

Impatti ambientali e sanitari prodotti dalla combustione di biomasse legnose per la produzione di calore ed elettricità

Environmental and health impacts of wood combustion to produce heat and power

Federico Valerio

Corrispondenza:
Federico Valerio,
federico.valerio@istge.it

Epidemiol Prev 2012; 36 (1): 16-26

RIASSUNTO

Nei fumi che si producono con la combustione del legno sono presenti numerose sostanze tossiche e cancerogene: benzene, formaldeide, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), diossine, polveri fini e ultrafini. I fattori di emissione disponibili dimostrano come, a parità di energia prodotta, le centrali termoelettriche alimentate a legna inquinano molto di più di quelle a gas naturale. Tutti gli studi confermano come i fumi di legna producano un deterioramento della qualità dell'aria, all'interno e all'esterno delle abitazioni, in particolare a causa della emissione di polveri fini e ultrafini (PM10, PM2,5). Numerosi studi hanno valutato i possibili effetti sulla salute attribuibili all'esposizione, in ambienti domestici, ai prodotti di combustione di biomasse, concludendo che il fumo di legna possa avere effetti negativi sulla salute umana; in particolare nel 2010 la IARC

ha classificato il fumo di legna come possibile cancerogeno per l'uomo. In Europa, la produzione d'energia elettrica e di calore dalla combustione di biomasse è in costante aumento (12% annuo), anche grazie agli incentivi per favorire la produzione di elettricità da fonti rinnovabili e la riduzione delle emissioni di gas serra. A oggi mancano studi adeguati a valutare gli effetti ambientali e sanitari delle numerose centrali termoelettriche alimentate a biomasse entrate in funzione che, nel 2008, nei 27 Paesi della UE hanno prodotto 108 Terawattora di energia elettrica, di cui il 53% con la combustione di biomasse legnose.

Parole chiave: bio combustibili, inquinamento in ambienti confinati, inquinamento aria, effetti sanitari.

Cosa si sapeva già

- L'uso di biomasse legnose è la principale fonte di energia e di inquinamento nelle abitazioni dei Paesi in via di sviluppo e i Paesi sviluppati incentivano l'uso energetico delle biomasse in centrali termoelettriche per ridurre le emissioni di gas clima alteranti.

Cosa si aggiunge di nuovo

- L'uso di biomasse legnose per la produzione di calore per usi domestici produce importanti impatti ambientali all'interno e all'esterno delle abitazioni, dovuti alle emissioni di sostanze tossiche e cancerogene. Un particolare problema associato alla combustione delle biomasse è l'alta concentrazione di polveri ultrasottili (<1 micron) nei fumi. Questo problema è di entità maggiore negli impianti domestici ma riguarda anche i grandi impianti termoelettrici alimentati con biomasse legnose. In entrambi i casi, i fattori di emissione attualmente disponibili segnalano che, a parità di energia prodotta, le emissioni di caldaie a biomasse, sono nettamente superiori alle emissioni di centrali alimentate con metano.
- Gli effetti sulla salute delle esposizioni ai fumi prodotti da impianti a biomasse per usi domestici, possono essere rilevanti e le emissioni di grandi centrali a biomasse, in particolare PM2,5, richiedono adeguati e urgenti monitoraggi ambientali e sanitari per valutare l'opportunità di continuare a incentivare, con sovvenzioni pubbliche, la produzione di elettricità con la combustione diretta di biomasse solide.

ABSTRACT

Environmental and health impacts of wood combustion to produce heat and power

Epidemiol Prev 2012; 36 (1): 16-26

Toxic chemicals such as benzene, polycyclic aromatic hydrocarbons, dioxins, and ultra fine particles were found in the smoke produced by wood combustion. Emission factors confirm that, to produce the same energy amount, many more pollutants are emitted by wood than by natural gas. Biomass burning produces a relevant deterioration of air quality inside and outside houses, notably due to emissions of fine and ultra fine dust (PM10, PM2.5) according to re-

viewed studies. Important improvements in emission quality are obtained with the use of more efficient household heating systems, both in developed and in developing countries. Numerous studies have assessed the possible health effects produced by wood smoke, providing sufficient evidence that the indoor exposure to wood smoke, even in developed countries, can have adverse effects on human health. In 2010 IARC classified wood smoke as a possible human car-

cinogen. In Europe, electricity generation from biomass combustion is increasing (12% each year) thanks to incentives provided to reduce greenhouse gas emissions and use of fossil fuels. Today adequate studies to assess the environmental and health effects of emissions from power plants fuelled by solid biomasses are still needed.

Key words: bio fuels, indoor and outdoor pollution, health effects

INTRODUZIONE

Nel 1990 le biomasse coprivano il 13% dei consumi mondiali di energia (55 exajoule/anno) e costituivano la quarta fonte di energia e legname, scarti agricoli e sterco animale, coprivano il 33% dei consumi energetici dei Paesi emergenti. In quegli stessi anni, l'uso di biomasse nei Paesi sviluppati, non era affatto trascurabile: Stati Uniti, 4% dei consumi energetici; Finlandia, 18%; Svezia, 16%; Austria, 16%.¹

L'Unione europea incentiva la produzione d'energia da fonti energetiche rinnovabili e, con la direttiva 2001/77/CE, ha invitato gli Stati membri ad aumentare la produzione di energia elettrica da fonti di energia rinnovabili (FER).

Nel 1997, nei Paesi UE la produzione di elettricità da FER era stimata pari a 338,41 Terawattora (TWh), corrispondente al 13,9% della produzione totale di elettricità. In base alla direttiva 201/77/CE, tale percentuale avrebbe dovuto essere del 22% entro il 2010, con una produzione di elettricità da FER pari a 535,6 TWh.

Nel 2008, i 27 Paesi UE hanno prodotto elettricità da FER pari a 108 TWh, con una crescita annuale media pari al 12%, a partire dal 1996.

Il Paese con la maggiore produzione di elettricità da biomasse è la Germania (27,7 TWh), seguita da Svezia (11,4 TWh), Finlandia (10,8 TWh), Inghilterra (10,5 TWh) e le principali fonti sono state: legname (53%), rifiuti solidi urbani (28%), biogas (19%).

Nel 2008, la sola produzione di calore da biomasse nella UE27 è stata di 7,8 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep), con la Svezia come principale utilizzatore di bio-combustibili (2,7 Mtep).

Per quanto riguarda l'Italia, alla fine del 2008 risultavano in esercizio 352 impianti per la produzione di elettricità alimentati a biomasse e rifiuti solidi urbani, per un totale di

1.555 MW di potenza installata e una produzione di elettricità di 5,9 TWh. In particolare, 65 impianti erano alimentati con rifiuti urbani, 45 con legname, 239 con biogas (di cui 193 con biogas da discarica) e 12 con bio-oli (olio di palma, colza...).

Il crescente ricorso alle biomasse come fonte di energia per usi domestici e industriali ha incentivato anche gli studi sugli impatti ambientali e sanitari degli inquinanti che inevitabilmente si producono durante la loro combustione.²

Gli studi che, negli ultimi dieci anni, hanno riguardato impatti ambientali e sanitari associati all'uso di biomasse legnose per la produzione di calore per usi domestici e di elettricità in impianti industriali sono l'oggetto di questa rassegna bibliografica.

IMPATTI AMBIENTALI NELL'USO DOMESTICO DELLE BIOMASSE

INQUINAMENTO ALL'INTERNO DELLE ABITAZIONI

Uno dei primi studi sull'inquinamento prodotto dall'uso domestico di biomasse è stato realizzato in villaggi del Nepal, dove il principale combustibile era la legna e, in minore quantità, le deiezioni secche di animali, il carbone di legna e scarti agricoli.³ Lo studio evidenziava, all'interno delle abitazioni, concentrazioni di polveri respirabili comprese tra 1 e 14 mg/m³ e le concentrazioni medie interne di CO (21 ppm) e di benzene (280 ppb) risultavano da dieci a cento volte superiori ai valori esterni contemporaneamente misurati. In anni più recenti si è continuato a studiare l'esposizione a fumi di biomasse di popolazioni rurali di Paesi in via di sviluppo⁴⁻⁷ ma si è anche spostata l'attenzione sulla qualità dell'aria all'interno d'abitazioni di Paesi sviluppati. La maggior parte di questi studi riguardano la Svezia, a causa della sua grande produzione di legname e del diffuso

uso a scopi energetici, degli scarti di questa attività.⁸⁻¹¹ In particolare, misure effettuate nel 2003 hanno dimostrato¹² che le famiglie svedesi che utilizzavano legna avevano una maggiore esposizione a zinco, rame, piombo e manganese. L'autore concludeva consigliando la necessità di studi più approfonditi per valutare l'effetto del fumo da legna sullo stato di salute della popolazione.

