

CHI HA PAURA DELLA GASSIFICAZIONE DELLE BIOMASSE?

Massimiliano Livi, Ph.D.

Dip. di Chimica Industriale "Toso Montanari"

Università di Bologna

massimiliano.livi2@unibo.it

Le energie rinnovabili sono spesso al centro di discussioni, polemiche e contestazioni, spesso perché non si riesce a valutare le reali dimensioni dei piccoli impianti che potrebbero essere realizzati, le vere ricadute economiche, sociali, ambientali e di salute pubblica. Infine, troppo spesso sono utilizzati come strumenti di scontro politico. In particolare le biomasse sono la fonte di energia rinnovabile più tormentata, specie per l'aspetto legato alle emissioni di polveri sottili. In questo articolo valuteremo quali sono le effettive emissioni degli impianti a biomassa legnosa che sorgono e sorgeranno un po' ovunque.



Who is Afraid of Biomass Gasification?

That renewable energy sources solicit heated discussions, controversies and even protests is often due to the inability to quantify the real economic, social and environmental impact as well as its impact on public health. It is also caused by the incapacity to measure the real dimension of efficient plants that could be constructed. And last but not the least, it is frequently unjustly used as an instrument in political warfare. The font of renewable energy that is particularly often under attack is BIOMASS, especially the aspect related to the emission of particulate matter (PM) during energy production. In this article, we will evaluate the actual emissions of wood biomass plants that are sprouting and will continue to sprout everywhere.

L'Italia è percorsa da un agitarsi di convegni e incontri a tema energetico, pro e, soprattutto, contro le rinnovabili: chi non vuole le pale eoliche, chi non vuole la turbina nel ruscello e chi non vuole le biomasse.

Quando si affronta un argomento così vasto ed articolato come la produzione di energia, non si deve focalizzare l'attenzione solo su un particolare legato ad un singolo progetto, ma si deve guardare il tema "energia" nel suo complesso, osservando il contesto globale nel quale tutti noi siamo inseriti ed individuando tra i pro ed i contro i punti che possono diventare una forza per quella comunità nella quale il progetto o impianto rinnovabile viene inserito.

Per decenni si è accettato che i combustibili fossili inquinassero ogni dove, ed adesso che esiste la possibilità, e l'obbligo di legge, di produrre energia da fonte rinnovabile in modo più funzionale e quindi più distribuito e meno legato alle potenti lobby delle fonti fossili, si vuole rinunciare perché questa rivoluzione verde si avvicina troppo alle nostre case o modifica vecchie abitudini e mentalità.

In uno studio della Clean Edge, un'azienda americana che compie ricerche per il settore delle energie verdi, pubblicato nel 2012, emerge che la corsa verso le energie verdi vede protagonisti la

Cina e gli Stati Uniti, dove comunque si sta verificando un aspro confronto con le grandi aziende multinazionali del settore del carbone e del petrolio che cercano di mantenere il loro spazio.

Allora, quali sono le ragioni vere per colpire le energie rinnovabili? Quali interessi ci sono dietro? Quale camaleontico personaggio decanta le rinnovabili, ma poi pretende che siano lontane da casa, dal paesaggio o dal proprio bacino elettorale? Perché continuare a sponsorizzare una fonte fossile come il metano o il GPL anziché una risorsa rinnovabile come la filiera bosco-energia?

Greenpeace Italia ha pubblicizzato una ricerca dell'Università Bocconi nella quale vengono calcolati i benefici netti delle fonti rinnovabili, tra il 2012 ed il 2030, che ammonteranno a 79 miliardi di euro sotto forma di maggiore occupazione (130 mila occupati), esportazioni nette dell'industria, riduzione del prezzo di picco dell'energia, che sarà sempre meno legata al prezzo del petrolio, e quindi decisa riduzione dell'importazione di combustibili fossili. Per quest'ultimo punto, la "fattura energetica", cioè quanto spendiamo in un anno come Paese per l'approvvigionamento di energia dall'estero (al netto delle esportazioni di prodotti energetici), per il 2013 è stimata sui 56 miliardi di euro, con una flessione, dovuta in parte anche alla crisi economica, di circa 8,8 miliardi rispetto all'anno precedente (-13,5%); una cifra pari al 3,6% del Pil.

Non possiamo disegnare il futuro che vogliamo, senza combustibili fossili, se non teniamo presente i limiti e le risorse della nostra nazione. I problemi che la nostra società deve necessariamente affrontare sono i seguenti:

- come ridurre la dipendenza dalle energie fossili (petrolio, gas e carbone);
- rispettare gli impegni del protocollo di Kyoto (diminuire produzioni di gas serra);
- individuare le energie verdi che possono essere prodotte localmente in base alle specifiche del proprio territorio;
- scegliere una tecnologia affidabile e di buon compromesso in base all'ambiente circostante.

Tra le molte rinnovabili le biomasse sono quelle più bersagliate perché il modo di sfruttarle, secondo i detrattori, assomiglia agli inceneritori, ma dobbiamo fare i dovuti distinguo, visto che con le nuove tecnologie non c'è alcun incenerimento delle biomasse usate.

Inoltre, in riferimento alle biomasse legnose, i vantaggi derivanti dal loro utilizzo per la produzione di energia sono molteplici e sono i seguenti:

- la legna è neutrale nei riguardi delle emissioni di anidride carbonica (i boschi non sono coltivati con fertilizzanti o fitosanitari come i campi di cereali o di girasole);
- il legno è una materia prima rinnovabile e l'abbattimento selezionato degli alberi deve essere comunque effettuato per la manutenzione del territorio;
- se prendiamo in considerazione l'intero ciclo di produzione del petrolio, dal pozzo alla pompa di benzina, o del gas naturale, dall'estrazione al fornello di cucina, l'utilizzo delle biomasse rispetto ai combustibili fossili ha un minore impatto sull'ambiente e sulla salute delle persone;
- la legna può costituire un vantaggio addizionale per l'agricoltura legata alla manutenzione del bosco o dei fiumi ed uno sgravio economico per la pubblica amministrazione, che attualmente è obbligata ad effettuare pulizia di boschi e fiumi senza alcun beneficio economico;
- la legna, a differenza delle altre rinnovabili, ha una produzione di energia costante nel tempo a prescindere dalle condizioni meteorologiche;
- la manutenzione del territorio boscato previene il degrado dei suoli ed i sempre più frequenti disastri idrogeologici. L'Italia è al quarto posto nel mondo per il numero di vittime annue causate da frane e alluvioni, con danni quantificati nell'ordine di 2 miliardi di euro annui. Secondo le *"Linee guida per la valutazione del dissesto idrogeologico e la sua mitigazione attraverso misure e interventi in campo agricolo e forestale"*, rilasciate dal Ministero dell'Ambiente, in Italia circa 4 milioni di ettari di terreno agricolo e forestale (il 13% del territorio nazionale) è a rischio di erosione e frane; servirebbero, pertanto, almeno 40 miliardi di euro per la messa in sicurezza del territorio. Denaro che potrebbe, in parte, provenire proprio dalla creazione della filiera foresta-energia;

