decompone per distillazione. Si ottiene con temperature tra i 400° e gli 800° in assenza di ossigeno o di altri ossidanti. Il grado di decomposizione raggiunto dalla biomassa durante il processo di pirolisi dipende da come si realizza il processo e da diversi parametri di reazione: temperatura, pressione, tempo di residenza, temperatura di condensazione dei vapori, ecc.

Le molecole vibrano con la temperatura, (vibrazione molecolare) e la frequenza a cui le molecole vibrano è direttamente proporzionale alla temperatura delle molecole stesse. Durante la pirolisi i materiali sono sottoposti a temperature molto alte, ciò causa una vibrazione molecolare molto elevata: ogni molecola complessa viene scossa e allungata fino a che le molecole le macromolecole organiche divengono instabili e si scindono in molecole più corte ed in carbonio elementare. La decomposizione dei materiali organici inizia tra i 180-200°C, con sviluppo di acido acetico e formico, e metanolo. A 260-280°C si hanno reazioni esotermiche durante le quali si formano catrami (tar e char), mentre intorno ai 400-450°C. inizia l'emissione dei prodotti gassosi con la formazione di anidride carbonica, monossido di carbonio, idrocarburi ed idrogeno. A temperature superiori a 600°C e sino a 900-1000°C, si ha essenzialmente una produzione di gas, composto da H₂, CO, CO₂

(quest'ultima in percentuali sempre più basse), e da idrocarburi. Il potere calorifico è circa 3000 kcal/Nm³.

Più la temperatura è elevata e la biomassa in pezzi di dimensioni ridotte, più aumenta la velocità di riscaldamento, mentre diminuisce la produzione di residui di tipo "char". L'alta temperatura e i materiali di dimensioni ridotte, favoriscono la rottura degli idrocarburi e l'aumento di idrogeno nel gas così prodotto. Il legno fornisce una maggior quantità di prodotti volatili e meno char rispetto alla paglia e agli scarti degli olivi, al contrario un maggior contenuto di ceneri negli scarti provenienti dall'agricoltura, favorisce le reazioni che portano alla produzione di char: risulta quindi evidente che la composizione della biomassa che subisce il processo di pirolisi influenza i prodotti finali.

Un maggior tempo di residenza della biomassa durante i processi di pirolisi rapida, aumentando il tempo di contatto tra il tar (catrame) e il char rende meno attivo quest'ultimo. L'alta reattività del char è favorita dalle condizioni in cui i gas sono rimossi rapidamente dalle particelle e questo avviene in condizioni di alta temperatura, biomasse in piccoli pezzi ed elevata velocità di riscaldamento.

A seconda delle metodologie utilizzate la pirolisi viene detta veloce, lenta o tradizionale. Quando il processo avviene in tempi molto brevi e ad elevate temperature, la pirolisi è denominata del tipo "flash". La produzione di energia mediante questo processo presenta ancora delle criticità dovute alla qualità dei prodotti (solidi, liquidi o gassosi) ottenuti (Fig. 17).

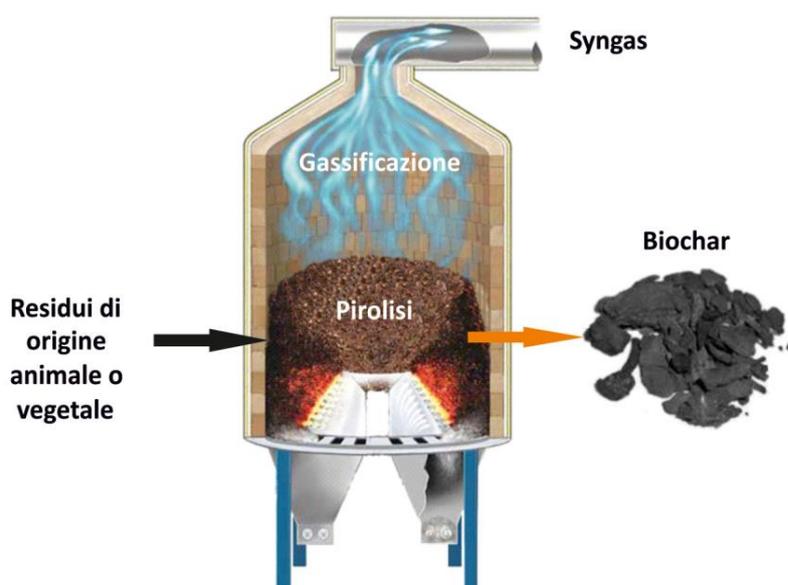


Fig. 17. Schema processo di pirolisi

Gassificazione

La gassificazione delle biomasse è il processo di conversione della biomassa solida in gas combustibile attraverso una sequenza di reazioni termochimiche con ossidazione parziale ad alta temperatura (900÷1.000°C).

Il gas che viene prodotto in questo processo, detto anche syngas o gas di gasogeno, è una miscela di H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O (come vapore acqueo) e N₂, più ceneri in sospensione e idrocarburi C₂H₆, in tracce. La composizione del syngas varia notevolmente a seconda del tipo di combustibile usato, della loro percentuale di umidità e del sistema usato per la gassificazione. Questo gas ha un basso potere calorifico che varia a seconda del metodo utilizzato per la sua produzione tra i 1000- 1200 kcal/Nm³ (kilocalorie per normal metro cubo) o esprimendo il valore in kilojoule, tra i 4.000 kJ/Nm³ dei gassificatori ad aria, i 10.000 kJ/Nm³ dei gassificatori a vapore d'acqua ed i 14.000 kJ/Nm³ di quelli ad ossigeno. Il processo viene detto "reforming" quando si utilizza il vapore acqueo.

Il syngas è ricco di impurità tra cui, polveri, metalli pesanti e catrami.

La gassificazione (Fig. 18) è un processo complesso che comprende l'essiccazione delle materie prime, seguita dalla pirolisi di queste, dalla parziale combustione dei prodotti intermedi e, infine dalla gassificazione dei prodotti risultanti. Il processo di gassificazione, che avviene in un reattore (gassificatore), si compie in presenza di un'agente gassificante, che può essere aria, ossigeno (O₂), vapore (H₂O) o anidride carbonica (CO₂). L'agente gassificante gioca un ruolo vitale nel convertire il char e gli idrocarburi pesanti (HC) in gas a basso peso molecolare come il monossido di carbonio (CO) e in idrogeno (H₂). Le qualità e le caratteristiche dei prodotti ottenuti durante il processo, dipendono dal materiale di partenza e dalle sue dimensioni, dell'agente gassificante scelto, dalla forma del reattore nonché da temperatura e pressione al suo interno e infine, anche dalla presenza di catalizzatori e di materiali adsorbenti.

Il syngas, mediante il processo come quello di Fischer-Tropsch, può essere successivamente trasformato in idrocarburi gassosi, liquidi e solidi, di elevata qualità per via della loro bassa aromaticità e dell'assenza di solfuri. Una delle maggiori criticità che si riscontrano durante questo processo è la formazione di catrame "tar", il catrame è un liquido viscoso contenente in prevalenza idrocarburi policiclici aromatici e spesso con un elevato contenuto di metalli pesanti, può provocare problemi di funzionamento nel reattore e

peggiore la qualità del gas prodotto. La formazione di catrame può essere ridotta attraverso metodologie quali il cracking termico, lo steam reforming e l'ossidazione parziale. Il processo di gassificazione presenta alcune criticità legate alle tecnologie in uso, infatti, se le tecnologie non sono adeguate, si rischia di ottenere gas con un potere calorifico non elevato e con molte impurità (polveri, catrami e metalli pesanti). Inoltre, il gas di gasogeno (syngas) presenta costi elevati di trasporto e stoccaggio e ha un basso contenuto energetico per unità di volume se paragonato ad altri gas. La trasformazione di questo gas in alcool metilico con un potere calorifico inferiore pari a 21.000 kJ/kg permette il suo utilizzo in motori, se il metanolo viene ulteriormente raffinato si ottiene benzina sintetica con un potere calorifico simile a quello delle benzine tradizionali.

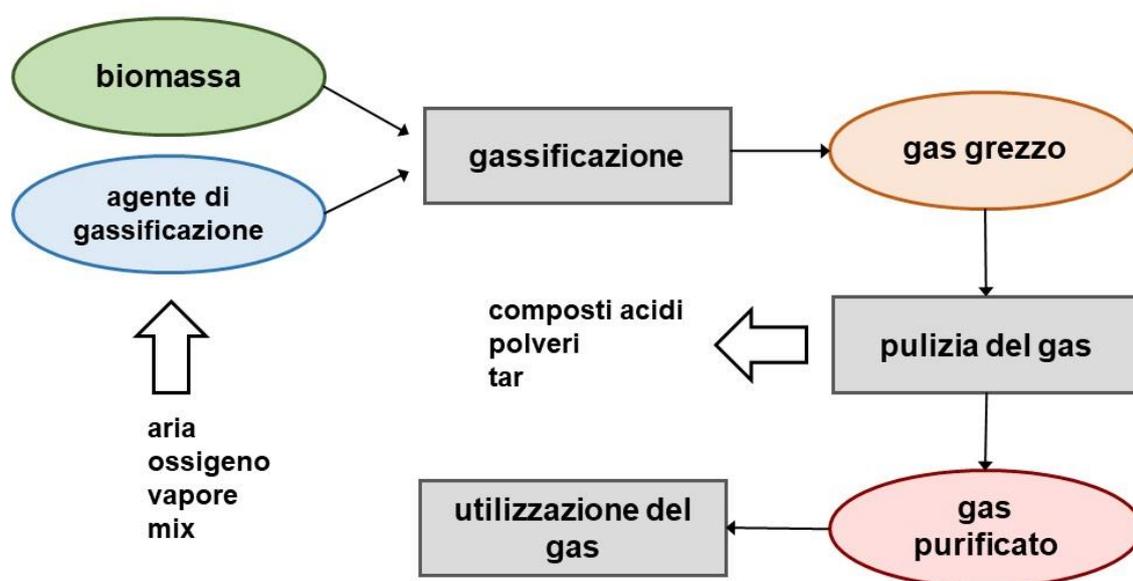


Fig. 18 Schema del processo di gassificazione

A seconda della tecnologia impiegata gli impianti di gassificazione possono essere suddivisi in varie tipologie tra cui, gassificatori a letto fisso (downdraft e updraft), a letto fluido (bollente e circolante) e a letto trascinato (Fig. 19 e Fig. 20).

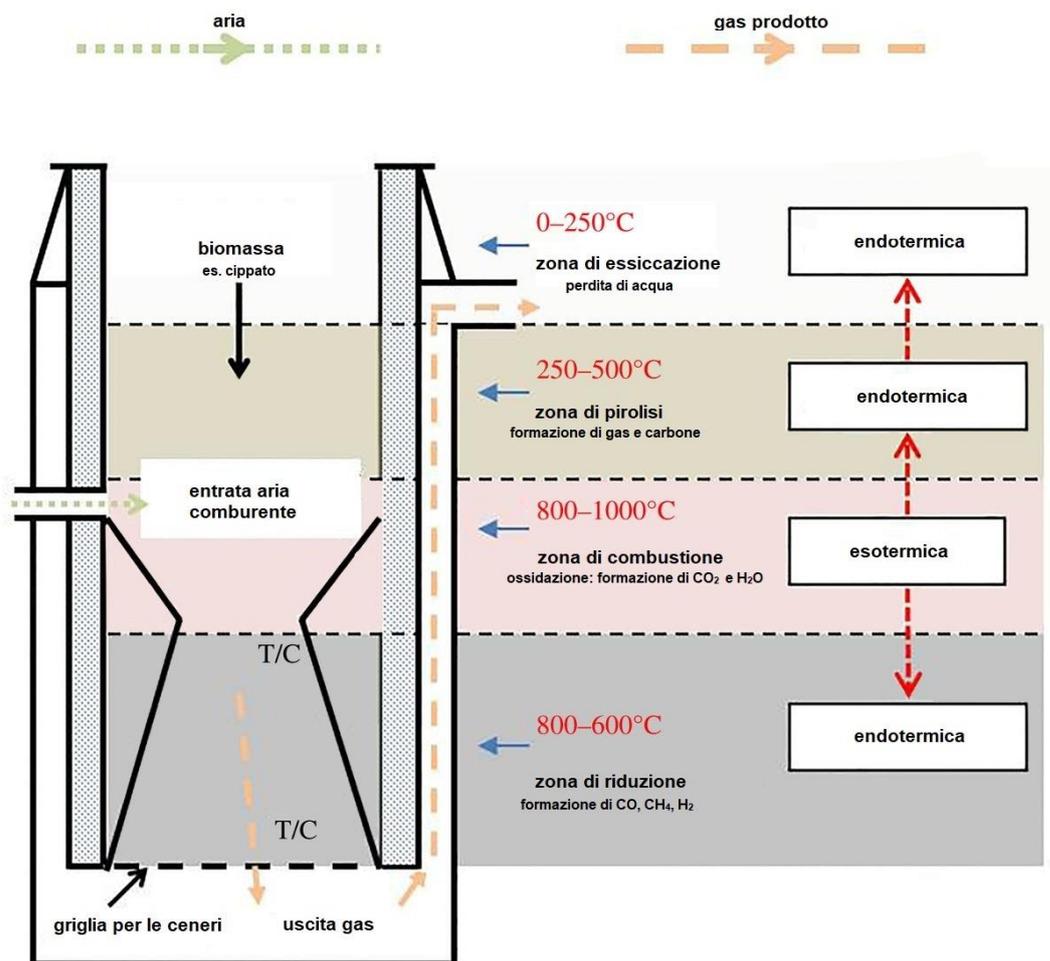


Fig. 19. Schema di funzionamento di gassificatore downdraft. Modificato da Rollinson 2016

TIPO	VANTAGGI	SVANTAGGI
Gassificatore a letto fisso controcorrente Updraft	<ul style="list-style-type: none"> - semplicità - possibilità di operare con diverse tipologie di biomasse (paglia, segatura, legname, etc.) - elevata combustione del carbone di legna e scambio termico del gas in uscita con la biomassa in ingresso - elevato rendimento di impianto 	<ul style="list-style-type: none"> - nel "letto" si formano vie preferenziali che portano a pericolose ritenzioni di ossigeno all'interno del letto fisso stesso - ritenzione dei catrami all'interno del gas
Gassificatore a letto fisso equicorrente Downdraft	<ul style="list-style-type: none"> - produzione di gas senza contenuto di catrami e quindi adatto per alimentazioni di motori endotermici 	<ul style="list-style-type: none"> - la biomassa deve essere trasformata in pellet o bricchetti prima dell'uso - difficoltà nel

	<ul style="list-style-type: none"> - basso impatto ambientale a causa del basso livello di composti organici nel condensato. 	<p>mantenere uniforme l'elevata temperatura</p>
Gassificatore a letto fluido (BFB, CFB)	<ul style="list-style-type: none"> - applicabile a grande scala (maggiore di 500 kW all'albero) - elevati coefficienti di scambio termico - elevate velocità di reazione - temperature uniformi 	<ul style="list-style-type: none"> - elevata produzione di particolato - pezzatura fine della biomassa combustibile - tecnologia complessa - possibile presenza di carbone nelle ceneri
Gassificatore a letto trascinato	<ul style="list-style-type: none"> - applicabile a grande scala - grande versatilità - bassa produzione di catrami - conversione del carbonio completa 	<ul style="list-style-type: none"> - elevata produzione di scorie - richiede combustibile fine - tecnologia complessa - elevati costi di gestione.

Fig. 20. Tipologie di impianti di gassificazione

Metodi di combustione

Combustione diretta

È il metodo più antico per ricavare energia dalle biomasse e consiste in un insieme di reazioni, con un ossidante, di solito aria o ossigeno puro, che provoca l'ossidazione completa delle sostanze organiche. Questo processo è caratterizzato da reazioni esotermiche rapide, che creano alte temperature e concentrazioni elevate di sostanze intermedie instabili in modo che la reazione si auto sostenga e propaghi tramite il trasporto di calore e/o materia.

La combustione di prodotti e residui agricoli dà un buon rendimento energetico, soprattutto se vengono utilizzati come combustibili biomasse ricche di glucidi strutturati (cellulosa e lignina) e con contenuti di acqua inferiori al 30%. Le biomasse solide utili sono:

- legname, anche cippato o in pellet;
- paglie di cereali;
- residui di raccolta di legumi secchi;
- residui di piante oleaginose (ricino, cartamo, etc.);
- residui di piante da fibra tessile (cotone, canapa, etc.);
- residui legnosi di potatura di piante da frutto e di piante forestali;
- residui dell'industria agro-alimentare.

Questo tipo di processo si realizza in caldaie, i principali tipi di caldaia e tecniche di combustione sono:

Combustione con caldaie a griglia

La griglia è composta da una serie di barre parallele che formano dei gradini e hanno la funzione di favorire l'inserimento e la combustione del materiale da bruciare. Si dividono in:

- caldaie a griglia fissa: adatta per materiali con pezzatura e caratteristiche variabili, in queste caldaie l'aria viene iniettata sia superiormente sia inferiormente, è una tipologia usata in impianti di piccole dimensioni ed è quindi diffusa in impianti non industriali. Per evitare l'intasamento dei fori dell'aria comburente viene utilizzato un carburante a basso contenuto di ceneri;
- caldaie a griglia mobile: utilizzata in impianti di taglia medio-grande, permette una maggior facilità di movimentazione, rimescolamento del combustibile e rimozione delle ceneri;

Questo sistema è piuttosto statico e perciò è necessario alimentare queste caldaie con combustibili a basso tenore di ceneri, per evitare intasamenti ed ostruzioni degli orifizi per l'aria comburente. Il rendimento di combustione è circa dell'80% e a causa delle perdite del materiale incombusto che finisce nelle ceneri e nei fumi. Le caldaie a griglia mobile, invece, grazie alla possibilità di muovere la griglia permettono la combustione di combustibili con un tenore di ceneri o tassi di umidità più elevati (Fig. 21).

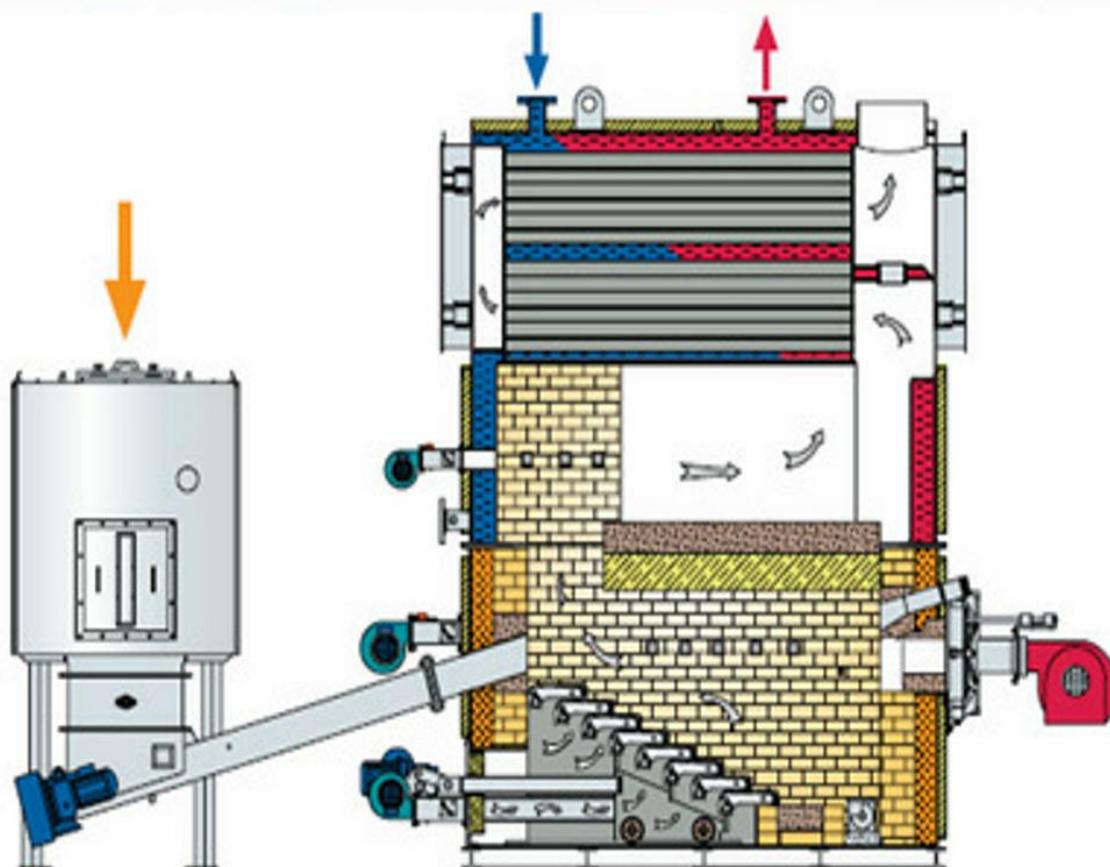


Fig. 21. Schema di caldaia a griglia mobile. Da: CTP Perozzo Impianti

Combustione in sospensione, questa modalità viene utilizzata con biomasse leggere polverizzate che cadono sulla griglia nella camera di combustione, il materiale è introdotto dall'alto e brucia prima di toccare la griglia, è molto utilizzato in ambito industriale ed ha una buona rendita con biomasse a basso tasso di umidità (<15%). È usata anche per smaltire gli scarti della lavorazione del legno, ma ha un costo elevato a causa della necessità di polverizzazione delle biomasse, inoltre ha costi di manutenzione elevati a causa della grande quantità di ceneri che si formano nella combustione e che si depositano nelle varie parti dell'impianto.

Combustione a doppio stadio, nella prima camera avviene la gassificazione della biomassa, nella seconda camera si ha la combustione e il trasferimento del calore ad un fluido termovettore.

Combustione con caldaie a letto fluido, questa tecnica, piuttosto recente, è stata utilizzata all'inizio con il carbone, in seguito il suo utilizzo si è esteso a diversi tipi di materiali. In queste caldaie la biomassa è trattenuta in sospensione da un flusso d'aria che rende fluido un letto di materiale inerte, ad esempio sabbia. Questa metodologia grazie ai moti turbolenti, e al continuo rimescolamento, limita l'uso dell'aria in eccesso abbassando così le emissioni di NOx; i rendimenti della combustione sono elevati, >90%, e i fumi in uscita vengono filtrati in modo da separare le particelle solide dal gas e riciclarle, immettendole di nuovo nel letto fluido. Questo sistema limita le emissioni di inquinanti, ma è piuttosto costoso.

A seconda delle caratteristiche assunte dal letto fluido si distinguono varie tipologie: FBC: "fluid bed combustion", è il letto fluido "normale", che a sua volta si divide in BFBC (bubbling fluid bed combustion) letto fluido bollente, e in CFBC (circulating fluid bed combustion) letto fluido ricircolato; inoltre ci sono i PFCB: "pressured fluid bed combustion" letto fluido pressurizzato che è usato però negli impianti ibridi gas-vapore. Si definisce a letto fluido bollente una caldaia in cui la velocità del gas è relativamente bassa (1- 1,5 m/s) e la quantità di particelle trascinate via dai fumi è contenuta.

Combustione con caldaie a tamburo rotante, in questo tipo di caldaie la rotazione della permette il rimescolamento continuo e provoca una combustione completa con la conseguente diminuzione degli incombusti. Queste caratteristiche la rendono adatta anche a combustibili con carichi inquinanti elevati.

La presenza delle ceneri nei biocombustibili rappresenta un aspetto molto critico per tutte le tecnologie di conversione energetica. Oltre a costituire un sottoprodotto della combustione, che deve essere periodicamente rimosso e smaltito, le ceneri sono anche alla base di diverse problematiche di natura tecnica (formazione di incrostazioni, corrosioni, produzione di agglomerati, ceneri leggere) e ambientale (polveri)

Processi biochimici

Questi processi sono dovuti a microrganismi, enzimi e funghi presenti nella biomassa e che, in particolari condizioni, innescano la conversione del materiale organico. Questi processi sono utilizzati per le biomasse in cui il rapporto tra la quantità di carbonio e quella di azoto (rapporto C/N) è inferiore a 30 e l'umidità superiore al 30%; condizioni queste ottimali in cui i microrganismi sono in grado essere biologicamente attivi.

I materiali adatti alla conversione biochimica sono:

- sottoprodotti delle colture come ortiche, paglia, resti del mais, del sorgo, delle barbabietole e canna da zucchero;
- colture acquatiche ed alghe;
- reflui zootecnici;
- materiale organico di discarica.

I processi biochimici utilizzati sono: la digestione anaerobica ed aerobica; la fermentazione alcolica e l'estrazione, tramite spremitura, di oli da piante oleaginose.

