REGIONE DEL VENETO

AIEL
ASSOCIAZIONE ITALIANA
ENERGIE AGROFORESTALI

VENETO AGRICOLTURA
Azienda Regionale per i settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare

La combustione del legno

FATTORI DI EMISSIONE E QUADRO NORMATIVO

REGIONE DEL VENETO

AIEL
ASSOCIAZIONE ITALIANA
ENERGIE AGROFORESTALI

VENETO AGRICOLTURA
Azienda Regionale per i settori Agricolo, Forestale e Agro-Alimentare

La combustione del legno

FATTORI DI EMISSIONE E QUADRO NORMATIVO

AUTORI
Valter Francescato, *Eliseo Antonini*
Aiel, Associazione Italiana Energie Agroforestali

FOTO
Archivio Aiel

COORDINAMENTO TECNICO-SCIENTIFICO DEL PROGETTO
Loris Agostinetto, *Federico Correale Santacroce*
Veneto Agricoltura
Settore Bioenergie e Cambiamento Climatico

PUBBLICAZIONE EDITA DA
Veneto Agricoltura
Azienda Regionale per i Settori Agricolo, Forestale e Agroalimentare
Settore Bioenergie e Cambiamento Climatico
Viale dell'Università, 14 - Agripolis - 35020 Legnaro (Pd)
Tel. 049.8293711 – Fax 049.8293815
e-mail: info@venetoagricoltura.org
www.venetoagricoltura.org

REALIZZAZIONE EDITORIALE
Veneto Agricoltura
Azienda Regionale per i Settori Agricolo, Forestale e Agroalimentare

COORDINAMENTO EDITORIALE
Alessandra Tadiotto, *Silvia Ceroni*
Settore Divulgazione Tecnica e Formazione Professionale
Via Roma, 34 - 35020 Legnaro (Pd)
Tel. 049.8293920 – Fax 049.8293909
e-mail: divulgazione.formazione@venetoagricoltura.org

È consentita la riproduzione di testi, foto, disegni ecc.
previa autorizzazione da parte di Veneto Agricoltura,
citando gli estremi della pubblicazione.

PRESENTAZIONE

Dato l'attuale interesse del mondo agricolo per le filiere bioenergetiche, diventa compito di Veneto Agricoltura occuparsi anche delle problematiche che derivano dall'utilizzo e dallo sviluppo di queste fonti di energia rinnovabile.

La filiera del legno-energia è una delle filiere più interessanti essendo proprio il legno la principale fonte di energia rinnovabile a livello mondiale.

Per questo motivo Veneto Agricoltura effettua attività di sperimentazione, attività didattiche e divulgative su questo tema da circa un decennio, cioè fin dalla data della sua istituzione.

Accanto al tradizionale uso del fuoco da legna per riscaldarsi e cucinare, diffuso in tutti i paesi del mondo, nelle nazioni del centro e nord Europa da più di 3 decenni si utilizzano moderne caldaie sia per il riscaldamento domestico individuale, sia per il teleriscaldamento a servizio di intere città.

Come tutti i processi di combustione, anche con il legno si producono delle emissioni che vanno in atmosfera.

Tali emissioni possono essere più o meno inquinanti, anche se confrontate con la combustione di combustibili fossili quali gasolio, metano, carbone, ecc., a seconda delle caratteristiche degli apparecchi termici nei quali avviene la combustione.

In Italia vi è molta disinformazione su quali siano gli effetti della combustione del legno a livello di emissioni in atmosfera e molto spesso chi vuole realmente documentarsi su basi scientifiche oggettive e non emotive, fatica a trovare dei validi riferimenti.

Per questo motivo con questa pubblicazione si è voluto mettere a disposizione di chi ne è veramente interessato una serie di informazioni ricavate da studi effettuati nei migliori istituti europei che stanno studiando l'argomento.

Accanto alle informazioni rigorosamente scientifiche si è voluto dare un taglio divulgativo alla pubblicazione cercando di renderla il più possibile di facile e gradevole lettura.

L'amministratore Unico
di Veneto Agricoltura
Paolo Pizzolato

SOMMARIO

1. STIMA DEL CONSUMO DI COMBUSTIBILI LEGNOSI IN VENETO **8**

1.1 Consumo di legna da ardere e pellet in apparecchi domestici 8

1.2 Consumo di biomasse legnose in caldaie centralizzate 9

2. EMISSIONI DEGLI APPARECCHI TERMICI **10**

2.1 Combustione del legno 10

2.2 Requisiti tecnico-costruttivi degli apparecchi 11

2.3 Formazione delle emissioni 12

2.4 Indicatori tecnico-ambientali degli apparecchi 13

2.4.1 Rendimenti 13

2.4.2 Emissioni 15

2.4.3 Livello di tossicità del particolato 24

3. NORMATIVA **27**

3.1 Norma UNI EN 303-5 27

3.2 Normativa italiana 28

3.3 Normativa in altri Paesi europei 29

3.3.1 Austria 29

3.3.2 Svizzera 29

3.3.3 Germania 30

4. CONSIDERAZIONI E PROPOSTE **32**

BIBLIOGRAFIA 34

Pagina precedente: *Altopiano di Asiago, utilizzazioni boschive orientate alla produzione di cippato*

1. STIMA DEL CONSUMO DI COMBUSTIBILI LEGNOSI IN VENETO

1.1 CONSUMO DI LEGNA DA ARDERE E PELLET IN APPARECCHI DOMESTICI

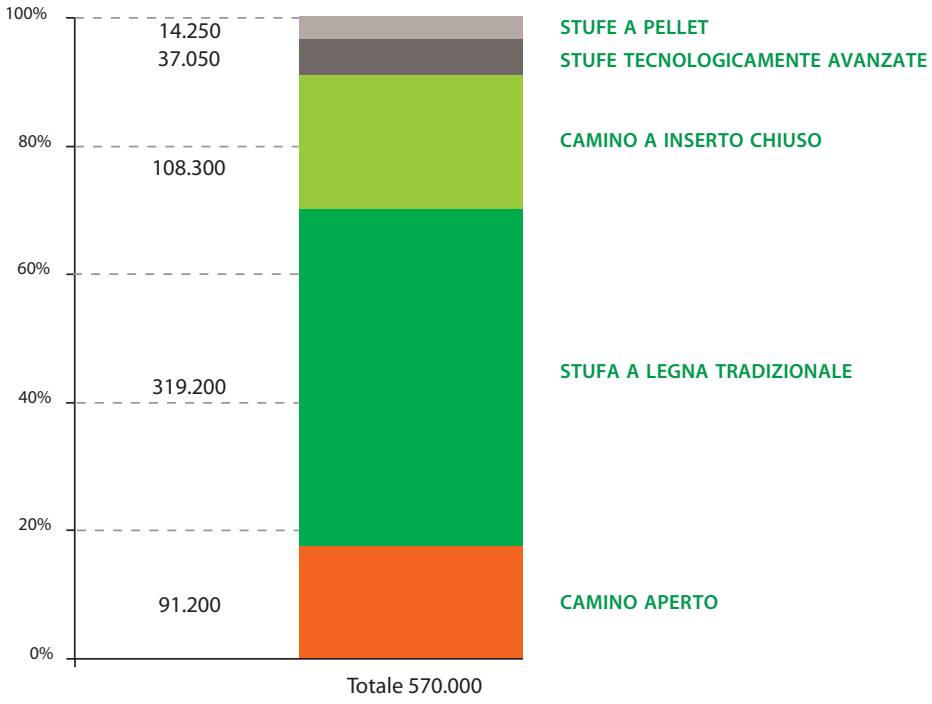
Dall'elaborazione dei dati di una recente ricerca condotta da APAT Lombardia emerge che **in Veneto si consumano mediamente ca. 2 milioni di tonnellate all'anno di legna da ardere e 41.000 t di pellet**, destinati agli apparecchi termici domestici (tabella 1.1), esclusa la legna impiegata dalle pizzerie. Il 90% sono apparecchi domestici tradizionali, di cui il 56% sono stufe a legna; meno del 10% sono stufe a legna tecnologicamente avanzate e stufe a pellet.

Nelle valli montane oltre il 50% delle famiglie usa la legna come fonte primaria per il riscaldamento e più del 70% come fonte secondaria. L'apparecchio domestico più diffuso (64%) è la stufa economica [1].