- la creazione di impianti è una straordinaria opportunità di sviluppo per i territori rurali dal punto di vista economico, sociale ed ambientale: consente, infatti, di mantenerli vitali, creando la filiera legata alle rinnovabili che può rappresentare una risorsa per l'intera comunità, invertendo fenomeni di spopolamento e contribuendo a un generale miglioramento della qualità della vita degli abitanti e del bilancio delle amministrazioni locali;
- in alcuni casi gli impianti a biomassa hanno prodotto ricchezza anche turistica tramite il "turismo delle rinnovabili", con scuole, professionisti, investitori, ecc. che visitano gli impianti più avanzati; in altri casi la costruzione di un impianto a legna ha promosso la nascita di altre aziende (mobilitifici, allevamenti, serre ecc.).

L'installazione di un impianto a fonte rinnovabile porta ad una maggiore consapevolezza nella popolazione locale della necessità del controllo e della cura del territorio. Troppo spesso però la raccolta delle informazioni da parte dei cittadini con il fai da te, specie attraverso il web, anziché attraverso università e centri di ricerca, non aiuta alla corretta presa di coscienza. L'insufficiente divulgazione di dati scientifici insieme ad una tendenziosa disinformazione porta la popolazione ad un'opposizione ottusa motivata da ignoranza e da interessi privati. Così facendo, tornano in letargo i propositi sociali e tecnologici di un futuro con meno energie fossili e si rimandando i problemi alle generazioni che seguiranno.

Lasciamo ai politici consapevoli il risveglio delle coscienze e torniamo ad analizzare scientificamente l'argomento in questione.

Tra i processi più innovativi per l'utilizzo della biomassa legnosa, la gassificazione della legna è quella più promettente, visto che ha una maggiore resa ed un minor impatto ambientale rispetto alla combustione diretta. Tecnicamente la gassificazione è un trattamento di legna a $T > 800$ °C in difetto di ossigeno per ottenere un gas combustibile costituito da CO, H₂, CH₄, CO₂ e un co-prodotto solido (carbonella vegetale); esistono in commercio differenti tipi di reattori di gassificazione, che permettono produzioni elettriche da 200 kWe a 150 MWe.

Le biomasse utilizzate possono essere residui forestali, legno dall'industria della carta, scarti di segheria o coltivazioni energetiche realizzate su territori non coltivati per produrre alimenti per l'uomo o per gli animali, come le golene, i bacini di espansione nei pressi dei fiumi.

Nel gassificatore per piccole produzioni di energia elettrica la legna entra dall'alto e l'ossigeno o l'aria entra dal centro, mentre il syngas prodotto esce dal basso assieme alla carbonella che viene estratta dal fondo del reattore con sistemi automatizzati.

Il vantaggio della gassificazione, rispetto alla combustione, sono il maggior controllo e la più facile pulizia delle emissioni inquinanti, il maggior sfruttamento dell'energia presente nella biomassa e l'utilizzo di una temperatura più elevata nella successiva combustione del syngas per produrre energia con motori endotermici (rendimento in energia elettrica 35%) o turbine (rendimento in energia elettrica 15%). La produzione di energia o di calore mediante gassificazione avviene in più stadi: lo spezzettamento della biomassa in piccole scaglie (cippato), la loro deumidificazione fino ad un contenuto di umidità <15%, la gassificazione in difetto di ossigeno nel reattore di gassificazione.

Per la pulizia del syngas, a valle del gassificatore possono essere introdotti cicloni, filtri a maniche o elettrofiltri per abbattere le polveri (smaltite opportunamente) o lavaggi ad acqua per eliminare dal syngas residui acidi o basici ed anche le polveri. L'acqua contenuta nella legna viene raccolta in un ciclo chiuso e smaltita in un sistema di trattamento acque come quello dei depuratori delle acque cittadine. A seguito della vera combustione del syngas nell'impianto di cogenerazione, che produce elettricità e calore, vengono inseriti impianti di abbattimento di NO_x, CO ed ulteriori filtri per abbattere le eventuali polveri presenti prima di immetterlo nell'ambiente.

La combustione del syngas, in questo modo, produce emissioni di polveri che sono paragonabili a quelle di un motore a GPL o gas naturale. Utilizzando le opportune tecnologie, nel suo complesso, la gassificazione delle biomasse legnose vergini è senz'altro una tecnologia pulita per produrre

energia elettrica e calore. Al contrario, la combustione diretta della legna ha una resa in energia elettrica inferiore (rendimento finale del 12-15% contro il 25-30% della gassificazione) ed una maggiore produzione di inquinanti.

I timori sugli impianti a biomassa

Di seguito verranno analizzate le maggiori accuse che vengono mosse nei confronti degli impianti a biomasse:

- quantità e provenienza;
- traffico indotto;
- incentivi economici;
- IPA e diossine;
- polveri sottili;
- metalli pesanti;
- altri inquinanti.

Quantità e provenienza

Nonostante negli ultimi cinquant'anni la superficie occupata da boschi sia praticamente raddoppiata, passando dai circa 5,5 milioni di ettari censiti nel 1959 ai quasi 11 milioni del 2010, e che quindi le foreste occupino una quota importante del nostro territorio (il 36%) il prelievo di legno dell'ultimo decennio ha registrato una media vicina agli 8 milioni di m³ annui (dati ISTAT), che equivale a poco meno del 25% dell'incremento annuo di biomassa prodotta, contro il 65% della media europea. Esistono quindi ampi margini di utilizzo della materia prima attraverso la creazione della filiera nazionale del legno-energia.

Il timore che la legna possa essere importata trova una naturale smentita nel fatto che, a differenza dell'olio di palma, la legna ha una bassa densità energetica (2.100-2.400 kcal/kg ai 9.000 kcal/kg dell'olio) e quindi i suoi costi di trasporto incidono considerevolmente. Per questo semplice motivo la conversione della legna è conveniente se questa viene raccolta in un raggio limitato fra 50-80 km¹; mentre per l'olio vegetale la distanza è molto meno importante.