La digestione anaerobica. È un processo di conversione, ad opera di batteri, del materiale organico che avviene in assenza di ossigeno. A seconda del tipo di batteri utilizzati, la digestione anaerobica avviene a differenti intervalli di temperatura:

- temperature comprese tra 20-45 °C, con un intervallo ottimale di 37-41 °C, se si usano batteri mesofili;
- temperature anche al di sopra dei 70 °C usando batteri termofili con condizioni di esercizio ottimali in un intervallo di temperatura tra i 50-52 °C.

Gli impianti di digestione aerobica, oltre che con resti vegetali, possono venire alimentati con il FORSU (ossia la frazione organica dei rifiuti solidi urbani) e con reflui di varia natura. Per ottimizzare la produzione di biogas e minimizzare gli impatti ambientali, questi processo deve essere effettuato in appositi impianti (digestori), in condizioni controllate di pH e temperatura ed evitando la dispersione del metano prodotto in atmosfera, essendo questo un potente gas serra.

Questo processo è chiamato anche fermentazione metanica.

La digestione aerobica. In questo processo i batteri operano sulle sostanze organiche in presenza di ossigeno. In pratica i microrganismi trasformano le sostanze complesse in sostanze semplici, rilasciando H₂O e CO₂.

Questo tipo di processo non produce gas combustibili, ma l'attività metabolica dei microrganismi produce calore che, con scambiatori a fluido, può essere trasferito all'esterno. La digestione aerobica è utilizzata prevalentemente per la trasformazione di fanghi in impianti di dimensioni medio piccole

La fermentazione alcolica. È un processo di trasformazione dei glucidi contenuti in piante amidacee o zuccherine ad opera di lieviti, che trasformano gli zuccheri delle piante in etanolo in base alla seguente reazione:



L'etanolo prodotto può essere utilizzato come carburante e come additivo per benzine.

Estrazione oli vegetali

Le piante oleaginose (soia, colza, palma, girasole, mais, ecc.), ossia quelle specie con semi ricchi di olio, attraverso un processo di conversione fisica che è fondamentalmente un processo di spremitura meccanica, portano alla produzione di un olio combustibile e di pannelli proteici con olio in percentuale al massimo del 10%, utilizzabili dall'industria mangimistica.

L'olio combustibile ha un notevole potere calorico (fino a 10.000 kcal/kg) ed è adatto per semplicità di trasformazione ed utilizzazione, alla produzione di energia elettrica ed energia termica con impianti di combustione a tecnologia semplice, come ad esempio motori diesel leggermente modificati.

Impianti in Italia

Secondo l'EurObserv'ER per il 2018 con un consumo di biomassa solida pari a 9,0 Mtep (milioni di tonnellate di petrolio equivalenti) l'Italia si è collocata al quarto posto in Europa, dopo Germania, Francia e Svezia.

La figura seguente (Fig. 22) mostra la ripartizione dei consumi italiani di biomassa solida per settori nell'anno di riferimento. Si osserva come la parte del leone corrisponde al consumo per la produzione di calore, pari a 7,4 Mtep, di cui ben 6,9 Mtep in impianti domestici, per riscaldamento invernale. La produzione di elettricità da biomassa solida, secondo questi dati, ammonta ad un consumo di circa 1,6 Mtep.

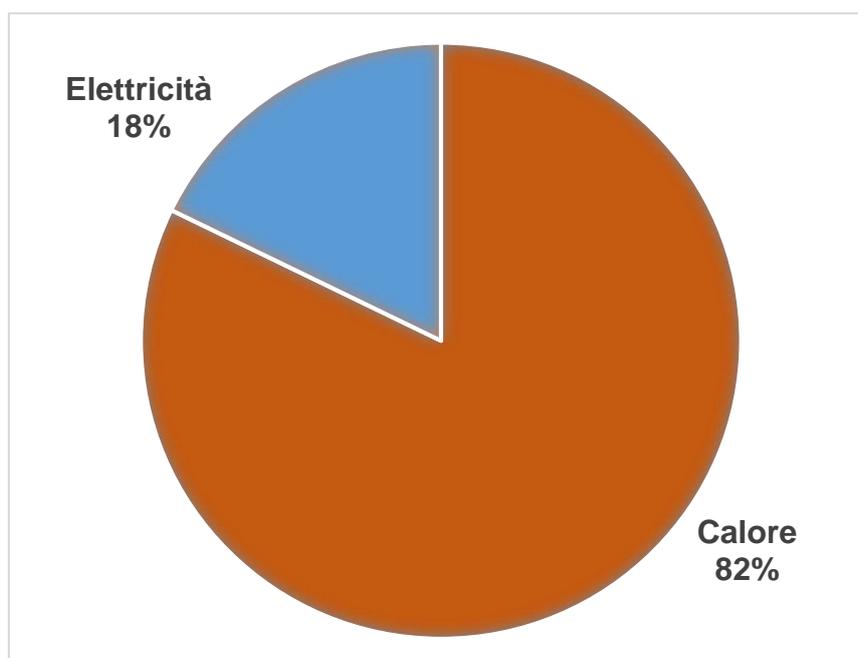


Fig. 22. Ripartizione per settori dei consumi nazionali di biomassa solida.
Dati EurObserv'ER 2018

La figura seguente mostra invece le percentuali dell'utilizzo della biomassa solida per la produzione dell'elettricità e la cogenerazione di energia termica ed elettrica con un valore rispettivamente di 2,2 TWh e di circa 2 TWh. Si osserva (Fig. 23) che il 54% dell'energia elettrica prodotta con biomasse solide è stato generato in centrali termoelettriche convenzionali, per l'impossibilità di valorizzare per mancanza di utenze circa il 60% dell'energia primaria della biomassa. Infatti la maggior parte dei territori in cui c'è abbondanza di biomassa legnosa, ove appare naturale l'ubicazione di questi impianti, non sempre è caratterizzata da grandi utenze termiche, in particolari utenze industriali con consumi costanti nel corso dell'anno.

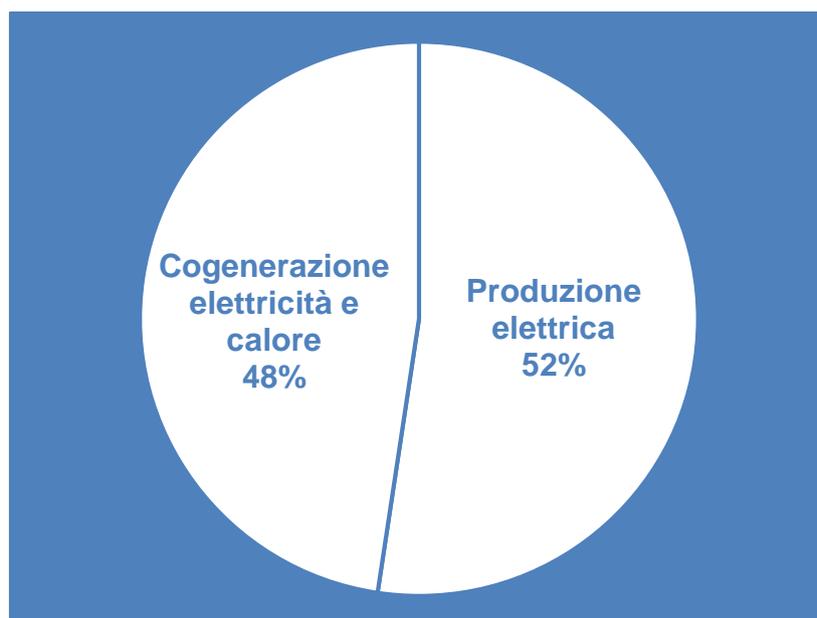


Fig. 23. Generazione di energia elettrica da biomasse solide in Italia nel 2018, suddivisa per tipologia di impianto. Dati EurObserv'ER

Fatta eccezione per il calore derivato, non esiste una “rete” nella quale viene immessa (e misurata) l’energia termica prodotta dai numerosi impianti per riscaldamento disseminati sul territorio nazionale (si pensi ad esempio a camini, stufe e caldaie a legna utilizzate nel settore domestico): di conseguenza, i consumi diretti di fonti rinnovabili per la produzione di energia termica sono misurati puntualmente solo negli impianti di maggiori dimensioni, mentre negli altri casi la ricostruzione viene effettuata attraverso indagini campionarie, oppure applicando criteri di stima che combinano dati di mercato, dati amministrativi, parametri tecnici, ecc.

Esaminando altri dati nel 2015 l’energia termica complessiva ottenuta in Italia dallo sfruttamento della biomassa solida per riscaldamento (legna da ardere, pellet, carbone vegetale) ammontava a circa 304.000 TJ, corrispondenti a 7,26 Mtep; i consumi effettivi coincidevano con quelli da rilevare ai fini del monitoraggio degli obiettivi UE. I consumi diretti di biomassa solida erano pari a 277.342 TJ (6,6 Mtep); il notevole incremento rispetto al 2014 (+13,4%) è legato principalmente alle basse temperature e al conseguente aumento del fabbisogno di calore che hanno caratterizzato il 2015. Gran parte della biomassa solida (97% circa) era utilizzata nel settore residenziale, dove trovano diffusa applicazione camini, caldaie, stufe a legna, ecc.

Da dati ricavati dell’atlante degli impianti GSE (Fig. 24), che riporta la collocazione degli impianti di produzione di energia elettrica, aggiornati al novembre 2018, risulta che gli

impianti per la produzione di energia elettrica da biomasse solide, con potenza nominale superiore ad 1 MW, siano 74, distribuiti in prevalenza in Italia settentrionale.



Fig. 24. Impianti a biomasse solide con potenza nominale maggiore di 1 MW. Atlante GSE 2018

Il numero di impianti a biomasse solide in Italia, scende a 43 quando si considerino gli impianti con potenza nominale superiore ai 5 MW, con una ragguardevole potenza installata superiore a 600 MW ed un consumo di biomassa superiore a 5Mton all'anno. Esistono infine alcuni grossi impianti termoelettrici abilitati alla co-combustione di biomasse fino al 10% che tuttavia negli ultimi anni hanno impiegato modesti quantitativi di biomasse.

Di contro, l'utilizzo delle biomasse per il riscaldamento domestico ha visto in questi anni un grande incremento. Infatti nei quindici anni tra il 2000 e il 2015, risultano essere stati

installati oltre 4 milioni tra stufe e termocamini, alimentati prevalentemente a legna. Si stima, tenendo conto della difficoltà di reperire dati precisi e quindi con un valore probabilmente sotto stimato, che il prelievo di legname italiano per legna da ardere per uso domestico sia tra i 3-5 Mm³.

4. Le tecnologie per il contenimento delle emissioni da impiego di biomassa solida

Al fine di limitare al massimo le emissioni di sostanze inquinanti dovute alla trasformazione energetica delle biomasse solide devono essere utilizzati degli appositi sistemi di controllo e contenimento delle emissioni. La combustione incompleta delle biomasse durante il processo di trasformazione oltre a diminuirne l'efficienza ha effetti negativi sulla produzione di composti inquinanti. Prima di essere rilasciati in atmosfera i gas di combustione vengono normalmente trattati per ridurre il contenuto di inquinanti.

In particolare la combustione di biomasse produce, prima del trattamento, elevate emissioni di particolato, anche al di sopra di 50 mg/m^3 (11% volume di O_2) (Nussbaumer, 2003). Le particelle emesse sono di tipo primario ultrafine e iperfine, quindi ben al di sotto dei classici $10 \mu\text{m}$ (PM10). Le emissioni di particolato sono originate da diverse fonti. Tra queste ci sono le ceneri volatili (o volanti), che sono il risultato del trascinarsi sia delle ceneri nei fumi di combustione sia dei sali (KCl , NaCl , K_2SO_4) che si formano dalle reazioni tra metalli con cloro e zolfo.

Le misure di controllo primario mirano ad impedire che la formazione di inquinante abbia luogo, e si applicano all'interno dell'impianto. Tali misure intervengono direttamente sulla geometria e sulla gestione dell'impianto: parametri operativi quali la temperatura, il tempo di combustione, la ventilazione vengono variati in modo da migliorare la resa della combustione e ridurre di conseguenza la formazione di alcuni inquinanti, come il monossido di carbonio. Con un controllo in continuo delle emissioni, i parametri di combustione possono essere variati in modo da mantenere sempre massima la resa. Tra i parametri che si possono variare ai fini del controllo primario delle emissioni, il principale è il rapporto combustibile/comburente (sulla base della misura della concentrazione di ossigeno). Per migliorare ulteriormente la resa di combustione è possibile variare lo spessore del combustibile (per gli impianti a griglia mobile) e recuperare il calore dei fumi. Un parametro particolarmente critico è la temperatura: una bassa temperatura determina un aumento del monossido di carbonio e altri incombusti, mentre temperature troppo elevate a livello locale portano alla formazione di ossidi di azoto. Per gli impianti alimentati con biomasse molto variabili (in termini di essenza immessa, ma anche semplicemente di umidità) le misure di

controllo primario sono di particolare importanza. Si precisa che, in generale, l'ottimizzazione dei parametri di combustione è effettuata dal gestore dell'impianto non solo ai fini di ottenere un controllo primario degli inquinanti, ma anche e soprattutto per migliorare la resa energetica dello stesso. Generalmente, le due esigenze tendono a coincidere.

Le misure di controllo secondario hanno luogo dopo che l'inquinante è già stato prodotto, e si applicano all'emissione in uscita dall'impianto. In linea molto generale, le polveri e gli ossidi di zolfo sono abbattute principalmente tramite il controllo secondario, mentre la produzione di composti organici volatili, monossido di carbonio e ossidi di azoto è prevenuta principalmente mediante controllo primario.

Abbattimento delle polveri

Al fine di valutare correttamente i fattori di emissione, occorre stimare le efficienze di abbattimento dei sistemi considerati. Il controllo delle polveri è uno degli aspetti più importanti da considerare. Infatti, l'abbattimento delle polveri implica anche un sostanziale abbattimento di tutti gli inquinanti ad esse associati, come la maggior parte dei metalli pesanti (escluso il mercurio e i metalli in grado di formare composti volatili). Tra i sistemi di controllo secondario delle polveri, i più utilizzati sono i cicloni, i filtri a maniche, gli elettrofiltri e gli scrubber umidi.

Filtri elettrostatici (ESP)

Gli elettrofiltri o filtri elettrostatici (ESP) abbattano il particolato attraverso l'induzione di cariche elettrostatiche sulle polveri dei fumi e la cattura delle stesse su un elettrodo di deposito, il gas vettore viene fatto fluire tra gli elettrodi e le particelle possono essere sia solide che liquide (Fig. 25). Sono sistemi adatti all'abbattimento di polveri con granulometria tra i 1000 μm e 1 μm , e per un'ampia gamma di temperature e di portate, ma il risultato è condizionato dalla capacità del particolato di farsi caricare elettrostaticamente dall'elettrodo ionizzante. Sono caratterizzati da un'elevata efficienza.

- ✓ Il particolato recuperato è inalterato e allo stato secco
- ✓ Si possono trattare effluenti di grande portata e molto corrosivi
- ✓ Le esigenze di manutenzione sono ridotte
- ✗ Si adattano male alle condizioni variabili degli effluenti da trattare
- ✗ I costi iniziali sono elevati
- ✗ Hanno ingombri notevoli
- ✗ Esistono rischi di incendio ed esplosione

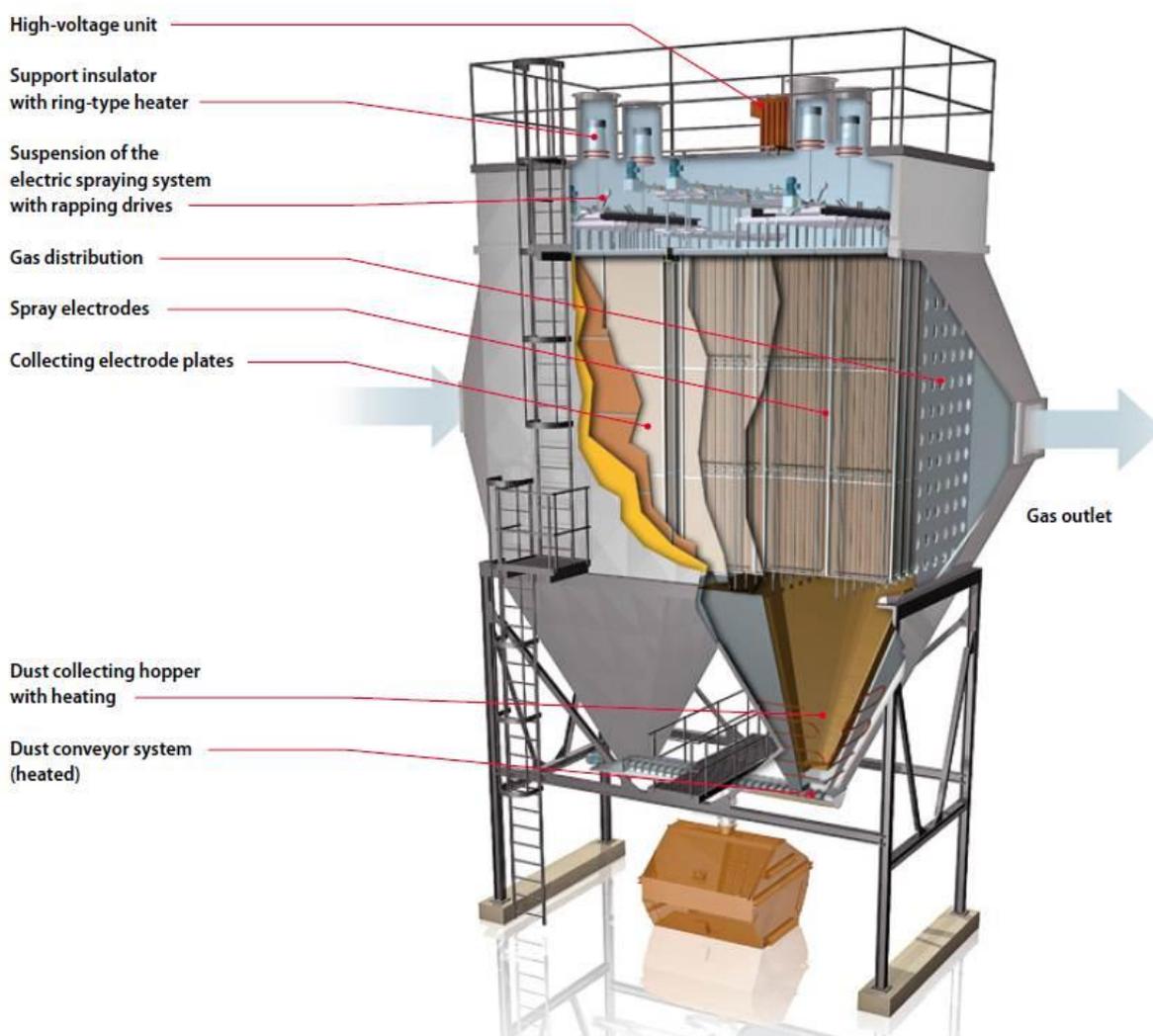


Fig. 25. Sistema di filtri elettrostatici. Da J&C Engineering

Quando la rimozione della polvere catturata dall'elettrodo avviene tramite l'acqua si parla di ESP ad umido.

Filtri a maniche

I filtri a maniche sono formati da serie di cilindri, simili a sacchi o maniche, in tessuto contenuti in "Bag house" compartimenti di metallo isolati (Fig. 26). Le fibre microporose sono le più efficienti per rimuovere la maggiore delle polveri dai fumi. Il diametro delle maniche va dai 10 ai 30 cm, e la loro lunghezza è di circa 10-12m. La pulizia dei filtri viene operata tramite scuotimento meccanico, getti di aria impulsivi, o inversione del flusso di aria. I materiali utilizzati, fibre naturali e artificiali organizzate in trame tipo tessuto-non-tessuto.

PTFE o materiali teflonati, non consentono di operare a temperature al di fuori dell'intervallo 150°C - 250°C circa. La filtrazione viene effettuata in un primo tempo solo dal materiale filtrante e poi anche dallo strato di materiale che progressivamente si deposita.

L'efficienza è legata al tipo di tessuto filtrante; le dimensioni dei pori sono di qualche decina di μm e consentono di trattenere particelle dell'ordine di 0.1 μm .

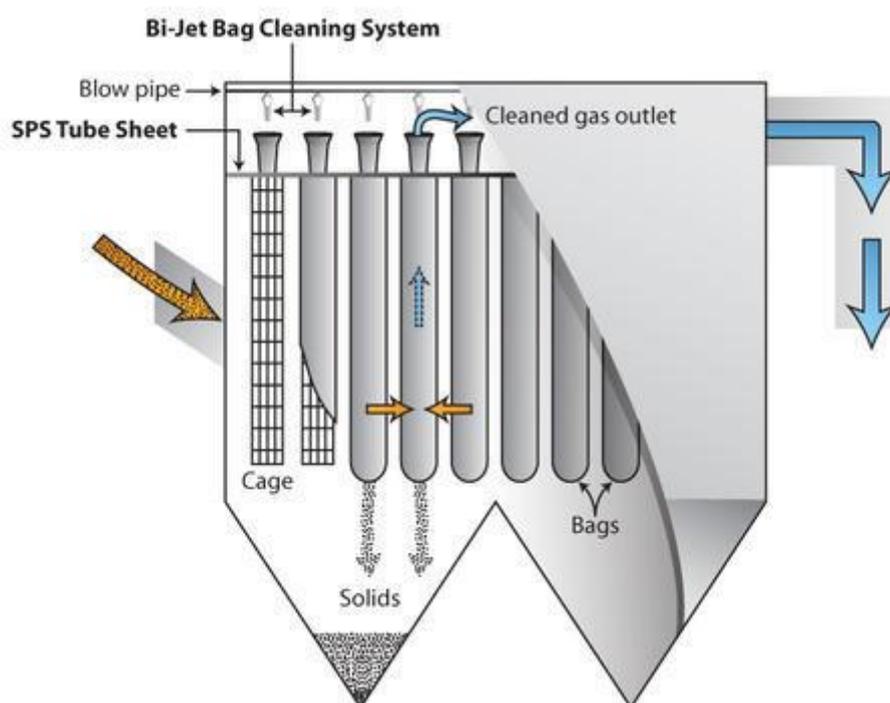


Fig. 26. Sistema di filtri a maniche.

Cycloni

Sempre per eliminare le polveri possono essere utilizzati i cicloni che separano le polveri dai fumi utilizzando la forza centrifuga; il loro rendimento dipende dal diametro del ciclone e dalle dimensioni delle particelle da separare. Se le portate dei gas di scarico dalla camera di combustione non sono trattabili con un solo ciclone, si utilizza un sistema di cicloni messi in parallelo, detto multiciclone (Fig. 27 e Fig. 28). Data la loro non elevatissima efficienza (vengono usati per rimuovere particelle dal diametro superiore ai 5 - 10 μm) e sono di solito utilizzati come pretrattamento in associazione con gli altri metodi di filtraggio.

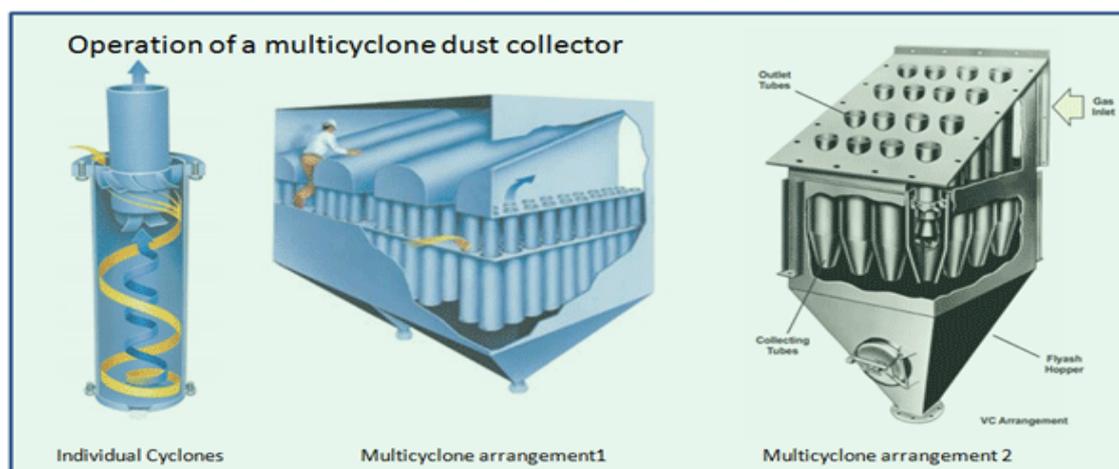


Fig. 27. Sistemi di cicloni e multicyclone.