Tabella 1.1 **Consumo di combustibili legnosi per stufe e caminetti** (fonte: APAT Lombardia – elab. Paniz)

Famiglie che usano la legna	N° apparecchi termici domestici	Consumo medio annuo per abitazione	Consumo medio annuo di legna	Consumo medio annuo di pellet
341.000 (17%)	570.000	4,7 t	2.000.000 t	41.000 t

Figura 1.1 **Diffusione delle differenti tipologie di apparecchi a uso domestico**



CONSUMO DI BIOMASSE LEGNOSE IN CALDAIE CENTRALIZZATE

1.2

Ad oggi non esiste nessuna fonte ufficiale rispetto al numero e alle caratteristiche degli impianti installati in regione. Sulla base di un recente censimento che ha considerato gli impianti che hanno ottenuto gli incentivi del PSR (2000-2006) e quelli segnalati da alcuni produttori/rivenditori di caldaie (15), si stima che siano presenti in Veneto ca. 470 impianti alimentati con combustibili legnosi, per una potenza termica complessivamente installata pari a 159 MW (tabella 1.2). A tali impianti si devono aggiungere 2 centrali dendroelettiche attive in provincia di Belluno e un grande teleriscaldamento con sistema di cogenerazione (Asiago).

Consumi di biomassa legnosa nelle caldaie centralizzate in Veneto (elab. Paniz, 2009) **Tabella 1.2**

	Numero	Consumo t/anno	Potenza installata MWt	Potenza media kWt
Cippato	115	32.223	45	390
Legna da ardere	151	3.001	4,8	30
Pellet	86	1.596	3,3	38
Pellet industriale	6	1.147	2,1	350
Scarti lavorazione industriale legno	112	183.015	103,7	1.000
Totale	**470**	**221.000**	**159**	
Centrali dendroelettriche (Cadore)	2	≈ 200.000	23 MWe	
CHP Asiago (VI)	1	≈ 17.000	10 MWt (+ 1 MWe)	
Totale	**473**	**438.000**	**169**	

I dati rilevati, in particolare per le caldaie a legna e a pellet, sono fortemente sottostimati poiché gran parte di questi apparecchi non beneficiano del PSR. Secondo dati ed elaborazioni più recenti è stato stimato che il numero delle caldaie (fino a 500 kWt) installate in Veneto sia dell'ordine del migliaio (tabella 1.3). Il dato regionale rimane tuttavia ancora sensibilmente sottostimato per la difficoltà a reperire dati rappresentativi e aggiornati del mercato di questi apparecchi.

Caldaie a legna, cippato e pellet fino a 500 kWt in alcune regioni italiane (elab. Francescato e Antonini, 2010) **Tabella 1.3**

Regioni/Province	Numero	MWt	Biomasse legnose (t/anno)
Bolzano	7.000	295	251.041
Veneto	985	181.5	154.275
Piemonte	347	92.4	78.540
Toscana	181	44.0	35.184
Friuli Venezia Giulia	191	15.3	12.997
Totale	**8.704**	**628.5**	**532.037**

Sulla base dei dati e delle stime disponibili si può affermare che annualmente in Veneto:

- circa **2 milioni di tonnellate di legna da ardere** (import incluso) sono impiegate in circa 570.000 apparecchi termici domestici di cui il 90% sono tecnologie tradizionali e obsolete;
- circa **500.000 tonnellate** di biomasse legnose di origine agroforestale e industriale (**cippato e pellet**, import incluso) sono utilizzate in caldaie centralizzate, sia per usi civili sia in processi industriali.

2. EMISSIONI DEGLI APPARECCHI TERMICI

2.1 COMBUSTIONE DEL LEGNO

Il processo di combustione può essere descritto attraverso i seguenti stadi intermedi successivi:

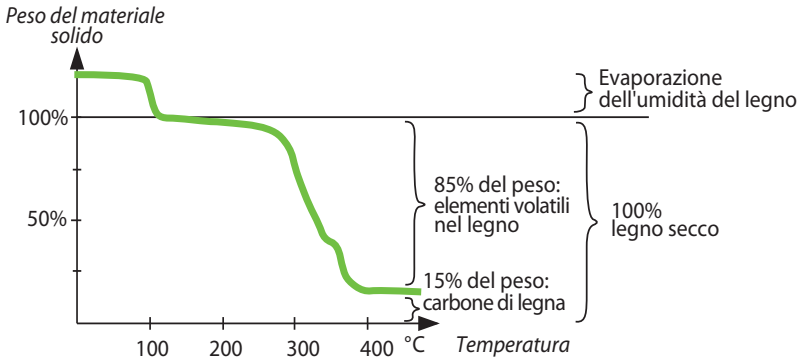
- **riscaldamento** del combustibile attraverso l'irradiamento della fiamma, del letto di braci e delle pareti della camera di combustione;
- **essiccazione** del combustibile attraverso l'evaporazione e il rilascio dell'acqua che avviene a partire da 100 °C;
- **decomposizione pirolitica** della sostanza secca (s.s.) del legno per effetto della temperatura a partire da 150 °C;
- **gassificazione** della s.s. del legno con ossigeno e formazione di gas combustibili (CO e C_nH_m) e carbone solido (da circa 250 °C);
- **gassificazione del carbone solido** con CO_2, vapore d'acqua e O_2 e formazione di CO (da ca. 500 °C);
- **ossidazione dei gas** combustibili con ossigeno e produzione di CO_2 e H_2O nell'ambito di un intervallo di temperature comprese tra 700 e 1400 °C (reale) fino a ca. 2000 °C (teorica);
- **trasferimento del calore** della fiamma allo scambiatore e in seguito al nuovo combustibile in ingresso.

Il legno è dapprima riscaldato attraverso l'irradiamento della fiamma, del letto di braci e delle pareti della camera di combustione, ma anche attraverso convezione e conduzione termica di calore nel combustibile. L'evaporazione dell'acqua inizia a partire da 100 °C. Non appena essiccate le particelle del combustibile, comincia la decomposizione pirolitica, indotta dall'aumento di temperatura che libera la componente volatile che rappresenta in termini ponderali circa l'85% del legno. Avviene così la rottura dei composti a catena lunga (nel legno per lo più la cellulosa) trasformati in composti a catena corta, da cui si formano gas combustibili quali il CO, gli idrocarburi carboniosi in forma gassosa e gli oli pirolitici (catrami).

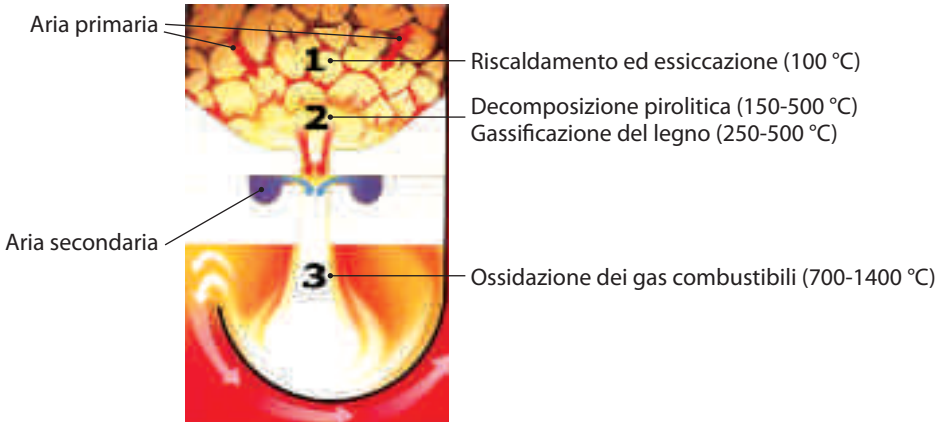
Per mantenere attivo il processo di gassificazione del legno e ottenere la potenza termica voluta, è fornita nella zona della decomposizione pirolitica (letto di braci) aria ossigenata chiamata "aria primaria". Nella fase di gassificazione è fornito il calore necessario alla reazione dei prodotti pirolitici gassosi, in presenza di ossigeno. Per permettere che i prodotti pirolitici solidi e gassosi (carbone, catrami) possano essere aggrediti è necessario arrivare ad una temperatura superiore ai 500 °C. Sotto l'effetto dell'aria-ossigenata qui iniettata ("aria secondaria"), avviene una più o meno completa ossidazione dei prodotti gassosi liberati quali il CO e C_nH_m, da cui, attraverso la formazione di prodotti intermedi (es idrogeno), si formano CO_2 e H_2O.

Nello stadio finale dei processi di combustione rimane, quale prodotto della degradazione termica del legno, il carbone solido che è dapprima gassificato sul letto di braci e alla fine ossidato nella fase gassosa. Infine, quale residuo solido della combustione rimangono le ceneri [2].