Un altro studio⁹ segnalava che le famiglie svedesi che utilizzano legna, rispetto ai controlli, avevano una maggiore esposizione a benzene e a 1-3 butadiene. In base ai valori medi di esposizione delle famiglie che utilizzavano legna (1-3 butadiene: $0,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$; benzene: $3,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) l'autore giudicava basso il rischio di cancro degli esposti.

Un'elevata emissione di polveri sottili (PM_{2,5}) è un'altra caratteristica della legna usata come combustibile. Misure effettuate in Svezia¹² in abitazioni riscaldate con la legna, segnalavano concentrazioni interne di PM_{2,5} di $14,8 \pm 14,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Concentrazioni maggiori di polveri sottili sono state trovate nel Montana,¹³ dove la concentrazione media di PM_{2,5} all'interno di 21 abitazioni che utilizzavano vecchi modelli di stufe a legna era di $51,2 \pm 32,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

INQUINAMENTO ESTERNO

Traccianti chimici e polveri sottili

Diversi studi hanno confermato che prodotti della degradazione di cellulosa e lignina, quali levoglucosano e metossifenolo, siano eccellenti traccianti della combustione di biomasse.¹⁴⁻¹⁷

L'uso di questi traccianti ha permesso di quantificare quante delle polveri sottili (PM₁₀ e PM_{2,5}) che si trovano in ambienti urbani e rurali, durante il periodo invernale, siano attribuibili alla combustione di biomasse.

Nei pressi di Vienna, il 10% delle PM₁₀ ha origine dal fumo di legna e questa percentuale raddoppia nelle aree austriache con maggiore presenza di boschi, quali la Stiria e i dintorni di Salisburgo.¹⁸

In un quartiere residenziale del sud della Germania, l'analisi del levoglucosano nell'aria ha permesso di stimare che il 59% del PM₁₀ sia attribuibile al riscaldamento domestico a legna.¹⁹

In Svizzera, l'analisi del ¹⁴C, come indicatore della fonte inquinante, ha permesso di stimare che il 41% del carbonio organico presente nelle PM₁₀ sia dovuta alla combustione del legno.²⁰

A Parigi, il contributo della combustione del legno al carbonio organico trovato nelle PM_{2,5} era stimato pari al $20 \pm 10\%$.²¹

In cinque comunità rurali nel Montana, sulle Montagne Rocciose, una procedura di identificazione delle fonti inquinanti, individuava nel fumo di legna, molto probabilmente prodotto da impianti di riscaldamento domestici, la fonte del 56-77% delle PM_{2,5} presenti in queste aree.^{22, 23}

Negli Stati Uniti, il contributo alla concentrazione di aerosol fine derivante dalla combustione di biomasse (incendi boschivi e usi energetici) è stato stimato essere pari al 30% negli stati dell'Ovest e al 20% in quelli dell'Est e gli autori stimano che la situazione sia destinata ad aggravarsi a causa del crescente utilizzo di biocombustibili.²⁴

Nell'area metropolitana di Bangkok,²⁵ nei siti con maggior densità di traffico, le emissioni di PM₁₀ da parte dei veicoli e della combustione di biomasse risultavano avere ruoli molto simili sul degrado della qualità dell'aria, pari al 33%, per ciascuna di queste fonti. Anche per le PM_{2,5}, sempre nei siti da traffico, le biomasse avevano un ruolo importante, pari al 26% e nelle aree residenziali di Bangkok la principale fonte di PM_{2,5} risultava essere la combustione di biomasse.

Anche a Pechino, la combustione delle biomasse è risultata possibile responsabile del 18-38% del carbonio organico trovato nelle PM_{2,5}; questo contributo derivava sia dall'uso di biocombustibili, sia dalla stagionale combustione sul campo dei residui dei raccolti agricoli.²⁶

Idrocarburi policiclici aromatici

La combustione di biomasse legnose comporta l'emissione nell'ambiente di importanti quantità di IPA che variano a seconda del combustibile e del tipo di impianto utilizzati. La concentrazione di 16 IPA nei fumi emessi da stufe di mattoni in terracotta, utilizzate tradizionalmente in Russia per il riscaldamento, da forni per cucinare e da una caldaia per il riscaldamento domestico (20kw) è stata effettuata nel Belarus,²⁷ gli impianti studiati erano alimentati con legna di betulla a diversi gradi di umidità e con mattonelle di torba. Le concentrazioni maggiori di IPA ($2.225 - 4.999 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sono state trovate quando i tre tipi di impianti erano alimentati con betulla secca. Con questo combustibile, la concentrazione nei fumi del benzo(a)pirene (BaP) era di $109 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il fattore medio di emissione del BaP era di $5,0 \text{ mg}/\text{kg}$ con la legna e $0,79 \text{ mg}/\text{kg}$ con la torba.

Studi effettuati in Svezia, Croazia e Grecia²⁸ per valutare il contributo della combustione di biomasse alla concentrazione di IPA nell'ambiente esterno stimavano che in Grecia e in Serbia le biomasse contribuivano al 10% degli IPA trovati in atmosfera, mentre nell'atmosfera svedese il contributo delle biomasse al totale degli IPA in atmosfera era stimato pari al 50%.

Diossine e Furani

L'inventario europeo per le emissioni di diossine in atmosfera stima che nel 2005, nei 17 Paesi dell'Unione, la principale fonte di diossine e furani (PCDD/F) sia stata la combustione di legna per usi domestici, con valori compresi tra 523 e 969 g I-TEQ/anno, seguita subito dopo da impianti di agglomerazione del carbon coke (387 - 470 g I-TEQ/anno).²⁹

Un'ampia rassegna bibliografica riportava le concentrazioni e i fattori di emissione di PCDD/F sia di impianti domestici sia industriali alimentati a legna.³⁰ Questo studio evidenziava l'importanza della qualità del combustibile utilizzato negli impianti di grandi dimensioni alimentate a legna. Con legna pulita e non trattata, le emissioni di PCDD/Fs variavano da 0,0025 (min) a 0,73 (max) ng I-TEQ/m³; con legna di scarto si sono registrati valori massimi di PCDD/Fs, pari a 18.025 ng I-TEQ/m³. La rassegna riporta anche le concentrazioni di PCDD/Fs trovate nella fuliggine depositata nelle canne fumarie e nelle ceneri; anche in queste matrici si è riscontrata una grande variabilità dovuta al tipo di impianto termico e alle caratteristiche del combustibile. Le maggiori concentrazioni si sono trovate quando la legna è stata bruciata insieme ai rifiuti e quando nella legna si trovavano alte concentrazioni di cloruro di sodio dovute al trasporto via mare dei tronchi galleggianti.

Uno studio condotto in Austria³¹ ha misurato le emissioni di PCDD/F di 30 diversi modelli d'impianti di riscaldamento a legna, in particolare stufe per uso cucina e caldaie, con potenza nominale di 50kw, testati in condizioni operative reali. La maggior parte degli impianti aveva un fattore di emissione di PCDD/F, per unità di calore prodotto, compreso tra 0,01-0,3 ng TEQ/MJ. Le emissioni più basse erano quelle di caldaie ventilate con post combustore e quelle di caldaie alimentate in continuo con pellet e cippato. E' interessante segnalare che le prestazioni peggiori si sono avute con gestioni scorrette da parte dei conduttori degli impianti, quali la co-combustione di rifiuti domestici o eccessivi carichi di legna nel forno.