Traffico indotto

Un altro punto che viene utilizzato per demonizzare impianti come questi, solitamente da 1 MWe, è la produzione di traffico veicolare, che di solito si traduce in 400-450 mezzi nell'arco di 1 anno, ovvero un traffico pari a 9 mezzi alla settimana, che percorrono le strade comunali in pochi minuti. Se ipotizziamo un camion che percorre 20 km all'interno di un Comune (tra andata e ritorno), con una velocità media di 50 km/h, questi vengono percorsi in circa 20 minuti. Numeri e tempi che per qualunque strada comunale o provinciale sono molto facilmente assorbibili e non incidono sui numeri del traffico già presente. Anche l'inquinamento indotto annualmente con questi mezzi non ha praticamente alcuna incidenza rispetto al traffico già presente nelle strade.

Incentivi economici

Alle volte si è giustamente indotti a pensare che senza incentivi questi impianti non potrebbero mai nascere ed in parte è proprio così. Bisogna ricordare che gli incentivi per il fotovoltaico, rinnovati per 4 anni, hanno permesso di creare una filiera che in Italia non esisteva; così facendo però il fotovoltaico oggi si sostiene senza alcun incentivo.

Il problema dell'elevato costo delle bollette energetiche che pagano famiglie ed aziende, è dovuta al fatto che l'Italia dipende per più dell'80% dai combustibili fossili che sono aumentati di prezzo tra il 2000 e il 2012 in modo considerevole: il petrolio è aumentato di oltre il 200% (triplicato), quello del carbone del 160% e quello del gas sul mercato europeo di circa il 300%. A parità di

consumi e al netto dell'inflazione, la fattura pagata dall'Italia per l'import dei fossili è passata da metà degli anni Novanta a oggi da 20 a 65 miliardi di euro.

Per quanto riguarda i costi diretti, gli incentivi alle rinnovabili del settore elettrico hanno raggiunto nel 2012 circa 10 miliardi di euro, il 16-17% della bolletta elettrica nazionale. Ma questi costi hanno inciso sull'aumento del prezzo del kWh elettrico degli ultimi anni solo per il 33%, mentre per il 57% dall'aumento dei prezzi dei fossili. Sul piano dei costi e dei benefici indiretti il saldo economico è senz'altro positivo per le rinnovabili; biomasse comprese. Tra i benefici da ascrivere alle rinnovabili c'è infatti la riduzione del prezzo medio orario dell'energia elettrica e la creazione di ricchezza e occupazione nazionale (su 1.000 euro spesi sulle biomasse, eolico, geotermia ed idroelettrico ne rimangono in Italia 700-900, mentre su 1.000 euro investiti sulla produzione elettrica da gas ne restano sul territorio nazionale 200, il resto va alle economie straniere)².

Ma i prezzi dei prodotti energetici non dicono tutto circa i costi che tutti devono pagare per soddisfare il proprio fabbisogno energetico. Un'analisi dei veri costi dell'energia vedrebbe includere le cosiddette "esternalità", ovvero i costi reali che non incidono direttamente sul prezzo, ma che comunque vengono pagati: quali costi ambientali, sanitari e sociali che vengono pagati sia nei Paesi da dove provengono le fonti di energia, sottoforma di inquinamento, sfruttamento dell'ambiente, guerre, sia nei Paesi dove vengono utilizzati. In Italia ammontano a quasi 50 miliardi di euro all'anno i danni ambientali e sanitari delle attività di imprese e famiglie pari al 3,1% del Pil; questo è quanto emerge da uno studio realizzato dalla società di ricerca e consulenza economica ECBA Project³. I danni ambientali e sanitari sono, in ordine di importanza, a carico:

1. dei veicoli di trasporto delle famiglie (7,8 miliardi);
2. degli impianti di riscaldamento residenziale (7,2 miliardi);
3. dell'industria manifatturiera (7,1 miliardi);
4. dei servizi di trasporto e logistica (3,9 miliardi);
5. del settore dell'energia elettrica e del gas (3,7 miliardi);
6. del commercio (3,1 miliardi).

Il fattore di emissione più impattante è il particolato fine (PM_{2,5}) con 17,1 miliardi di euro di costi esterni (35% del totale), interamente ascrivibili ad effetti sanitari (per malattie respiratorie e mortalità a lungo termine), seguito dalla CO₂, principale responsabile dei cambiamenti climatici di origine antropogenica, con 11,2 miliardi di costi esterni (23%), e agli NO_x con 8,3 miliardi (17%). Nello stesso anno, il 2012, l'allora Ministro dell'Ambiente Clini e l'Enea, riprendendo un report della IEA⁴ aggiungevano alle esternalità sopra riportate che: *"fossili contro fonti rinnovabili 6 a 1: sul fronte degli incentivi. Alle fonti fossili sono andati, a livello mondiale, incentivi per 400 miliardi di dollari nel 2010 contro i 66 miliardi di dollari di incentivi per le fonti rinnovabili"*. Senza contare che, il mancato raggiungimento degli obiettivi che ci siamo imposti con il protocollo di Kyoto farebbe scattare delle penali che peserebbero sulla nostra bolletta ben più del doppio degli incentivi dati con le bollette elettriche alle fonti rinnovabili.

IPA e diossine

Spesso gli impianti a legna vengono associati con la produzione di IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e diossine. Anche in questo caso ci sono da fare numerosi distinguo tra combustione e gassificazione.

Partiamo da uno studio dell'Istituto Superiore di Sanità⁵, realizzato insieme ad altri 6 istituti di Paesi europei, nel quale si dimostra come l'assunzione media di IPA avvenga attraverso l'ingestione degli alimenti cucinati o affumicati con carbonella o legna. Per l'ISS l'ingestione contribuisce al raggiungimento della dose complessiva per circa il 90%. In particolare, l'assunzione di benzo[a]pirene (BaP) (il composto più studiato e generalmente usato come indicatore della qualità dell'ambiente) che per un adulto risulta compresa tra 0,05 e 0,29 µg/giorno. Valori superiori sono stati individuati in Italia meridionale, con una dose di 0,32 µg/giorno. L'assunzione

per ingestione giornaliera da parte di bambini e ragazzi è circa 2,4 volte superiore a quella degli adulti. L'assunzione globale media di BaP risulta essere approssimativamente intorno a 0,2 µg/persona al giorno. L'ingestione di acqua influisce per meno dell'1%, risultando dunque una via di esposizione relativamente trascurabile. Il restante 9% è dunque attribuibile all'inalazione di aria. Il contributo dovuto all'aria inalata è stato calcolato sulla base di una concentrazione di BaP pari a 1 ng/m³, che è la concentrazione media tipicamente misurata nell'aria urbana; una concentrazione sicuramente inferiore si può trovare nelle zone rurali dove però possono contribuire alla presenza di IPA sia gli incendi di sterpaglie, sia il maggiore utilizzo della legna per cucinare e riscaldarsi. D'altronde la concentrazione di 1 ng/m³ viene comunemente misurata a livello stradale, in prossimità delle emissioni veicolari (generalmente, la principale sorgente di IPA in ambito urbano) quindi è ragionevole stimare che l'effettiva esposizione personale sia decisamente inferiore, almeno per la maggior parte della popolazione. Dunque, il contributo della dieta è sicuramente superiore al 90% sopra calcolato.