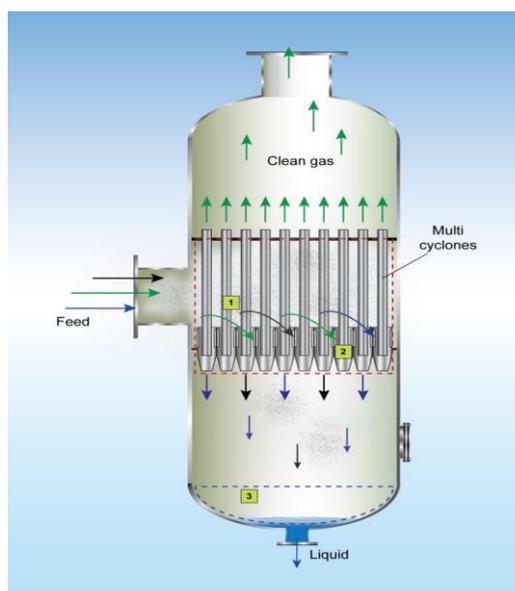


Fig. 28. Sistema multicyclone. Da Ensepattec

I **depolveratori** ad umido utilizzano sia l'atomizzazione di acqua nel flusso gassoso sia l'effetto Venturi. Quando nel gas sono presenti inquinanti solubili vengono rimossi mediante trasferimento di massa nella fase liquida.

Scrubber

Gli scrubber, detti anche in italiano torri di lavaggio o colonne di assorbimento, vengono utilizzate per abbattere le polveri e i microinquinanti acidi presenti nei gas di combustione. Le tipologie maggiormente in uso sono i cosiddetti "wet scrubbers" o scrubber a umido, che prevedono l'impiego di un liquido per rimuovere gli inquinanti dal gas. Il modo con cui il liquido di lavaggio viene fatto entrare in contatto con i gas varia a seconda della tecnologia impiegata, di solito o mediante la nebulizzazione del liquido sul gas, o al contrario facendo

attraversare il liquido dal gas. I processi di assorbimento coinvolti in questa metodologia possono essere di tipo fisico se basati solo sulla solubilizzazione dell'inquinante, o chimico in presenza di reazioni tra il gas e il liquido (Fig. 29). Quest'ultimo tipo di abbattimento risulta essere maggiormente efficace. Una volta che il liquido (che può variare a seconda dell'inquinante che si vuole abbattere) ha assorbito l'inquinante, può essere smaltito dopo ulteriori trattamenti può essere sottoposto riciclato nello scrubber (Fig. 30).

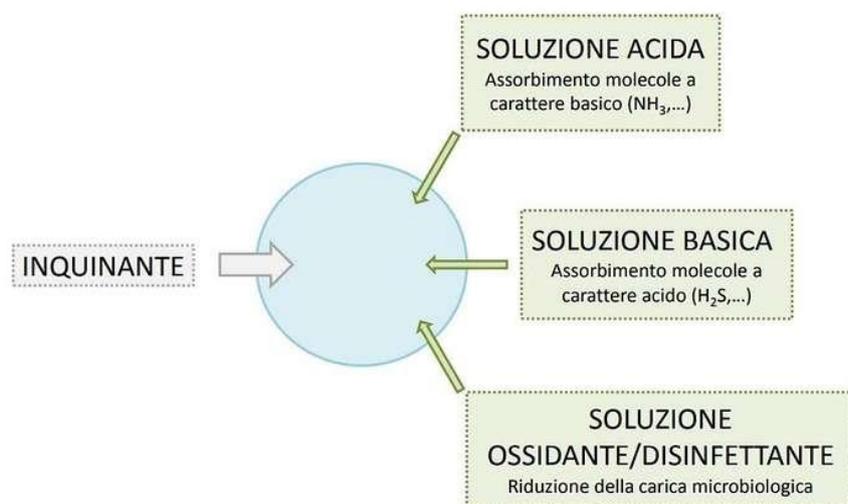


Fig. 29. Schematizzazione del processo di "scrubbing". Tecnosida.

Al termine del processo di depurazione rimangono dei fanghi, da smaltire nel rispetto delle norme, se non sono tossici possono essere disidratati e smaltiti nelle apposite discariche.

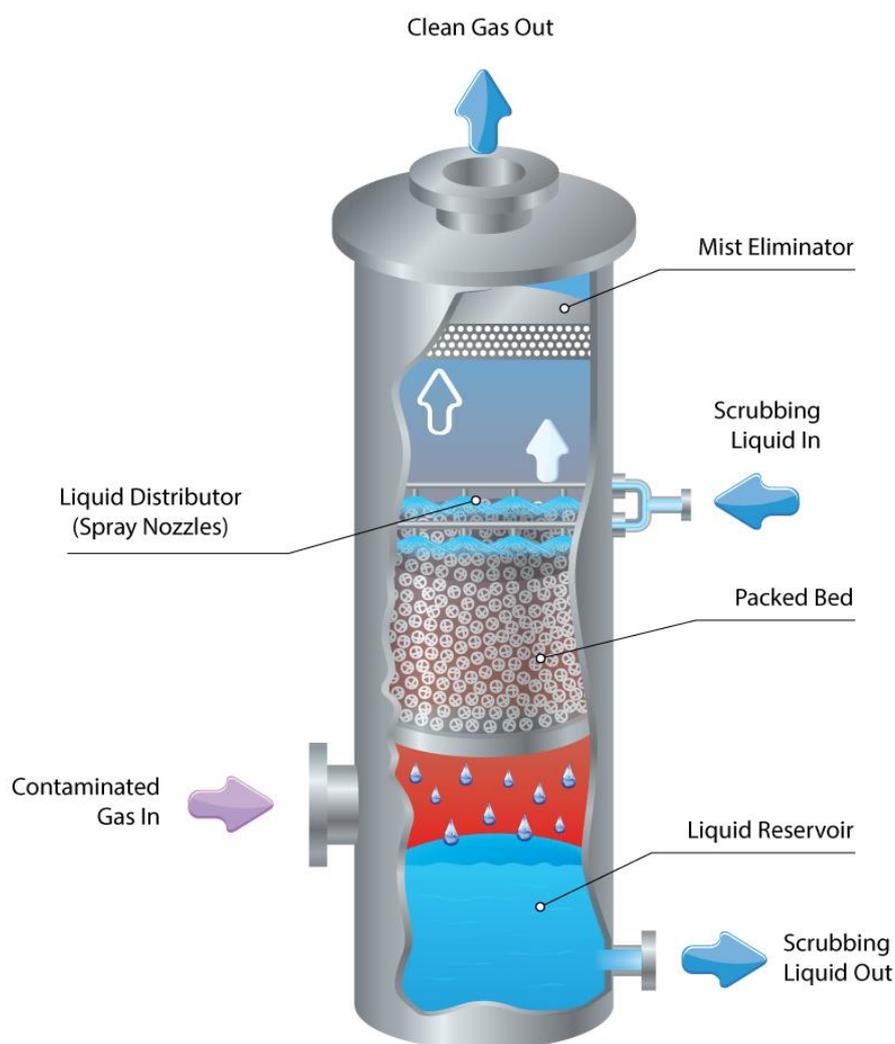


Fig. 30. Schema di funzionamento di uno scrubber

Nella tabella seguente (Fig. 31) vengono elencati i vantaggi e gli svantaggi dell'utilizzo degli scrubber ad umido.

Vantaggi	Svantaggi
<p>Ingombro contenuto. Gli scrubber riducono la temperatura e il volume delle correnti gassose inquinate e ciò consente di ridurre le dimensioni dello scrubber stesso, dei ventilatori e dei condotti a valle, rispetto a quelle di altri impianti di abbattimento. Le minori dimensioni comportano minori</p>	<p>Possibilità di corrosione. Alcuni inquinanti, solubilizzati in acqua, formano soluzioni acide molto corrosive. In questi casi è fondamentale scegliere attentamente i materiali costruttivi.</p>

costi di investimento e maggiore flessibilità sull'ubicazione dell'impianto.	
Possibilità di trattare correnti gassose umide. Correnti ad alto tenore di umidità non rappresentano un limite all'utilizzo.	Alti consumi energetici. Per ottenere alte efficienze di abbattimento spesso sono richieste alte portate di ricircolo del liquido che implicano alti costi operativi.
Minimo rischio di incendio ed esplosione. Usando soluzioni acquose si riducono i rischi di incendio ed esplosione.	Necessità di trattamento della soluzione assorbente. La soluzione assorbente deve essere trattata sia nel caso la si voglia ricircolare in impianto sia qualora la si debba scaricare. In quest'ultimo caso, vasche di decantazione o chiarificatori possono essere necessari per rispettare i limiti agli scarichi idrici.
Possibilità di trattare correnti gassose contenenti anche materiale particellare (polveri)	Pennacchio al camino. Gli scrubber aumentano il tenore di umidità della corrente gassosa e questo genera un pennacchio di vapore acqueo al camino.
Possibilità di trattare gas corrosivi	

Fig. 31. Vantaggi e svantaggi scrubber ad umido

Efficienza di abbattimento dei sistemi per le polveri

L'efficienza di abbattimento di questi sistemi dipende dal diametro aerodinamico considerato delle polveri stesse. Di conseguenza, si riportano di seguito le efficienze di abbattimento elaborate recentemente in vari studi del settore. Il Biomass Energy Research Center (BERC) nel 2010 ha riportato per l'abbattimento delle polveri (PM10 e PM 2.5) i seguenti valori di efficienza (Fig. 32 e Fig. 33).

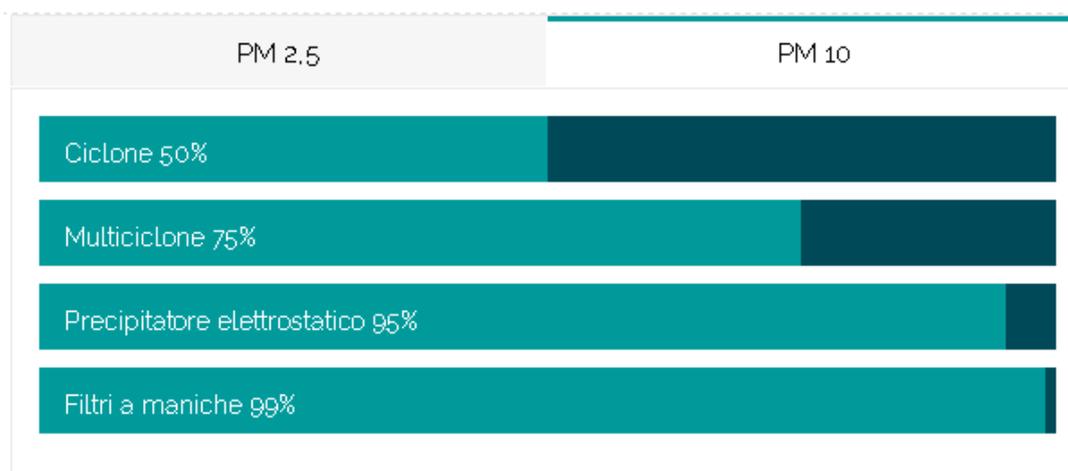


Fig. 32. Valori di efficienza per i diversi sistemi di abbattimento delle polveri PM10. Biomass Energy Research Center (BERC)

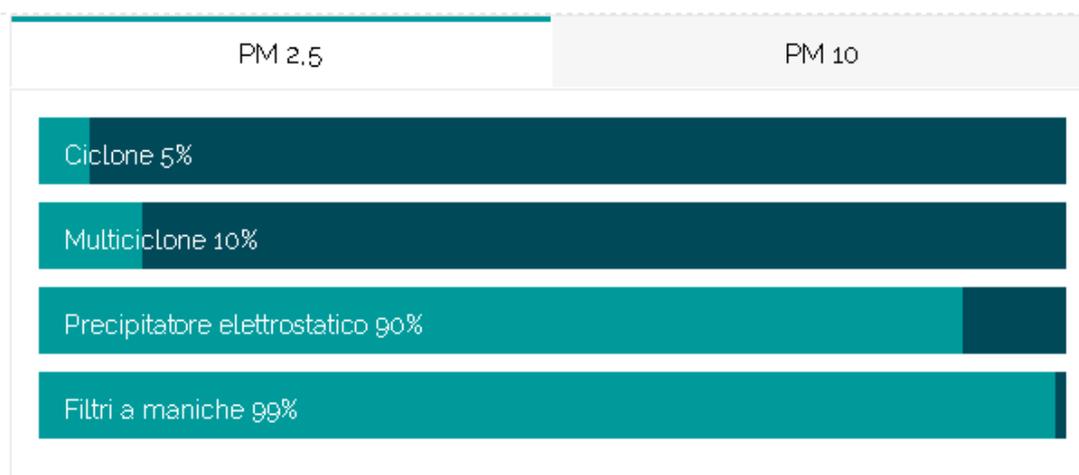


Fig. 33. Valori di efficienza per i diversi sistemi di abbattimento delle polveri PM2.5. Biomass Energy Research Center (BERC)

Nella tabella seguente (Fig. 34) vengono riassunti i principali metodi per l'abbattimento delle polveri con indicata l'efficienza, come percentuale, per ogni sistema di abbattimento e tipologie di impianto nei quali vengono utilizzati.

TECNICA	VALUTAZIONI ECONOMICHE		EFFICIENZA DI RIMOZIONE				APPLICAZIONI
	COSTI DI INVESTIMENTO (milioni di Euro)	COSTI DI ESERCIZIO (milioni di Euro/anno)	<1 μ m	2 μ m	5 μ m	<10 μ m	
Precipitatori elettrostatici (ESP)	1,9 – 4,6 (a seconda della portata media dei fumi)	0,1-0,2	>96.5%	>98.3%	>99.95%	>99.95%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ CENTRALI ELETTRICHE ➤ RAFFINERIE (applicate a forni e bruciatori, unità FCCU, camere a coke, rigeneratori di catalizzatori ecc.)
Filtri a maniche	2,1 – 4,3 (a seconda della portata media dei fumi)	0,15-0,35	>99.6%	>99.6%	>99.9%	>99.95%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ SETTORE CHIMICO ➤ CEMENTIFICI
Abbattimento a umido (wet scrubber)	1,5-2,5 (a seconda della portata media dei fumi)	0,02 – 0,04	>98.5%	>99.5%	>99.9%	>99.9%	<ul style="list-style-type: none"> ➤ INCENERITORI ➤ INDUSTRIA DEL VETRO
Cicloni e Multicicloni	Variabili in funzione del numero di cicloni		-	20-70%	85-90%		<ul style="list-style-type: none"> ➤ PRODUZIONE E TRASFORMAZIONE DEI METALLI
Combinazioni di varie tecniche	-	-	>99%				

Fig. 34. Efficienza e settori di applicazione di sistemi di abbattimento delle polveri.

L'illustrazione che segue (Fig. 35) mostra l'efficienza dei vari sistemi di abbattimento per le polveri secondo i diversi diametri delle polveri stesse.

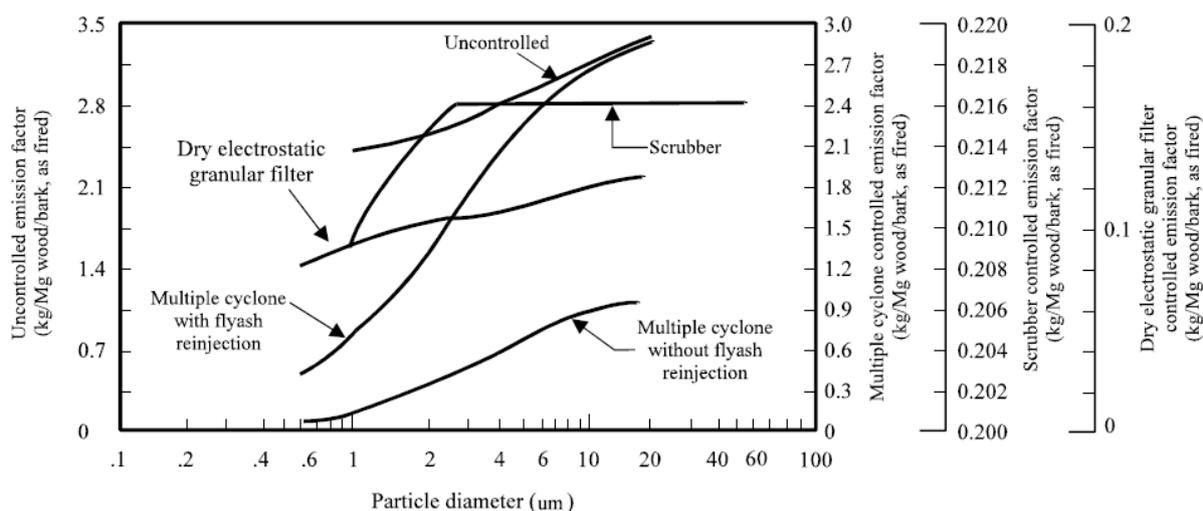


Fig. 35. Efficienza dei sistemi di abbattimento a seconda del diametro delle polveri. Fonte EPA

Riduzione catalitica SCR - SNCR

Per l'abbattimento degli ossidi di azoto (NO_x), vengono utilizzati sistemi che applicano la riduzione catalitica selettiva (SCR) (Fig. 36) e la riduzione non catalitica selettiva (SNCR). Nella riduzione catalitica selettiva un riducente allo stato liquido o gassoso, ad esempio ammoniacale o urea, viene aggiunto ai gas di scarico in presenza di un catalizzatore (ad esempio vanadio o un altro metallo), che catalizza la reazione facendola avvenire tra i 265 e i 425 °C, che porta alla formazione di H₂O (vapore acqueo) e N₂ (gas azoto), abbattendo gli NO_x. Nella riduzione catalitica non selettiva (SNCR) le reazioni chimiche sono le stesse ma avvengono in assenza del catalizzatore.

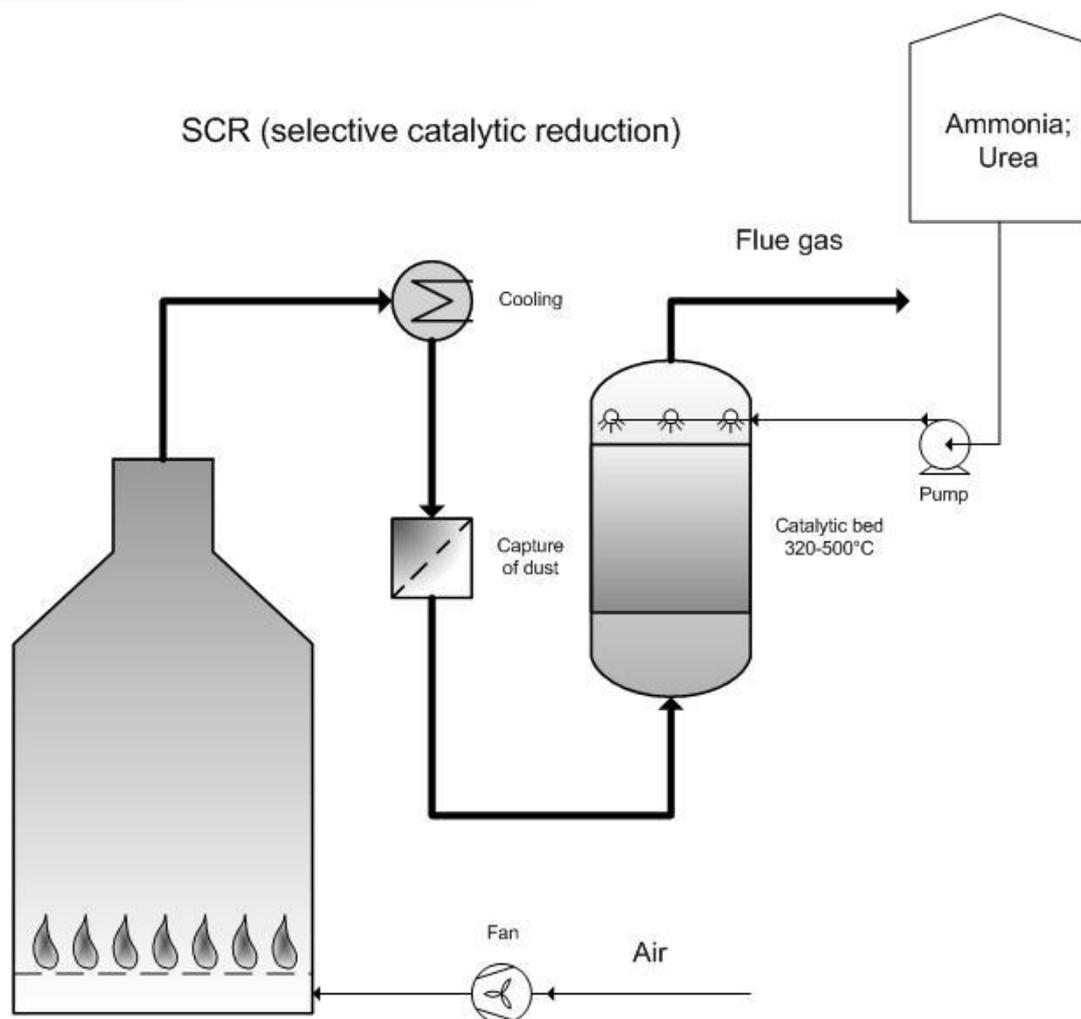


Fig. 36. Schema di funzionamento della riduzione catalitica selettiva (SCR). Da EMIS energie- en milieu-informatiesysteem voor het Vlaamse Gewest

Assorbimento a secco

Per abbattere gli ossidi di zolfo (SO_x) di acidi come l'acido cloridrico (HCl) e fluoridrico (HF) si possono utilizzare delle tecniche che prevedono l'assorbimento a secco ad alta e bassa temperatura su sostanze sorbenti alcaline a base di calcio o di calcio e magnesio, ad esempio: calce idrata, carbonato di sodio e bicarbonato di sodio.

Le tabelle seguenti (Fig. 37 e 38) riassumono tutte le tecniche di abbattimento degli inquinanti, a seconda del tipo di sostanze, e il settore in cui vengono applicate, indicando anche l'efficienza di abbattimento.

ELENCO DI TECNICHE IMPIEGATE NEI DIVERSI SETTORI (in particolare: Impianti chimici; raffinerie, impianti recupero vapori; trattamenti con solventi)	
TECNICA	EFFICIENZE DI ABBATTIMENTO
Wet scrubbing	COV 50-99 % C. Inorganici 90-99%
Adsorbimento	COV 80-95 % Odori 80-95 % H ₂ S 80-95 %
Condensazione	Odori 60-90 Ammoniaca 20-60 %
Separazione a membrana	COV > 99.9 %
Trattamenti biologici (filtrazione/srscrubbing/tryckling)	COV 75-99 % C. Inorganici 80-95 % Odori 70-95 %
Ossidazione termica	COV 95-99 %
Ossidazione catalitica	COV 90-99 % CO >98 % Odori 80-95 %
Incenerimento Termico	95 – 99.9 %

Fig. 37. Tecniche di abbattimento a seconda delle sostanze inquinanti

TECNICA	EFFICIENZE DI ABBATTIMENTO PER ALCUNI SETTORI INDUSTRIALI					
	CENTRALI	RAFFINERIE (applicate a gas in uscita da unità per la produzione di energia e vapore e da forni, bruciatori, riscaldatori, reattori alimentati a fuel gas, fuel oil, coke)	SETTORE CHIMICO	INCENERITORI	CEMENTIFICI	Trattamento di metalli: Impianti di galvanizzazione continua (Processo di rigenerazione di HCl e di H ₂ SO ₄)
Lavaggio a umido con calce o calcare	92-98% In funzione del sorbente	90-98%	90 - 97%	L'efficienza di riduzione dei sistemi di desolfurazione a secco, semisecco e umido, applicati a inceneritori è molto alta per emissioni di SO₂, HF, HCl	> 90%	> 90%
Lavaggio con acqua di mare	85-98%	99%	-		> 90%.	> 95%.
Spray dry scrubber	85-92%	(Combinato con iniezione di additivi) > 92	-		> 95%.	-
Iniezione di sorbente (es. carbone attivo) direttamente in forno	45-50% 70-90% (con riciclo dei prodotti di reazione)	50-70%	40-80%		60-80%.	-
Desolfurazione a secco (iniezione di sorbente in condotte) (Dry FGD)	50-90%		85-90%		-	-
Iniezione mista (forno-condotte) di sorbente	50-90%		-		-	-

Fig. 38. Tecniche di abbattimento a seconda dei settori industriali di applicazione

Questi sistemi di abbattimento delle emissioni vengono utilizzati in impianti industriali di dimensioni medio grandi, mentre ancora non diffuso e non obbligatorio è l'utilizzo di sistemi di abbattimento per i piccoli impianti domestici. Anche per questi ultimi esistono tuttavia delle tecnologie adatte a limitare le emissioni di inquinanti, come ad esempio gli elettrofiltri o precipitatori elettrostatici per stufe e caldaie a pellet (Fig. 39), o dei cicloni di piccole dimensioni per l'abbattimento della fuliggine.