EMISSIONI DI CALDAIE MODERNE E TRADIZIONALI PER USO DOMESTICO ALIMENTATE CON BIOCOMBUSTIBILI

La Svezia è uno dei Paesi sviluppati che fa maggiormente ricorso a biocombustibili per uso domestico, a causa della sua grande produzione di legname e all'opportunità di utilizzare, come fonti di energia, gli scarti di questa attività; nel 2000, in Svezia, l'energia prodotta da impianti domestici a biomasse è stata di 12 Twh.³² Il tipo di biocombustibile più utilizzato in Svezia (150.000 tonnellate nel 2002) è legno in forma di pellet, cilindri prodotti per compressione di segatura. Per questi motivi sono numerosi gli studi effettuati in questo Paese per migliorare l'efficienza di impianti termici alimentati a biomasse e diminuire le emissioni inquinanti.^{11,33-35}

In particolare, uno studio³⁶ ha messo a confronto i fattori d'emissione di numerosi inquinanti presenti nel fumo di legna emessi da due caldaie di tipo tradizionale, due moderne caldaie con forno ceramico e tre bruciatori alimentati a pellet. Le maggiori concentrazioni di particolato (2.200 mg/MJ) si sono registrate con una caldaia tradizionale senza accumulo di acqua calda, a fronte di 12 mg/MJ mi-

surate nei fumi di una caldaia alimentata a pellet. La stessa caldaia tradizionale emetteva 64 mg di IPA ($\Sigma 27$ IPA) per MJ di energia prodotta, mentre nei fumi di una caldaia a pellet si registravano i valori più bassi di IPA, 0,06 mg/MJ. In un villaggio finlandese è stato valutato l'effetto degli impianti di riscaldamento alimentati a legna sulla concentrazione di numerosi inquinanti (PM10, PM2,5, COV, BaP) in atmosfera; in particolare, tra il 35 al 60% del benzene misurato in questa zona (concentrazione media 1,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) è stato attribuito alla combustione del legno.³⁷

Studi pubblicati tra il 2008 e il 2010³⁸⁻⁴⁰ confermano come nei fumi prodotti dalla combustione di biomasse legnose siano particolarmente abbondanti particelle ultrafini e nanoparticelle che, una volta inalate, possono produrre danni in diversi organi bersaglio.⁴¹

La tabella 1 sintetizza i risultati d'uno studio effettuato dal Politecnico di Milano⁴² che ha misurato il numero di nano particelle (diametro <0,1 μm) in uscita da impianti termici per uso domestico (potenza 100-150 kw) alimentati con diversi combustibili e nell'aria ambiente con cui sono stati alimentati questi impianti.

UTENZA	NUMERO PARTICELLE/ CM3	FRAZ < 0,1 MICROMETRI (%)
Pellet	41.000.000 -52.000.000	93/19
Metano	4.500	89/68
Aria ambiente	28.000	88/64

Tabella 1. Concentrazioni e percentuale di particelle con diametro inferiore a 0,1 micrometri nelle emissioni d'utenze termiche civili alimentate a pellet e metano

Table 1. Nanoparticle concentration and percentage of <0,1 μm particles in emissions of domestic heating boilers fuelled by wood pellet and natural gas

Da questo studio si evince che dal camino di una caldaia a pellet, dopo un trattamento dei fumi con multiciclone, possono uscire molte più nanoparticelle di quelle che escono da una caldaia alimentata a metano, senza nessun trattamento fumi e, in quest'ultimo caso, i fumi sono addirittura più puliti dell'aria ambiente in ingresso ai due impianti di riscaldamento.

IMPIANTI AMBIENTALI NELL'USO INDUSTRIALE DI BIOCOMBUSTIBILI

L'uso di biomasse legnose per la produzione d'elettricità e calore in impianti industriali vede un crescente interesse sia da parte dei Paesi in via di sviluppo⁴³⁻⁴⁶ sia di quelli sviluppati.^{1,47,48}

Nonostante il crescente ruolo di questi impianti nei bilanci energetici nazionali, sono ancora pochi gli studi sul loro impatto sulla qualità dell'ambiente. Uno di questi⁴⁹ è stato realizzato, tra il 2007 e il 2008 in Francia, dove, tra il 2002 e il 2006, sono stati attivati 480 impianti termici industriali

alimentati con biomasse legnose. Otto di questi impianti, con una potenza termica da 0,3 a 6 MW, sono stati oggetto di una approfondita campagna di monitoraggio. Sei impianti erano entrati in funzione dopo il 2002, gli altri due, rispettivamente, nel 1992 e nel 1993. Tutti gli impianti erano dotati di un multiciclone per l'abbattimento delle polveri e solo due impianti prevedevano ulteriori trattamenti dei fumi: un impianto era dotato anche di filtro a manica e un altro di precipitatore elettrostatico. Nelle emissioni sono state valutate le concentrazioni di particolato, la frazione di polveri con diametro inferiore a 1 micron (PM1), metalli pesanti e le concentrazioni di PCDD/F, policlorobifenili (PCB) e IPA. Sulle ceneri residue sono stati misurati i PCDD/F. Altri inquinanti controllati sono stati gli ossidi d'azoto, CO e i composti organici volatili (COV). Solo uno degli impianti più vecchi, quello realizzato nel 1992, mostrava elevate emissioni di PCDD/F, IPA e policlorobifenili (PCB); la concentrazione di PCDD/F nei fumi era di 2,88 ng I-TEQ/m³, nettamente superiore al valore limite di 0,1 ng I-TEQ/m³ e le concentrazioni di 16 IPA erano di 90.969 µg/m³. Le pessime prestazioni di questa caldaia erano attribuite a particolari disfunzioni nella sua gestione.

Un secondo impianto, con il solo trattamento fumi con multi ciclone, superava di poco (0,132 ng I-TEQ/m³) il limite dei PCDD/Fs e tutti gli altri impianti, nonostante non fossero dotati di specifici sistemi d'abbattimento delle diossine, erano ampiamente nei limiti, con concentrazioni di PCDD/Fs compresi tra 0,0003 e 0,060 ng I-TEQ/m³.

I fattori medi di emissione per energia prodotta dei sette impianti in regola erano: PCDD/Fs, 49 ng I-TEQ/GJ; PCB, 1,6 ng/GJ; BaP, 0,14 mg/GJ. I fattori di emissioni minimi: PCDD/Fs, 0,2 ng I-TEQ/GJ; PCB, 0,2 ng/GJ; BaP, 0,06 mg/GJ.

Anche le emissioni di polveri (tra 16 e 169 mg/m³) erano giudicate basse, anche se la percentuale di PM1 era molto alta in tutti gli impianti (min 51%, max 89%). Le concentrazioni di polveri, CO e NO_x erano giudicati in linea con le BAT prescritte in Europa per i grandi impianti per la produzione d'energia.

Le concentrazioni più basse di polveri (16 e 7 mg/m³) e COV (1,6 e 0,9 mg/m³) sono state trovate nell'impianto con filtri a manica, alimentato in un caso con legna vergine e nell'altro con paglia, a testimonianza dell'elevata efficienza di questo tipo di filtri.

Una ricerca bibliografica pubblicata nel 2011⁵⁰ 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 sono stati registrate con i filtri elettrostatici (15,8-2,3 mg/m³). A valle dei multi cicloni le concentrazioni di polveri totali sono ri-

sultate maggiori, da 50-100 mg/m³. L'autore conclude che per garantire il rispetto del limite delle concentrazioni di polveri nei fumi, in vigore a Vancouver (18 mg/m³) e applicato alle emissioni di impianti a biomasse, sia necessario ricorrere a filtri elettrostatici e a filtri a manica, entrambi con una efficienza di abbattimento superiore al 90%. Le prestazioni migliori sono attribuite ai filtri a manica, con efficienze di abbattimento di particelle, con dimensioni tra 0,05 e 1 micron, superiori al 99,5% e in grado di trattenere anche metalli pesanti e diossine.