Lo studio prosegue determinando le concentrazioni dei singoli IPA, che variano generalmente da meno di 1 µg/kg ad alcuni µg/kg e occasionalmente fino a valori dell'ordine delle decine, e talvolta delle centinaia, di µg/kg. I livelli più alti vengono riscontrati negli alimenti grigliati (soprattutto carni e prodotti carnei grigliati ad alte temperature e per tempi prolungati), fino a 13,2 µg/kg quando la carne è grigliata "fortemente" per un tempo prolungato⁶; questo perché gli IPA sono per la maggior parte contenuti e trasportati da particelle carboniose (fuliggine) emesse dalle stesse fonti che li hanno originati e che si depositano sul cibo. Dobbiamo ricordare che il syngas depurato non contiene particelle carboniose in quanto queste rimangono o nella carbonella vegetale oppure vengono eliminate dai sistemi di purificazione a valle del gassificatore.

Tornando allo studio dell'ISS, l'assunzione media giornaliera di BaP attraverso la dieta risulta stimabile in un intervallo approssimativamente compreso tra 50 e 300 ng/persona, valore corrispondente circa al 90% dell'assunzione globale media. Per i fumatori di sigarette, i contributi provenienti dall'ingestione di alimenti e dal fumo possono essere ben superiori visto che, in alcuni casi, una singola sigaretta può produrre 1,2 µg di IPA⁷, ben 4 volte la maggiore dose giornaliera data dall'alimentazione. Lo studio aggiunge che il diverso significato tossicologico dell'esposizione inalatoria e orale ad IPA non implica in alcun modo un rischio cancerogeno confrontabile, vista la presenza nel fumo di sigarette di molteplici sostanze cancerogene oltre gli stessi IPA.

Lo studio si conclude con l'affermazione che l'ingestione di IPA con gli alimenti possa essere associata ad un rischio aggiuntivo di circa 10-100 casi di tumore per milione di persone, ben inferiore al rischio di tumore polmonare nei fumatori, stimato in circa 1 caso su 10 fumatori.

In un altro studio⁸ condotto tra il 1998 e il 2002 in Inghilterra, Repubblica Ceca, Ungheria, Polonia, Romania, Russia e Slovacchia, veniva identificato "l'odds ratio" (OR) in base all'utilizzo di biomasse e carbone per riscaldamento, cottura dei cibi o entrambe. L'odds ratio è uno degli indici utilizzati per definire il rapporto di causa-effetto tra due fattori. Il calcolo dell'odds ratio prevede il confronto tra le frequenze di comparsa dell'evento (ad esempio, malattia) rispettivamente nei soggetti esposti e in quelli non esposti al fattore di rischio in studio. Se il valore dell'OR è maggiore di 1, il fattore di rischio è o può essere implicato nella comparsa della malattia.

Attraverso il coinvolgimento di 2.861 casi e 3.118 controlli in 4 anni, lo studio ha verificato che l'uso domestico di carbone e legna per la preparazione dei pasti comportava un aumento del rischio di contrarre tumore polmonare in quanto le emissioni all'interno di ambienti chiusi portano a livelli di polveri tali da produrre, nel tempo, un lieve aumento delle probabilità, anche se il campione utilizzato per questa analisi era ridotto a 58 persone (OR 1,37). Con un numero maggiore di persone coinvolte (divisi in nazione, educazione, fumatori/non fumatori, occupazione, ecc.) le conclusioni dei 15 scienziati coinvolti (appartenenti a Paesi diversi: Polonia, Italia, Russia, Regno Unito, Romania, Rep. Ceca, Slovacchia, Ungheria e Nuova Zelanda) evidenziavano la

manca di significative differenze; tanto che in alcuni casi, con l'aumento dell'utilizzo di questi combustibili l'O.R. diminuiva anziché aumentare, come ci si sarebbe aspettato.

Relativamente alla produzione di diossine si evince che l'ambiente nel quale avviene la gassificazione è estremamente avverso alla formazione delle stesse. Le diossine si formano come combinazione tra componenti organici, con anelli benzenici, e cloro a temperature comprese tra i 250 ed i 600 °C. Nella zona di gassificazione la temperatura è superiore agli 800 °C, l'ambiente è povero di ossigeno e ricco di idrogeno (H₂) con il quale il cloro reagisce dando origine ad acido cloridrico gassoso (HCl) che viene abbattuto all'uscita del reattore attraverso un sistema di lavaggio che utilizza una soluzione acquosa (insieme ad altre sostanze come H₂S, NH₃, ecc.).

Bisogna poi considerare che il cloro, nel legno, è solitamente molto basso (circa 0,01% in peso) e durante la gassificazione reagisce con l'idrogeno e con tutti gli altri metalli alcalini presenti in quantità decisamente maggiori tra lo 0,1 e lo 0,3% (Ca, Na, K, Mg, ecc.), formando sali clorurati che andranno ad accumularsi principalmente nella carbonella vegetale in uscita dal reattore (costituendo i solidi totali della carbonella) ed in misura minore nella condensa prodotta all'uscita dal reattore⁹.

A dimostrazione che la gassificazione impedisce la formazione di diossine, in alcuni esperimenti scientifici, come la gassificazione di rifiuti contenenti cloro o gassificando direttamente polivinilcloruro, una plastica che contiene circa il 50% in peso di cloro, immettendone nel reattore 70 kg/h si produce un gas contenente solamente 0,01 ng-TEQ*/Nm³ (*=Toxic Equivalent Quantity; che indica la somma di quantità "equivalenti" dal punto di vista del potenziale tossico rispetto alla "diossina di Seveso")¹⁰. Il limite nelle emissioni della normativa europea per i composti organoclorurati attualmente in vigore è 0,1 ng-TEQ/Nm³ (Direttiva 200/76 CE).

Polveri sottili

Per quanto riguarda le polveri sottili, anche su questo tema molto spesso si scatenano le maggiori critiche contro gli impianti a biomassa legnosa ed anche in questi casi bisogna fare corrette e puntuali analisi.

Ci sono alcune pubblicazioni che vengono citate in modo parziale e i cui dati vengono utilizzati ed estrapolati, con evidente sciattezza, per commentare allo stesso modo tecnologie differenti (combustione diretta, pirolisi, gassificazione, ecc.).