Suddivisione percentuale delle componenti del legno e loro comportamento durante la combustione [3] **Figura 2.1**



Fasi della combustione in un apparecchio termico a legna a tiraggio forzato per aspirazione **Figura 2.2**



REQUISITI TECNICO-COSTRUTTIVI DEGLI APPARECCHI 2.2

Per ottenere un elevato rendimento e un basso livello di emissioni nocive, la tecnica costruttiva degli apparecchi di combustione deve tenere in considerazione le differenti caratteristiche qualitative delle biomasse legnose.

Per ottenere un processo di combustione quanto più completo devono essere considerati i seguenti concetti di base:

- fornire un mezzo di ossidazione (**aria comburente**) in eccesso;
- raggiungere un sufficiente **tempo di permanenza** della miscela gas combustibili-aria comburente nella zona di reazione;
- raggiungere una **temperatura** di combustione sufficientemente elevata;
- garantire una buona **mescolanza** dei gas combustibili con l'aria comburente attraverso un'elevata turbolenza.

Questi requisiti tecnico-costruttivi sono riassunti dalla ***"Regola delle 3-T"*** (Tempo-Temperatura-Turbolenza) che indica, in modo sintetico, il fondamentale ruolo dell'ottimizzazione dell'intensità di mescolamento, del tempo di permanenza e della temperatura di combustione.

La combustione completa è naturalmente solo un concetto teorico, specie nei combustibili solidi quale è il legno, in quanto è problematico raggiungere e mantenere un corretto grado di mescolanza tra aria e combustibile in un periodo di tempo così limitato.

La combustione incompleta dà luogo a un'incompleta combustione dei gas e un aumento di incombusti sia organici che inorganici. Ciò si traduce in un aumento del contenuto di CO e polveri nei fumi esausti.

2.3 FORMAZIONE DELLE EMISSIONI

Le ragioni della non completa combustione sono riconducibili raramente a una non idonea fornitura di ossigeno. Più spesso sono causate da una scarsa temperatura nella zona di ossidazione che rallenta lo svolgimento del processo di ossidazione. Questo capita in particolare quando è impiegato combustibile troppo umido.

L'incompleta combustione avviene anche se i tempi di permanenza delle reazioni associate in una certa zona molto calda sono troppo scarsi (ad es. focolare troppo piccolo). Questo si verifica anche nel caso dei combustibili molto umidi; più alto è il contenuto idrico nel combustibile maggiore è il volume dei gas di scarico e quindi più basso diventa il loro tempo di permanenza nella camera di combustione. Inoltre si riduce la temperatura di combustione. Si può verificare anche una non idonea mescolanza dei gas combustibili prodotti con l'aria comburente (secondaria), in quanto per esempio non è prodotta abbastanza turbolenza nel focolare e così i gas combustibili non entrano sufficientemente in contatto con l'ossigeno.

Per raggiungere una quanto più possibile completa combustione devono essere quindi soddisfatte una serie di condizioni tecniche.

La figura 2.3 illustra in modo semplificato i processi di formazione delle polveri in forma di ceneri volatili grossolane e particolato fine (aerosol) attraverso la combustione del legno cippato in una caldaia a griglia mobile ad alimentazione laterale.

In riferimento alle moderne caldaie, la maggior parte delle polveri prodotte dalla combustione rientra nel campo dimensionale inferiore a 1 µm (figura 2.4), perciò le misure complessive di riduzione delle polveri devono essere rivolte contestualmente anche alla riduzione del particolato.

Figura 2.3 **Processi di formazione delle polveri grossolane e del particolato in una caldaia a griglia mobile [4]**

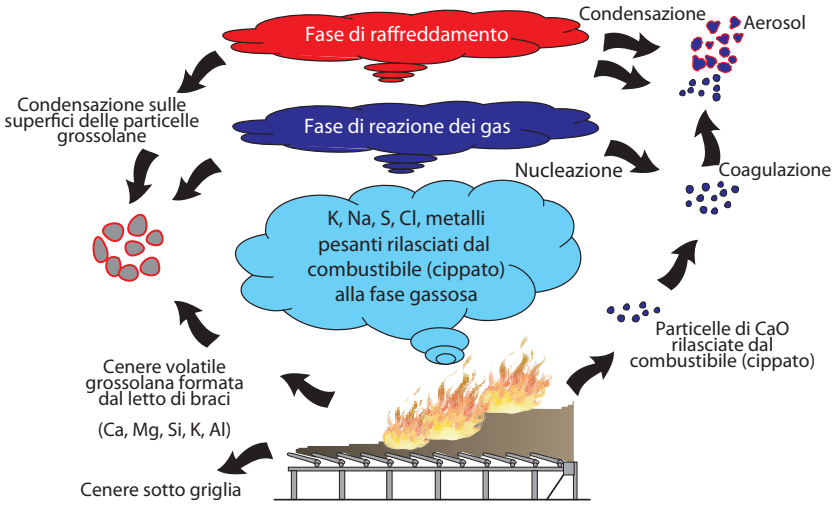
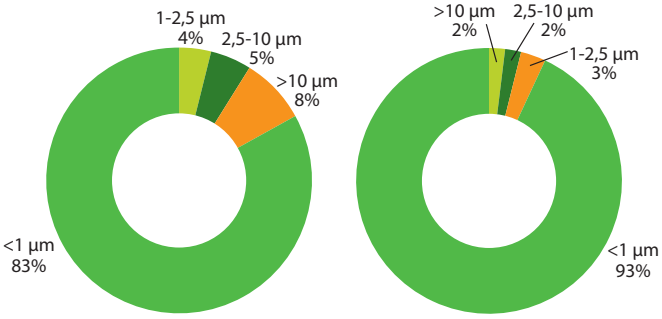


Figura 2.4 **Classificazione quantitativa dimensionale delle polveri prodotte da una caldaia a cippato e una a pellet [5]**



CALDAIA A CIPPATO 50 kW
emissioni di polveri totali: ca. 40 mg/Nm³

CALDAIA A PELLET 25 kW
emissioni di polveri totali: ca. 25 mg/Nm³

INDICATORI TECNICO-AMBIENTALI DEGLI APPARECCHI 2.4

Sono molti i parametri da prendere in considerazione per valutare compiutamente la bontà di un generatore termico a biomasse legnose. Solo pochi di questi consentono tuttavia un'oggettiva valutazione comparativa. Tra questi i più importanti sono il **rendimento** e il **livello d'emissioni nocive** che sono rilevati con metodi di prova uniformi e codificati e valgono in senso lato come indicatori tecnico-ambientali dell'apparecchio.

RENDIMENTI 2.4.1

Si distinguono il **rendimento al focolare** e il **rendimento della caldaia**. Negli apparecchi termici domestici è determinato solo il rendimento al focolare, poiché gran parte del calore utile è diffuso nell'ambiente da riscaldare e non indirettamente attraverso un vettore termico. Solo per le caldaie centralizzate è possibile determinare entrambi i rendimenti. Il rendimento al focolare comprende:

- le perdite di calore nei gas di scarico;
- le perdite nei residui (combustibili) che rimangono nelle ceneri;
- le perdite derivanti dalla combustione incompleta.

Il rendimento della caldaia invece, include anche le perdite per radiazione della superficie della caldaia che, nei piccoli impianti, corrisponde mediamente al 3%. La maggior parte delle perdite di calore va nei gas di scarico, perciò le misure costruttive per aumentare il rendimento sono dirette per lo più a ridurre la temperatura dei fumi, mentre il miglioramento della combustione dei gas serve principalmente a ridurre il carico di sostanze nocive nei fumi esausti. La temperatura dei gas di scarico non può però oltrepassare il punto di rugiada, al di sotto del quale si formano i condensati nella canna fumaria che creano danni lungo il suo tragitto e possono aumentare anche il pericolo d'incendio della stessa.

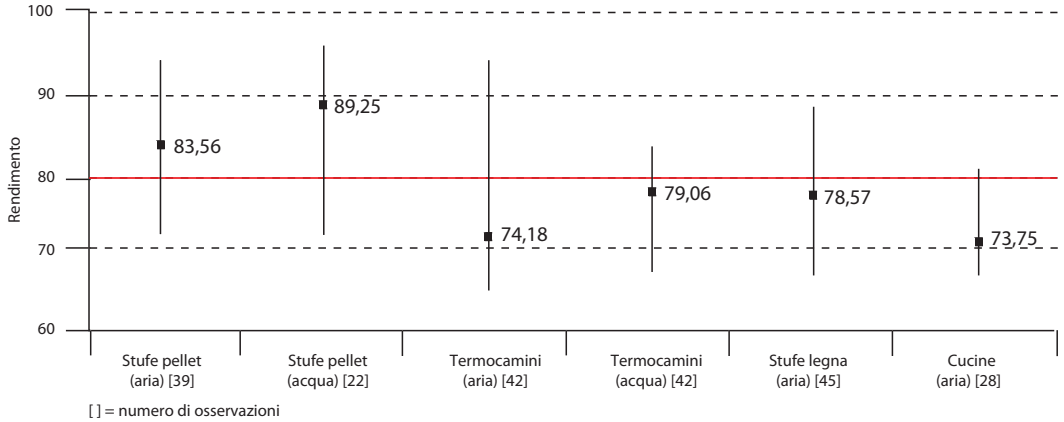
Rendimento degli apparecchi domestici

Il rendimento al focolare degli apparecchi domestici a legna raggiunge valori compresi tra il 70 e l'80% (figura 2.5). Le stufe a pellet raggiungono valori compresi tra l'80 e il 90%, quindi un rendimento comparabile con gran parte delle caldaie centralizzate a pellet.