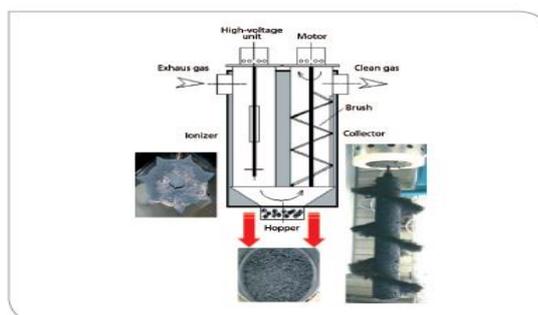


Fig. 39. Elettrofiltro "Carola". Karlsruhe Institute of Technology

5. Analisi delle emissioni tipiche

L'utilizzo delle biomasse solide per la produzione di energia elettrica e/o termica porta all'emissione in atmosfera di sostanze chimiche.

Le emissioni relative all'utilizzo delle biomasse solide variano in tenore e tipologia a seconda del tipo di combustibile, delle modalità di utilizzo delle biomasse (processi biochimici o termochimici) e della grandezza degli impianti.

Per quello che riguarda la combustione delle biomasse legnose le sostanze principali che vengono emesse sono:

- monossido di Carbonio (CO)
- ossidi di Azoto (NO_x)
- ossidi di Zolfo (SO_x)
- composti organici (COV)
- polveri
- idrocarburi policiclici aromatici (IPA)

Vengono emessi, inoltre, minori quantitativi di altre sostanze come metalli (nichel, vanadio ecc.) qualora siano presenti come impurezze nel combustibile utilizzato. Il monitoraggio in continuo delle emissioni di SO₂, NO_x e polveri è obbligatoria per gli impianti con potenza termica superiore ai 100 MW, mentre per le emissioni di CO è obbligatoria già con impianti aventi una potenza termica oltre i 6 MW. Per gli altri inquinanti i controlli sono forniti da misurazioni ad hoc sui singoli impianti secondo quanto indicato nelle singole autorizzazioni. Le criticità più importanti derivanti dalla combustione delle biomasse solide riguardano principalmente le emissioni di polveri, NO_x, CO e microinquinanti organici (IPA).

Le polveri o particolato, il cosiddetto "PM" (Particulate Matter) è un "insieme di particelle solide e liquide" che si trova in sospensione nell'aria; i termini PM₁₀ e PM_{2,5} indicano le frazioni di particolato atmosferico che hanno un diametro inferiore rispettivamente a 10 e a 2,5 µm.

La meteorologia incide significativamente sull'andamento temporale di questo inquinante, infatti l'accumulo di polveri sottili e l'aumento delle concentrazioni in aria si verifica principalmente nei mesi autunnali e invernali, caratterizzati da condizioni atmosferiche più stabili, che limitano il rimescolamento delle masse d'aria e la dispersione degli inquinanti stessi.

I fattori di emissione di ossidi di azoto per gli impianti a legna sono indicativamente pari al doppio e a tre volte quelli di impianti a gasolio e metano, rispettivamente. Per quanto

riguarda i fattori di emissione di biossido di zolfo da combustione a legna, essi sono inferiori a quelli da combustione di gasolio.

Da monitorare con attenzione anche gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) che si formano durante la combustione incompleta o la pirolisi di materiale organico contenente carbonio, come carbone, legno, prodotti petroliferi e rifiuti. I cosiddetti IPA ad alto peso molecolare, come il benzo[e]pirene e il benzo[a]pirene, possono derivare da nerofumo e fuliggine di legna (black carbon), sostanze connesse a fonti pirogeniche.

Le modalità di combustione influenzano l'emissione delle diverse sostanze, ad esempio livelli troppo bassi di comburente, generano spesso composti carboniosi parzialmente ossidati tossici o altamente nocivi come: CO, composti organici volatili non metanici (NMVOC), idrocarburi policiclici aromatici (IPA), diossine e furani (PCDD/F), oltre al particolato e agli ossidi di azoto. Gli ossidi di zolfo (SO_x) si possono formare in presenza di materiali, ad esempio la corteccia o la paglia, che hanno tenori in zolfo più elevati (> 0.2% sulla sostanza secca) rispetto al legno. Per quanto riguarda i composti del cloro, la composizione elementare dei biocombustibili presenta sempre una parte minore ma variabile di cloro (Cl); nel legno è pressoché nulla, mentre è più elevata in alcune biomasse erbacee e altre biomasse non di origine agroforestale. Durante il processo di combustione vengono rilasciati HCl, Cl₂ e cloruri (KCl, NaCl); il successivo raffreddamento dei fumi determina la loro condensazione sulle pareti del dispositivo termico e sulle particelle di cenere volatile che vengono normalmente raccolti separatamente e smaltiti. La presenza iniziale di cloro nella biomassa può essere imputata alla contaminazione da composti chimici come: insetticidi, colle, additivi e vernici. La presenza di cloro oltre al rilascio di HCl in atmosfera tramite i fumi, influenza la formazione di diossine e furani, composti organici di cui alcuni congeneri cancerogeni. Infine la composizione chimica del combustibile influenza l'emissione di altre sostanze (K, Na, S, Cl, Zn, Pb, Cd, e, in parte elementi refrattari come Ca, Mg e Si).

Confronto emissioni impianti a seconda della taglia

I processi di combustione che avvengono negli impianti di grande, media e piccola taglia, portano alla emissione di sostanze inquinanti e dipendono da fattori quali la tipologia del combustibile utilizzato, le tecnologie di combustione e le condizioni in cui il sistema opera. Indicativamente si può affermare che i combustibili gassosi sono composti da molecole più semplici e raggiungono più facilmente la combustione completa, laddove i combustibili liquidi e solidi possono rilasciare residui dovuti alla combustione incompleta (ad esempio carbonio nelle ceneri e idrocarburi in fase gassosa), di contro nei combustibili gassosi possono essere presenti sostanze aggiunte agli atomi di carbonio, idrogeno e ossigeno, come lo zolfo aggiunto in qualità di odorizzante dei gas, o dovuto ai processi di raffinazione. La biomassa legnosa contiene poco zolfo, ma ha componenti inorganiche che rimangono nelle ceneri: sodio, potassio, magnesio e in minima parte metalli pesanti. Questi elementi sotto forma di ceneri contengono solo minime quantità di metalli pesanti (Pb, Cr, ...). Più impattante ai fini degli effetti dell'inquinamento è il particolato, sia quello primario, ovvero quello che viene prodotto direttamente dal processo di combustione, che quello secondario, che si viene a creare direttamente in atmosfera a causa di reazioni chimiche a partire da sostanze, ad esempio gli ossidi di azoto e di zolfo, dette "precursori" emesse a loro volta da varie sorgenti. La combustione incompleta produce parte del particolato primario ed è costituita da carbonio. Queste specie di composti organici sono presenti all'interno dei fumi che si sprigionano durante la combustione e possono venire quantificate come Carbonio Organico Totale (COT), quando questi composti si aggregano formano la fuliggine (soot). Nei fumi possono essere presenti anche alcuni idrocarburi, gli IPA - Idrocarburi Policiclici Aromatici, tra cui il benzo[a]pirene; questi composti sono classificati tossici e cancerogeni. La combustione incompleta, specie quella di legna da ardere in focolari aperti o in stufe domestiche di antica concezione, è una fonte importante di questi idrocarburi. Altro inquinante dovuto a processi di combustione incompleta è il monossido di carbonio (CO) che si forma in carenza di ossigeno, il comburente, o quando combustibile e comburente non si "mescolano" a sufficienza.

La formazione degli ossidi di azoto invece è favorita dalle temperature elevate durante la combustione, la loro formazione è facilitata nei combustibili gassosi poiché questi, di solito, presentano temperature di fiamma più elevate, rispetto ai combustibili solidi. Le tecnologie utilizzate per la combustione delle biomasse si differenziano per come il combustibile viene introdotto e alimenta il sistema, per come entra in contatto con il comburente (aria), per i

tempi di residenze e per le temperature nella camera di combustione. Tutti questi fattori determinano delle differenze anche nelle emissioni per cui lo stesso combustibile può produrre inquinanti differenti, in diverse quantità, a seconda delle tecniche utilizzate e del livello tecnologico dell'apparecchio o dell'impianto. Camere di combustione efficienti riducono l'emissione di monossido di carbonio e degli altri prodotti della combustione incompleta. La riduzione della temperatura di fiamma nei bruciatori riduce la produzione degli NOx. L'abbattimento di altri inquinanti come ad esempio la componente organica del particolato, rimane ancora molto problematica per i piccoli apparecchi domestici, poiché può essere ridotta solo con appositi sistemi di abbattimento a valle, difficilmente utilizzabili a scala domestica.

Infatti, oltre alle differenti tipologie di biomasse usate e alle modalità di utilizzo, la grande differenza in termini di emissioni è dovuta alla presenza o meno di sistemi di abbattimento delle stesse e all'efficacia di tali sistemi.

Casi di studio CNR sugli impatti di impianti a biomasse

Si riportano di seguito come casi di studio, alcuni risultati degli studi degli impatti sulla qualità dell'aria e sulle ricadute al suolo di sostanze inquinanti, effettuati dall'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico (IIA) del CNR, in due differenti impianti a biomasse.

Caso di Studio 1

La centrale elettrica oggetto di questo studio è alimentata a biomasse (prevalentemente da legno vergine e cippato di legno proveniente da manutenzione boschiva). L'impianto è composto da un gruppo di produzione da 46 MW netti che vengono immessi nella rete di distribuzione dell'elettricità. La centrale è dotata dei seguenti sistemi di abbattimento degli inquinanti: filtro a maniche, scrubber non catalitico (SNCR), sistema di depurazione a calce/carboni attivi.

Lo studio è stato strutturato in campagne di misura della durata di 10 giorni ciascuna. I monitoraggi sono stati effettuati in due diversi siti, uno a nord della centrale verso il mare (sito denominato "marina") ed uno a sud presso una scuola (denominato "scuola"). Sono state effettuate tre campagne, con identiche modalità, nei mesi di novembre 2011, settembre 2012 e dicembre 2012. Questi periodi sono stati scelti sulla base di precise motivazioni: durante il mese di novembre 2011 era in corso il fermo-impianto della Centrale, il che ha consentito una valutazione del ruolo dell'emissione della Centrale rispetto a quello delle altre sorgenti che insistono sul territorio; le campagne di settembre e dicembre 2012 hanno costituito il termine di paragone in condizioni di esercizio dell'impianto, durante due diverse stagioni (fine estate e inverno). Il programma di monitoraggio ha provveduto a misurare: la concentrazione media giornaliera in massa delle polveri di diametro inferiore a 10 micrometri (PM10); la composizione chimica dei campioni giornalieri di PM10 (elementi, carbonio organico, carbonio elementare, specie ioniche, fra cui K⁺); la concentrazione media giornaliera di levoglucosano; la concentrazione media giornaliera di alcuni metalli tossici (As, Ni, Cd, Pb, Mn, Sb, V); la concentrazione media del periodo dei microinquinanti organici (PCDD, PCDF, IPA, di-PCB). Nelle tabelle seguenti (Figg. 39 e 40) si riportano i limiti per le sostanze inquinanti, come previsti dalla normativa.

Inquinante	Tipo protezione	Indice statistico	Unità di misura	Limite	Numero sup./anno
PM10	salute umana	media 24ore	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	50	35/anno
	salute umana	media annuale	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	40	

Fig. 39. Limiti normativi PM10

Inquinante	Tipo protezione	Indice statistico	Unità di misura	Valore obiettivo	Soglia val. sup.	Soglia val. inf.
IPA Benzo(a)pyrene	salute umana	media annuale	ng/m^3	1,0	0,6	0,4
Cadmio	salute umana	media annuale	ng/m^3	5,0	3	2
Arsenico	salute umana	media annuale	ng/m^3	6,0	3,6	2,4
Nichel	salute umana	media annuale	ng/m^3	20,0	14	10
Pb	salute umana	media annuale	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,5	0,35	0,25

Fig. 40. Limiti normativi idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e metalli

Il monitoraggio e l'analisi della qualità dell'aria e degli impatti relativi a questa centrale ha dimostrato che la concentrazione del PM10 era inferiore al limite di legge e che in esso prevalevano le specie inorganiche naturali (da suolo e da mare) e le specie organiche. Non sono state osservate variazioni significative nella concentrazione e composizione del PM fra il primo periodo di misura, di fermo impianto, e i due periodi successivi, con impianto funzionante (Fig. 41).

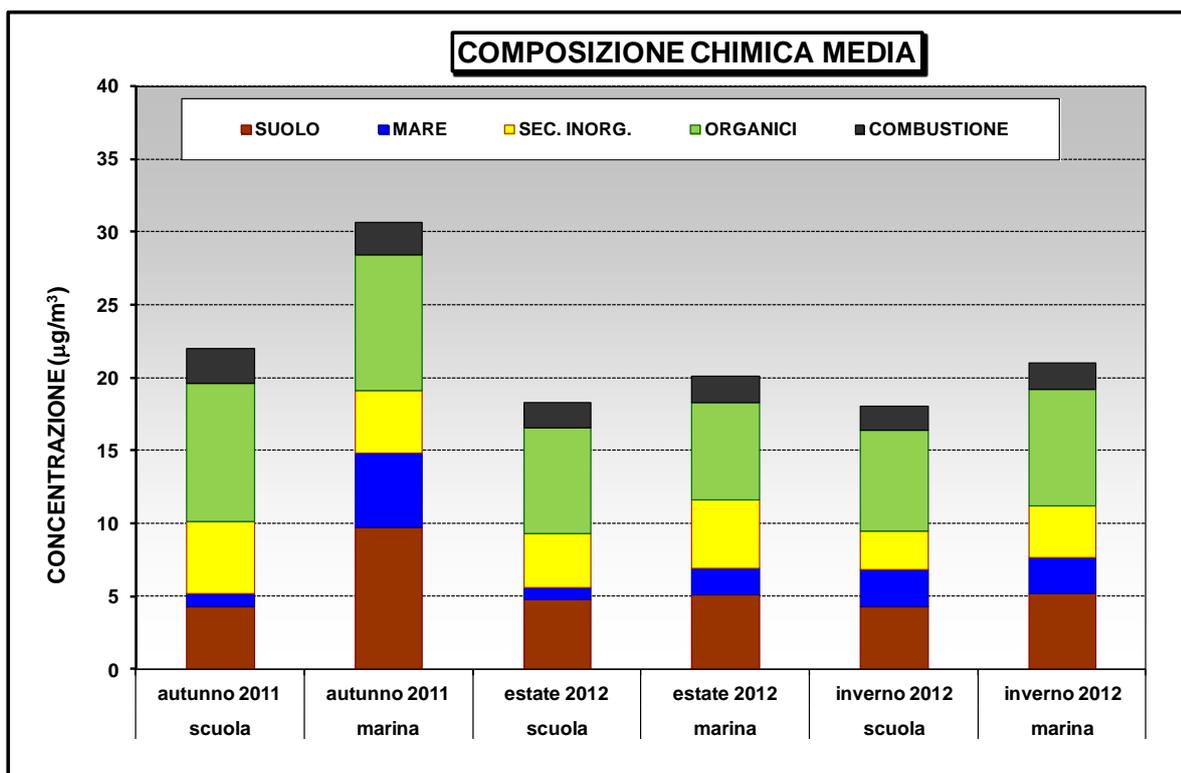


Fig. 41. Stima delle concentrazioni di PM10 a seconda delle sorgenti emissive, nelle diverse stagioni.

La misura del levoglucosano, tracciante della componente organica del carbonio tipica della combustione di legna, ha fornito valori in linea con i dati relativi ad altre aree rurali italiane. La concentrazione del levoglucosano è superiore durante il periodo autunnale e invernale (Fig. 42):

- Sito in prossimità della scuola - $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (autunno), $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estate), $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (inverno)
- Sito in prossimità della marina - $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (autunno), $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (estate), $0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (inverno)

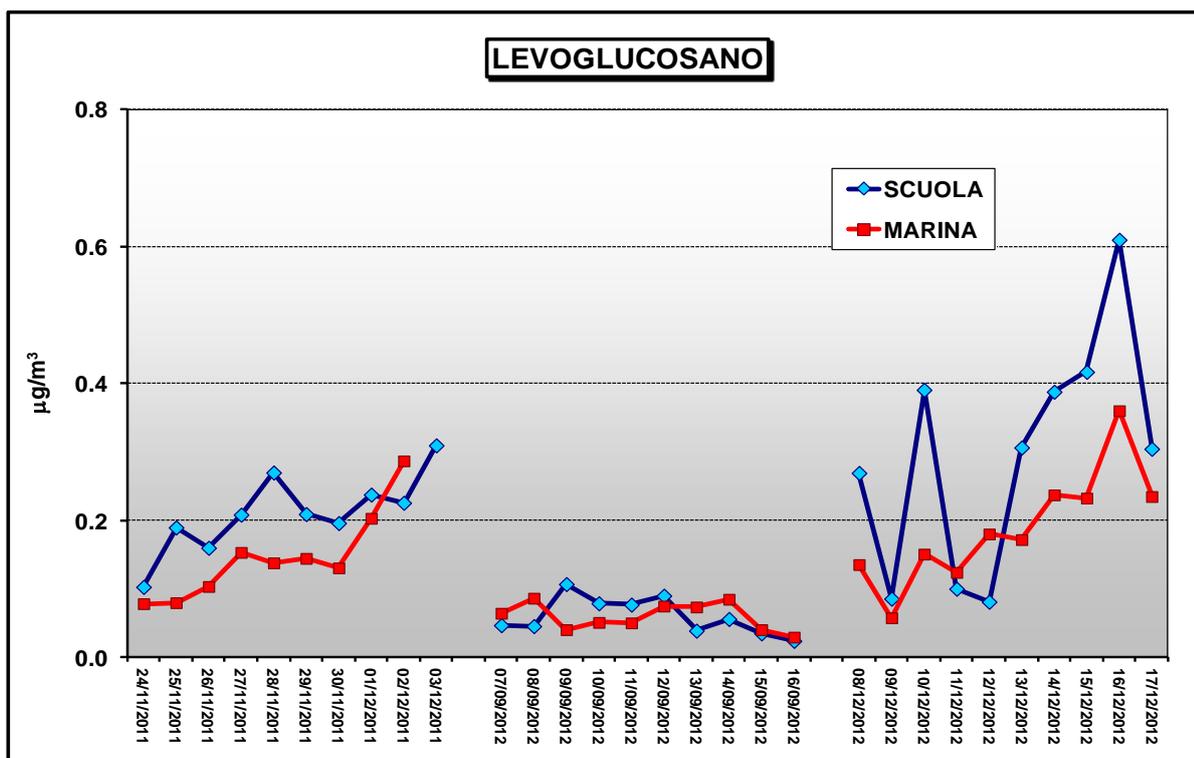


Fig. 42. Andamento delle concentrazioni di levoglucosano in due siti di campionamento, in diverse stagioni.

Il levoglucosano costituisce circa il 14% del carbonio organico emesso dalla combustione di biomasse. Il contributo di questa sorgente è quindi stimabile come:

- compreso fra 1 e 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la stagione invernale
- al di sotto di 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante la stagione calda.

Poiché l'impianto era attivo anche durante la stagione estiva, e non lo era durante la campagna autunnale, il suo contributo è verosimilmente al di sotto di 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Le maggiori concentrazioni levoglucosano riscontrate nel periodo autunnale-invernale, potrebbero, quindi, essere dovute a fonti di combustione "domestica" in caminetti o simili.

Quest'ultimo valore costituisce un limite massimo per l'emissione di particolato attribuibile alla Centrale.

La concentrazione dei microelementi, arsenico (As), cadmio (Cd), nichel (Ni), piombo (Pb), manganese (Mn), antimonio (Sb), vanadio (V) si è mantenuta al di sotto dei valori-obiettivo, per oltre un ordine di grandezza per As, Cd e Ni, e per oltre due ordini di grandezza per il Pb. I livelli di concentrazione di questi elementi non mostrano differenze significative, né fra i due siti di misura, né fra i tre periodi. Non è stata riconosciuta alcuna impronta riconducibile all'attività della Centrale (Fig. 43 e Fig. 44).

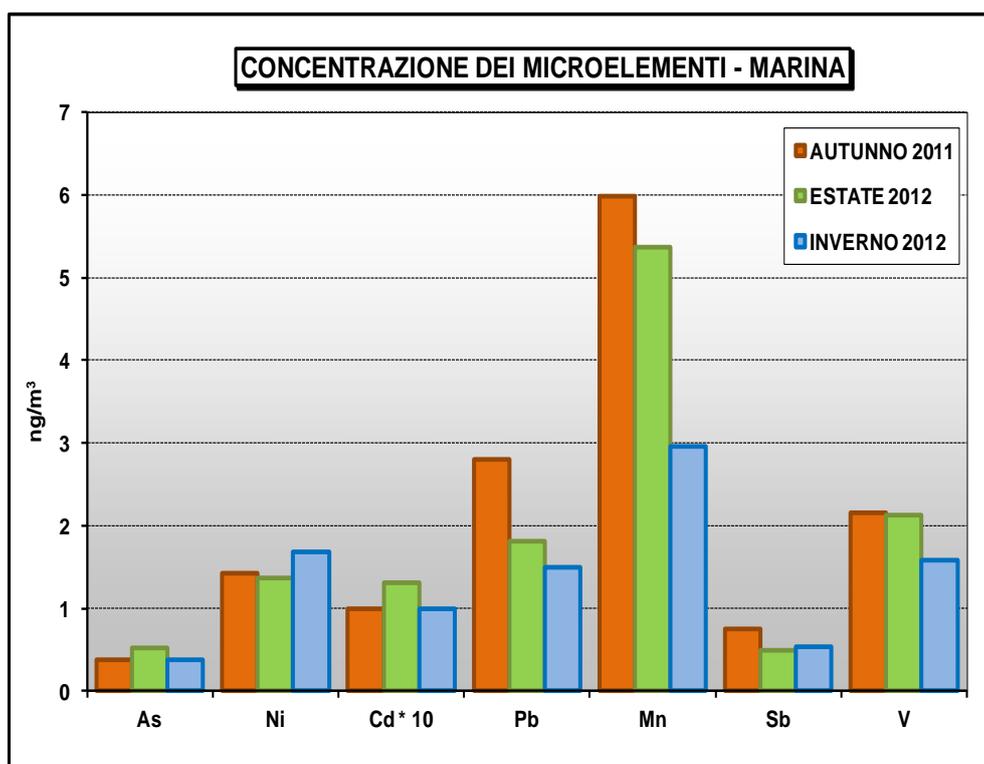


Fig. 43. Concentrazione dei microelementi nel sito "marina" per stagione

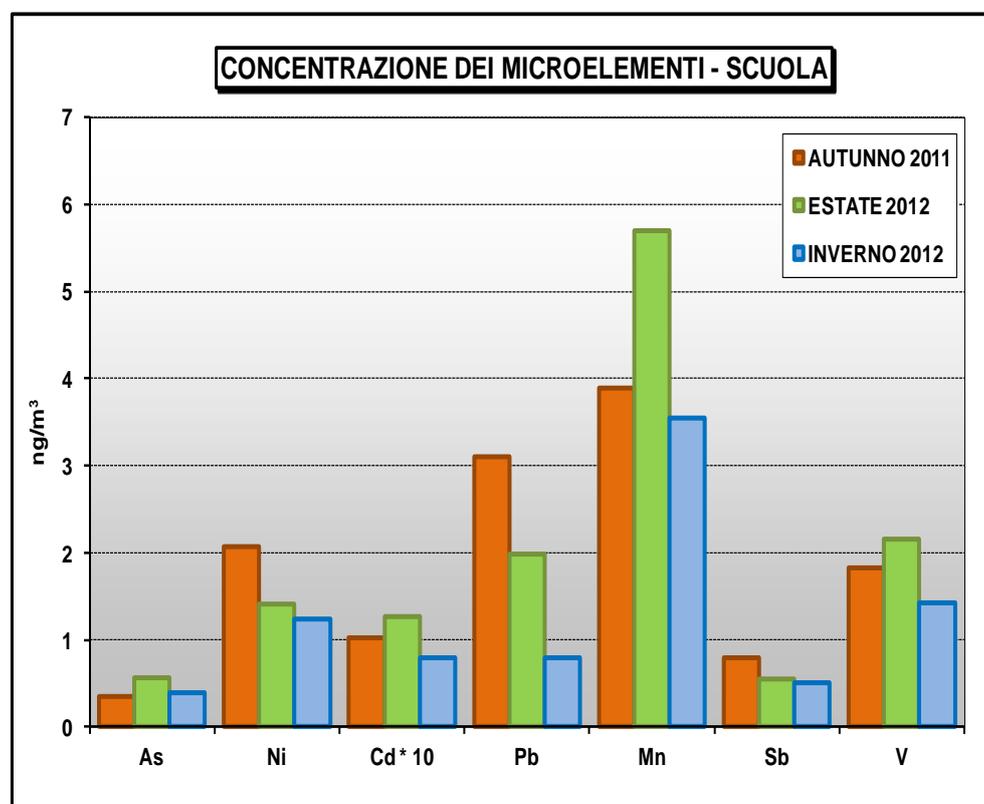


Fig. 44. Concentrazione dei microelementi nel sito "scuola" per stagione

I valori di concentrazione degli IPA sono compatibili con quelli attesi per un sito rurale, e molto inferiori a quelli riscontrabili nelle aree urbane.