POLVERI ULTRAFINI

Il principale problema ambientale creato da impianti industriali alimentati a biomasse è l'emissione di particolato sottile^{21,26} e ultrasottile, con dimensioni inferiori a 1 micron.⁵¹⁻⁵³

Gli studi che hanno misurato polveri fini nelle emissioni d'impianti di media potenza alimentati a legna, sono pochi. Uno di questo è quello realizzato su quattro impianti di teleriscaldamento finlandesi, le cui emissioni sono state messe a confronto con tre impianti di simile potenza termica, alimentati a olio combustibile pesante.⁵⁴

I quattro impianti a biomasse, con una potenza termica da 5 a 15 MW, utilizzavano segatura, cortecce e cippato di legno da attività forestali; il trattamento fumi dei tre impianti a forno rotante era un multiciclone, seguito, in un caso, da scrubber umido e, negli altri due impianti, da filtro elettrostatico; l'unico impianto basato sulla gasificazione della biomassa e successiva combustione del gas era dotato solo di un monociclone per ridurre le polveri più grossolane.

I fattori d'emissione delle PM1 dopo il trattamento fumi nei tre impianti a forno rotante erano 31-6-4 mg/MJ e 13 mg/MJ nel gasificatore. È interessante notare che i tre impianti di teleriscaldamento alimentati a olio combustibile (da 4 a 7 MWt), senza nessun trattamento fumi, avevano un fattore d'emissione delle PM1, rispettivamente di 5,0-8,3-4,1 mg/MJ, a conferma del fatto che le emissioni di elevate quantità polveri ultra sottili sono il principale problema dei biocombustibili solidi.

La minore emissione di polveri fini da impianti a olio combustibile, rispetto a caldaie a legna, è stato evidenziato anche in un altro studio³⁶ in cui caldaie a legna e a pellet sono state confrontate con due caldaie alimentate a olio combustibile di simile potenza. L'olio combustibile mostrava emissioni di particolato confrontabili, per quanto riguarda le concentrazioni in peso, con le migliori prestazioni degli impianti alimentati a biomasse, ma il numero di particelle emesse (diametro tra 30 nm e 10 nm) bruciando olio combustibile erano tra i valori più bassi trovati in questo studio, 0,01 x 10¹³ particelle/Mj, una quantità 80 volte inferiore rispetto alle migliori prestazioni di una caldaia alimentata a pellet (0,8 x 10¹³ particelle/MJ).

Confronti tra le emissioni di polveri con diametro inferiore

a 1 micron, da parte di impianti alimentati con diversi combustibili, richiedono qualche cautela, in quanto le tecniche di misura adottate non sono ancora ufficialmente validate; tuttavia i risultati riportati in questa rassegna derivano da confronti effettuati con le stesse procedure dagli stessi autori. Pertanto si può ritenere che eventuali errori sistematici, riconducibili al metodo di misura utilizzato, possano essere presenti in tutte le misure effettuate nell'ambito dello stesso esperimento e quindi è altamente probabile che i maggiori fattori di emissione attribuiti, da tutti gli autori riportati, alle biomasse legnose, rispetto ai combustibili fossili, siano un'informazione corretta.

FATTORI DI EMISSIONE A CONFRONTO

Il Programma europeo di valutazione e monitoraggio (EMEP) elabora, periodicamente, un inventario delle emissioni inquinanti, fornendo i fattori d'emissione attribuibili a specifiche attività antropogeniche. Questo inventario è curato dalla task force UNECE/EMEC e pubblicato dall'Agenzia europea per l'ambiente.⁵⁵

Dall'inventario pubblicato nel 2009 sono stati tratti i fattori di emissione da impianti per la produzione di calore e elettricità alimentati, rispettivamente, con legna vergine e gas naturale riportati nella tabella 2. Questi valori sono stati stimati secondo la procedura definita Tier 2 che utilizza fattori di emissione sviluppati in base alla conoscenza del tipo di processo in uso nei Paesi delle cui emissioni cui si vuole elaborare l'inventario.

I fattori d'emissione riportati in tabella 2 fanno riferimento a un Giga Joule (GJ) d'energia complessivamente prodotta da impianti di cogenerazioni di elettricità e calore. Nella tabella 2 sono riportati i valori medi e i valori minimi e massimi dei fattori di emissione, con limiti di confidenza al 95%. Tali valori fanno riferimento a impianti con potenze superiori a 50MW termici, con combustori a letto trascinato secco e dotati dei sistemi di trattamento fumi più comuni nei Paesi in cui si vuole effettuare l'inventario delle emissioni, in questo caso i Paesi dell'Unione europea.

Gli inquinanti presi in considerazione sono: NO_x, SO_x, COV, PM₁₀ e PM_{2,5}, il mercurio, PCDD/Fs e BaP.

La tabella 2 mostra come mediamente, a parità di energia elettrica e termica prodotta (1 Giga Joule) un impianto alimentato a gas naturale produca, per tutti gli inquinanti riportati, un inquinamento atmosferico nettamente inferiore a quello prodotto da un impianto alimentato con biomasse legnose vergini.

In particolare, in base a queste stime, una centrale a biomasse legnose immette in atmosfera una quantità di polveri ultrafini (PM_{2,5}) tredici volte maggiore di quanto ne produca una centrale alimentata con gas naturale.

Anche la differenza nelle emissioni di diossine e furani (PCDD/F) è notevole: una centrale a biomasse mediamente ne emette cento volte di più di una alimentata a gas naturale. Nello stesso Inventario delle emissioni si stima che, se la caldaia alimentata con legno vergine è di tipo a letto fluido, con una maggior permanenza dei fumi nella camera di combustione, i fattori d'emissione degli ossidi di azoto, mediamente, sono più bassi (96 g/GJ), simili ai valori medi del gas naturale, mentre le emissioni degli altri inquinanti restano invariate. Si sottolinea come il fattore di emissione scelto (quantità di inquinanti emessi a parità di energia utile prodotta) permetta un corretto confronto tra combustibili con potere calorifico molto diverso, quali la legna secca (15 MJ/kg) e il metano (47 MJ/kg).

CENERI

La combustione di legno essiccato produce ceneri in quantità pari allo 0,5-0,7 % in peso rispetto alla quantità di materiale trattato;^{27,56,57} nel caso di altri biocombustibili molto utilizzati, come la paglia di grano, le ceneri prodotte sono pari al 15,5% del peso della paglia bruciata, un valore nettamente superiore alle ceneri mediamente prodotte dal carbone (7%).

La natura alcalina delle ceneri prodotte dalle biomasse può creare problemi tecnici agli impianti. Il sodio e il potassio abbassano il punto di fusione delle ceneri e questo aumenta la deposizione di ceneri sui tubi della caldaia, inoltre la pre-

Tabella 2. Fattori d'emissione (valore medio e valori minimi e massimi entro i limiti di confidenza del 95%) da impianti per la produzione di elettricità e calore, alimentati con gas naturale e legno vergine

Table 2. Emission factors (mean, minimum and maximum values within 95% confidence limits) for plants using natural gas and wood for electricity and heat production.