I valori di rendimento illustrati in figura 2.5 fanno riferimento solo all'apparecchio, poiché la temperatura dei gas è misurata presso la stufa e non all'uscita del camino.

I moderni apparecchi termici domestici a legna a caricamento manuale migliorano continua-

Rendimento al focolare a potenza nominale degli apparecchi domestici a legna e pellet [6] (nostre elaborazioni su dati IMQ Primacontrol) **Figura 2.5**



mente il livello di rendimento, come testimoniano i dati; tuttavia, negli apparecchi manuali il rendimento è notevolmente influenzato dalla gestione, quindi i valori reali possono essere ben più bassi di quelli ottenuti nei banchi prova. Ad esempio, l'impiego di legna umida e/o di grande dimensione, un troppo elevato eccesso d'aria, un sovraccarico del focolare, possono compromettere fortemente il rendimento dell'apparecchio. Questi inconvenienti possono essere evitati quando il gestore segue rigorosamente le indicazioni riportate nel libretto di istruzioni.

L'influenza della gestione dell'apparecchio è molto meno rilevante nelle stufe a pellet, dove si impiega un combustibile omogeneo, peraltro caricato automaticamente.

Rendimento delle caldaie centralizzate

Il rendimento della caldaia, rispetto a quello al focolare, è più basso di 2-4 punti percentuali (figura 2.6). Le moderne caldaie raggiungono un rendimento superiore all'85% e nei modelli più recenti si oltrepassa stabilmente il 90%. Questo vale in particolare per le caldaie a pellet che in genere raggiungono un rendimento di 2-3 punti percentuali superiore alle caldaie a legna e cippato.

Le differenze tra modelli e classi di potenza sono comunque molto basse (perdite per radiazione).

Evoluzione del rendimento delle caldaie

Come si evince dai dati pubblicati dagli enti di certificazione preposti, negli ultimi 25 anni il rendimento delle caldaie è aumentato di circa 30 punti percentuali (figura 2.7).

Allo stato dell'arte, l'ulteriore aumento di rendimento è concepibile solo attraverso l'introduzione di scambiatori aggiuntivi con effetto di condensazione.

Figura 2.6 **Rendimento a potenza nominale delle caldaie a legna, cippato e pellet. Risultati di 10 anni di prove (1996-2006) presso il TFZ di Straubing (www.tfz.bayern.de) [5]**

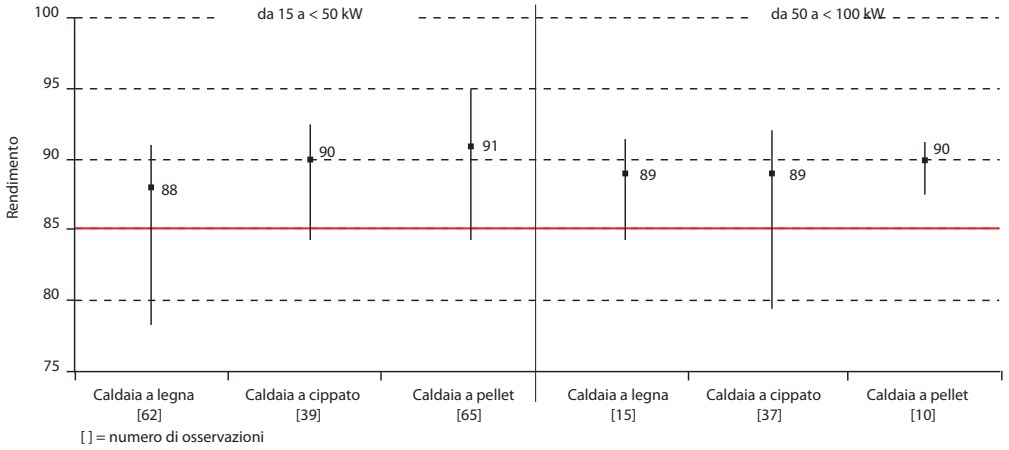
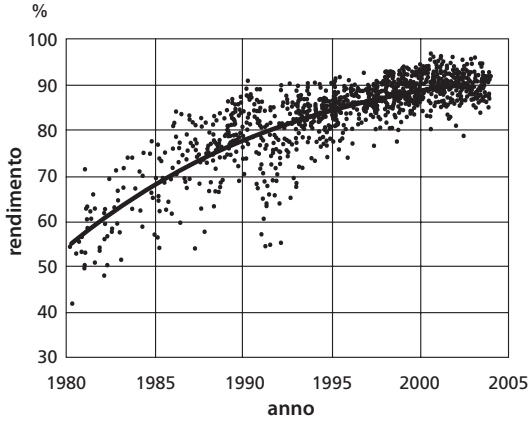


Figura 2.7 **Evoluzione del rendimento in caldaie manuali e automatiche di piccola taglia. Risultati delle prove di certificazione del BLT di Wieselburg (blt.josephinum.at)**



Composizione e impatto sulla salute

Le emissioni nocive degli apparecchi a biomasse legnose sono composte principalmente da quattro elementi:

- Monossido di carbonio (CO)
- Composti organici volatili (COV, C_nH_m)
- Polveri totali
- Polveri sottili
- Ossidi di azoto (NO_x)

Monossido di carbonio (CO). È un gas inodore che in atmosfera è rapidamente ossidato in CO_2. Poiché il CO è facilmente misurabile, è utilizzato per rilevare la bontà della combustione e rappresenta quindi il parametro di emissione più spesso misurato a valle dei processi di combustione.

Composti organici volatili (COV). Sono composti a elevato peso molecolare spesso indicati semplicemente come idrocarburi carboniosi (C_nH_m). A differenza del CO formano un gruppo di sostanze con un impatto sulla salute umana e sull'ambiente notevolmente maggiore, poiché sono classificati in parte come sostanze cancerogene. I COV sono caratterizzati da un odore molto forte che arreca notevole disturbo. Come il CO essi sono il risultato della combustione incompleta.

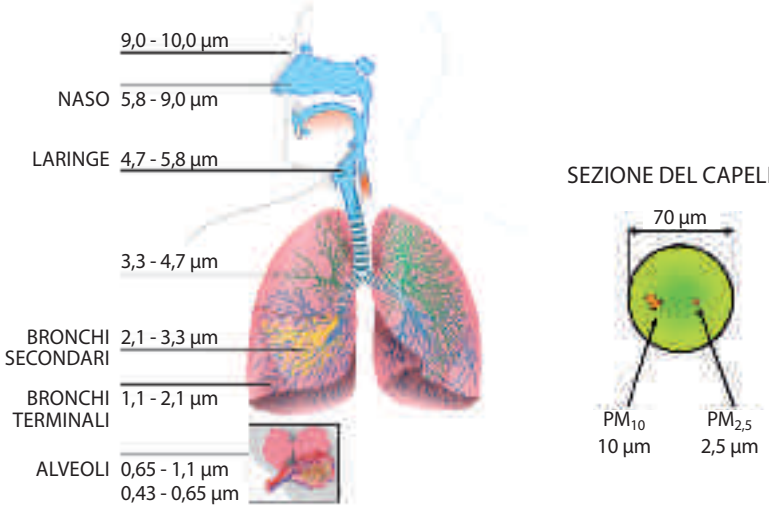
Polveri totali. Consistono nella parte separata, con apposito filtro, dai gas di scarico della combustione dei combustibili solidi. Esse contengono principalmente elementi minerali del combustibile (particelle di cenere). A seconda della bontà della combustione possono essere originati anche incombusti carboniosi organici e catrami. Sulla superficie delle polveri possono essere adsorbiti gli altamente tossici composti policiclici aromatici e le diossine. Questo effetto si rileva in particolare nella componente più fine delle polveri dei gas di scarico (particolato), a causa della loro elevata superficie. Queste sostanze sono in parte raccolte nelle ceneri di risulta dalla pulizia dello scambiatore e del camino.