La concentrazione di benzo(a)pirene è molto al disotto del valore-obiettivo di 1 ng/m³ (media annuale). Inoltre l'andamento della concentrazione degli IPA mostra una spiccata stagionalità.

La somma dei congeneri è stata pari a 1.2 e 1.7 ng/m³ durante la campagna estiva, ed è stata compresa fra 5.1 ed 8.4 ng/m³ durante le campagne autunnale e invernale.

La confrontabilità dei livelli di IPA osservati durante la prima campagna, durante la quale la Centrale ha osservato il fermo-impianto, e durante la terza, eseguita durante la successiva stagione fredda ma con impianto in funzione, indica che il ruolo svolto dalle emissioni della Centrale è modesto (Fig. 45, Fig. 46 e Fig. 47).

La stagionalità della concentrazione degli IPA ricalca quella già osservata per il levoglucosano.

Al sito della Scuola il rapporto di concentrazione fra levoglucosano e somma degli IPA è costante (34 durante la campagna autunnale, 35 durante la campagna estiva e 36 durante la campagna invernale). Ciò indica la prevalenza del ruolo svolto dai riscaldamenti domestici, o da altre sorgenti di combustione di legna che si attivano durante il periodo invernale, nel determinare l'incremento della concentrazione sia del levoglucosano che degli IPA.

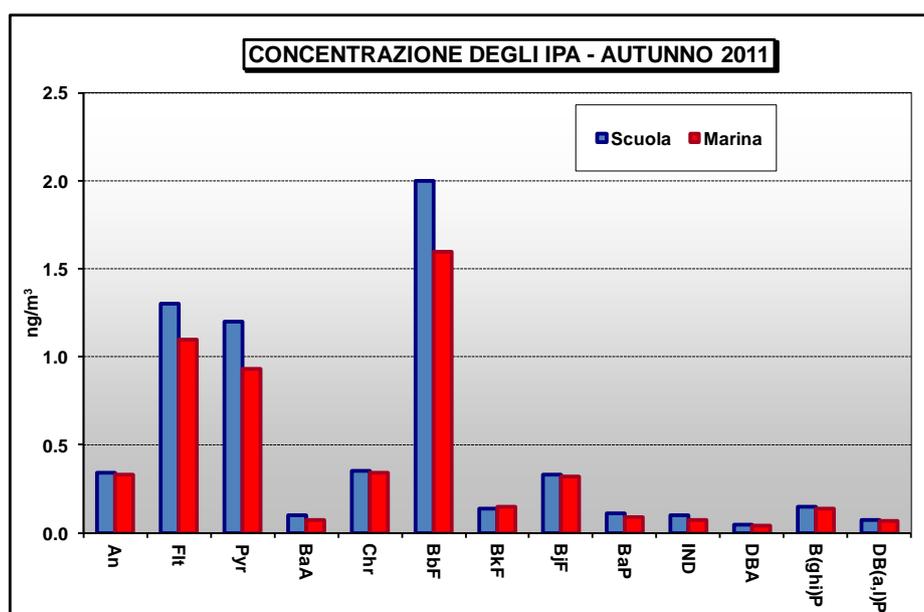


Fig. 45. Concentrazione IPA autunno 2011 nei due siti

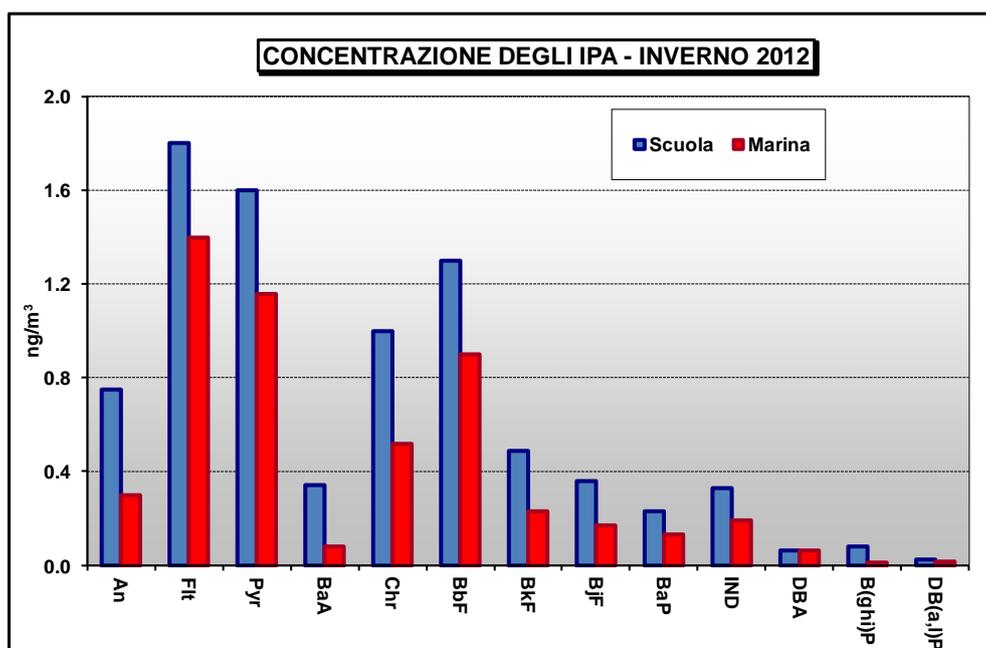


Fig. 46. Concentrazione IPA inverno 2012 nei due siti

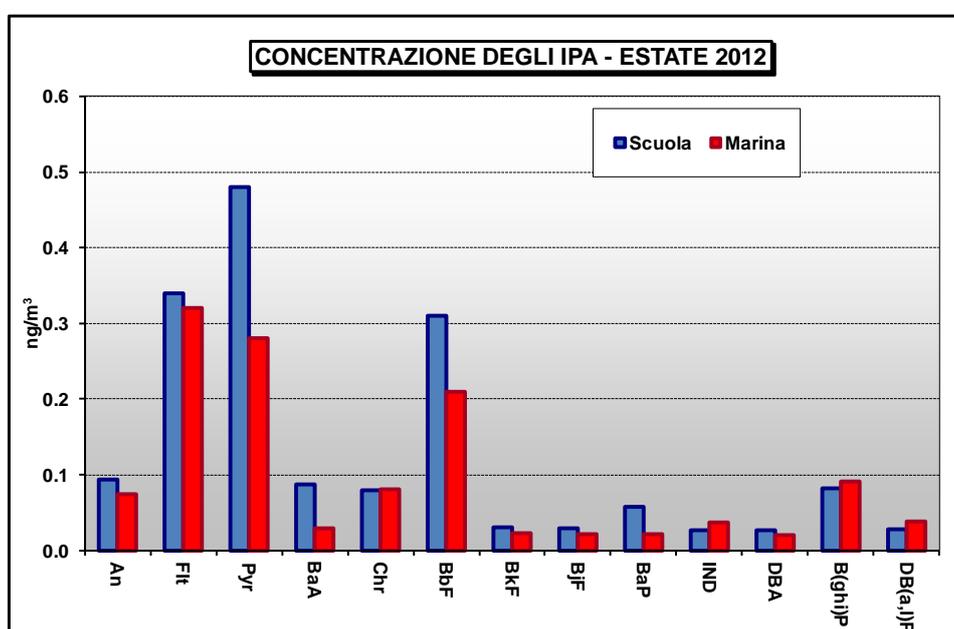


Fig. 47. Concentrazione IPA estate 2012 nei due siti

Per quello che riguarda le diossine, i furani e policlorobifenili (PCDD, PCDF e dl-PCB) sono risultati in tutti i casi al di sotto dei limiti di quantificabilità. Le concentrazioni risultano quindi ampiamente al di sotto dei livelli indicati nelle linee guida del WHO sia per le aree urbane che per quelle rurali.

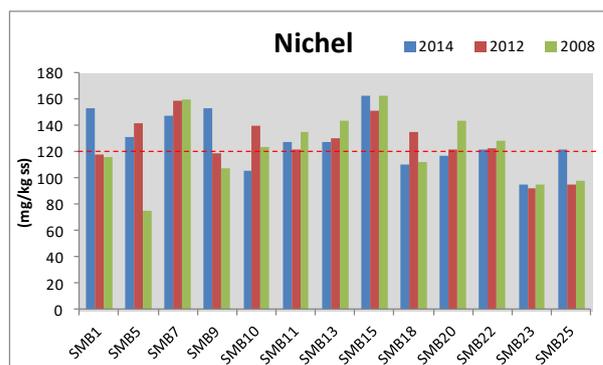
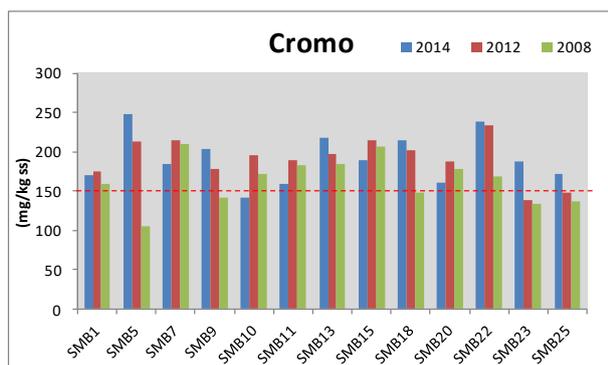
Caso di Studio 2

La Centrale Termoelettrica a biomasse (biomassa vergine da produzioni agricole e da manutenzione forestale) oggetto di questo studio, è costituita da due linee di combustione di biomasse caratterizzate da 40,6 MWt di potenza ed è in grado di erogare una potenza fino a 21 MW elettrici netti, con produzione di energia che viene ceduta alla Rete Nazionale.

In questo caso lo studio ha riguardato il campionamento dei suoli superficiali nell'intorno di un impianto a biomasse, al fine di individuare le concentrazioni degli inquinanti, le relazioni tra la sorgente emissiva ed alcune sostanze, organiche e inorganiche nonché variazioni temporali tra le campagne di monitoraggio. Le figure seguenti mostrano i valori di concentrazione ottenuti nella campagna effettuata dal CNR nel 2014 confrontate con le concentrazioni delle campagne precedenti eseguite da ARPA negli stessi siti negli anni 2008 e 2012. La linea tratteggiata rossa indica, in tutte le figure (Fig. 48), i limiti previsti dal D.Lgs. 152/06 e s.m.i. (vedi tabella riassuntiva seguente).

Inquinante	Tipo protezione	Indice statistico	Unità di misura	Valore obiettivo	Soglia val. sup.	Soglia val. inf.
IPA Benzo(a)pyrene	salute umana	media annuale	ng/m ³	1,0	0,6	0,4
Cadmio	salute umana	media annuale	ng/m ³	5,0	3	2
Arsenico	salute umana	media annuale	ng/m ³	6,0	3,6	2,4
Nichel	salute umana	media annuale	ng/m ³	20,0	14	10
Pb	salute umana	media annuale	µg/m ³	0,5	0,35	0,25

Sono state misurate le concentrazioni nel suolo delle seguenti sostanze inorganiche: Metalli (mg/kg s.s.) - Antimonio (Sb), Arsenico (As), Berillio (Be), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo totale (Cr), Mercurio (Hg), Nichel (Ni), Piombo(Pb), Rame (Cu), Stagno (Sn), Tallio (Tl), Vanadio (V), Zinco (Zn);



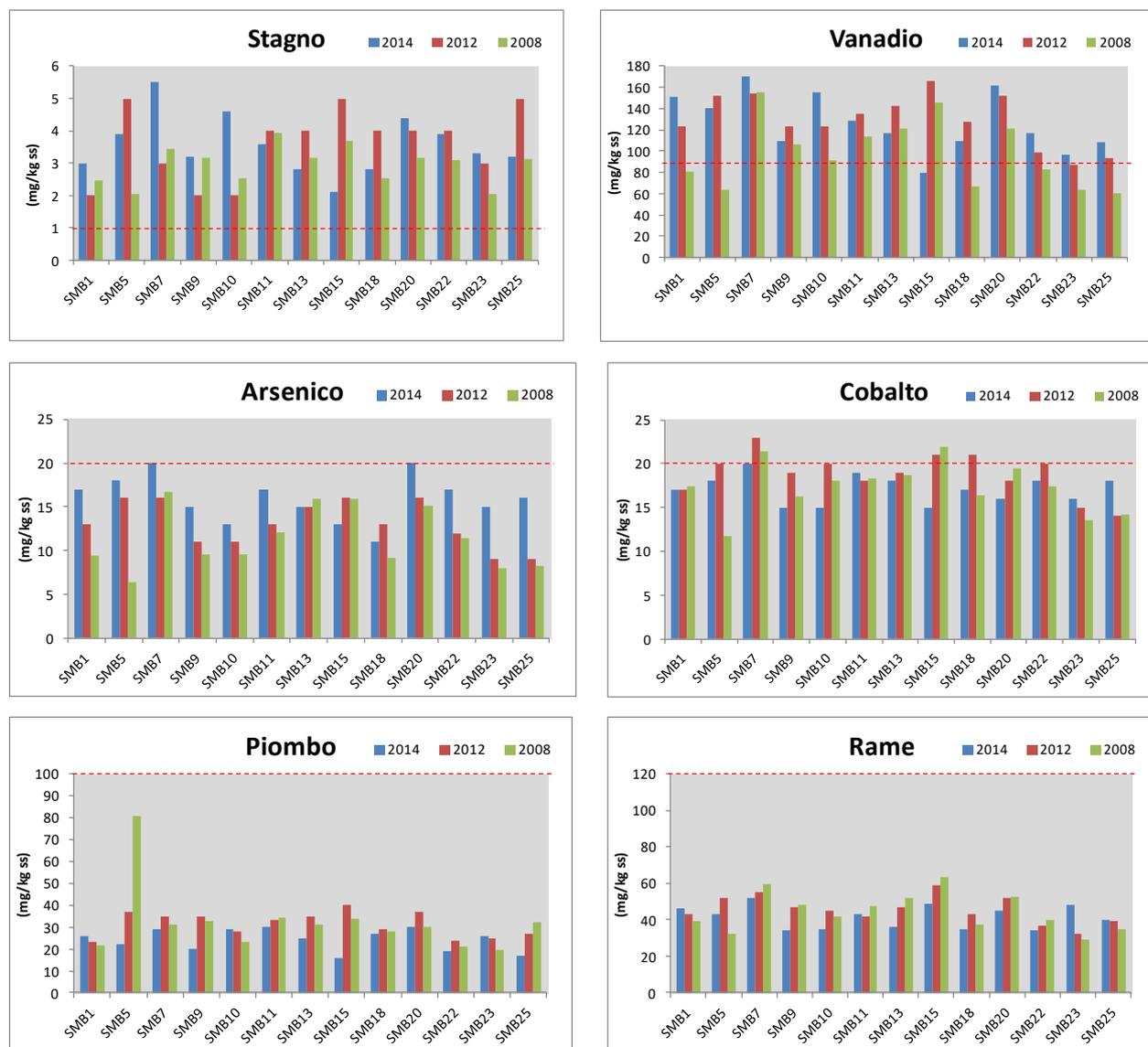


Fig. 48. Concentrazioni dei metalli nei suoli campionati, per il 2008, 2012 e 2014

Le sostanze organiche misurate sono state le seguenti:

Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) (ng/g s.s.): Fluorantene (FL), Antracene (Ant), Fenantrene (Phe), Benzo(e)pirene (BeP), Pirene (Pyr), Benzo(a)antracene (BaA), Crisene (Chr), Benzo(b+j+k)fluorantene (Bb+j+kF), Benzo(a)pirene (BaP), Dibenzo(a,h)antracene (DbahA), Indeno(1,2,3,c,d)pirene (IndP), Benzo(g,h,i)perilene (BghiP), Dibenzo(a,e)pirene (DbaeP), Dibenzo(a,i)pirene (DbaiP), Dibenzo(a,h)pirene (DbahP), Dibenzo(a,l)pirene (DbalP) (Fig. 46 e Fig. 47).

Policlorodibenzo-p-diossine e policlorodibenzofurani (PCDD e PCDF) (ng/kg s.s. e ng WHOTEQ/kg s.s.) (Fig. 48).

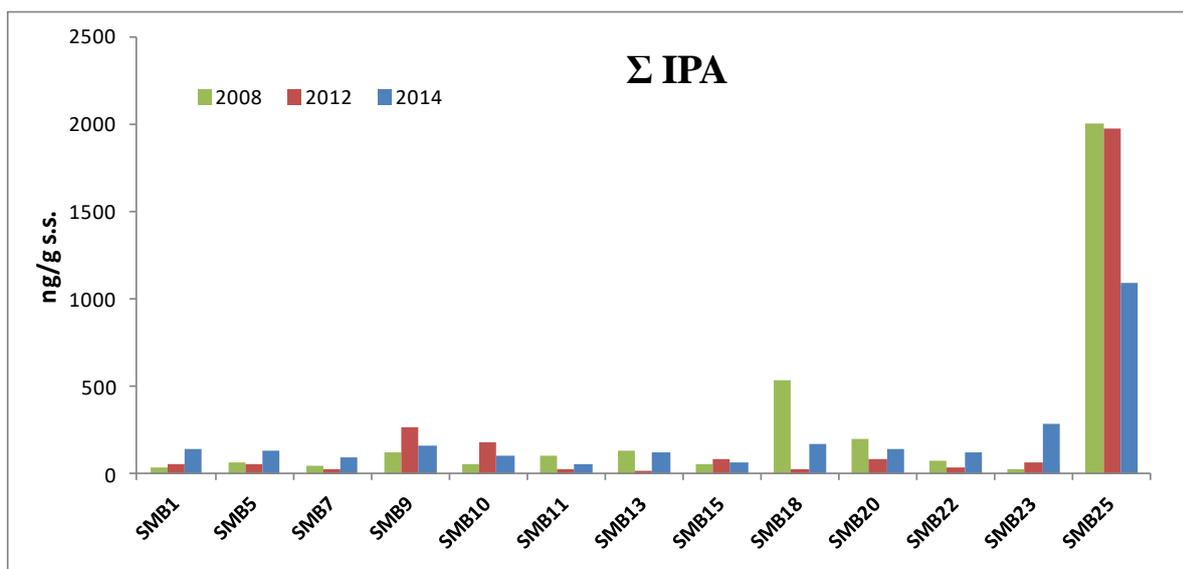


Fig. 46. Concentrazioni degli IPA nei suoli campionati, per il 2008, 2012 e 2014

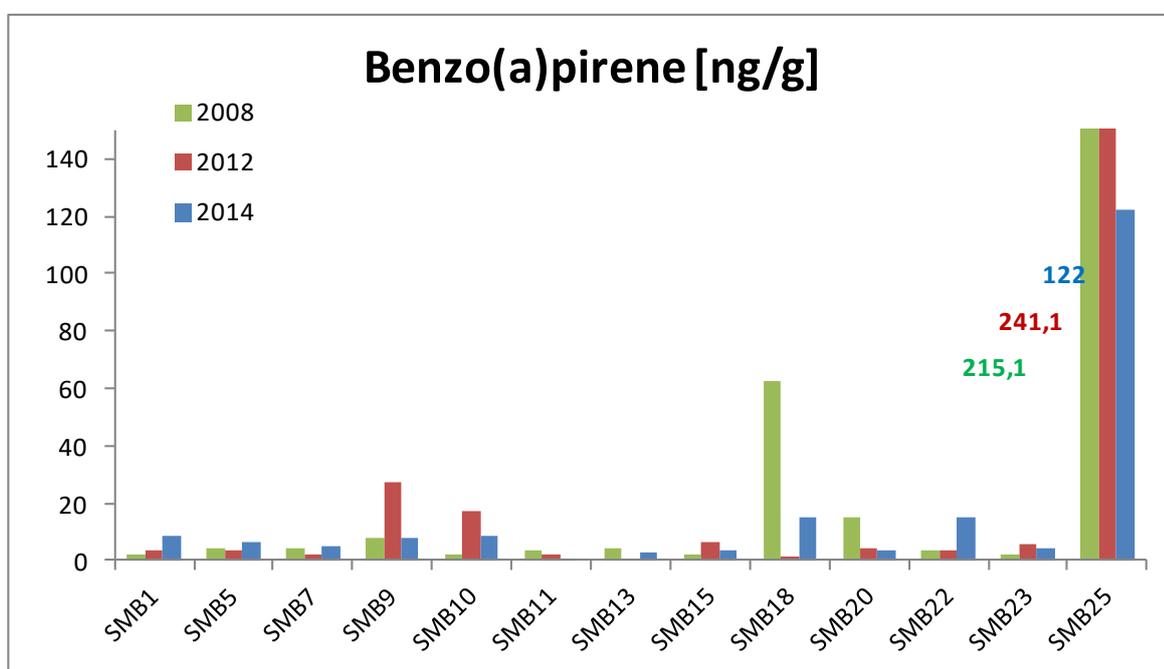


Fig. 47. Concentrazioni del Benzo(a)pirene nei suoli campionati, per il 2008, 2012 e 2014

Come si può osservare, la concentrazione degli IPA presenta un andamento simile tra le varie campagne di misura. Solo nel campione denominato SMB25 si osserva per il 2014 una concentrazione circa dimezzata. Si può osservare che nessun superamento è stato osservato ed il valore massimo riscontrato è pari a 0,66 mg/kg (sito SMB25) a fronte ad un limite di legge

di 10 mg/kg. Anche per quanto riguarda la concentrazione dei singoli composti, tutti risultano inferiori ai limiti di legge.

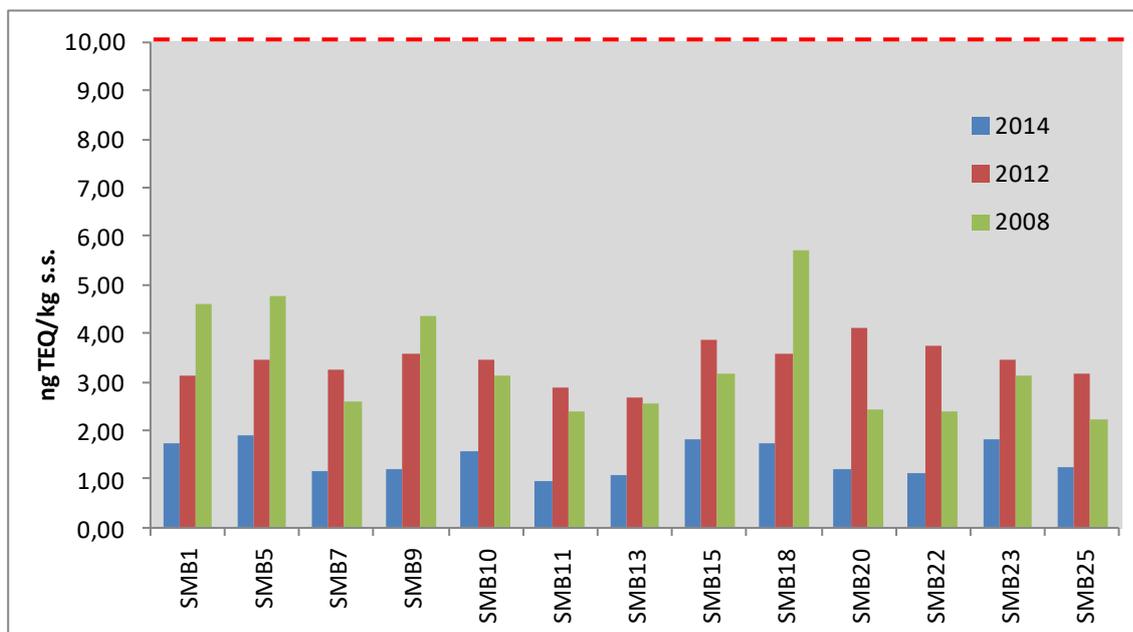


Fig. 48. Concentrazioni dei **PCDD/F** nei suoli campionati, per il 2008, 2012 e 2014

Per quanto riguarda la concentrazione di diossine e furani (PCDD/F) come sommatoria, nei siti di indagine, i dati del 2014 risultano per tutti i siti inferiori o al più confrontabili con quelli delle campagne precedenti (Fig. 48). Nella stessa figura è indicata anche la concentrazione limite. Rispetto ai limiti previsti dal D.Lgs. 152/06 e s.m.i. per i siti ad uso verde pubblico, privato e residenziale (col. A della Tabella1 dell'Allegato 5 al Titolo V della Parte IV), il valore di 10 ng/kg s.s. come sommatoria TEQ non è stato mai superato; il valore mediano per i suoli in esame è di 1.24 ng TEQ/kg, un valore pari al 10% del limite e non tutto è attribuibile solo alle emissioni dall'impianto.