	UNITÀ	GAS NATURALE		LEGNO	
		VALORE MEDIO	MIN-MAX	VALORE MEDIO	MIN-MAX
NO _x	g/GJ	89	15-185	211	55-420
SO _x	g/GJ	0,3	0,2-0,4	11	6,5-15,0
COV	g/GJ	1,5	0,8-6,0	7,3	2,4-22,0
PM ₁₀	g/GJ	0,9	0,4-1,3	25	5,7-645,0
PM _{2,5}	g/GJ	0,9	0,4-1,3	12	5,2-555,0
Hg	mg/GJ	0,1	0,05-0,15	1,5	0,9-2,1
PCDD/F,	ng I-TEQ/GJ	0,5	0,3-0,8	50	25-75
BaP	µg/GJ	0,6	0,2-0,6	1,1	0,7-1,6
Ref ⁵⁵					

senza di cloro nelle biomasse può creare problemi di corrosione degli impianti.^{58, 59}

Il contenuto di cadmio, cromo, rame, piombo e mercurio delle ceneri volanti derivanti dalla combustione di particolari tipi di legname (quercia, faggio, abete) è superiore a quella riscontrabile nelle ceneri volanti prodotte dalla combustione di carbone.⁵⁷

L'uso della cenere di legna come fertilizzante può essere una soluzione per evitare i costi di un loro smaltimento, tuttavia è opportuno verificare, nelle ceneri di legna, la presenza e la biodisponibilità di composti organici tossici quali IPA e PCB. Studi effettuati su ceneri volanti prodotti da due caldaie alimentate a cippato di legno riscontravano concentrazioni d'IPA ($\Sigma 16$ IPA) lisciviabili, pari a 1.757.019 e 8.712 $\mu\text{g}/\text{kg}$, valori superiori ai limiti fissati dalla Swedish Forest Agency per autorizzare il riciclo di ceneri nei suoli forestali: 2.000 $\mu\text{g}/\text{kg}$.⁶⁰

Uno studio condotto in Svizzera ha verificato il livello di contaminazione di IPA e di PCB indotto dalla somministrazione, a terreno di bosco, di cenere prodotta da una caldaia (540 Kw) alimentata a cippato di legno, con un contenuto d'IPA ($\Sigma 20$ IPA) di 16.800 $\mu\text{g}/\text{kg}$ e di PCB ($\Sigma 14$ PCB) di 3,4 $\mu\text{g}/\text{kg}$.⁶¹ La cenere fu distribuita sulla superficie di terreno di bosco in quantità pari a 8 tonnellate/ha. Cinque mesi dopo l'applicazione della cenere, rispetto al terreno di controllo, la concentrazione di IPA risultava sei volte maggiore, mentre non risultava modificata la concentrazione di PCB, probabilmente a causa di una diversa mobilità e biodegradazione delle due classi di composti. In base a questo risultato, gli autori consigliavano che la fertilizzazione di foreste non contaminate si debba fare solo con ceneri a basso contenuto di composti organici.

ESPOSIZIONE A FUMO DI LEGNA ED EFFETTI SULLA SALUTE

Gli studi epidemiologici e sperimentali forniscono una crescente evidenza d'una possibile associazione tra esposizione a fumo di legna e diversi effetti sulla salute umana, quali diminuita funzionalità polmonare, ridotta resistenza alle infezioni, aumento dell'incidenza e severità di asma.^{8,62-66}

Un'ampia rassegna bibliografica pubblicata nel 2007 ha valutato gli studi riguardanti gli effetti sulla salute umana derivanti dall'esposizione a fumo di legna.⁶⁷

In base a questa rassegna, l'autore evidenziava che, nei Paesi sviluppati, gli studi sull'impatto sanitario dei fumi prodotti da combustione di biomasse fossero ancora pochi e concludeva che tutte le attuali ricerche segnalano che l'esposizione a fumo di legna prodotto da impianti di riscaldamento domestico è associata a effetti sanitari all'apparato respiratorio, del tutto simili a quelli prodotti dall'inalazione di particelle prodotte dalla combustione di combustibili fossili.

Inoltre, studi *in vitro* suggeriscono che particelle prodotte

da combustione incompleta possano essere più tossiche di quelle formate da combustioni ad alta efficienza.⁶³

Nel 2010 l'Agenzia internazionale per la ricerca sul cancro (IARC) ha classificato come possibile cancerogeno per l'uomo (gruppo 2A) le emissioni dalla combustione domestica di biocombustibili, in particolare la legna.⁶⁸

Il rischio di contrarre cancro al polmone, a seguito dell'esposizione a fumo di legna, può riguardare anche popolazioni dei Paesi sviluppati. Uno studio condotto tra il 1998 e il 2002 in Inghilterra, Repubblica Ceca, Ungheria, Polonia, Romania, Russia e Slovacchia, con il coinvolgimento di 2.861 casi e 3.118 controlli, ha verificato che l'uso domestico di carbone e legna per la preparazione dei pasti comportava un aumento significativo del rischio di contrarre tumore polmonare, con un rischio relativo pari a 1,37, mentre l'uso di combustibili liquidi e gassosi faceva registrare un rischio più basso.⁶⁹

Un simile risultato è emerso da uno studio caso-controllo effettuato a Montreal (Canada). In questo caso, l'esposizione alle emissioni d'impianti domestici alimentati a legna è stata stimata in base a un questionario somministrato a soggetti a cui era stato diagnosticato un tumore polmonare e a un pari numero di soggetti sani. Nella popolazione femminile che aveva dichiarato di essere stata esposta a fumo di legna, il rischio relativo di cancro polmonare risultava di 2,5, mentre non si evidenziavano eccessi di rischi nella popolazione maschile. Anche se questo risultato richiedeva una migliore quantificazione dell'esposizione a fumo di legna, era coerente con quanto emerso da altri studi, in base ai quali è la popolazione femminile la più esposta, sia perché sono prevalentemente le donne ad accudire al fuoco e a far da mangiare, sia perché, specialmente nelle aree rurali, sono le donne che passano la maggior parte del loro tempo all'interno delle abitazioni.⁷⁰

Un'altra rassegna bibliografica sugli effetti sulla salute del fumo di legna⁶³ conclude affermando che sia necessario avere informazioni più dettagliate sull'esposizione a fumo di legna in base al tipo di combustibile usato, agli impianti e alle modalità d'uso. Anche l'influenza delle caratteristiche chimico-fisiche del particolato presente nel fumo da legna necessita di studi adeguati, fondamentali per individuare le priorità di intervento per ridurre con efficacia le emissioni nocive da impianti alimentati da biocombustibili. Per raggiungere questi obiettivi gli autori auspicano una maggiore collaborazione tra diversi campi di ricerca, tra cui scienze della combustione e degli aerosol, epidemiologia e tossicologia.

A queste discipline scientifiche è opportuno che si affianchi anche la chimica ambientale per stimare correttamente l'esposizione e per studiare le modificazioni chimico-fisiche, in atmosfera, dell'emissioni prodotte dalla combustione di biomasse.⁷¹

DISCUSSIONE

Questa rassegna bibliografica ha ampiamente documentato come la comune percezione che la legna sia un combustibile “pulito” non sia supportata da fatti documentati.

Le biomasse hanno l'indiscutibile vantaggio d'essere una fonte d'energia rinnovabile, d'essere costantemente disponibili a tutte le latitudini abitate tuttavia, in quanto combustibili solidi, la loro combustione è intrinsecamente inquinante e poco efficiente.

A questo problema, nei Paesi in via di sviluppo e in quelli sviluppati, si è risposto con impianti termici sempre più efficienti e con adeguati trattamenti dei fumi.

La conoscenza dei problemi sanitari prodotti dall'inalazione di polveri in base alle loro dimensioni ha obbligato a trattamenti dei fumi sempre più complessi e costosi: cicloni, multi cicloni, filtri elettrostatici, filtri a manica.

Con i moderni impianti domestici e industriali si sono raggiunti importanti miglioramenti, ma l'emissione di non trascurabili quantità di polveri ultrasottili e nano-polveri è ancora un problema oggetto di studio, in particolare per gli impianti di riscaldamento domestici.

La maggior parte degli studi esaminati concludono che l'esposizione a fumo di legna, qualunque sia la sua causa primaria, possa avere effetti negativi sulla salute degli esposti. Nel compilare questa rassegna, abbiamo trovato pochi studi sulle emissioni e nessun studio sul possibile impatto sanitario derivante dalle emissioni di grandi centrali termoelettriche alimentate a biomasse solide e liquide (oli vegetali). Un'adeguata analisi dei rischi prodotti da questo tipo d'impianti ci sembra opportuna, prima che il loro numero aumenti, sotto la spinta degli incentivi economici che numerosi Stati hanno adottato.

I fattori d'emissione al momento disponibili, concordano con il fatto che, a parità d'energia prodotta, sia con impianti domestici sia industriali, combustibili fossili quali l'olio combustibile, ma ancor più il metano e il gas naturale, hanno un impatto sull'ambiente nettamente inferiore a quello prodotto dalla combustione di biomasse, anche quando si adottano le migliori tecnologie, oggi disponibili, per la combustione e il trattamento fumi.