Polveri sottili (PM). Con questo termine sono indicate tutte le particelle con un *diametro aerodinamico equivalente* (d_{ae}*) inferiore ai 10 µm. Sotto 1 µm inizia il così detto campo dimensionale submicron. Per la salute umana sono significative soprattutto le particelle che riescono a penetrare nel sistema respiratorio (polmoni). Mentre le particelle con d_{ae}>10 µm sono trattenute quasi completamente nel naso e nella gola. Nel campo inferiore ai 2,5 µm una gran parte delle particelle entra nei polmoni e sotto 1 µm entrano negli alveoli e si depositano nei tessuti polmonari.

* Le particelle sono molto variabili rispetto alla loro densità (rapporto massa/volume) e spesso non hanno una forma sferica. Quando si parla del loro diametro, quindi, ci si riferisce a un diametro "equivalente", il cosiddetto diametro aerodinamico, ovvero il diametro di una particella sferica con una densità di 1 g/cm^3, ma con una velocità di sedimentazione uguale a quella della particella in questione.

Penetrazione delle polveri nell'apparato respiratorio in funzione della loro dimensione [7]
A destra: raffronto dimensionale tra un capello umano, il PM10 e il PM 2,5 [8]

Figura 2.8



Le polveri sottili si differenziano a seconda della composizione chimica dei loro costituenti (solfati, metalli pesanti, composti organici e inorganici) e in base alle sorgenti che originano tali costituenti (ad es., il particolato da combustione dei motori diesel). Dimensione e composizione del PM dipendono non solo dai processi emissivi ma, in particolare per le frazioni più fini, anche dai processi di trasformazione ai quali le particelle vanno incontro dopo la loro emissione in atmosfera. Nella massa delle particelle sono presenti due componenti correlate alla dimensione granulometrica: quella più fine, che arriva sino a circa 1 µm, si origina generalmente da processi che avvengono a elevate temperature e/o processi di formazione "secondaria" gas-particella. I processi meccanici come l'erosione, la corrosione e l'abrasione di materiali producono le particelle più grossolane, generalmente maggiori di 1 µm, che rappresentano la seconda componente. Esse trasportano, ad esempio, componenti del suolo e spray marino. Un'altra frazione, le particelle ultrafini con dimensione inferiore a 0,1 µm, si può caratterizzare meglio attraverso il conteggio del numero di particelle per cm^3, perché nonostante siano abbondanti in numero contribuiscono solo in piccola parte alla massa del PM. Le particelle grandi e molto piccole hanno un tempo di residenza in atmosfera che dipende dai processi di deposizione e coagulazione. Le particelle che sono comprese approssimativamente tra 0,1 e pochi µm permangono più a lungo in atmosfera (tipicamente da alcuni giorni ad una settimana) e possono conseguentemente essere trasportate per lunghe distanze (1.000 o più chilometri).

Il PM è emesso direttamente da sorgenti "primarie" (PM primario), ma si forma in atmosfera anche per reazioni (omogenee o eterogenee) di precursori gassosi (PM secondario). Altre distinzioni comuni si riferiscono a sorgenti naturali/antropiche e a sorgenti derivanti, o meno, da processi di combustione. La stima delle emissioni prodotte da sorgenti nelle quali non sono coinvolti processi di combustione presenta un considerevole grado di incertezza [8].

Le polveri sottili sono considerate particolarmente tossiche quando originate da processi di combustione poiché, come già accennato, sulle loro superfici adsorbono incombusti carboniosi o possono condurre metalli pesanti e così fungono da vettori di trasporto di sostanze nocive [5].

Ossidi di azoto. Inizialmente sono emessi in forma di NO e poi, in presenza di ossigeno, sono rapidamente ossidati in diossido di azoto (NO_2); entrambe i composti sono indicati come NO_x. Essi derivano sostanzialmente dall'azoto contenuto nel combustibile che nel legno assume valori relativamente bassi (0,15%). La reazione dell'azoto con l'ossigeno avviene a temperature superiori a 1.300 °C, che nel corso della combustione del legno si manifestano per lo più solo localmente e temporaneamente. L'NO_2 è un gas tossico con odore penetrante, percepito a partire da 1 ppm. A partire da 25 ppm crea bruciori agli occhi e da 150 ppm può provocare danni all'apparato respiratorio. Gli ossidi di azoto partecipano anche alla formazione dell'ozono che provoca bruciore agli occhi, mal di testa, disturbi respiratori, oltre a contribuire all'effetto serra.

Oltre ai sopraccitati e misurabili parametri standard delle emissioni, come per tutti i processi di combustione esistono poi ulteriori emissioni nocive.

Qui sono annoverati il gruppo degli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), delle sostanze nocive a base di cloro (HCl, diossine e furani) e dei metalli pesanti emessi con i gas di scarico. Anche la suddivisione dimensionale delle ceneri volatili emesse in forma di polveri rappresenta un importante criterio di valutazione. Tuttavia questo sarà trattato solo marginalmente nei prossimi capitoli, tanto più che nei piccoli apparecchi, che impiegano solo legno vergine, per tali composti non sono imposti limiti di legge perciò in questo ambito esistono pochi dati. Lo stesso discorso vale per le emissioni di SO_2.

Emissioni di CO negli apparecchi domestici

In letteratura sono presenti pochi dati sulle emissioni degli apparecchi domestici in quanto

la legislazione nazionale prevede limiti solo per il CO. Di seguito sono illustrati i valori di emissione di CO recentemente presentati (figura 2.9).
Le normative (UNI) riferite agli apparecchi termici domestici indicano che il valore di emissione di CO deve essere inferiore o uguale al valore dichiarato dal produttore e comunque non superiore a 12.500 mg/Nm^3. La UNI EN 15250 (2007) per gli apparecchi a lento rilascio di calore stabilisce il limite a 3.750 mg/Nm^3, mentre la UNI EN 14785 (2006) per gli apparecchi domestici a pellet di legno fissa il limite di CO a 500 mg per il funzionamento a potenza nominale e 750 mg/Nm^3 nelle prove a combustione lenta.

Emissioni di particolato nei piccoli apparecchi

Recentemente sono stati pubblicati i risultati di uno studio della Task 32 dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA, www.ieabcc.nl [10]) 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).
In particolare gli apparecchi manuali sono caratterizzati da un ampio intervallo del fattore di emissione e i valori reali sono spesso significativamente maggiori di quelli di prova. Inoltre la non corretta gestione dell'apparecchio può causare un aumento del fattore di emissione di circa 10 volte. Per questo motivo l'inventario riporta i dati distinguendoli in valori medi, valori in condizioni di funzionamento ottimali e valori rilevabili nelle peggiori condizioni. Il fattore di emissione è espresso in mg di particolato emesso per MJ di energia utile riferita al potere calorifico inferiore del legno (mg/MJ). Per convertire questo valore in mg/Nm^3 può essere utilizzato il fattore approssimativo 1,5.

Fattore di emissione nei piccoli apparecchi

I dati sui camini aperti sono molto rari, per questi apparecchi risulta un fattore d'emissione molto variabile, in ogni caso in media è ca. 250 mg/MJ (375 mg/Nm^3). Nei camini a inserto chiuso (come definiti dalla EN 13229:2001), il risultato tipico varia tra 47 e 83 mg/MJ (70-125 mg/Nm^3) e quello migliore varia nel range 14-26 mg/MJ (21-40 mg/Nm^3); mentre nel peggiore dei casi raggiunge 204 mg/MJ (306 mg/Nm^3) .
Gli apparecchi a pellet e le caldaie a legna con tiraggio forzato raggiungono valori medi relativamente bassi, anche in condizioni di non ottimale gestione (risultato peggiore). Il valore tipico per questi apparecchi, nel caso di impiego di pellet e legna idonei (pellet di qualità attestata/certificata e legna vergine con contenuto idrico M ≤20%) è circa 30 mg/MJ (45 mg/Nm^3). Nei modelli più recenti di caldaie a pellet (es. condensazione) si sono raggiunti valori inferiori a 10 mg/MJ. Essendo tuttavia il pellet un combustibile di caratteristiche standardizzate impiegato in apparecchi ad alimentazione automatica

Emissioni di CO a potenza nominale degli apparecchi domestici a legna e pellet[6] **Figura 2.9**
(nostre elaborazioni su dati IMQ Primacontrol)