I risultati ottenuti possono essere così riassunti:

- I campioni di suolo analizzati sono omogenei, non si sono osservate variazioni tra i campioni stessi né tra i diversi inquinanti considerati.
- I dati sperimentali sono stati confrontati con campagne precedenti e con i valori limite della legge vigente, non hanno mostrato differenze e hanno mostrato tutti valori ampiamente sotto i limiti di legge.
- I valori di alcuni metalli, superiori alle concentrazioni limite, sono dovute a valori di fondo naturale.

- Per la maggior parte dei metalli e dei microinquinanti organici le concentrazioni sono risultate inferiori ai limiti di quantificazione
- Da una analisi statistica dei dati non sono emerse correlazioni significative dei vari inquinanti tra di loro né con la granulometria del suolo

I piccoli impianti

Differente e sicuramente meno controllata e controllabile è la situazione di piccoli impianti, ovvero quelli con potenza termica nominale inferiore a 1 MWth.. Esaminando le tipologie di piccoli impianti domestici abbiamo innanzitutto il cosiddetto caminetto aperto, il caminetto tradizionale, è il tipo di apparecchio che è stato meno influenzato dall'evoluzione tecnologica e che praticamente non ha subito cambiamenti dalla "notte dei tempi". È formato da una camera di combustione, ha un'ampia apertura ed è direttamente connessa al camino. Il fuoco riscalda l'ambiente direttamente per radiazione e l'efficienza energetica dei caminetti si ferma di solito intorno al 15%. Evoluzione del caminetto tradizionale è il caminetto chiuso, che può essere installato a se stante o collocato nel caminetto tradizionale. In questi apparecchi l'efficienza termica aumenta in media al 55%, anche le emissioni inquinanti risultano ridotte. Le stufe a legna hanno il focolare chiuso hanno aperture per far entrare l'aria nella camera di combustione; se la legna da bruciare è troppa rispetto all'aria che entra, la stufa brucia male e produce grandi quantità di sostanze inquinanti; una stufa può avere un rendimento termico che va dal 45%, all'84% per gli apparecchi più moderni. Le stufe a pellet sono alimentate, con un combustibile ricavato dalla segatura essiccata e poi compressa in forma di piccoli cilindri, i pellet appunto. Il combustibile risulta essere più omogeneo e meno umido rispetto alla legna e ha quindi una probabilità maggiore di avere una combustione efficace. La camera di combustione viene alimentata da un dispositivo di carico automatico. Queste stufe hanno un'efficienza termica media del 70%, che arriva anche al 94% negli apparecchi migliori e più moderni.

Stufe e caminetti sottostanno rispettivamente alle certificazioni obbligatorie EN 13229 ed EN 13240, e le canne fumarie a quella EN 1443. Gli apparecchi inoltre devono essere dotati di un libretto di impianto nel quale devono essere riportate le operazioni di prima installazione, di manutenzione ordinaria e straordinaria nonché il rendimento di combustione.

Nella tabella seguente (Fig. 49) vengono indicati i fattori emissivi per principali inquinanti degli impianti domestici di combustione della biomassa solida.

Fattori di emissione combustione biomassa solida (g/GJ)							
	NOx	CO	NMVOC	PM10	PM2.5	Diox (mg/GJ)	B(a)P

Caminetto	50	6000	780	516	510	0.48	0.04
Stufa tradizionale	50	6000	720	486	486	0.48	0.15
Caminetto chiuso	90	4500	390	139	134	0.48	0.01
Stufa a pellet	90	500	10	149	148	-	0.01
Stufa innovativa	90	3000	250	177	165	-	0.15

Fig. 49. Fattori emissione per la combustione da biomassa solida. Informative Inventory Report - ISPRA 2016 ed ENEA

Da dati CURIT, il catasto degli impianti termici in Lombardia, risultano attivi al 2018, solo in questa regione, 3.278.645 impianti, a fronte di appena 480.615 dichiarazioni di registrazione degli impianti stessi. Sono quindi ancora pochi gli apparecchi registrati malgrado la legislazione regionale preveda, dal 15 ottobre 2014, che gli apparecchi per il riscaldamento alimentati a biomassa legnosa (legna, cippato, pellet, bricchetti) di potenza maggiore a 5 kW siano muniti di “Libretto di impianto”, poiché rientrano a tutti gli effetti nell’ambito di applicazione della normativa regionale relativa agli impianti termici. Il “Libretto di impianto” deve identificare le caratteristiche tecniche (potenza e rendimento), il combustibile utilizzato e riportare indicazioni circa le corrette modalità di gestione del generatore, il regime di funzionamento ottimale, i sistemi di regolazione presenti, nonché i limiti (minimo e massimo) del tiraggio del sistema di evacuazione dei fumi da collegare all’apparecchio.

La tabella seguente (Fig. 50) illustra il confronto tra il consumo energetico totale in Lombardia nell’anno 2014 (dati inventario delle emissioni INEMAR) a fronte delle emissioni per combustibile di PM10, in tonnellate annue, rispetto ai fattori di emissione dei principali combustibili. Si può notare come i camini aperti abbiano emesso in un anno, solo in Lombardia, 3.679 tonnellate di PM10.

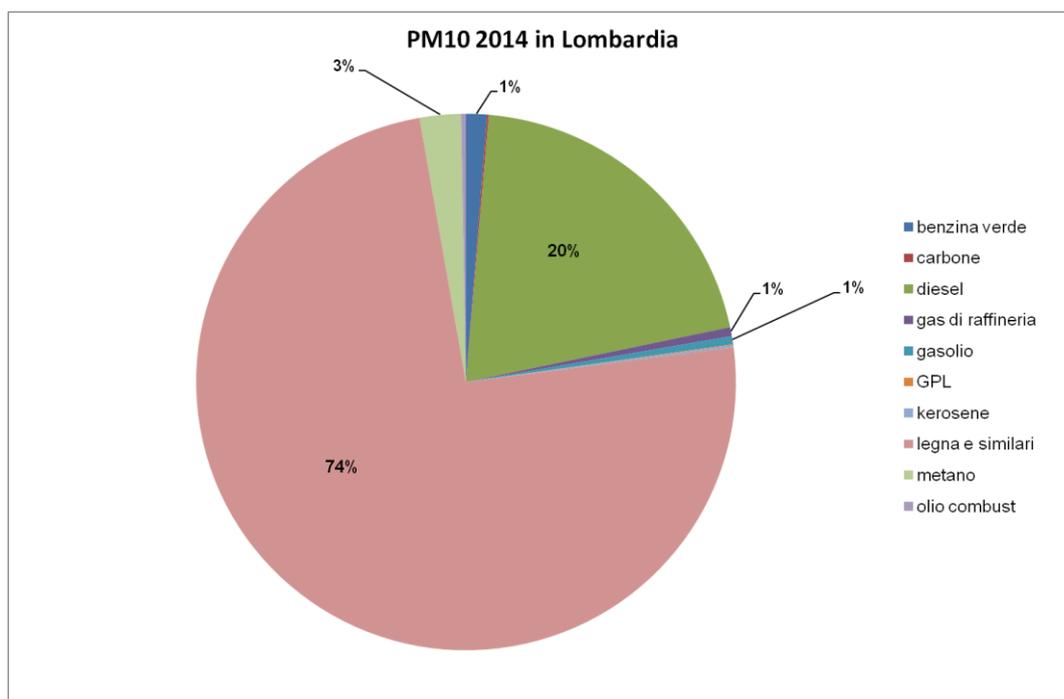


Fig. 50. Distribuzione percentuale del PM10 in Lombardia nel 2014. Dati INEMAR, inventario delle emissioni della regione Lombardia 2014

Molti studi recenti rilevano come i piccoli impianti domestici, per diversi anni incentivati e pubblicizzati come soluzione “green”, abbiano un notevole impatto sull’emissione di inquinanti. Ad esempio uno studio condotto da InnovHub - Stazioni sperimentali per l’industria, “Studio comparativo sulle emissioni da apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet”, pubblicato nel giugno 2016 (Fig. 51). Nello studio vengono confrontati gli inquinanti emessi (PM, CO, NO_x, SO_x, IPA) da piccoli impianti domestici alimentati con combustibili differenti. In particolare sono state comparate le emissioni delle stufe a pellet sia per apparecchi di qualità differenti, rispettivamente categoria 4 stelle e 3 stelle secondo il DGR 5656/16 (Regione Lombardia), sia alimentati a pellet di qualità A1, la più elevata disponibile e A2, più economica e scadente .

Combustibile	CO g/GJ	NO _x g/GJ	SO _x g/GJ	COV g/GJ	PM g/GJ	IPA benzo(a)Pirene µg/MJ	NOTE
--------------	------------	-------------------------	-------------------------	-------------	------------	-----------------------------	------

Gas Naturale	56.6	32.3	0.3a	<0.15	<0.04	<0.08	a valore medio di letteratura
GPL	47.8	22.6	2.2b	<0.15	<0.04	<0.08	b elaborazione ISSI sulla base di dati di specifica
Gasolio	3.7c	34c	19.3c	1.1c	0.1c	0.08a	c dati ISSI su caldaie di potenza >150 kW a valore di letteratura
Legna	5862d	122d	10.7d	536d	254d	68.7d	d dati ISSI
Pellet A1 stufa 4 stelle	175.6	135.9	6.87e	6.7	23.9	0.22	e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A1 stufa 3 stelle	141.4	118.2	6.87e	40.5	44.1	0.18	e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A2 stufa 4 stelle	236.1	166.3	12.8e	8.2	83.8	0.1	e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A2 stufa 3 stelle	625.7	233.2	12.8e	223.8	82.9	0.94	e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo

Fig. 51. Studio InnovHub 2016

I fattori di emissione di questo studio, appaiono essere piuttosto coerenti sia con i fattori di emissione indicati nel documento AP42 – Vol. 1. Residential wood stoves, dell'EPA (Fig. 52), mentre risultano superiori, anche se dello stesso ordine di grandezza quelli individuati dall'EMEP/EEA per gli impianti domestici a biomassa (legno, pellet, residui agricoli) (Fig.53).

g/GJ	Stufe a legna			Stufa a pellet	
	convenzionale	non catalitica	catalitica	certificata	non certificata
PM10	290,7	186,2	193,8	39,9	83,6
CO	2192,6	1337,6	991,8	374,3	496
NOx	26,6	ND	19	131,1	ND
SOx	3,8	3,8	3,8	3,8	ND
NMVOC	503,5	114	142,5	ND	ND

Fig. 52. Fattori di emissione "Residential wood stoves". AP42. EPA

CO g/GJ	NMVOC g/GJ	SOX g/GJ	NH3 g/GJ	TSP (total particles) g/GJ	PM10 g/GJ	Benzo(a)pyrene mg/GJ
4000	600	11	70	800	760	121

Fig. 53. Fattori di emissione "Small combustion plants – biomass" EMEP/EEA. Luglio 2017

In un recentissimo articolo sulla composizione del particolato ultrafine da dati riguardanti la città di Dublino (Huang et al. 2018), città europea di medie dimensioni, viene mostrato che in due giorni, il 19 novembre 2016 (P1) e il 22 gennaio 2017 (P2) di picco di inquinamento atmosferico, la concentrazione in massa dell'aerosol sub-micronico (PM1) era superiore a $300 \mu\text{g m}^{-3}$ nel primo episodio e a $273 \mu\text{g m}^{-3}$, concentrazioni medie su trenta minuti di misurazione (Fig. 54).

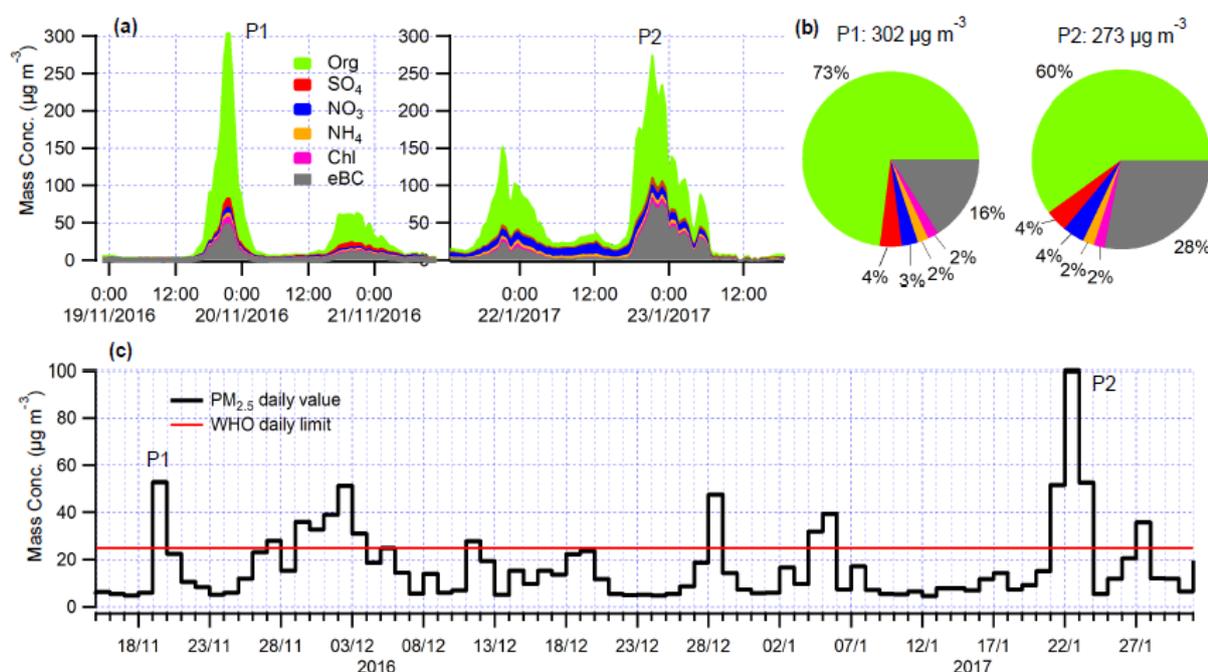


Fig. 54. Picchi P1 e P2 di concentrazioni di polveri ultrafine. Da “Extreme air pollution from residential solid fuel burning. Huang et al. 2018”

Le ricerche sulle fonti emissive e sulla composizione del particolato, tramite la quantità di carbonio organico e “Black carbon” hanno confermato che fino al 70% del PM1, era attribuibile alle emissioni dovute all'uso domestico di torba e legna (rispettivamente il 12% e l'1% delle stufe domestiche funzionano con questi combustibili) (Fig. 55). I picchi di inquinamento coincidono con temperature basse e condizioni di stagnazione in atmosfera, e proprio in queste situazioni, infatti, viene consumato più combustibile per il riscaldamento e c'è meno dispersione nell'aria, favorendo gli accumuli in atmosfera. Le conclusioni dell'articolo sottolineano l'impatto sulla qualità dell'aria dell'utilizzo domestico di torba a legname, evidenziano il ruolo primario della tecnologia di combustione e controllo delle

emissioni affermando che: "...piuttosto che promuovere combustibili solidi con emissioni basse o nulle di CO₂, è urgente introdurre nuovi controlli sulle emissioni domestiche".

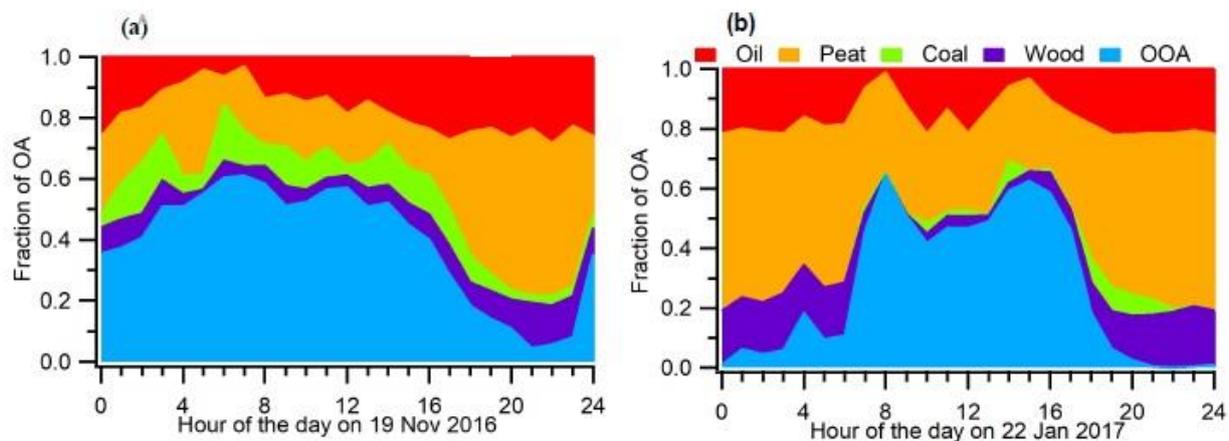


Fig. 55. Contributo dei vari componenti (petrolio, torba, carbone, legna) alla massa totale dell'aerosol organico. Da "Extreme air pollution from residential solid fuel burning. Huang et al. 2018".

6. Considerazioni ambientali e conclusioni

Tutte le attività umane hanno degli impatti sull'ambiente che vanno considerati, valutati e mitigati in un'ottica di sostenibilità ambientale, che include, cioè, anche gli aspetti economici e sociali.

Il legno è considerato un'energia rinnovabile a impatto nullo rispetto alle emissioni di CO₂, poiché, rispetto ai combustibili fossili che si sono formati durante milioni di anni, e hanno immagazzinato l'anidride carbonica ere geologiche fa, la CO₂ liberata durante la combustione delle biomasse legnose, è pari a quella fissata dalle piante, durante la crescita, mediante il processo di fotosintesi. Il ciclo del carbonio, non dà quindi emissioni aggiuntive di gas serra in atmosfera. Con alcuni metodi che valutano il ciclo di vita (LCA) delle biomasse, come il metodo dell'IPCC del 2007 "GWP 100y V1.02" che fornisce i risultati in termini di percentuali GWP (Global Warming Power) su un periodo di 100 anni dalle emissioni, o il Greenhouse Gas Protocol V1.01 / CO₂eq (kg) che fornisce i risultati degli impatti ambientali in termini di tonnellate equivalenti di CO₂.eq fossile emessa, è possibile calcolare l'apporto di CO₂. Inoltre, secondo quanto affermato nella "Relazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo sui criteri di sostenibilità relativamente all'uso di fonti da biomassa solida e gassosa per l'elettricità, il riscaldamento e il raffreddamento SEC(2010)" con l'utilizzo dei residui forestali o agricoli, si ottiene un riduzione di gas serra elevato e corrisponde in generale a un valore superiore all'80% rispetto ai combustibili fossili.

Livelli elevati di Risparmio Standard di CO₂eq sono garantiti anche dagli impianti a biomassa solida di taglia industriale eserciti attraverso la sola produzione di energia elettrica come evidenziato dall'Appendice E della norma UNI/TS 11435 "Criteri di sostenibilità delle filiere di produzione di energia elettrica, riscaldamento e raffreddamento da biocombustibili solidi e gassosi da biomassa.

Inoltre, tenuto conto che il decadimento delle piante genera emissioni di metano, un gas con un impatto serra 30 volte superiore alla CO₂, la manutenzione forestale sostenibile attraverso la produzione di materiale per combustione ai fini energetici ha come effetto la riduzione di 30 volte le emissioni serra naturali.

Considerazioni sulle emissioni clima-alteranti

Rispetto alle emissioni di gas ad effetto serra, la legna è una fonte di energia quasi neutra, infatti la quantità di biossido di carbonio (CO₂) emesso durante la sua combustione è praticamente pari a quella assorbita con il processo di fotosintesi - componente fondamentale del ciclo del carbonio - durante la vita vegetativa della pianta dalla quale quella legna deriva.

La biomassa legnosa, infatti, viene raccolta e predisposta per l'impiego con un processo produttivo che incide in modo limitato nel bilancio complessivo del biossido di carbonio, specie quando si garantisce una filiera corta tra zone di produzione e impianti per il consumo. Ribadito l'elevato contributo delle filiere bioenergetiche sul risparmio delle emissioni di CO₂, bisogna però considerare che, soprattutto nei piccoli impianti a biomassa privi di sistemi di controllo, la combustione della legna può portare all'emissione di composti gassosi e particolato che hanno un effetto climalterante. Infatti, in condizioni di cattiva combustione la legna da ardere emette composti metanici, un gas ad effetto serra, e considerevoli quantità di fuliggine, detta anche "black carbon" o "fumo nero" o anche carbonio elementare. Il black carbon è un fortissimo agente climalterante: il suo effetto riscaldante medio è valutato sul breve termine (20 anni) oltre 2000 volte quello della CO₂. Le emissioni di black carbon possono essere significativamente ridotte a livelli trascurabili attraverso sistemi di trattamento fumi, normalmente installati su tutti i grandi impianti.

Quindi la biomassa solida è una fonte energetica, che limita il cambiamento climatico se la combustione è efficiente. Viceversa, se consideriamo le emissioni di black carbon e di metano di un camino aperto (o di una stufa poco efficiente), la combustione della legna ha un effetto negativo anche dal punto di vista delle emissioni climalteranti.

Considerazioni sulle emissioni di macroinquinanti

Le emissioni di sostanze inquinanti possono essere considerate una delle maggiori criticità derivata della combustione delle biomasse solide, soprattutto per quanto riguarda le polveri (il PM), gli ossidi di azoto (NO_x), e il monossido di carbonio (CO). E' considerazione molto diffusa, quindi, che la combustione di legna può risultare molto inquinante: ciò è confermato dai dati scientifici se la combustione non avviene correttamente (come per qualsiasi altro combustibile), e in modo incontrollato. A questo proposito numerosi studi dimostrano che il rapporto fra la combustione domestica della legna e la qualità dell'aria ha un impatto negativo dovuto al fatto che le combustioni domestiche –se mal condotte nei piccoli impianti (ad esempio, utilizzando legna con alto grado di umidità o trattata, in impianti con tecnologie

non recenti oppure non regolarmente e frequentemente mantenuti e puliti) - emettono in atmosfera particolato e composti tossici. Questa situazione, però, è totalmente differente rispetto a quella dei grandi impianti, dotati di sistemi di abbattimento e sottoposti al monitoraggio continuo delle emissioni inquinanti.

Per tali impianti l'efficienza di abbattimento degli inquinanti è tale da ridurre a valori estremamente ridotti – se non trascurabili – gli impatti ambientali dovuti al processo di combustione.

Considerazioni sulle emissioni di microinquinanti

Le emissioni di sostanze microinquinanti dagli impianti a biomasse sono una sottocategoria delle emissioni tipiche dei processi di combustione e come per le precedenti possono essere considerate una delle maggiori criticità derivata dalla combustione delle biomasse solide, soprattutto per quanto riguarda gli impianti di piccola taglia che non hanno sistemi di abbattimento delle emissioni.

Questa classe di inquinanti è sempre oggetto di attenta valutazione per gli impianti di taglia rilevante, che prevedono costanti controlli volta a valutare il livello di emissione ma quasi totalmente tralasciati nel caso di piccoli impianti di combustione, mancando quindi di fornire un adeguato riferimento.

Tuttavia i parametri di controllo della combustione e la natura della matrice hanno un'influenza determinante sul livello di emissione di microinquinanti.

Generalmente l'impiego di biomasse vergini e un costante controllo del processo di combustione in termini di tenore di ossigeno e di temperatura di combustione permette di ridurre grandemente l'emissione di questi elementi.

Inoltre la presenza di sistemi di abbattimento tipica dei grandi impianti e sottoposti al monitoraggio continuo delle emissioni inquinanti è tale da ridurre a valori estremamente ridotti – se non trascurabili – gli impatti ambientali dovuti al processo di combustione.

Conclusioni

La biomassa disponibile a scopi energetici è in aumento, in Italia e in Europa sia per quanto riguarda le risorse forestali, sia per quanto concerne l'utilizzo di residui forestali e agricoli. In particolare la valorizzazione dei residui appare essere particolarmente in linea con i concetti della sostenibilità e più precisamente con i principi alla base del concetto di "economia circolare".