La conoscenza della tossicità delle emissioni in atmosfera e la possibile contaminazione delle ceneri prodotte devono obbligatoriamente far parte dei criteri che i vari Paesi intenderanno adottare per incentivare l'uso energetico di biomasse, in particolare quelle ligno-cellulosiche.

Incentivare la sostituzione d'impianti per la produzione di calore ed elettricità alimentati a gas naturale con impianti di pari potenza, alimentate a biomasse, è una decisione che necessita d'attente analisi dei rischi.⁷²

Non può essere solo la presunta neutralità dei biocombustibili nei bilanci dei gas clima-alteranti a governare le scelte. A questo riguardo ci sembra opportuno segnalare che raramente si

sono effettuate misure sulla quantità di metano presente nell'emissioni d'impianti a biomasse. Nell'unico studio che abbiamo trovato,³⁶ il metano, in impianti domestici alimentati con biomasse è risultato sempre presente, anche a concentrazioni rilevanti: 0,95 mg/MJ è il fattore di emissione di metano trovato nei fumi del migliore impianto a biomasse testato e valori compresi tra 610 e 4.800 mg/MJ sono stati trovati nei fumi delle caldaie a legna di tipo tradizionale.

Poiché il metano ha un effetto clima alterante dieci volte maggiore della CO₂, l'affermazione che l'uso di biomasse a scopi energetici debba essere incentivata per ridurre le emissioni di gas clima-alteranti, deve essere fatta con cautela e con le opportune verifiche.

Segnaliamo, a riguardo, una nota pubblicata su *Science*⁷³ in cui si esprimono dubbi che l'uso di biocombustibili contribuisca a ridurre le emissioni di gas serra in quanto, per esempio, nelle valutazioni al tempo effettuate, non erano state conteggiate le emissioni di gas serra nelle fasi di produzione e raccolta delle biomasse.

Altre perplessità, sempre su *Science*, sono state espresse riguardo ai metodi più efficaci per ridurre le emissioni di gas serra: conservare e recuperare nuove aree forestali potrebbe ottenere risultati migliori di quelli raggiungibili utilizzando bio carburanti.⁷⁴

Inoltre, occorre non trascurare il fatto che la combustione di legna produce grandi quantità di nero fumo (carbon black)^{75,76} che, depositato su superfici coperte da neve e ghiaccio, contribuisce alla diminuzione dell'albedo e, sospeso in atmosfera, riflette verso la Terra il calore assorbito. Pertanto si stima che anche l'emissione in atmosfera di nerofumo da legna possa contribuire all'aumento della temperatura del Pianeta.⁷⁷

Rispetto ai problemi derivanti dalla gestione di grandi centrali alimentate a biomasse (potenze elettriche > 10 MW), riteniamo utile la lettura del rapporto *Lezioni imparate dalle esistenti centrali a biomasse*,⁷⁸ che fornisce informazioni tecniche ed economiche relative alla gestione di 20 grandi impianti a biomasse, di cui 18 negli Stati Uniti, una in Canada e una in Finlandia, con una potenza elettrica installata da 10 a 60 MWe. Le lezioni più importanti sembrano essere: la sicurezza dei contratti di approvvigionamento del biocombustibile; i costi di trasporto che sono giudicati proibitivi quando il biocombustibile proviene da una distanza superiore alle cento miglia; problemi di emissioni odorigene da stoccaggi di legname di durata superiore a un anno; lamentele, da parte delle popolazioni residenti, per il rumore prodotto dalla centrale. I miglioramenti sull'ambiente, indotti dalle centrali, sono stati in gran parte attribuiti al fatto che le centrali a biomasse hanno sostituito usi energetici degli scarti del legname meno efficienti. Un effetto positivo collaterale indotto dall'attivazione di queste centrali è stato attribuito a una maggiore e più costante pu-

lizia dei boschi, la quale ha aumentata la resistenza degli alberi non abbattuti agli attacchi di insetti e parassiti e ha ridotto la frequenza di incendi boschivi.

L'importanza di quest'ultima lezione è confermata dalle stime delle emissioni derivante da incendi più o meno controllati di colture agricole e aree boschive^{79,80} le cui emissioni contribuiscono al degrado della qualità dell'aria. Occorre, tuttavia, rilevare che la corretta manutenzione dei boschi e quindi la riduzione del rischio di incendio, è anche conseguenza di un uso primario dei boschi per la produzione di legno da opera.

CONCLUSIONI

La combustione diretta di biomasse legnose, a causa della tossicità dell'emissioni e del basso potere calorifico di questi combustibili, non risulta poter essere un'alternativa ambientalmente valida ai combustibili fossili se non si riuscirà a ridurre le loro emissioni di polveri fini e ultrafini, IPA e PCDD/Fs, da impianti domestici e industriali, agli stessi valori presenti nell'emissioni di analoghi impianti alimentati con metano.

Attualmente, per ridurre le alte esposizioni a inquinanti presenti nel fumo di legna, il maggior sforzo deve essere fatto nel fornire alle popolazioni dei Paesi in via di sviluppo impianti economici ed efficienti.

La diffusione d'impianti di riscaldamento domestico alimentati a biomasse, nei grandi centri urbani dei Paesi sviluppati, appare problematica in quanto, attualmente, gli alti costi e problemi tecnici, non giustificano la possibilità di trattare i fumi di impianti di riscaldamento familiari o condominiali in modo da ridurre significativamente le loro emissioni in atmosfera.

Una possibile alternativa, specialmente in aree rurali e montane che non dispongono di reti di distribuzione del metano, è di realizzare impianti di teleriscaldamento alimentati a biomasse di produzione locale, con caldaie a elevata efficienza termica e con idonei trattamenti fumi per ridurre le emissioni di polveri sottili e ossidi di azoto, in sostituzione di singoli impianti domestici alimentati a legna. In aree urbane densamente popolate, la sostituzione di im-

pianti di riscaldamento e teleriscaldamento alimentati a metano con impianti alimentati a biomasse certamente esporrebbe la popolazione a una maggiore concentrazione di inquinanti. Un recente studio, condotto con i criteri di analisi dei cicli di vita (LCA) ha stimato che, in un impianto di teleriscaldamento, il passaggio dal gas naturale al gas prodotto dalla gassificazione di pellet in legno aumenterebbe di 6,2 volte l'impatto di inquinanti con significativi effetti sulla salute umana.⁷²

Le informazioni fornite da questa rassegna, giustificano l'avvio di campagne di monitoraggio della qualità dell'aria intorno alle grandi centrali termoelettriche alimentate con biomasse legnose, per verificare il loro ruolo nell'eventuale mancato rispetto degli obiettivi di qualità dell'aria, in particolare la concentrazione di PM10 e PM2,5 nelle zone dove più frequentemente impattano le emissioni di questi impianti.

Queste indagini devono servire anche per valutare l'opportunità di continuare a favorire la realizzazione di nuovi impianti di questo tipo con finanziamenti pubblici, quali i Certificati verdi.

Gran parte degli impianti a biomasse realizzati e in via di autorizzazione, sono giustificati solo dagli interessi economici indotti da questi incentivi che, peraltro, come avviene in Italia, privilegiando la produzione d'elettricità, non spingono al recupero delle grandi quantità di calore residuo contemporaneamente prodotto che, spesso, è disperso in atmosfera, con un netto peggioramento dell'efficienza energetica e dei fattori d'emissione dell'impianto.

Opportuni incentivi a scelte tecnologiche meno impattanti della combustione diretta delle biomasse, quali la trasformazione in combustibili gassosi (syngas, biometano, idrogeno) e liquidi (metanolo, etanolo e olio diesel) di biomasse lignocellulosiche, grazie a tecnologie che stanno uscendo dalle fasi sperimentali,^{81,82} potrebbero essere la risposta corretta, dal punto di vista energetico, ambientale e sanitario, per inserire a pieno titolo le biomasse tra le fonti d'energia rinnovabile a basso impatto ambientale, a favore dell'intera umanità.