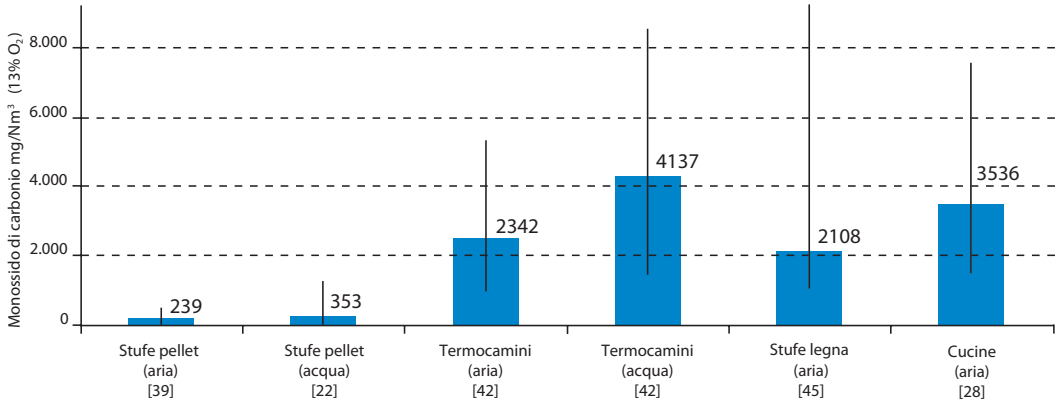
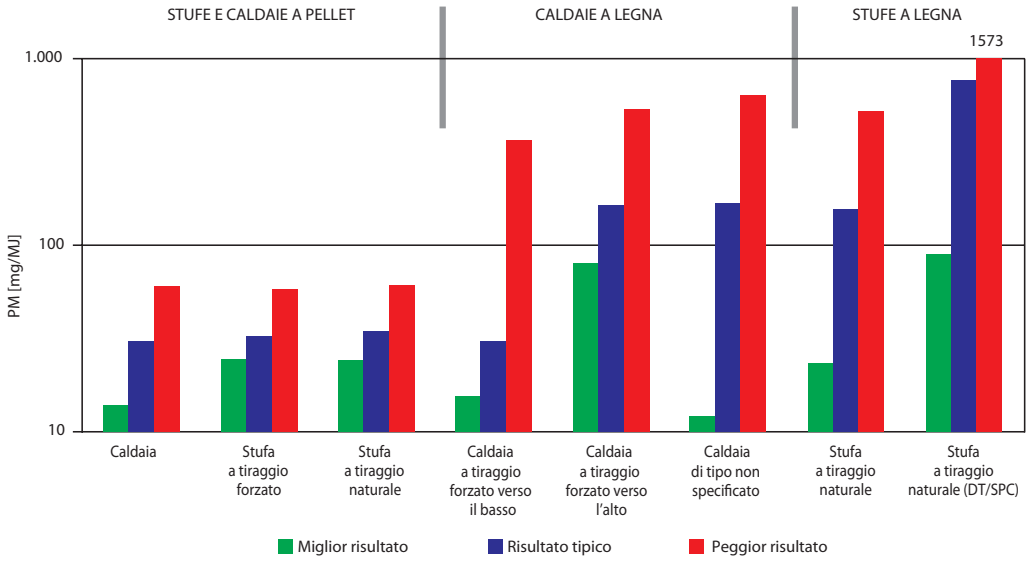


Figura 2.10 **Fattore di emissione medio, migliore e peggiore a confronto per alcuni tipi di apparecchi termici [10]**

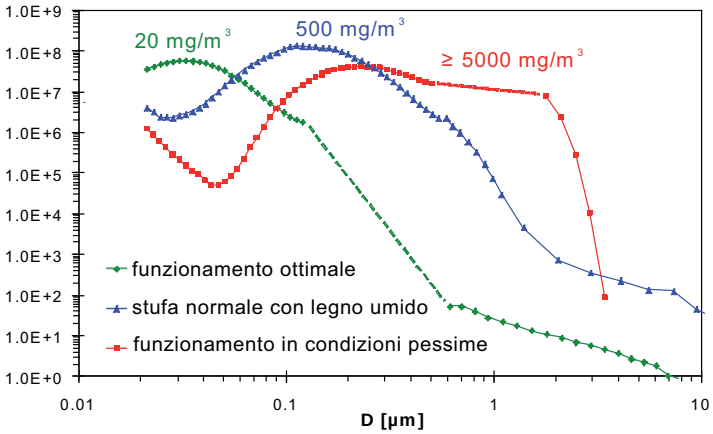


del focolare, l'aumento del fattore di emissione in caso di gestione non idonea è molto meno rilevante (fattore 2) rispetto alla legna (fattore 10). Inoltre negli apparecchi a legna la fase di accensione può contribuire ad aumentare il valore medio del fattore di emissione.

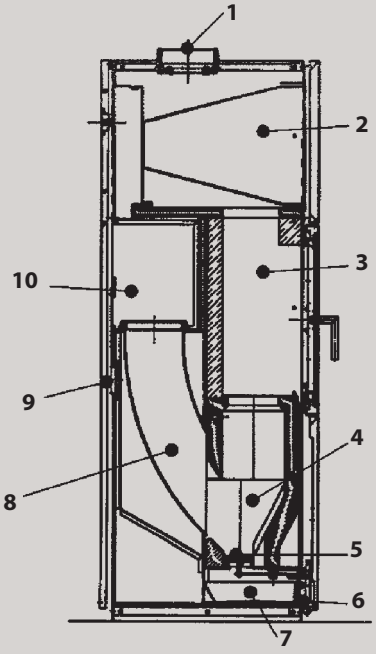
Le stufe a legna hanno tipicamente un fattore di emissione di PM di 150 mg/MJ (225 mg/Nm^3), ipotizzando un fase di accensione ottimale, caso piuttosto raro nella pratica. L'elevato fattore di emissione è dovuto essenzialmente alle continue cariche manuali e al frequente uso di legna di dimensioni e contenuto idrico non ottimali.

Riguardo alle stufe a legna, recenti ricerche hanno dimostrato che il campo di variazione del fattore di emissione è notevolmente ampio: da 20 fino a 5.000 mg/Nm^3. Negli apparecchi domestici manuali infatti la gestione riveste un ruolo determinante sul fattore di emissione. È stato riscontrato che una stufa a legna certificata con marchio di qualità per un livello di emissione di polveri inferiore a 50 mg/Nm^3, nel caso di caricamento con ciocchi molto grandi raggiunge facilmente i 250 mg/Nm^3 e se la legna è umida possono essere raggiunti addirittura i 500 mg/Nm^3. In una stufa a legna semplice (non certificata) in condizioni di pessimo funzionamento e registri dell'aria chiusi si sono raggiunti addirittura 5.000 mg/Nm^3 di polveri (figura 2.11).

Ripartizione dimensionale del PM e valori di emissione in diverse condizioni di funzionamento [11] **Figura 2.11**



Lo studio ha dimostrato inoltre che nel caso d'impiego di una **stufa tecnologicamente innovativa**, con divisione interna tra vano di carico della legna e la camera di combustione e una combustione a due stadi con immissione d'aria secondaria nella camera di post-combustione rivestita in refrattario, sono stati rilevati, con funzionamento ottimizzato, emissioni di polveri molto basse, inferiori a 20 mg/Nm^3 (figura 2.11). Nel caso di funzionamento normale, non sorvegliato, e l'impiego di ciocchi di legna (classici) le emissioni si mantenevano inferiori a 50 mg/Nm^3. In questo caso le caratteristiche costruttive della stufa impediscono, di fatto, un sovraccarico della camera di combustione. Nel caso d'uso di legna eccessivamente umida, dopo poco avviene lo spegnimento della stufa, impedendo così un funzionamento a lungo termine in condizioni molto sfavorevoli per la combustione.



1 raccordo canna fumaria
2 modulo convettivo/di accumulo
3 fuoco
4 storta della camera di combustione per legna in ciocchi
5 griglia scuoticenere
6 entrata aria primaria
7 cassetto cenere
8 vano di riempimento
9 entrata aria secondaria
10 apertura per carico

L'impiego di una stufa con combustione a due stadi e funzionamento ottimale, consente di raggiungere un fattore di emissione di 10 mg/Nm^3. Impiegando legna stagionata (M30) le emissioni rimangono comunque nel range 20-50 mg/Nm^3 [11].

Fattore di emissione delle moderne caldaie a legna

Nelle caldaie a fiamma superiore e tiraggio naturale (senza ventilatore) il valore tipico del fattore di emissione si attesta attorno a 100 mg/MJ (150 mg/Nm^3). Il progresso tecnologico ha consentito di migliorare sensibilmente questo valore.