Il significativo aumento delle foreste in Italia e in Europa negli ultimi decenni, a fronte di risorse pubbliche per la loro gestione sempre inferiori, desta grande preoccupazione in diverse autorità pubbliche ad esse preposte. L'utilizzo a fini energetici della biomassa derivata dalla gestione sostenibile delle foreste consente quindi anche di ridurre il rischio idrogeologico e di incendi in Italia. L'obiettivo di incremento della valorizzazione energetica delle risorse forestali secondo criteri di sostenibilità ambientale è oggi ancor più perseguibile se si considera, soprattutto per gli impianti di taglia industriale, l'obbligo di tracciabilità della biomassa da filiera previsto dai dettami normativi vigenti. Inoltre, risultano sempre più ordinari a livello regionale gli strumenti per la corretta gestione forestale come gli inventari ed i regolamenti forestali e quindi l'obbligo di autorizzazione/comunicazione al taglio del patrimonio boschivo. Da non dimenticare il crescente ricorso a sistemi di certificazione della gestione forestale basati su standard internazionali di sostenibilità ambientale.

Come ricordato, l'utilizzo della biomassa a scopo energetico è uno degli strumenti indicati come positivo rispetto alla riduzione dell'effetto serra, infatti il bilancio della CO₂ relativo a questa filiera energetica è considerato neutro, e tenuto conto della riduzione delle emissioni di metano derivanti dalla naturale decomposizione di materiale organico si può addirittura considerare un effetto largamente positivo, analogo a un carbon sink.

Riassumendo tra gli aspetti positivi dell'utilizzo a scopi energetici delle biomasse solide, possiamo elencare:

- la disponibilità e la diffusione relativamente omogenea rispetto al territorio;
- lo sviluppo di tecnologie economicamente vantaggiose, competitive e sicure dal punto di vista ambientale, per la conversione delle biomasse;
- si tratta di un tipo di risorsa già pronta dal punto di vista tecnico per essere integrata nel sistema attuale di distribuzione dell'energia assicurando continuità, stabilità e programmabilità nella fornitura di energia elettrica per quasi tutto l'anno;

- porta a benefici economico-sociali quali: la riduzione dell'importazione di greggio e di metano, la diversificazione delle attività agricole con l'impiego dei sottoprodotti e residuali, la gestione corretta del patrimonio boschivo, il recupero dei terreni degradati;
- contribuisce alla gestione di biomasse residuali altrimenti destinate a smaltimento in discarica o a pratiche di combustione incontrollata;

Le tecniche di utilizzo delle biomasse sono mature e danno buoni rendimenti energetici. Anche le tecnologie legate all'abbattimento delle emissioni inquinanti sono efficaci e in costante miglioramento.

Ci sono pur tuttavia delle criticità da tener presenti, prime fra tutte le emissioni inquinanti. Se fino a poco tempo fa si riteneva che "piccolo è bello" a riguardo dell'utilizzo domestico delle biomasse, da studi scientifici e rapporti tecnici recenti emergono le criticità legate ai vari tipi di impianti. Infatti, non solo la combustione libera in camini aperti emette inquinanti in quantità, come intuibile, ma anche apparecchi considerati più sicuri e "puliti" come le stufe a pellet, mostrano una grandissima variabilità per quello che riguarda le emissioni di sostanze dannose. Mentre gli impianti medio-grandi che utilizzano le biomasse solide applicano tecnologie di abbattimento degli inquinanti e tecniche di monitoraggio, che danno un controllo pressoché totale sulle emissioni.

La variabilità degli impatti dei piccoli impianti domestici, deriva, non solo dal modello di stufa e dalla tecnologia utilizzata - con il sistema di certificazione volontaria che attribuisce le stelle in base a 5 parametri: rendimento, emissioni di particolato primario (PP), ossidi di azoto (NOx), composti organici totali (COT), monossido di carbonio (CO) -, ma anche dalla sua manutenzione, infatti gli studi dimostrano che già dal secondo anno di utilizzo le stufe peggiorano molto le loro prestazioni, sia dal punto di vista dell'efficienza energetica, sia in termini di capacità di abbattimento degli inquinanti. Inoltre la qualità del combustibile utilizzato è rilevante ai fini dell'emissione di inquinanti, ad esempio pellet più economici e di dubbia origine risultano essere molto più dannosi come impatto ambientale che quelli di qualità superiore e controllata. E se da una parte per avere accesso agli sgravi fiscali chi ha installato in questi ultimi anni le stufe a pellet ha prodotto un libretto di impianto, di fatto non esiste ancora un sistema di controllo sull'efficienza ambientale del riscaldamento domestico.

Di contro gli impianti per la produzione di energia elettrica di taglia medio grande, che utilizzano biomasse solide, sono soggetti a certificazione e costante monitoraggio obbligatorio in tutto l'arco del ciclo produttivo e sono quindi in grado di garantire il rispetto dei più rigorosi limiti alle emissioni previsti. Infatti in Italia le norme prevedono che tutti gli impianti di potenza elettrica superiore a 5 MWe siano dotati di sistemi di abbattimento polveri con filtri a maniche o filtri elettrostatici ad alta efficienza, sistemi di contenimento degli ossidi di azoto con abbattimento selettivo e sistemi di contenimento delle emissioni di monossido di carbonio. Come definito dal D.Lgs 183/2017 e in generale il D.Lgs 152/2006 e s.m.i., gli impianti devono rispettare limiti di emissioni molto restrittivi che quasi annullano il loro impatto sulla qualità dell'aria in ambito locale.

Di contro la sfida da affrontare oggi per ridurre l'inquinamento dal particolato prodotto dai piccoli impianti domestici di riscaldamento, molto numerosi, o in ambito urbano da attività "insospettabili" come le pizzerie, consiste nell'assicurare nella pratica un corretto funzionamento e una corretta manutenzione degli impianti nuovi o esistenti, evitando anche che vengano bruciati materiali non idonei, argomenti questi che sono stati affrontati dal Ministero dell'Ambiente con il correttivo del D.Lgs 183/2017.

Riteniamo pertanto che anche lo scenario di promozione nell'impiego delle biomasse solide per la produzione di energia – sia essa termica o elettrica – debba tener conto delle diverse caratteristiche dei sistemi di produzione che sicuramente, grazie a tecnologie sofisticate ed ad alta efficienza, sono in grado di assicurare impatti ambientali estremamente contenute, in linea con le migliori tecnologie attualmente disponibili.

Glossario

A

Ampère (A) - Unità di misura dell'intensità della corrente elettrica. Corrisponde ad un flusso di carica in un conduttore pari ad un Coulomb per secondo.

Ampère-ora (Ah) - Quantità di elettricità equivalente all'energia corrispondente al flusso di una corrente di un ampère per un'ora. E' usata per misurare l'esaurimento di carica di una batteria in un certo periodo. Il singolo Ah vale 3600 Coulomb.

Anaerobico - Ambiente totalmente privo di ossigeno disciolto.

Anidride carbonica (CO₂) - Gas incolore ed inodore naturalmente presente nell'atmosfera terrestre. È un prodotto finale di quasi tutti i processi di combustione. È uno dei principali gas di serra responsabili del riscaldamento globale terrestre. La sua quantità nell'aria sta aumentando di anno in anno; secondo stime recenti, l'aumento è di circa lo 0,27% annuo. La CO₂ fissata nella biomassa (piante, animali e funghi) viene considerata comunque partecipe al ciclo atmosferico del carbonio data la limitata longevità di questi elementi viventi, a differenza di quella fissata nei composti carbonici fossili (tra cui il petrolio e il gas naturale) il cui carbonio non partecipa al bilancio CO₂ dell'atmosfera per molti milioni di anni.

Anidride solforosa (SO₂) - Gas incolore, dal forte odore, che rappresenta uno dei prodotti di reazione della combustione di combustibili fossili, i quali contengono solitamente impurità di zolfo. Tutte le combustioni più incidenti, come le centrali termoelettriche che usano carbone o petrolio con elevato tenore di zolfo, così come il traffico veicolare possono essere sorgenti importanti di SO₂. Insieme da altri ossidi di zolfo, la SO₂ contribuisce al problema delle piogge acide ed è considerata uno dei più critici inquinanti dell'aria.

Anossico - Ambiente privo di ossigeno disciolto, ma ricco di ossigeno combinato (NO₃⁻, NO₂⁻, SO₄⁼, ecc.).

B

Bilancio energetico - strumento contabile in grado di fornire una rappresentazione unitaria e coerente dei flussi energetici (produzione, importazione, esportazione, acquisto, vendita, trasporto, trasformazione, utilizzazione) di un certo impianto o area geografica in un dato periodo di tempo. Normalmente, i bilanci riportano le quantità di energia necessarie per il fabbisogno energetico espresse in quantità equivalenti di un solo tipo di energia primaria (in generale il petrolio). Il prospetto di bilancio permette di evidenziare tra gli altri due saldi significativi: consumi interni lordi (o impieghi interni di fonti primarie)

Biocombustibile - Combustibile prodotto direttamente o indirettamente da biomassa.

Biogas - Miscela gassosa costituita in prevalenza da anidride carbonica e metano, risultato dei processi di digestione anaerobica.

Biomassa - Rappresenta la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Secondo la direttiva 2001/77/CE si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali), dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.

Bricchetto - Si intende un biocombustibile densificato, solitamente in forma di parallelepipedo o cilindro, ottenuto comprimendo la biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di additivi di pressatura. In genere, il bricchetto è ottenuto utilizzando una pressa a pistone.

C

Caldaia - Camera di combustione per la produzione di energia termica (scaldare aria, acqua o altro)

Cambiamento climatico - Un mutamento del clima che può essere indotto da cause naturali o antropiche. Tra le cause antropiche si ipotizzano gli effetti derivanti da un aumento nella concentrazione atmosferica dei gas serra che inibiscono la trasmissione di una parte dell'energia del sole riflessa dalla superficie terrestre verso lo spazio. Questi gas includono l'anidride carbonica, il vapore acqueo, il metano, i clorofluorocarburi (CFC) ed altri prodotti chimici. Le aumentate concentrazioni di gas serra sono in parte imputabili ad attività umane, come ad esempio

disboscamenti massicci, l'impiego di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale), il rilascio di CFC dai frigoriferi, dai condizionatori d'aria, ecc.

Carbon sink - All'interno del ciclo del carbonio quella fase in cui va ad accumularsi il carbonio stesso. Se per esempio lo scambio netto fra la biosfera e l'atmosfera è verso l'atmosfera, la biosfera è la sorgente e l'atmosfera è il dispersore (o sink).

Catalizzatore - Sostanza in grado di aumentare la velocità di una reazione chimica, agevolandola dal punto di vista termodinamico, in quanto ne abbassa l'energia di attivazione, apparentemente senza parteciparvi, dato che al termine della reazione la si ritrova inalterata.

Char - Agglomerato di natura complessa costituito prevalentemente da carbonio.

Ciclo combinato - Tecnologia per la produzione di energia elettrica da combustibili in forma gassosa che si basa sull'utilizzo di una o più turbine a gas (turbogas) associate ad una turbina a vapore. Il calore dei fumi allo scarico della turbina a gas viene sfruttato in un generatore di vapore a recupero nel quale si produce il vapore poi utilizzato nella turbina a vapore.

Cippato - Si intende la biomassa, di natura legnosa o erbacea, ridotta in particelle di piccole dimensioni, chips, mediante un'azione meccanica di taglio (cippatura).

Cogenerazione (CHP) - Si intende la produzione combinata, sequenziale o contemporanea, di energia elettrica e calore a partire da un'unica fonte energetica (CHP – Combined Heat and Power production).

Colture dedicate o energetiche - Si intendono le coltivazioni allestite allo scopo di produrre biomassa da destinare alla produzione di energia elettrica e/o termica. Possono essere suddivise in colture lignocellulosiche, colture oleaginose e colture alcoligene.

Combustibile - E' un materiale che impiegato insieme ad un comburente (ossigeno) in un processo di combustione, rilascia l'energia dei legami molecolari che può quindi essere impiegata per altri scopi: energia termica, energia meccanica ecc.

Combustibile fossile - Sono quei combustibili che derivano dalla trasformazione di sostanza organica, su archi di tempo solitamente molto lunghi, in forme via via più stabili e ricche di carbonio e povere di legami azotati, (a crescente rapporto C:N). Rientrano in questo campo il petrolio e derivati, il carbone e i gas naturali. Tra i principali vantaggi di questo tipo di combustibili: sono "compatti", ovvero hanno un alto rapporto energia/volume; sono facilmente trasportabili e immagazzinabili, costano poco e possono essere impiegati da macchina di tecnologia relativamente semplice.

Combustione - E' l'atto di bruciare un certo tipo di combustibile, quale ad es. benzina, insieme ad un comburente, l'ossigeno, per produrre energia. La combustione è sia quella della legna per fare fuoco, che quella del carburante in un motore a scoppio o nell'alimentazione delle centrali elettriche.

Combustione delle biomasse - Combustione di materia organica di origine naturale o di scarto dei processi produttivi dell'agricoltura o dell'industria e dell'artigianato (es. scarti della lavorazione del legno) per produrre energia.

Composti organici volatili (COV) - Composti chimici a base di carbonio che possono volatilizzarsi nell'aria. I COV o VOC possono causare o essere presenti nello smog e possono essere essi stessi tossici. Spesso i VOC hanno un odore riconoscibile (es. benzina, alcool, solventi di vernici).

Concentrazione - Definisce la quantità di un soluto in una soluzione (es. la quantità di sale disciolto in acqua) o di un gas nell'aria che lo contiene. Solitamente essa viene definita in termini di proporzione. I gas ritenuti responsabili dell'effetto serra sono presenti solo in forma di tracce nell'atmosfera e solitamente sono misurati in parti per milione di volume (ppmv), in parti per miliardo di volume (ppbv) o in parti per trilione (milione di milioni) di volume (pptv).

Contenuto in ceneri - Si esprime come la percentuale in peso sulla sostanza secca. È uno dei parametri fondamentali per la classificazione della biomassa: un elevato contenuto in ceneri crea problemi di gestione soprattutto nei piccoli impianti; influenza negativamente il contenuto in polveri nei fumi e quindi le prestazioni ambientali degli impianti.

Contenuto in polveri - Si esprime come percentuale in peso della massa pressata e rappresenta la frazione di polveri con diametro inferiore ai 3,15 mm che vengono generate dalle trafile durante la produzione del pellet. È un parametro che rivela la qualità del processo produttivo e, come la durabilità, risulta legato a problemi di sicurezza (es. possibilità di incendi durante la movimentazione del materiale), di manutenzione/gestione degli impianti di combustione e di corretto funzionamento dei sistemi di trasporto e di alimentazione.

D

Deforestazione - Progressiva riduzione della copertura forestale non bilanciata da rinnovazione naturale o da impianti artificiali. Gli effetti della D. sulla presenza di anidride carbonica nell'atmosfera sono di duplice natura: da un canto la decomposizione naturale o la combustione del legno immette anidride nell'atmosfera, dall'altro viene ridotta la biomassa vegetale impegnata nella fissazione dell'anidride carbonica (fotosintesi). Oltre all'impatto sull'atmosfera tuttavia, la D. comporta conseguenze più locali, ma immediate sulla regimazione delle acque e sulla stabilità idrogeologica.

Densità apparente - Viene espressa in kg/m³. Rappresenta la massa dell'unità di volume del biocombustibile. È un parametro importante soprattutto per la commercializzazione della biomassa. Influisce sul rendimento dell'impianto in particolare per i dispositivi di alimentazione a "volume". Si utilizza per calcolare la densità energetica.

Densità energetica - È il rapporto tra il contenuto energetico della biomassa e il volume sterico in cui è compreso, che si esprime anche come rapporto tra il potere calorifico inferiore del volume solido e del volume apparente. È generalmente espresso in MJ/ms o kWh/ms.

Digestione anaerobica - Processo di fermentazione mediante il quale la sostanza organica viene trasformata in biogas (o in altro composto organico ridotto come etanolo, acido lattico, ecc.), in assenza di ossigeno.

E

Effetto serra - Alterazione del bilancio tra energia solare assorbita e riflessa dal pianeta come conseguenza di variazioni delle quantità di sostanze che costituiscono l'atmosfera terrestre. Principale imputato per l'effetto serra sono l'anidride carbonica e alcuni altri gas, la cui presenza in quantità superiore alla media impedisce ad una parte della radiazione solare luminosa e termica di essere dispersa (riflessione, effetto albedo ecc.) nell'universo con conseguente riscaldamento progressivo e graduale della temperatura atmosferica della terra. L'effetto serra altera il modo con cui il clima terrestre si mantiene in equilibrio fra energia in entrata e quella in uscita, permettendo che la radiazione ad onde corte proveniente dal sole penetri per scaldare la terra, ma impedendo la risultante radiazione ad onda lunga di fuoriuscire nuovamente verso il cosmo, in modo simile a quanto si verifica in una serra per la coltivazione di piante.

Efficienza energetica - Rapporto tra la quantità di energia impiegata e la quantità di energia utile da essa ricavata. Per es. una lampadina elettrica con maggiore efficienza energetica produce più luce e meno calore rispetto ad una lampadina convenzionale rifornita con la stessa quantità di energia elettrica. Aumentare l'efficienza energetica dei processi di produzione industriale, consente di produrre di più con la stessa quantità di energia e quindi di ridurre gli impatti sull'ambiente (p.es. riducendo le emissioni) senza aumentare i costi di produzione. Una maggiore efficienza energetica può essere raggiunta utilizzando tecnologie, combustibili o fonti energetiche più efficienti, oppure riducendo gli sprechi, le perdite (miglioramento degli isolamenti) ecc.

Emissione - È il rilascio di sostanze gassose, liquide o solide nell'atmosfera. La combustione di idrocarburi ad es. produce sempre anidride carbonica (gas) e altri composti (nitrati e solfati) riconducibili ad impurità nel combustibile, emessi in forma gassosa o solida (particolati, polveri sottili).

Energia - In generale, si misura in J (Joule); viene misurata anche in cal (calorie) e Wh (Wattora).
1 Wh = 3.600 J; 1 cal = 4.186 J; 1 Wh = 860 cal

F

Fattore di emissione - È il rapporto fra la quantità di emissioni prodotte e la quantità di combustibile o materia prima processati o bruciati. Per i veicoli, è il rapporto fra la quantità di inquinamento prodotta e la distanza percorsa. Il fattore di emissione viene impiegato spesso per valutare la quantità totale di emissioni prodotte dal traffico, dai centri urbani o da impianti industriali o più generalmente per redigere gli inventari delle emissioni.

Fonti convenzionali - Comprendono le fonti di energia fossili commerciali, unicamente impiegate per la produzione di energia elettrica.

Fonti di energia - Vengono generalmente distinte in fonti rinnovabili (solare, eolico, geotermico, biomassa, idroelettrico), non rinnovabili come i combustibili fossili (carbone, petrolio, gas) e nucleari (da fissione o fusione).

Fonti energetiche rinnovabili - Vengono considerate tutte le fonti energetiche, la cui creazione o riproduzione in natura avviene a ritmi più rapidi della misura in cui vengono consumate o che comunque sono disponibili in quantità pressoché illimitata. Sono considerate fonti rinnovabili di energia il sole, il vento, le maree, il moto ondoso, l'energia idraulica, le risorse geotermiche e la trasformazione di prodotti vegetali o dei rifiuti organici e inorganici.

Fonti primarie - I combustibili fossili, le fonti rinnovabili, il combustibile nucleare, ovvero tutte le forme di energia non derivate.

Fumi - Emissioni talvolta visibili, costituite da particelle solide con diametro inferiore ad 1 micron, formate come condensa di vapore o come reazioni chimiche che si realizzano in un determinato processo.

G

Gas serra (o GHG) - Comprendono gas in parte naturalmente presenti nell'atmosfera terrestre comuni come l'anidride carbonica ed il vapore acqueo, ma anche gas più rari quali il metano ed i clorofluorocarburi (CFC), la cui concentrazione nell'atmosfera ne modifica la capacità di trasmissione o riflessione di tipi differenti di radiazioni solari o cosmiche. L'aumento di tali gas nell'atmosfera è il principale indagato per il riscaldamento globale. La maggiore concentrazione di questi gas è imputabile alla combustione di combustibili fossili e dell'emissione di sostanze inquinanti nell'atmosfera (aumento emissione) e della deforestazione (mancato assorbimento di anidride carbonica). La sigla GHG si riferisce alla dicitura inglese "Green House Gases".

Gassificazione - È il processo di trasformazione di combustibili liquidi o solidi in prodotti gassosi utili sia come combustibili, sia come materia prima per diversi processi chimici. La gassificazione si può effettuare per pirolisi (limitatamente ai combustibili liquidi), oppure, secondo diversi tipi di reazione, con aria, ossigeno, vapor d'acqua in base al tipo di prodotto che si desidera ottenere. Nonostante nel processo di gassificazione vada persa una parte dell'energia del combustibile e a volte sia addirittura necessario somministrarne dall'esterno, l'operazione risulta conveniente in quanto la combustione con combustibili gassosi risulta più controllabile, non porta alla formazione di ceneri e permette il raggiungimento di temperature più elevate.

Gigawatt (GW) - Unità di misura della potenza elettrica, pari a un milione di Kilowatt.

Gigawattora (GWh) - Unità di misura dell'energia, pari a un milione di Kilowattora.

I

Idrocarburi - Sostanze chimiche organiche composte esclusivamente da carbonio e idrogeno. Le molecole sono a forma di catene o anelli di atomi di carbonio, ai quali sono legati atomi di idrogeno. Possono essere immessi nell'aria da sorgenti naturali (p.es dalla vegetazione) o come conseguenza della combustione di combustibili fossili e vegetali, della volatilizzazione di combustibile o dall'uso di solventi. Gli idrocarburi contribuiscono in modo importante alla formazione dello smog. Qualsiasi processo di combustione coinvolgente idrocarburi libera anidride carbonica nell'aria, oltre ad altre sostanze derivanti da impurità.

Impatto ambientale - Qualsiasi ripercussione sull'ambiente, sia positiva che negativa, interamente o parzialmente derivante da attività antropiche (l'uomo). Per la realizzazione di grandi opere, la maggior parte dei paesi industrializzati del mondo prevede per legge una Valutazione d'Impatto Ambientale (VIA).

Incenerimento - È il processo di combustione di rifiuti solidi e di altro materiale, in condizioni controllate.

J

Joule - Unità di misura dell'energia nel Sistema Internazionale. $1J = Ws$

K

Kilowattora (KWh) - L'unità di misura che esprime la quantità di energia elettrica pari a 1.000 Watt fornita o richiesta in un'ora di tempo.

M

Massa sterica - È impiegata per gli ammassi dei combustibili lignocellulosici tal quali (legna da ardere, cippato e pellet) che presentano al loro interno degli spazi vuoti, più o meno grandi in funzione della pezzatura e della forma. Si esprime in kg/unità di volume sterico (metro stero alla rinfusa e metro stero accatastato).

Massa volumica - Si riferisce al peso e al volume del corpo legnoso (corpo poroso) o al singolo pezzo di combustibile densificato (pellet e bricchetti); composti da un insieme di sostanze e da vuoti (lumi vascolari, ecc.) riempiti da aria e/o acqua. Si esprime in kg/m³.

Megawatt (MW) - Unità di misura della potenza, pari a mille Kilowatt.

Megawattora (MWh) - Unità di misura dell'energia, pari a mille Kilowattora.

Metano (CH₄) - E' un gas naturalmente presente in natura come prodotto di numerosi processi di decomposizione o metabolici. Consiste di un atomo di carbonio a cui sono legati quattro atomi di idrogeno.

Metanogenesi - Processo mediante il quale la sostanza organica viene trasformata in metano in assenza di ossigeno; in senso stretto viene indicata la fase finale del processo di digestione anaerobica in cui i batteri metanigeni trasformano acetato, idrogeno e anidride carbonica in metano.

O

Ossidi di azoto (NO_x) - Definizione generale dei residui che vanno dall'ossido nitrico (NO) al diossido di azoto e ad altri ossidi dell'azoto. Gli ossidi dell'azoto rappresentano un gruppo di sostanze prodotte dai processi di combustione e contribuiscono in modo importante alla formazione di smog ed alla deposizione di acidi sul suolo e sono quindi da considerarsi inquinanti. In particolare l'NO₂, prodotto principalmente da autoveicoli alimentati da idrocarburi e dalle centrali termoelettriche, può arrecare danni alla salute.