Conflitti di interesse dichiarati: nessuno

BIBLIOGRAFIA

1. Hall DO. Biomass energy in industrialised countries—a view of the future. *Forest Ecology and Management Agroforestry and Land use Change in Industrialized Nations*. 1997;91(1):17-45.
2. Abbasi T, SA Abbasi. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14(3):919-937.
3. Davidson CI, SF Lin, JF Osborn, MR Pandey, RA Rasmussen, MA Khalil. Indoor and outdoor air pollution in the Himalayas. *Environmental science & technology* 1986; 20(6):561-567.
4. Begum BA, SK Paul, M Dildar Hossain, SK Biswas, PK Hopke. Indoor air pollution from particulate matter emissions in different households in rural areas of Bangladesh. *Building and Environment* 2009; 44(5):898-903.
5. Leslie GB. Indoor Air Problems in Asia. *Indoor and Built Environment*. 1995; 4 (3-4): 140-150.
6. Padhi BK, PK Padhy. Domestic fuels, indoor air pollution, and children's health. *Annals of the New York Academy of Sciences* 2008;1140:209-217.
7. Siddiqui AR, K Lee, EB Gold, ZA Bhutta. Eye and respiratory symptoms among women exposed to wood smoke emitted from indoor cooking: a study from southern Pakistan. *Energy for Sustainable Development* 2005; 9 (3): 58-66.
8. Boman BC, AB Forsberg, BG Jarvholm. Adverse health effects from ambient air pollution in relation to residential wood combustion in modern society. *Scand J Work Environ Health* 2003;29(4):251-260.
9. Gustafson P. Exposure to some carcinogenic compounds in air, with special reference to wood smoke, 2009. Tesi di laurea
10. Krecel P. Impact of residential wood combustion on urban air quality, 2008. Tesi di laurea
11. Olsson M, J Kjällstrand. Low emissions from wood burning in an ecolabelled residential boiler. *Atmospheric Environment*. 2006; 40 (6): 1148-1158.
12. Molnár P, P Gustafson, S Johannesson, J Boman, L Barregård, G Sällsten. Domestic wood burning and PM2.5 trace elements: Personal exposures, indoor and outdoor levels. *Atmospheric Environment* 2005;39(14):2643-2653.
13. Ward T, C Palmer, M Bergauff, K Hooper, C Noonan. Results of a residential indoor PM2.5 sampling program before and after a woodstove changeout. *Indoor air* 2008; 18(5):408-415.
14. Schmidl C, H Bauer, A Dattler, R Hitzenberger, G Weissenboeck, IL Marr, et al. Chemical characterisation of particle emissions from burning leaves. *Atmospheric Environment* 2008;42(40):9070-9079.
15. Schmidl C, IL Marr, A Caseiro, P Kotianova, A Berner, H Bauer, et al. Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. *Atmospheric Environment* 2008;42 (1):126-141.
16. Simoneit BRT. Biomass burning - a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Applied Geochemistry* 2002;17(3):129-162.
17. Simoneit BRT, VO Elias. Detecting Organic Tracers from Biomass Burning in the Atmosphere. *Marine Pollution Bulletin* 2001; 42(10):805-810.
18. Caseiro A, H Bauer, C Schmidl, CA Pio, H Puxbaum. Wood burning impact on PM10 in three Austrian regions. *Atmospheric Environment* 2009;43(13):2186-2195.
19. Bari MA, G Baumbach, B Kuch, G Scheffknecht. Wood smoke as a source of particle-phase organic compounds in residential areas. *Atmospheric Environment* 2009; 43(31):4722-4732.
20. Szidat S, TM Jenk, H-A Synal, M Kalberer, L Wacker, I Hajdas, et al. Contributions of fossil fuel, biomass-burning, and biogenic emissions to carbonaceous aerosols in Zurich as traced by 14C. *J Geophys Res* 2006;111.
21. Favez O, H Cachier, J Sciare, R Sarda-Esteve, L Martinon. Evidence for a significant contribution of wood burning aerosols to PM2.5 during the winter season in Paris, France. *Atmospheric Environment* 2009;43(22):3640-3044.
22. Ward T, T Lange. The impact of wood smoke on ambient PM2.5 in northern Rocky Mountain valley communities. *Environmental Pollution* 2010;158(3):723-729.
23. Ward TJ, L Rinehart, T Lange. The 2003/2004 Libby, Montana PM2.5 source apportionment research study. *Aero Science Technology* 2006;40:166-177.
24. Park RJ, DJ Jacob, JA Logan. Fire and bio-fuel contributions to annual mean aerosol mass concentrations in the United States. *Atmospheric Environment* 2007;41(35): 7389-7400.
25. Chuersuwana N, S Nimrat, S Lekphet, T Kerdkumrai. Levels and major sources of PM2.5 and PM10 in Bangkok Metropolitan Region. *Environment International Assessment of Urban and Regional Air Quality and its Impacts - Selected papers submitted to the Third International Symposium on Air Quality Management at Urban, Regional and Global Scales (AQM2005) and 14th IUAPPA Regional Conference held in Istanbul on September 26-30, 2005*. 2008;34(5):671-677.
26. Zhang X, S Kondragunta, C Schmidt, F Kogan. Near real time monitoring of biomass burning particulate emissions (PM2.5) across contiguous United States using multiple satellite instruments. *Atmospheric Environment* 2008;42(29):6959-6972.
27. Kakareka SV, TI Kukharich, VS Khomich. Study of PAH emission from the solid fuels combustion in residential furnaces. *Environ Pollut* 2005;133(2):383-387.
28. Mandalakis M, O Gustafsson, T Alsberg, AL Egeback, CM Reddy, L Xu, et al. Contribution of biomass burning to atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons at three European background sites. *Environ Sci Technol* 2005;39(9):2976-2982.
29. Quass U, M Fermann, G Broker. The European dioxin air emission inventory project—final results. *Chemosphere* 2004; 54(9):1319-1327.
30. Lavric ED, AA Konnov, JD Ruyck. Dioxin levels in wood combustion—a review. *Biomass and Bioenergy* 2004;26(2):115-1145.
31. Hubner C, R Boos, T Prey. In-field measurements of PCDD/F emissions from domestic heating appliances for solid fuels. *Chemosphere* 2005;58(3):367-372.
32. Gustafson L, C Tullin, I Wrande. Small-scale biomass combustion in Sweden—research towards a sustainable society. In: 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry; 2000; Sevilla, Spain: James&James Science Publishers Ltd; 2000, pp. 1553-1555.
33. Kjällstrand J, M Olsson. Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances. *Biomass and Bioenergy Pellets 2002 The first world conference on pellets* 2004;27 (6):557-561.
34. Olsson M, J Kjällstrand, G Petersson. Specific chimney emissions and biofuel characteristics of softwood pellets for residential heating in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 2003;24(1):51-57.
35. Olsson M, J Kjällstrand. Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass and Bioenergy Pellets 2002 The first world conference on pellets* 2004;27(6):607-611.
36. Johansson LS, B Leckner, L Gustavsson, D Cooper, C Tullin, A Potter. Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment* 2004;38(25):4183-4195.
37. Hellén H, H Hakola, S Haaparanta, H Pietarila, M Kauhaniemi. Influence of residential wood combustion on local air quality. *Science of The Total Environment* 2008; 393(2-3):283.
38. Laitinen T, SH Martin, J Parshintsev, T Hyötyläinen, K Hartonen, M-L Riekkola, et al. Determination of organic compounds from wood combustion aerosol nanoparticles by different gas chromatographic systems and by aerosol mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 2010;1217(1):151-159.
39. Kim H, B Choi. The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine. *Renewable Energy* 2010; 35(1):157-163.
40. Kim H, B Choi. Effect of ethanol-diesel blend fuels on emission and particle size distribution in a common-rail direct injection diesel engine with warm-up catalytic converter. *Renewable Energy* 2008;33(10): 2222-2228.
41. Donaldson K, L Tran, LA Jimenez, R Duffin,