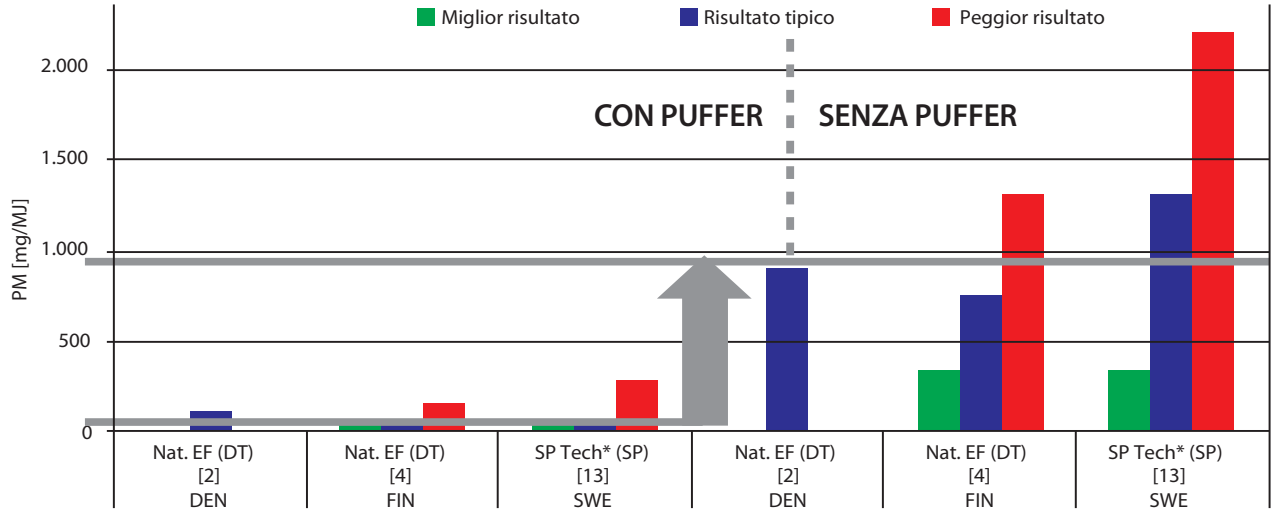
1. *Aria primaria pre-riscaldata*
2. *Aria secondaria*
3. *Turbo-camera di combustione*
4. *Turbolatori verticali*
5. *Sonda Lambda*
6. *Ventilatore a tiraggio forzato e regolazione elettronica*
7. *Pannello elettronico di comando*

Le caldaie a legna più evolute sono infatti dotate generalmente di un focolare a fiamma inferiore o laterale nel quale la combustione avviene in due stadi. L'aria primaria stimola la decomposizione pirolitica del legno, mentre l'aria secondaria favorisce la fase di ossidazione della componente volatile nella zona di post-combustione. Si tratta di caldaie a tiraggio forzato per aspirazione con complessi sistemi di regolazione elettronica della potenza e della combustione (Lambda) che, in base alla condizione dei fumi di scarico, agiscono sui ventilatori primari e secondari. In questi apparecchi il tipico valore del fattore di emissione è circa 33 mg/MJ (50 mg/Nm^3), inclusa l'accensione. In Austria sono stati rilevati persino valori di ca. 10 mg/MJ (15 mg/Nm^3), inclusa l'accensione [10]. Anche nelle moderne caldaie a legna il contenuto idrico influenza fortemente le emissioni di particolato. In una moderna caldaia manuale impiegando legna da ardere con contenuto idrico del 23% il fattore di emissione rimane inferiore ai 90 mg/Nm^3, mentre passando al 31% le emissioni di polveri aumentano a 414 mg/Nm^3 [12].

Importanza dell'accumulatore

Come illustra la figura 2.12, nelle caldaie a legna l'installazione di un accumulatore (puffer) adeguatamente dimensionato (come definito nella UNI EN 303-5) influenza positivamente il fattore di emissione. La presenza del puffer consente infatti di far lavorare la caldaia a pieno carico riducendo al minimo le fasi di carico parziale, ovvero quelle più sfavorevoli per la combustione [10, 2].

Figura 2.12 **Influenza dell'accumulatore (puffer) sul fattore di emissione di una caldaia a legna**



* = Misura con accensione (DT) = Tunnel di diluizione Nat. EF = Fattore di emissione nazionale SP = Particolato solido (metodo con filtro)

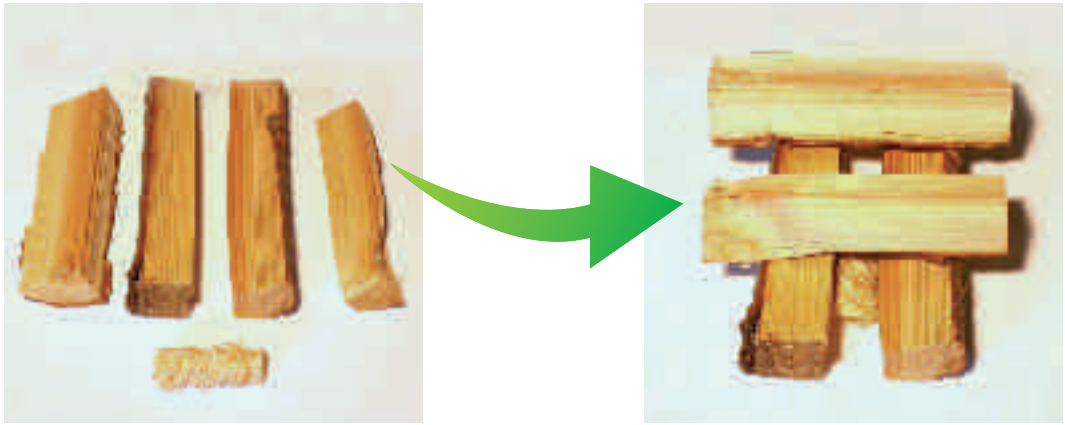
Influenza dei metodi di accensione

Il metodo di accensione per gli apparecchi con fiamma superiore è una fase della gestione che ha un importante effetto sul fattore di emissione del particolato, sia nelle fasi di accensione sia di caricamento intermedio. Accanto quindi alla dimensione della legna e al suo contenuto idrico anche il punto in cui si accende il fuoco contribuisce ad una combustione migliore e a più basse emissioni.

Per dimostrare l'influenza di questa fase sono stati posti a confronto due metodi di accensione: il primo prevede l'accensione della carica di legna dall'alto (metodo innovativo) mentre il secondo consiste nell'accendere il fuoco in modo tradizionale dal basso. Nel primo caso è stato usato un "modulo di accensione" composto di 4 pezzetti di legna secca (3x3x20 cm) - disposti come illustrato in figura 2.13 - sotto i quali è stato inserito l'accendi fuoco, composto di un batuffolo di lana di legno impregnato di cera. Al contrario dell'accensione tradizionale dal basso, il legno brucia gradualmente dall'alto verso il basso, ottenendo una completa combustione del carico che procede più lentamente e in modo più controllato. La fiamma richiama i gas combustibili del legno che, passando attraverso la fiamma medesima ad altissime temperature, bruciano pressoché completamente (ossidazione) riducendo fortemente la presenza dei nocivi incombusti carboniosi (figura 2.14).

Confrontando i due metodi sia in stufe sia in inserti, si è potuto rilevare una riduzione delle polveri totali del 50-80% (70-120 mg/Nm^3 al 13% di O_2) rispetto al metodo di accensione tradizionale (200-500 mg/Nm^3 al 13% di O_2) [10].