Negli studi effettuati dal 2009 al 2012 dal Politecnico di Milano¹¹, si fa riferimento alla combustione diretta e si misura il numero di nano-particelle o polveri ultrafini (diametro <0,1 μm) in uscita da impianti termici per uso domestico (potenza 100-150 kW) alimentati con diversi combustibili e nell'aria ambiente in cui questi impianti emettono. Nello studio si fa presente come *«le particelle di dimensioni nanometriche (0,1-0,001 μm) sono presenti sulla terra da milioni di anni ed il genere umano è da sempre esposto ad un "fondo" di particelle ultrafini e nano-particelle generate da processi "naturali". Su tale fondo si è innestato, col tempo, il contributo delle attività antropiche. Tra le fonti, certamente figurano gli impianti di combustione fissi (caldaie, centrali) e mobili (automobili, aerei, ecc.)»*.

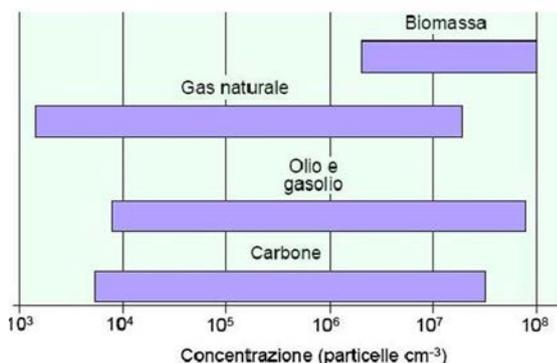


Fig. 1 - Concentrazioni delle particelle in uscita dai camini

In Fig. 1 vengono riportate le concentrazioni in uscita dai camini delle attività industriali dove c'è una

combustione diretta; mentre tra le attività umane gli autori ne riportano alcune con elevata produzione di polveri sottili, tra le quali la panificazione che può produrre oltre 640 mila particelle a cm^3 , la saldatura che può produrre tra 54 mila e 3.500.000 a cm^3 ed, infine, anche nelle nostre cucine vi sono particelle con una concentrazione di 130 mila a cm^3 .

Anche gli autori di questi studi, lamentano come a *“differenza di tutti gli altri Paesi, in cui il dibattito è motivo di approfondimento di ricerca, in Italia alcune componenti dell’ambientalismo hanno postulato una connessione diretta tra combustione e presunti effetti sulla salute del particolato ultrafine; senza andare a considerare tutte le altre fonti che possono compromettere la salute e prescindendo dai complessi meccanismi che presidono la generazione, l’emissione e la diffusione degli inquinanti, nonché l’esposizione alla loro azione”*.

Tra gli impianti esaminati, le concentrazioni di particelle (in numero) maggiori si riscontrano per:

- caldaie a legna e gasolio;
- caminetti;
- motori diesel senza filtro antiparticolato;
- motori a benzina a iniezione diretta.

Dal loro studio emerge come le concentrazioni (in numero) maggiori si rilevano per caldaie oltre che per motori Diesel (come riportato in Fig. 2).

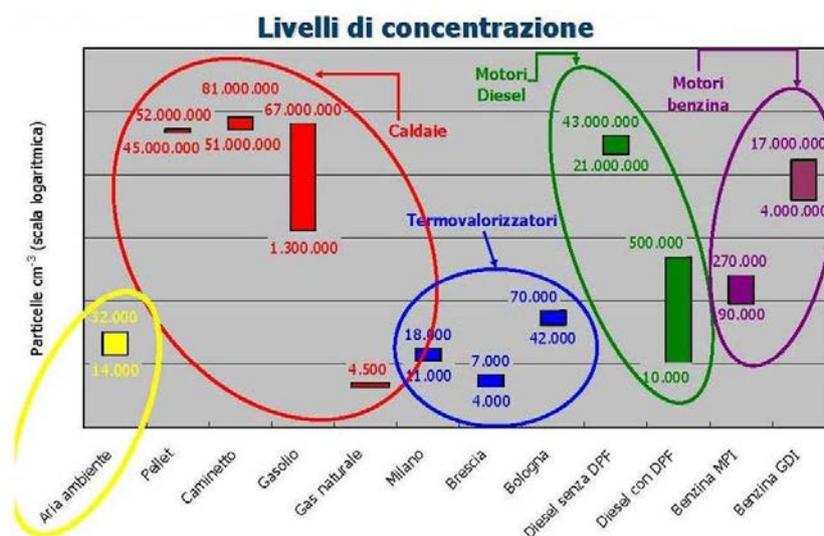


Fig. 2 - Livelli di concentrazioni delle particelle in uscita dai camini

Senza dimenticare che una candela di 15 grammi (una semplice tea-light, oggi molto in voga nel nostro mercato) accesa in una stanza di 20 m^2 , è in grado di produrre particolato e polveri sottili pari a un valore 200 volte maggiore dei limiti di sicurezza ambientali applicati ad esempio in una città, come Milano, quando viene bloccata la circolazione dei veicoli, per l’allarme inquinamento.

Tutto questo per sottolineare come sia eccessivo e poco funzionale scagliarsi contro un singolo impianto, specie se di piccole dimensioni, se non si riducono fortemente anche le altre fonti emissive cui la popolazione è maggiormente ed inconsapevolmente esposta. È vero che un impianto di piccole dimensioni può contribuire negativamente alle emissioni complessive, ma da solo non influenza in modo significativo la situazione generale nel quale andrà ad inserirsi; specialmente se questa non è già compromessa da altre attività. Non è un caso che la Regione Emilia-Romagna abbia imposto dei limiti per l’installazione di impianti a biomassa solo nelle aree di superamento e nelle aree a rischio di superamento, individuate in base ad alcune criticità emerse negli anni, senza imporre limiti di distanza o altro rispetto ai nuclei abitati. In queste aree è comunque possibile realizzare gli impianti a biomasse a condizione che si sostituiscano sorgenti emissive esistenti e che sia assicurato un saldo complessivo pari almeno a zero delle emissioni in

atmosfera di PM10 e NO₂¹². La Regione Lombardia¹³, data la grave situazione ambientale, ha invece imposto limitazioni all'uso di legna da ardere per il riscaldamento domestico degli edifici in camini e stufe di vecchio tipo - nel caso siano presenti altri impianti per riscaldamento a metano, gasolio, GPL o altri combustibili ammessi - dal 1° novembre al 31 marzo nei Comuni delle zone critiche e in quelli con altitudine uguale o inferiore a 300 m. In particolare, non sarà consentito l'utilizzo delle biomasse legnose in questi impianti: camini aperti; camini chiusi, stufe e qualunque altro tipo di apparecchio che non garantisca un rendimento energetico adeguato ($\geq 63\%$) e basse emissioni di carbonio ($\leq 0,5$).