Ossido di carbonio (CO) - Anche detto monossido di carbonio, è un gas incolore ed inodore derivante dalla combustione incompleta degli idrocarburi. Concentrazioni bassissime di CO inalate nei polmoni ne riducono quasi completamente la capacità di apportare ossigeno all'organismo con grave pericolo per la salute. Oltre l'80% del CO emesso nelle aree urbane deriva dagli autoveicoli e per questa ragione esso viene monitorato con particolare attenzione, in qualità di inquinante chiave dell'atmosfera.

Ozono (O₃) - Legame instabile di tre atomi di ossigeno (la forma più diffusa e stabile è costituita da due atomi) capace di assorbire buona parte della radiazione infrarossa e filtrare quella ultravioletta (dannosa per gli organismi viventi) provenienti dal sole. L'instabilità della molecola rende l'ozono molto reattivo e poco longevo nell'atmosfera. L'indebolimento dello strato di ozono nella stratosfera (alta quota) consente alla radiazione ultravioletta di raggiungere le quote più basse della troposfera, inducendo qui le molecole di ossigeno a due atomi a trasformarsi in ozono (a tre atomi), tossico per la maggior parte degli organismi. Livelli elevati di ozono nella troposfera esistono in zone quali ad esempio le grandi città, come conseguenza delle reazioni fotochimiche degli idrocarburi e degli ossidi dell'azoto, liberate dalle emissioni dei veicoli e dalle centrali elettriche, ma anche in montagna e in zone verdi, dove maggiore è la concentrazione di ossigeno disponibile per la conversione in ozono.

P

Particolato atmosferico - Il termine particolato atmosferico indica le particelle di aerosol sospese nell'atmosfera terrestre che hanno dimensioni che variano da pochi nm a 100 µm. Il PM₁₀ e il PM_{2,5} sono definiti come il materiale particolato avente un diametro aerodinamico medio inferiore, rispettivamente, a 10 µm e 2,5 µm. Quindi il PM_{2,5} è una frazione del particolato totale interamente contenuta nella frazione di PM₁₀.

Pellet - Si intende un biocombustibile densificato, normalmente di forma cilindrica, ottenuto comprimendo della biomassa polverizzata con o senza l'ausilio di agenti leganti di pressatura. In genere il pellet è ottenuto utilizzando un estrusore a trafilatura.

Per evaporazione - Tecnica di separazione dei componenti presenti in una miscela che opera, percolando la miscela stessa, portata in fase di vapore, attraverso delle membrane di materiale idrofilo selettivo. Nella filiera della produzione del bioetanolo questa strategia è utilizzata per ottenere l'etanolo quasi anidro (97% in peso).

Pirolisi - È il processo di scissione termica impiegato soprattutto nell'industria del petrolio per ridurre il peso molecolare degli idrocarburi attraverso la rottura dei legami carbonio-carbonio della molecola. Viene chiamato anche cracking. La pirolisi viene effettuata con metodi puramente termici o termico-catalitici (→ catalizzatore).

Potenza nominale di una centrale di produzione di energia elettrica - Somma aritmetica delle potenze nominali dei generatori elettrici della centrale, compresi quelli di riserva, destinati alla produzione di energia elettrica.

Potere calorifico - Esprime la quantità di calore che viene liberato nella combustione completa dell'unità in peso o in volume di un combustibile. Si distinguono un potere calorifico inferiore (p.c.i.) e un potere calorifico superiore (p.c.s.), a seconda che l'acqua, formata per combustione dell'idrogeno eventualmente presente nel combustibile, si consideri allo stato di vapore o di liquido. La differenza tra i due tipi di potere calorifico corrisponde appunto al calore di vaporizzazione dell'acqua formatasi nella combustione. Nella pratica interessa sempre il potere calorifico inferiore, perché i fumi vengono sempre scaricati in condizione di temperatura per cui l'acqua è presente sotto forma di vapore. Viene espresso in MJ/kg t.q. e per comodità anche in kcal/kg t.q.. Viene utilizzato per calcolare la densità energetica.

Produzione - La generazione di energia elettrica, comunque essa venga prodotta (fonti fossili, fonti idriche, fonti rinnovabili, energia nucleare).

Protossido di azoto (N_2O) - Composto chimico presente in forma gassosa nell'atmosfera, composto da due atomi di azoto ed uno di ossigeno, compreso nei gas serra e nei gas coinvolti nei processi di inquinamento dell'aria.

R

Rendimento - in generale il rendimento esprime il rapporto tra input e output, p.es. in una conversione di energia il rendimento o efficienza termodinamica è il rapporto tra l'energia utile ottenuta e l'energia fornita al sistema. Dire che un pannello solare fotovoltaico ha un rendimento dell'11%, equivale a dire che per ogni 100W di radiazione solare entrante nel pannello, vengono prodotti 11W di corrente elettrica.

Rete elettrica - Complesso di reti di trasmissione e distribuzione collegate mediante uno o più dispositivi di interconnessione.

Riscaldamento globale - Il termine definisce l'aumento della temperatura della troposfera terrestre globale. Il termine per tanto si riferisce ad un fenomeno e non alle cause che lo inducono. Nel passato del pianeta terrestre ci sono stati numerosi periodi di riscaldamento e raffreddamento globale, indotti da cause naturali. Oggi vengono invece spesso sottintese le cause antropiche ritenute responsabili di questo effetto, come ad esempio l'emissione di gas serra.

Risorse - in campo economico-ambientale vengono definite risorse la totalità di materiali e delle sostanze presenti nell'ambiente, utilizzabili in processi di tipo economico. A tale proposito vengono distinte le risorse abiotiche (minerali e fossili, con tempi di rigenerazione lunghissimi e quindi non rinnovabili) e risorse biotiche (viventi o di origine vivente recente, da considerarsi rinnovabili).

S

Sequestro di carbonio - Termine utilizzato in ecologia per indicare il carbonio trattenuto da bacini chiusi (sink), quali gli oceani, o in bacini terrestri quali le foreste o i terreni, e quindi non presente nell'atmosfera.

Sorgenti naturali - Si riferisce alle sorgenti naturali di emissione di gas serra o sostanze inquinanti, comprendente sia le sorgenti biologiche che geologiche, ecc.

Sostanza secca - Condizione nella quale il biocombustibile è privo d'acqua.

Sostanza secca senza ceneri (daf) - Condizione nella quale il biocombustibile è privo d'acqua e di materiale inorganico.

Sviluppo sostenibile - Termine coniato nel 1987 dalla politica norvegese Gro Harlem Brundtland che redige il famoso "Rapporto Brundtland" (Our Common Future) in cui l'allora presidente della Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo, prospetta uno sviluppo che coniughi le aspettative di benessere e di crescita economica con il rispetto dell'ambiente e la preservazione delle risorse naturali. L'essenza di questa forma di sviluppo è un rapporto stabile fra le attività umane ed il mondo naturale, che non diminuisce le prospettive per le generazioni future di godere di una qualità della vita buona almeno quanto la nostra.

T

Tar - Miscela complessa di idrocarburi condensabili.

TEP - Tonnellata equivalente di petrolio. Unità di misura dell'energia adottata per misurare grandi quantità, ad esempio nei bilanci energetici e nelle valutazioni statistiche. Viene utilizzata per

confrontare le risorse di energia che si possono ottenere da fonti diverse. Equivale all'energia sviluppata dalla combustione di una tonnellata di petrolio. Essendo il potere calorifico del petrolio grezzo pari a 41.860 kJ/kg, un Tep equivale a $41.860 \cdot 10^3$.

Terawatt (TW) - Unità di misura della potenza, pari a un miliardo di Kilowatt.

Terawattora (TWh) - Unità di misura dell'energia, pari a un miliardo di Kilowattora.

Trigenerazione (CHCP) - Si intende il sistema di produzione congiunta di energia elettrica, termica e frigorifera a partire da un unico combustibile (CHCP – Cogeneration of Heat, Cooling and Power).

V

Volt - Unità di misura della tensione elettrica.

W

Watt - Unità di misura in fisica, della potenza in generale, ma largamente utilizzato per l'energia elettrica.

Bibliografia

Rapporti tecnici e istituzionali

1. AREA Science park - *Energia dalle biomasse. Le tecnologie, i vantaggi per i processi produttivi, i valori economici e ambientali*. 2006. Geletti Raffaella et al.
2. ARPA Emilia Romagna - *Impianti a biomassa. Documento divulgativo sulle problematiche delle emissioni in atmosfera convogliate e diffuse*. 2011
3. CNR – IIA. Caratterizzazione e valutazione comparata delle emissioni derivanti dall'utilizzo di biomassa e polietilene nella centrale "Curti Riso" di Valle Lomellina (PV). 2011
4. CNR – IIA. Studio di sorveglianza ambientale per la centrale biomasse Italia S.p.A. Stabilimento di Strongoli (KR). 2013
5. CNR – IIA. Studio delle potenziali ricadute al suolo nelle aree produzione di energia elettrica da biomassa. Attività eseguita per conto di San Marco Bioenergie S.p.A. 2015
6. Danish Technological Institute. *Steam explosion for biomass pre-treatment*. 2013
7. Department for Environment, Food and Rural Affairs. United Kingdom - *Crops Grown For Bioenergy in England and the UK: 2016*
8. EBS Energia da Biomasse Solide. *La Strategia Energetica Nazionale e la generazione elettrica da biomasse solide. Strumento di attuazione dell'economia circolare e risorsa per lo sviluppo di valore sociale, ambientale ed economico per il Paese*. 2017
9. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Small combustion. Last update July 2017
10. ENAMA (Ente Nazionale per la Meccanizzazione Agricola) - Progetto biomasse. *Biomasse ed energia*. Cap. 1-5. 2011
11. ENEA - *Impatti energetici e ambientali dei combustibili nel riscaldamento residenziale*. 2017. A cura di Maria Rosa Virdis, Maria Gaeta, Umberto Ciorba e Ilaria D'Elia
12. ENEA - *Analisi trimestrale del sistema energetico italiano. III trimestre 2017*. A cura di Francesco Gracceva
13. ENEA - *Analisi sperimentale su stufa a legna. Caratterizzazione del combustibile di prova. Prove di prestazione dell'apparecchio. Misura a caldo delle emissioni di particolato*. 2012. Stoppiello Giovanni
14. ENEA - *Quaderno biomasse e bioenergia*. 2011
15. ENEA - *Scheda tecnologica: biomasse termiche*. 2010
16. Environmental Protection UK - *Biomass and Air Quality Guidance for Scottish Local Authorities*. 2010
17. EPA. AP-42. Air Emissions Factors.

18. ETA Florence - Renewable Energies. Progetto ENCROP: promuovere la produzione e l'utilizzo di biomassa da colture energetiche. Manuale - Produzione e utilizzo di biomasse ligno cellulosiche da colture dedicate. 2010
19. European Commission. Commission staff working document impact assessment. Sustainability of Bioenergy. 2016
20. European Commission. DG ENER - *Review of literature on biogenic carbon and life cycle assessment of forest bioenergy*. Final Task 1 report, DG ENER project, 'Carbon impacts of biomass consumed in the EU' 2014. A cura di Robert Matthews
21. European Commission. Relazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo sui criteri di sostenibilità relativamente all'uso di fonti da biomassa solida e gassosa per l'elettricità, il riscaldamento e il raffreddamento SEC(2010) 65 final SEC(2010) 66 final
22. European Commission. Intelligent Energy Europe. Gasification Guide - Guideline for safe and eco-friendly biomass gasification. Deliverable 8: *Biomass gasification*. 2007
23. GSE (Gestori Servizi Elettrici) – *Rapporto statistico 2017*
24. GSE (Gestori Servizi Elettrici) - *Quarta relazione dell'Italia in merito ai progressi ai sensi della direttiva 2009/28/CE*. 2017
25. GSE (Gestori Servizi Elettrici) - *Monitoraggio fonti rinnovabili nelle regioni 2017*
26. GSE (Gestori Servizi Elettrici) - *Rapporto statistico. Energia da fonti rinnovabili in Italia. 2015*
27. GSE (Gestori Servizi Elettrici) - *Energia da fonti rinnovabili in Italia. Dati preliminari 2015*
28. IEA - *Report 2016*
29. Innovhub stazioni sperimentali per l'industria. *Studio comparativo sulle emissioni di apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet*. 2016
30. International Institute for Environment and Development (IIED) - *The UK's Biomass Energy Development Path*. 2010
31. IPPCC - Prevenzione e riduzione integrata dell'inquinamento. *Il contenuto minimo del piano di monitoraggio e controllo*. 2006
32. ISPRA - *Informative Inventory Report*. 2016
33. ISPRA - *Guida tecnica per la gestione dei sistemi di monitoraggio in continuo delle emissioni (SME)*. 2013
34. ISTAT. Annuario statistico italiano. *Ambiente ed energia*. 2016
35. Joint Research Centre (JRC) - Technical report. *Long-term trends in black carbon from biomass and fossil fuel combustion detected at the JRC atmospheric observatory in Ispra*. Putaud, J.P., Cavalli, F., and Crippa, M. 2018

36. Joint Research Centre (JRC) - Science and Policy Report. *Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions*. Giuntoli J., Agostini A., Edwards R., Marelli L. 2015
37. Ministero dello Sviluppo Economico - *La situazione energetica nazionale nel 2017*
38. Ministero dello Sviluppo Economico - *Bilancio Energetico Nazionale*. 2016
39. Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA. *Sviluppo di dispositivi per la rimozione di inquinanti da emissioni gassose prodotte dalla combustione di biomassa solida*. Vincenzo Palma, Eugenio Meloni. 2013
40. Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA. *Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo di abbattimento del tar*. Report Ricerca di Sistema Elettrico B., P. De Filippis, M. Scarsella, N. Verdone (Dipartimento di Ingegneria Chimica Materiali Ambiente). 2012
41. Progetto PREPAIR (LIFE 15 IPE IT 013) programma LIFE 2014-2020 dell'Unione Europea - *Gli impatti ambientali della combustione di biomassa legnosa per la produzione di calore: le esperienze delle azioni di comunicazione nell'area del bacino padano e in Slovenia*. 2018
42. Progetto SELVA. CNR – IIA, Regione Lazio
43. Provincia di Treviso - ARPA. *Impianti di combustione a scarti di legno: controllo tecnico-analitico delle emissioni prodotte e raffronto con il quadro normativo di settore. Rapporto conclusivo*. 2012
44. RaFIItalia - Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia (2017 - 2018). Direzione generale delle foreste del Mipaaf (Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari, Forestali e del Turismo)
45. REN21 - *Renewables 2017. Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat)
46. Renael (Rete nazionale delle Agenzie Locali per l'Energia) - *Vademecum fonti rinnovabili – Energia da biomassa*. Campagna di informazione, comunicazione ed educazione a sostegno delle fonti rinnovabili, del risparmio e dell'uso efficiente dell'energia. 2004
47. Rete Rurale Nazionale 2014-2020 - Romano R., Plutino M. Licciardo F., (2018); Libro Bianco sui Boschi d'Italia, il futuro del settore forestale; Rapporto, Scheda 22.1
48. SEN 2017 – Strategia Energetica Nazionale
49. State of Green - *From sustainable biomass to competitive bioenergy. Insights into Danish bioenergy solutions*. 2015
50. Technical University of Denmark - *Experiences with biomass in Denmark*. Gregg Jay Sterling et al. 2014

Letteratura scientifica e articoli in riviste specialistiche

1. Bajwaa Dilpreet S. et Al. (2018) *A review of densified solid biomass for energy production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 96 (2018) 296–305
2. Bilandzija Nikola et Al. (2018) *Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 93 (2018) 225–230
3. Colantonia Andrea et Al. (2016) *Land use planning for utilizing biomass residues in Tuscia Romana (central Italy): Preliminary results of a multi criteria analysis to create an agro-energy district*. Land Use Policy 50 (2016) 125–133
4. Candolo Giovanni. *Biomasse vegetali: i possibili processi di conversione energetica*. Agronomica 4/2005
5. Dimiccoli Antonello e Saviano Laura. L'utilizzo degli scrubber come soluzione ottimale per abbattere le emissioni. Gas a cicli inorganici. Tecnologie e soluzioni per l'ambiente n. 2 maggio-giugno 2009, Gruppo Sole 24 ore
6. Dimitriou Konstantinos, Kassomenos Pavlos. A meteorological analysis of PM10 episodes at a high altitude city and a low altitude city in central Greece – The impact of wood burning heating devices. Atmospheric Research. Volume 214, 1 December 2018, Pages 329-337 (2018)
7. Francescato Valter. AIEL. *Evoluzione del consumo di legna e pellet e delle emissioni di PM10 dalla combustione residenziale in Italia. Proposte al Governo e alle Regioni per dimezzare il PM10*. Agriforenergy. Anno X n., febbraio 2016
8. Fuller Gary w. et al. *Contribution of wood burning to PM10 in London*. Atmospheric Environment 87 (2014) 87-94
9. Gilardoni Stefania et al. (2016). *Direct observation of aqueous secondary organic aerosol from biomass-burning emissions*. PNAS vol. 113, no. 36, 10013–10018. 2016
10. Ingrao Carlo et al. (2019) *Investigating energy and environmental issues of agro-biogas derived energy systems: A comprehensive review of Life Cycle Assessments*. Renewable Energy 136 (2019) 296 -307
11. Kumar Prashant. *New directions, from biofuels to wood stoves: The modern and ancient air quality challenges in the megacity of Sao Paulo*. Atmospheric Environment. Volume 140, September 2016, Pages 364-369
12. Mao Guozhu et al. (2018) *Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis*. Science of the Total Environment 635 (2018) 1081–1090
13. Paolotti Luisa et al. (2017) *Economic and environmental assessment of agro-energy wood biomass supply chains*. Biomass and Bioenergy 97 (2017) 172 – 185
14. Pereira Vítor João, Martinho Domingues (2018) *Interrelationships between renewable energy and agricultural economics: An overview*. Energy Strategy Reviews. Volume 22, November 2018, Pages 396-409

15. Piaskowska-Silarska Małgorzata et al. *Technical and economic analysis of using biomass energy*. E3S Web of Conferences 14, 02016 (2017). Energy and Fuels 2016
16. Prosperi Maurizio et al. (2019) *Ex ante assessment of social acceptance of small-scale agro-energy system: A case study in southern Italy*. Energy Policy. Volume 124, January 2019, Pages 346 - 354
17. Rana Roberto et al. (2016) *Greenhouse gas emissions of an agro-biogas energy system: Estimation under the Renewable Energy Directive*. Science of the Total Environment 550 (2016) 1182 – 1195
18. Riva Giovanni, Alberti Mauro. *Il controllo e la certificazione delle emissioni in impianti a legna*. Ambientediritto.it Legislazione e giurisprudenza. Rivista giuridica <https://www.ambientediritto.it/>
19. Ru-Jin Huang et Al. *Extreme air pollution from residential solid fuel burning*. Nature Sustainability, volume 1, pages 512–517 (2018)
20. Sallustio et al. (2015) *Recent trends in forest cover changes: only positive implications? L'Italia Forestale e Montana / Italian Journal of Forest and Mountain Environments*. 70 (4): 273- 294, 2015 doi: 10.4129/ifm.2015.4.03
21. Vadenboa Carl et Al. (2018) *Environmental optimization of biomass use for energy under alternative future energy scenarios for Switzerland*. Biomass and Bioenergy 119 (2018) 462–472

Letteratura grigia e presentazioni

1. ARPA - Sezione di Bologna *Seminario Regionale: Impianti a biomasse in Emilia-Romagna: aspetti autorizzativi e di controllo*. Giovanna Biagi. Bologna 1-2 ottobre 2013
2. Barisano Donatella, Canneto Giuseppe. *Gassificazione: opportunità e limiti*. Bioenergie al 2020 la ricerca ENEA. Forlener 2013
3. Battisacco Matteo. *Legno – Energia: il calore in ambito residenziale*. Tesi di Laurea. Università Ca' Foscari Venezia. 2012
4. Bigaran Lorenzo. *Analisi LCA (Life Cycle Assessment) della produzione di energia da gassificazione biomassa*. Tesi di Laurea. Università degli studi di Padova. Dipartimento di ingegneria industriale. 2013
5. Calabria Alfonso. Università di Roma “La Sapienza”. *Metodi per l'abbattimento delle emissioni*.
6. Consonni Stefano. Politecnico di Milano. *Quadro di riferimento tecnico. Il BREF per i grandi impianti di combustione*. Prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento: gli impianti di produzione energia. Piacenza 2005
7. Danish Heating District. Danish Energy Association. *Biomass for energy. Why coal and gas should be replaced by wood pellets and wood chips*.

8. De Santis C. *Sviluppo di un modello di simulazione per impianti di gassificazione a biomassa*. Tesi di dottorato. "Sapienza" Università di Roma. 2012
9. Di Francesco Francesco. *Metodi innovativi per la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto negli impianti di combustione: la tecnologia scr high dust e il caso del termoutilizzatore di Brescia*. Tesi di laurea. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. Facoltà di ingegneria. 2009
10. Galante Silvia. *La combustione di biomassa in piccoli impianti residenziali: emissioni, incertezze, scenari di riduzione*. Tesi di Dottorato. Politecnico di Milano 25mo ciclo
11. Galiotto Marco. *Analisi comparativa delle prestazioni energetiche (termiche ed elettriche) negli impianti a biomasse*. 2011. Tesi di laurea. Università degli studi di Padova. Facoltà di ingegneria
12. GSE (Gestori Servizi Elettrici) - *Le rinnovabili del 2017*. Luca Benedetti
13. GSE (Gestori Servizi Elettrici) - *Energie rinnovabili al 2020 Scenari tendenziali*. 2015
14. Gurrieri Gian Luca - Regione Lombardia; Lanzani Guido - ARPA Lombardia. *Emissioni del riscaldamento domestico a biomasse. Il piano generale degli interventi per la qualità dell'aria di Regione Lombardia (PRIA) e le iniziative comuni per il miglioramento della qualità dell'aria*. 2014
15. Lanzani Guido et al. - ARPA Lombardia. *Impatto della combustione della legna sulla qualità dell'aria: analisi e prospettive*. Rimini 2016
16. Minarelli Enrico. *L'analisi del ciclo di vita della biomassa Ligno-cellulosica di S.A.BA.R. S.p.A.: da rifiuto a risorsa*. Tesi di laurea. Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia. 2015
17. Ministero dello Sviluppo Economico - *Il monitoraggio statistico-energetico: dati del primo semestre 2018*. Perrella Giovanni
18. Ricci Renato. *Conversione energetica delle biomasse*. Dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche. Università Politecnica delle Marche. Corso di energetica a.a. 2013/2014
19. Sirtori Mattia. *Filiera biomassa energia: analisi sostenibilità secondo il metodo SWOT a partire dall'esperienza della centrale di teleriscaldamento di Tirano*. Tesi di Laurea. Università "La Bicocca" di Milano. 2013

Sitografia

1. <http://www.progettoselva.it/>
2. http://www.casaclima.com/ar_25502__RINNOVABILI-Biomasse-legge-di-stabilit-impianti-a-biomasse-incentivi-Legge-di-stabilit-proroga-fino-al-2020-degli-incentivi-per-gli-impianti-a-biomasse.html
3. <http://www.arpat.toscana.it/notizie/arpatnews/2015/098-15/098-15-emissioni-provenienti-dall-uso-della-biomassa-per-la-produzione-di-energia>
4. <http://energiealternative.soswiki.com/definizione-biomassa.php>
5. <http://docenti.unicam.it/tmp/1727.pdf>
6. http://www.tecnosida.it/it_IT/52/945/CaseHistory_PWS_caldaie_a_cippato.php
7. <http://www.laboratoriobiomasse.it/ita/news/?id=84>
8. <http://www.scienzaverde.it/energia-da-biomasse-blog/solide/>
9. http://www.sviluppoeconomico.gov.it/images/stories/normativa/20130314_Strategia_Energetica_Nazionale.pdf
10. <http://assocosma.org/wp-content/uploads/2015/11/Convegno-Arezzo-polveri-sottili-ed-emissioni.pdf>
11. http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/biomasse/2012/rds-2013-176.pdf
12. <http://energiealternative.soswiki.com/definizione-biomassa.php>
13. <https://www.babcock.com/it-it/industry/renewable-biomass-biofuels>
14. http://www.dsa.unipr.it/trezzo/uni_parma/capitoli/tecnologie/le_tecnologie_di_combustione_diretta.htm
15. <http://wiki.gekgasifier.com/w/page/6123786/Multi-fuel%20Run%20Comparison>
16. <http://www.enea.it/it/seguici/events/EnergieRinnoeManutenzione/manutenzioneterritorio>
17. http://www.mionmosole.it/categorie_prodotti/sistemi-di-filtrazione-e-depurazione/
18. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_it
19. http://www.termofluido.univpm.it/materialedidattico/energetica/Biomasse_01_2013.pdf
20. <http://www.laboratoriobiomasse.it/media/docs/downloads/183-5.pdf>