- DE Newby, N Mills, et al. Combustion-derived nanoparticles: A review of their toxicology following inhalation exposure. *Particle and Fibre Toxicology* 2005;2(1):10.
42. Cernuschi S, M Giugliano, S Consonni. Emissioni di polveri fini e ultrafini da impianti di combustione. 2009. <http://www.gecos.polimi.it/wets09/Stefano%20Consonni-FederNano.pdf>. Accesso:2010
43. Aggarwal RK, SS Chandel. Emerging energy scenario in Western Himalayan state of Himachal Pradesh. *Energy Policy* 2010;38 (5):2545-2551.
44. Bhattacharya SC. Biomass energy in Asia: a review of status, technologies and policies in Asia. *Energy for Sustainable Development* 2002;6(3):5-10.
45. Bhattacharya SC, C Jana. Renewable energy in India: Historical developments and prospects. *Energy* 2009;34(8):981-991.
46. Demirbas A. Importance of biomass energy sources for Turkey. *Energy Policy* 2008;36 (2):834-842.
47. Hall D, J House. Biomass energy in Western Europe to 2050. *Land Use Policy* 1995; 12(1):37-48.
48. Thornley P. Increasing biomass based power generation in the UK. *Energy Policy* 2006;34(15): 2087-2099.
49. Fiani E, P Le Lour, J Auduberteau, S Bordebeure, E Autret. An assessment of POP releases from biomass combustion in french utility boilers. *Organohalogen Compounds* 2008; 70:70-73.
50. Ghafghazi S, T Sowlati, S Sokhansanj, X Bi, S Melin. Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011;15:3019-3028.
51. Joller M, T Brunner, I Obernberger. Modeling of aerosol formation during biomass combustion for various furnace and boiler types. *Fuel Processing Technology* 2007;88 (11):1136-1147.
52. Wierzbicka A, L Lillieblad, J Pagels, M Strand, A Gudmundsson, A Gharibi, et al. Particle emissions from district heating units operating on three commonly used biofuels. *Atmospheric Environment* 2005;39(1): 139-150.
53. Pagels J, M Strand, J Rissler, A Szpila, A Gudmundsson, M Bohgard, et al. Characteristics of aerosol particles formed during grate combustion of moist forest residue. *Journal of Aerosol Science* 2003;34(8): 1043-1059.
54. Sippula O, J Hokkinen, H Puustinen, P Ylipirilä, J Jokiniemi. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers. *Atmospheric Environment* 2009;43(32):4855-4864.
55. Trozzi C. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - Air pollution EEA. 2009. <http://www.eea.europa.eu/themes/air/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook>. Accesso:2011
56. Johansson LS, C Tullin, B Leckner, P Sjövall. Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass and Bioenergy* 2003;25(4):435-446.
57. Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in Energy and Combustion Science* 2005;31(2):171-192.
58. Vamvuka D, D Zografos, G Alevizos. Control methods for mitigating biomass ash-related problems in fluidized beds. *Biore-source Technology* 2008;99(9):3534-3544.
59. Jones JM, LI Darvell, TG Bridgeman, M Pourkashanian, A Williams. An investigation of the thermal and catalytic behaviour of potassium in biomass combustion. *Proceedings of the Combustion Institute* 2007;31(2):1955-1963.
60. Enell A, F Fuhrman, L Lundin, P Warfvinge, G Thelin. Polycyclic aromatic hydrocarbons in ash: Determination of total and leachable concentrations. *Environmental Pollution* 2008;152(2):285-292.
61. Bundt M, M Krauss, P Blaser, W Wilcke. Forest fertilization with wood ash: effect on the distribution and storage of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs). *Journal of environmental quality* 2001;30(4):1296-1304.
62. EPA. Health Effects of Wood Smoke I Cleaner Burning Wood Stoves & Fireplaces I EPA. 2008. <http://www.epa.gov/woodstoves/healtheffects.html>. Accesso:2010
63. Kocbach Bølling A, J Pagels, KE Yttri, L Barregard, G Sallsten, PE Schwarze, et al. Health effects of residential wood smoke particles: the importance of combustion conditions and physicochemical particle properties. *Particle and Fibre Toxicology* 2009;6(1):29.
64. Löndahl J, J Pagels, C Boman, E Swietlicki, A Massling, J Rissler, et al. Deposition of biomass combustion aerosol particles in the human respiratory tract. *Inhalation toxicology* 2008;20(10):923-933.
65. Orru H, M Kaasik, E Merisalu, B Forsberg. Health impact assessment in case of biofuel peat - Co-use of environmental scenarios and exposure-response functions. *Biomass and Bioenergy* 2009;33(8):1080-1086.
66. Rinne ST, EJ Rodas, ML Rinne, JM Simpson, LT Glickman. Use of Biomass Fuel is Associated with Infant Mortality and Child Health in Trend Analysis. *Am J Trop Med Hyg* 2007;76(3):585-591.
67. Naeher LP, M Brauer, M Lipsett, JT Zelikoff, CD Simpson, JQ Koenig, et al. Wood-smoke health effects: a review. *Inhal Toxicol* 2007;19(1):67-106.
68. IARC. Household Use of Solid Fuels and High-temperature Frying. Lyon France; 2010.
69. Lissowska J, A Bardin-Mikolajczak, T Fletcher, D Zaridze, N Szeszenia-Dabrowska, P Rudnai, et al. Lung cancer and indoor pollution from heating and cooking with solid fuels: the IARC international multicentre case-control study in Eastern/Central Europe and the United Kingdom. *Am J Epidemiol* 2005;162(4):326-333.
70. Ramanakumar AV, ME Parent, J Siemiatycki. Risk of lung cancer from residential heating and cooking fuels in Montreal, Canada. *Am J Epidemiol* 2007;165(6):634-642.
71. Grieshop A, J Logue, N Donahue, A Robinson. Laboratory Investigation of photochemical oxidation of organic aerosol from wood fires - Part I: Measurement and simulation of organic aerosol evolution. *Atm Chem Phys Discuss* 2008;8:15699-15737.
72. Pa A, XT Bi, S Sokhansanj. A Life Cycle Evaluation of Wood Pellet Gasification for District Heating in British Columbia. *Biore-source Technology*. 2011; In Press, Accepted Manuscript.
73. Searchinger TD, SP Hamburg, J Melillo, W Chameides, P Havlik, DM Kammen, et al. Fixing a Critical Climate Accounting Error. *Science* 2009;326(5952):527-528.
74. Righelato R, DV Spracklen. Environment. Carbon mitigation by biofuels or by saving and restoring forests? *Science* 2007; 317(5840):902.
75. Olivares G, J Strom, C Johansson, L Gidhagen. Estimates of black carbon and size-resolved particle number emission factors from residential wood burning based on ambient monitoring and model simulations. *J Air Waste Manag Assoc* 2008; 58(6):838-848.
76. Krecl P, J Ström, C Johansson. Carbon content of atmospheric aerosols in a residential area during the wood combustion season in Sweden. *Atmospheric Environment*. 2007; 41: 6974-6985.
77. Panicker AS, G Pandithurai, PD Safai, S Dipu, D-I Lee. On the contribution of black carbon to the composite aerosol radiative forcing over an urban environment. *Atmospheric Environment* 2010;44(25): 3066.
78. NREL. Lessons Learned from Existing Biomass Power Plants. 2007. <http://www.nrel.gov/docs/fy00osti/26946.pdf>. Accesso:2010
79. Meyer CP, AK Luhar, RM Mitchell. Biomass burning emissions over northern Australia constrained by aerosol measurements: I-Modelling the distribution of hourly emissions. *Atmospheric Environment* 2008; 42(7):1629-1646.
80. Anttila P, U Makkonen, H Hellén, K Kyllönen, S Leppänen, H Saari, et al. Impact of the open biomass fires in spring and summer of 2006 on the chemical composition of background air in south-eastern Finland. *Atmospheric Environment* 2008; 42 (26): 6472-6486.
81. Demirbas A. Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management* 2009;50(11):2782-2801.
82. van der Meijden CM, HJ Veringa, LPLM Rabou. The production of synthetic natural gas (SNG): A comparison of three wood gasification systems for energy balance and overall efficiency. *Biomass and Bioenergy* 2010;34(3):302-311.