Negli studi del Politecnico infine, si fa riferimento al fatto che, a differenza delle emissioni domestiche, quelle degli impianti industriali di combustione fissi sono fortemente influenzate dalla presenza di sistemi di depurazione, con i filtri a tessuto e i depolveratori elettrostatici che possono garantire efficienze di rimozione superiori al 99% e concentrazioni di polveri inferiori a 1 mg/m³.

A proposito dei sistemi di abbattimento delle polveri ci sono numerose pubblicazioni che dimostrano come per gli impianti a combustione diretta, le prestazioni migliori sono attribuite ai filtri a manica, con efficienze di abbattimento di particelle, con dimensioni tra 0,05 e 1 µm, superiori al 99,5% ed in grado di trattenere anche metalli pesanti e diossine¹⁴.

A questo punto cerchiamo di quantificare le polveri emesse da impianti domestici e da impianti industriali alimentati a legna, in modo da verificare l'influenza di un ipotetico impianto a gassificazione o a combustione diretta rispetto a ciò che viene prodotto dai sistemi domestici.

Una ricerca pubblicata nel 2011¹⁵ riporta le concentrazioni di polveri nei fumi di ventotto impianti di teleriscaldamento di piccola e media potenza, alimentati con diversi tipi di biomasse legnose e con diversi trattamenti fumi: ciclone, multi ciclone, filtro elettrostatico. Le più basse concentrazioni di polveri totali nei fumi di un impianto a combustione da 6 MW_{termici} sono state registrate con i filtri elettrostatici (15,8 mg/m³), mentre per un impianto a gassificazione da 17,5 MW_{termici} e 1,38 MW_{elettrici}, sempre con filtri elettrostatici, i valori sono ancora più bassi (2,5 mg/m³).

Se andiamo ad analizzare altre pubblicazioni nelle quali sono stati determinate le quantità di polveri prodotte per MJ di energia presente nella materia prima utilizzata, otteniamo dati molto significativi e funzionali per fare degli utili confronti.

L'Associazione Italiana Energie Agroforestali (AIEL) ha pubblicato alcuni dati molto interessanti. I dati sui camini aperti sono molto rari e con questi apparecchi il fattore d'emissione risulta molto variabile, con una media di circa 250 mg/MJ (per convertire questo valore in mg/Nm³ può essere utilizzato il fattore approssimativo 1,5, ottenendo 375 mg/Nm³). Nei camini a inserto chiuso (come definiti dalla EN 13229:2001), il risultato tipico varia tra 47 e 83 mg/MJ (70-125 mg/Nm³) e quello migliore varia in un intervallo tra 14 e 26 mg/MJ (21-40 mg/Nm³); mentre nel peggiore dei casi raggiunge 204 mg/MJ (306 mg/Nm³)¹⁶. In una conferenza organizzata dalle Agenzie Regionali di Protezione dell'Ambiente (ARPA) delle regioni del nord Italia del 2011, vengono pubblicati altri dati^{17,18}, che sono peggiorativi rispetto a quelli determinati dall'AIEL e dalla Task 32 dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (AIE), che ha inventariato i valori del fattore d'emissione di particolato sia degli apparecchi domestici che delle caldaie centralizzate, rilevati da 17 istituti di ricerca in sette Paesi europei (Svizzera, Austria, Germania, Danimarca, Norvegia, Svezia e Olanda)¹⁹ (Tab. 1). Da tutti gli studi emerge come gli apparecchi manuali siano caratterizzati da un ampio intervallo del fattore di emissione e la non corretta gestione dell'apparecchio può causare un aumento del fattore di emissione di circa 10 volte rispetto ad un apparecchio in buono stato. Nonostante questa variabilità, possiamo utilizzare i dati pubblicati per determinare quantomeno un intervallo di emissioni di ogni singolo apparecchio preso in esame; partendo da due dati uguali per tutti:

1. un consumo annuale di circa 100 quintali di legna da ardere;
2. un potere calorifero pari a 10,132 MJ/kg (17,5 MJ/kg per il pellet).

Tab. 1 - Valori emissivi di sistemi tradizionali: 1 = buono stato di manutenzione; 2 = cattivo stato di manutenzione			
	mg/MJ	kg/anno	mg/Nm ³
Rif. [16]			
Camini aperti	250	25	375
Stufe pellets	30	5	45
Stufe legna	150	15	225
Stufe cippato	60	6	90
Rif. [17, 18]			
Camino aperto ¹	500	51	750
Camino aperto ²	860	87	1.290
Camino chiuso ¹	250	25	375
Camino chiuso ²	450	46	675
Stufa tradizionale ¹	250	25	375
Stufa tradizionale ²	810	82	1215
Rif. [19]			
Camino aperto ¹	160	16	240
Camino aperto ²	910	92	1.365
Camino chiuso ¹	80	8	120
Camino chiuso ²	240	24	360

Gli apparecchi a pellet e le caldaie a legna con tiraggio forzato raggiungono valori medi più bassi rispetto ai camini aperti o chiusi, specie rispetto a quelli che si trovano in condizioni di non ottimale gestione (cattivo stato). I camini possono emettere in atmosfera da 16 a 92 kg di polveri sottili ogni anno; con valori più probabili intorno ai 50 kg/anno di polveri sottili; praticamente circa lo 0,5% in peso rispetto alla biomassa entrante. Se invece andiamo a verificare le emissioni di un piccolo impianto a gassificazione da 1 MWe, dotato di un cogeneratore, nel quale il syngas viene valorizzato, previa purificazione, per ottenere energia elettrica e termica potremo avere una emissione di polveri inferiori ai 20 mg/Nm³²⁰, ma che può scendere oltre fino a 1 mg/Nm³ se vi è la presenza di un ulteriore filtro a maniche o filtro elettrostatico dopo il sistema di abbattimento catalitico degli inquinanti (tipicamente un SCR), che permette, come visto, un abbattimento del 99,5%. Non è un caso che anche il legislatore con il decreto sulle energie rinnovabili non fotovoltaiche²¹ abbia inserito dei limiti sulle polveri che si collocano a metà di quanto sopra riportato, con una emissione al camino di 10 mg/m³ per impianti da 0 a 20 MW_{termici}. Considerando poi che per chi volesse installare un sistema di monitoraggio in continuo delle emissioni, il limite autoimposto sarà certamente del 50% inferiore al limite di legge per essere sicuri di rispettare i limiti e quindi per usufruire dell'ulteriore incentivo per la produzione di energia.

Ipotizzando a questo punto di avere un piccolo impianto a gassificazione, inferiore ad 1 MW_{elettrico} e circa 3 MW_{termici}, che produce energia attraverso uno o più cogeneratori e quindi con portate comprese tra gli 8.000 e i 12.000 m³/h, intervallo dovuto al numero dei cogeneratori, alla tipologia di motore, ecc. potremmo ipotizzare un intervallo di emissioni di polveri sottili emesse da questa tecnologia.

Se i dati di partenza saranno i seguenti:

- potenza installata inferiore ad 1 MW_{elettrico} e circa 3 MW_{termici},
- consumo di 12.000 t/anno di legna sotto forma di cippato di legna al 40-45% di umidità,
- 7.500 ore di funzionamento all'anno,
- 10.000 m³/h di portata dei gas di scarico,
- sistema catalitico SCR seguito da un filtro a maniche, con una emissione che oscilla tra 1 e 10 mg/m³, ma che è più probabile sia tra i 2 e i 4 mg/m³, come riportato in precedenza, avremo un'emissione di particolato che oscilla tra 78 e 780 kg/anno, più verosimilmente c'è da attendersi una emissione di polveri di 200-300 kg/anno.

A questo punto si possono fare i dovuti paragoni tra le attività domestiche e quelle dell'impianto sopradescritto, determinando il numero di camini domestici corrispondenti rispetto ai dati sopra riportati (Tab. 2).

Tab. 2 - Rapporto tra emissioni impianto ed emissioni dei sistemi tradizionali: 1 = buono stato di manutenzione; 2 = cattivo stato di manutenzione	
	Numero di emissioni equivalenti
Rif. [16]	
Camini aperti	12
Stufe pellets	57
Stufe legna	20
Stufe cippato	49
Rif. [17, 18]	
Camino aperto ¹	6
Camino aperto ²	3
Camino chiuso ¹	12
Camino chiuso ²	7
Stufa tradizionale ¹	12
Stufa tradizionale ²	4
Rif. [19]	
Camino aperto ¹	19
Camino aperto ²	3
Camino chiuso ¹	37
Camino chiuso ²	12

Come si può quindi rapidamente vedere, l'impianto a gassificazione di legna, che utilizza 12 mila tonnellate anno di cippato, ha un'emissione di polveri compresa da 3 a qualche decina di camini aperti o stufe tradizionali, che utilizzano complessivamente da 60 a 400 volte meno legna dell'impianto in questione.

Risultati simili li ha ottenuti anche ARPA Umbria, che, su un impianto analogo a quello in oggetto, posto in un'area già parzialmente compromessa dove esistono altri impianti industriali, ha dichiarato che:

- *“per quanto riguarda i valori delle concentrazioni al suolo massime giornaliere, sia comparabile con gli altri impianti presenti nell'area industriale”;*
- *“l'effetto delle emissioni diminuisce a poche centinaia di metri dall'impianto”;*
- *“confrontando l'impianto con attività produttive sia analoghe che di diversa natura i valori realmente emessi sono generalmente più bassi dei valori massimi autorizzati dal legislatore”;*
- *“un impianto come questo emette come 20-21 camini domestici”.*

Metalli pesanti

Anche su questo tema, spesso c'è una cattiva informazione, perché se è vero che la combustione diretta può dare luogo all'emissione di metalli contenuti nella legna di partenza, per quanto riguarda la gassificazione vi sono numerosi articoli che dimostrano come questo problema praticamente non sussiste.

In un articolo del 2006, viene riportato come la gassificazione, in un impianto pilota, di salici utilizzati per il disinquinamento di siti contaminati per la rimozione di cadmio, cromo, rame, nichel, piombo e zinco, i metalli pesanti si concentrano e si trovano solamente nelle differenti frazioni

solide (carbonella, fly ash, ecc.), nessun metallo pesante finisce nel syngas, quindi nei cogeneratori e di conseguenza nei fumi di scarico²².

Da una ricerca effettuata più di recente con un gassificatore di laboratorio nessun metallo pesante viene rilevato nel syngas e l'unico metallo pesante intercettato è lo zinco (superando però i 1.000°C)²³. Infine, la gassificazione di sostanze organiche contenenti elementi radioattivi ha mostrato una ritenzione sostanzialmente completa dei radionuclidi sulla carbonella. La trattenuta dei metalli radionuclidi è pari al 100%, considerando anche il fatto che la condensa trattiene le poche tracce di metalli che possono passare nel gas. Il risultato finale del processo di trattamento è la distruzione del biologico e la riduzione dei residui radioattivi in un piccolo volume di carbonella²⁴.

Altri inquinanti

Gli altri inquinanti emessi da un impianto che utilizza la cogenerazione sono NO_x, CO, SO_x e idrocarburi incombusti (HC). Con un buon sistema catalitico, tipicamente un SCR, questi composti possono essere abbattuti fino a raggiungere valori inferiori o paragonabili a quelli delle emissioni degli autoveicoli che circolano nelle strade di tutta Italia. D'altra parte, le emissioni di ossidi di zolfo sono praticamente assenti perché l'H₂S che si forma durante la gassificazione, similmente all'HCl, reagisce con i metalli alcalini o viene abbattuto dal sistema ad umido non raggiungendo il cogeneratore.

Se confrontiamo i limiti di legge imposti dalla normativa sugli scarichi degli automezzi Euro V, i limiti imposti dal decreto sulle rinnovabili non fotovoltaiche del 6 luglio 2012 ed un'ipotetica emissione prevista per l'impianto in oggetto, pari al 60% dei limiti del suddetto decreto, possiamo ottenere una tabella come la Tab. 3.

Tab. 3 - Limiti di emissione per motori diesel Euro V e per l'impianto a biomasse				
g/kWh	Ossidi di azoto (NO _x)	Monossido di carbonio (CO)	Polveri	Idrocarburi incombusti (HC)
Motore diesel Euro V	2,0	1,5	0,02	0,46
Limite di legge per impianto a biomasse 1 MWe	2,0	2,0	0,10	0,32
Emissioni previste impianto a biomasse 1 MWe	1,6	1,6	0,06	0,19

In pratica l'impianto a gassificazione di legna ha le stesse emissioni orarie di 4 SUV di 4.0 cc di cilindrata, o di 7 furgoni 3.0 cc di cilindrata oppure se preferite di 12 FIAT Punto 1.4 multijet; autoveicoli che circolano a centinaia nelle strade di tutta Italia.

Per questi motivi etichettare, come viene spesso mosso dai detrattori, questi piccoli impianti, come industria insalubre di prima classe sia spropositato in quanto le emissioni sono minime e paragonabili a qualche camino a legna o a veicoli che percorrono giornalmente le nostre strade. Inoltre, nel 1934, anno di pubblicazione del decreto riportante l'elenco delle industrie insalubri (parzialmente rivisto nel 1994), questi impianti non sono presenti, mentre lo sono distributori di benzina, aziende per la produzione di formaggi, macellerie, salumifici con macellazione, scuderie, maneggi e tipografie con rotative, che, nel 1934, potevano essere considerate effettivamente insalubri, ma oggi?

Conclusioni

L'utilizzo della legna come combustibile ha un costo ambientale direttamente legato alle tecnologie di combustione ed è tanto maggiore quanto più le stufe e i camini utilizzati sono tecnicamente arretrati. Numerosi studi nazionali indicano come i sistemi tradizionali, da soli, rappresentino più del 70% dei sistemi utilizzati per la combustione di legna e che questi siano tra le principali fonti di inquinamento da polveri sottili visto che in Italia vengono bruciate in questi sistemi buona parte dei 19 milioni di tonnellate di legna da ardere all'anno²⁵. Consumo che è chiaramente concentrato nelle località montane seguite dalle zone di collina e prevalentemente nei piccoli centri abitati, con meno di 30 mila abitanti, e, nonostante l'elevato consumo, la legna rappresenta comunque un consumo complementare al sistema di riscaldamento principale in quanto più del 70% delle famiglie utilizzatrici fa uso comunque di combustibili fossili come metano, GPL, gasolio, carbone e altro²⁵.

Incentivi e scelte tecnologiche meno impattanti della combustione diretta delle biomasse lignocellulosiche, quali la gassificazione o la pirolisi, oltre alla fermentazione, per la produzione di syngas, biolio, biometano, etanolo, ecc., grazie a tecnologie che stanno uscendo dalle fasi sperimentali^{1,26}, sono la risposta più corretta che la scienza e la tecnica possono darci per rispondere alle sfide che il futuro ci presenta per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Le paure, immotivate, devono essere superate innanzitutto rivolgendosi ad imparziali fonti del sapere (università, centri ricerca ecc.) che conoscono tecnologie e le ricadute, poi finanziando la ricerca scientifica ed infine attraverso la divulgazione di dati scientifici che possono dimostrare come queste tecnologie, una volta presenti solo nei grandi impianti di cokeria dei petrolchimici, oggi sono diventati installazioni industrializzate e commercializzate, ormai alla portata di aziende, della collettività e non sono impattanti come lo erano un tempo.

Concludendo, queste tecnologie sono la risposta corretta, dal punto di vista energetico, ambientale e sanitario, per ridurre la nostra dipendenza dalle fonti fossili, per utilizzare al meglio il nostro territorio e quindi inserire a pieno titolo le biomasse tra le fonti d'energia rinnovabile a basso impatto ambientale, a favore dell'intera umanità e dell'ambiente²⁷.

Ringraziamenti: Si ringrazia la EnCor Srl di Correggio per la gentile concessione delle immagini.

Bibliografia

¹C.M. Van der Meijden, H.J. Veringa, L.P.L.M. Rabou, *Biomass and Bioenergy*, 2010, **34**(3) 302.

²E. Ronchi, A. Barbabella, L. Refrigeri, I costi dell'energia in Italia, Fondazione per lo sviluppo sostenibile, 2013.

³*Nuova Energia*, 2013, **5**.

⁴International Energy Agency World Energy Outlook 2012; <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2012/>

⁵B. Bocca, R. Crebelli, E. Menichini. Presenza degli idrocarburi policiclici aromatici negli alimenti, Istituto Superiore di Sanità, 2003.

⁶P. Mottier, V. Parisod, R.J. Turesky, *J. Agric. Food Chem.*, 2000, **48**, 1160.

⁷E. Marchei *et al.*, Composizione chimica del fumo principale di sigaretta, Istituto Superiore di Sanità, 2010.

⁸J. Lissowska *et al.*, *Am. J. Epidemiol.*, 2005, **162**(4), 326.

⁹H.K. Chagger *et al.*, *Applied Energy*, 1998, **60**, 101.

¹⁰T. Yamamoto *et al.*, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, 2004, **6**, 6.

¹¹S. Cernuschi, M. Giugliano, S. Consonni, Emissioni di polveri fini e ultrafini da impianti di combustione; www.gecos.polimi.it/wets09/Stefano%20Consonni-FederNano.pdf; www.mater.polimi.it/mater/it/pubblicazioni/rapporti-mater; www.mater.polimi.it/mater/it/.

¹²Delibera della giunta regionale Emilia Romagna del 26 marzo 2012 n° 362.

¹³Delibera Regione Lombardia n. 3398 del 27/10/2006.

¹⁴O. Sippula *et al.*, *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32), 4855.

¹⁵S. Ghafghazi *et al.*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, **15**, 3019.

¹⁶V. Francescato, E. Antonini, La combustione del legno: fattori di emissione e quadro normativo, Aiel (Associazione Italiana Energie Agroforestali).

¹⁷Progetto APAT - ARPA Lombardia stima dei consumi di legna da ardere per riscaldamento ed uso domestico in Italia, 2008.

- ¹⁸C. Pastorello *et al.*, *Atmospheric Environment*, 2011, **45**, 2869.
- ¹⁹T. Nussbaumer *et al.*, Particulate Emissions from Biomass Combustion in IEA Countries. Survey on Measurements and Emission Factors. On behalf of International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 32, Swiss Federal Office of Energy (SFOE), 2008; ISBN 3-908705-18-5; www.ieabcc.nl or www.verenum.ch
- ²⁰J. Brandin *et al.*, Swedish Energy Agency Report. Small Scale Gasification: Gas Engine CHP for Biofuels, 2011.
- ²¹Decreto 6 luglio 2012.
- ²²P. Vervaeke *et al.*, *Biomass and Bioenergy*, 2006, **30**, 58.
- ²³D. Porbatzki *et al.*, *Biomass and Bioenergy*, 2011, **35**, S79.
- ²⁴R. Scott Martin, S.E. Manahan, *Chemosphere*, 1998, **37**(3), 531.
- ²⁵S. Caserini *et al.*, Stima dei consumi di legna da ardere per riscaldamento ed uso domestico in Italia, 2008, Progetto APAT e ARPA Lombardia.
- ²⁶A. Demirbas, *Energy Conversion and Management*, 2009, **50**(11), 2782.
- ²⁷W. Fleuren *et al.*, Opportunities for a 1,000 MWe biomassfired power plant in the Netherlands, 2005, Greenpeace Netherlands and E.ON Benelux.