Modulo di accensione innovativo **Figura 2.13**



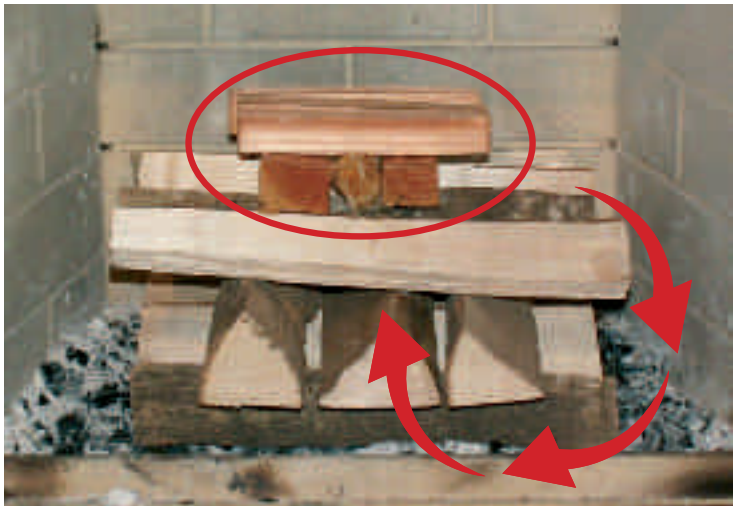
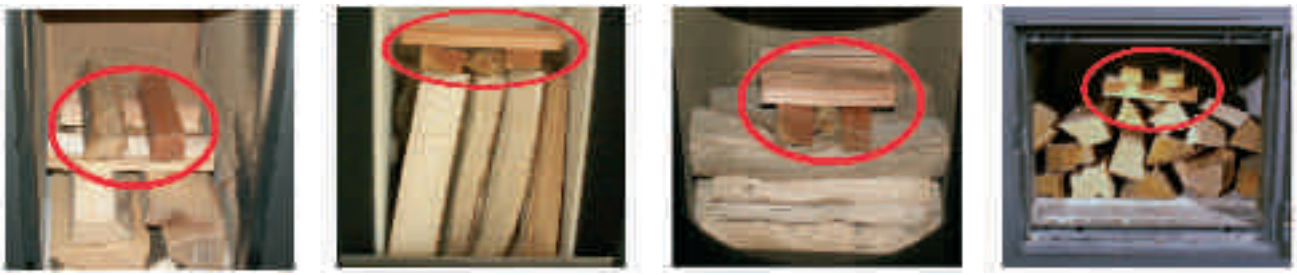


Figura 2.14



Modalità diverse di disposizione della legna per la sua accensione dall'alto

Il metodo di accensione dall'alto si applica principalmente a stufe a legna, stufe ad accumulo, camini a inserto. La figura di seguito mostra diverse modalità di carico in funzione del tipo di apparecchio e della dimensione della camera di combustione.

Il fumo è un primo indicatore della produzione del particolato. Nel caso di una gestione corretta dell'apparecchio (impiego di legna M20, accensione dall'alto), nella fase di accensione il fumo della combustione diventa invisibile al più tardi dopo 15 minuti dall'accensione. Altro importante fattore per gli apparecchi a legna, privi di camera di post-combustione, è il grado di riempimento della camera di combustione la quale funge da area di combustione dei gas. Se è troppo ridotta (eccessivo riempimento) la fase di mescolamento e di ossidazione dei gas è insufficiente e pertanto il fattore di emissione è più elevato.

REGOLE PER LA CORRETTA GESTIONE DI UN APPARECCHIO DOMESTICO A LEGNA

www.energia-legno.ch

- Non sovraccaricare la camera di combustione e consultare le istruzioni del costruttore.
- Non soffocare il fuoco chiudendo le prese d'aria o la cappa della canna fumaria.
- Aggiungere solo singoli ciocchi o bricchetti. Posarli sulle braci ardenti, in modo che la legna cominci subito a bruciare. Non soffocare il fuoco una volta aggiunto il combustibile (pericolo di esplosione). Nelle stufe ad accumulo, non aggiungere ulteriore legna tra due cariche.
- Chiudere le prese d'aria solo quando le braci sono quasi completamente spente, in modo che la stufa non si raffreddi troppo velocemente. Chiudere la cappa della canna fumaria solo quando le braci sono spente.
- Una volta raffreddata, smaltire la cenere con i rifiuti domestici.
- La pulizia regolare da parte di uno spazzacamino riduce le emissioni di polveri fini.

Fattore di emissione nelle moderne caldaie automatiche a cippato

Il fattore di emissione nelle caldaie a cippato di piccola e media potenza (fino a ca. 500 kW) varia tipicamente nell'intervallo 50-100 mg/MJ (75-150 mg/Nm^3) [10]. Nonostante l'alimentazione automatica, anche in questo caso la gestione dell'impianto gioca un ruolo decisivo (qualità cippato, manutenzione, dimensionamento caldaia, configurazione idraulica dell'impianto) [2].

Il campo di variazione del fattore di emissione delle caldaie dipende molto dal livello tecnologico raggiunto dal mercato di riferimento. Si presentano di seguito i dati più recenti pubblicati da due tra i più autorevoli gruppi di ricerca europei che si occupano di quest'argomento.

La figura 2.15 illustra i valori medi d'emissione delle caldaie a legna, cippato e pellet, misurati dal TFZ di Straubing (Baviera) nel decennio 1996-2006 [5].

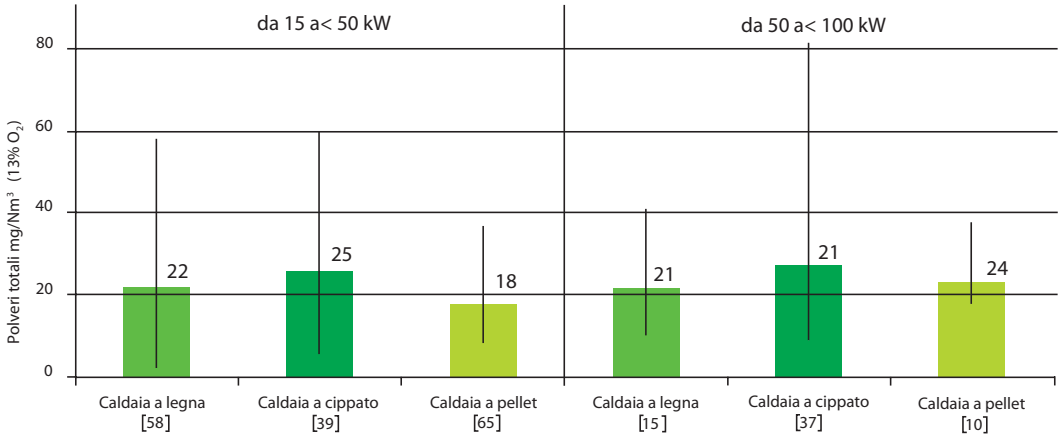
La tabella 2.1 riporta i valori medi rilevati in caldaie di piccola-media potenza nel corso di

Sezione di una moderna caldaia a cippato

169 prove di combustione effettuate presso il BLT di Wieselbug (Austria) nel periodo 1999-2004 [8].

Negli impianti con potenza superiore ai 500 kW il fattore di emissione è influenzato dal sistema filtro applicato. Installando un elettrofiltro o un filtro a manica a valle del multiciclone si riescono a garantire livelli di emissioni di PM inferiori ai 20 mg/Nm^3 [10].

Fattore di emissione a confronto per diversi tipi di caldaie [5] **Figura 2.15**



Emissioni espresse in mg/Nm^3 [8] **Tabella 2.1**

	NO_x	COV	CO	Polveri
Caldaia a legna	131	5	100	22
Caldaia a cippato	155	<2	28	28
Caldaia a pellet	125	<2	48	17

2.4.3 LIVELLO DI TOSSICITÀ DEL PARTICOLATO

Un aspetto che deve essere considerato è l'effetto nocivo delle diverse categorie di polveri. Di solito delle polveri si rileva solo la dimensione, sapendo che il particolato con diametro aerodinamico inferiore a 10 µm inizia a penetrare nel nostro sistema respiratorio, mentre normalmente non si considera l'intensità dell'effetto di tossicità delle polveri in funzione della loro composizione chimica.

In Svizzera al riguardo sono state compiute delle ricerche per confrontare il livello di tossicità delle polveri prodotte da una moderna caldaia automatica (100 kW) a cippato, tre tipi di stufe a legna e un'auto Diesel Euro III [11, 13].

Sono stati quindi quantificati i differenti effetti di citotossicità del particolato durante prove in vitro condotte sulle cellule polmonari V79 del criceto cinese. I risultati possono essere così riassunti:

- nel caso di combustione in una **moderna caldaia automatica** si raggiunge un'elevata qualità della combustione e di conseguenza un basso livello d'incombusti carboniosi e di fuliggine. Il particolato consiste principalmente di sostanze inorganiche, ovvero sali minerali (KCl, K_2SO_4, $CaCO_3$, e CaCO). La tossicità di questo particolato inorganico è risultata 5 volte inferiore alla fuliggine dell'auto diesel, che è composta invece di materiale carbonioso incombusto con una bassa frazione inorganica di ceneri;
- nel caso di una **stufa a legna tecnologicamente avanzata**, con combustione a due stadi ed immissione forzata d'aria secondaria per l'ossidazione dei gas combustibili del legno, le emissioni si mantengono molto basse e, nella fase di funzionamento ad alta temperatura, presentano una composizione chimica molto simile al particolato inorganico delle caldaie automatiche;
- nel caso di una **stufa a legna tradizionale a funzionamento normale** risulta una tossicità del particolato paragonabile a quella della fuliggine del Diesel;
- il particolato prodotto da una **stufa tradizionale non funzionante correttamente** (combustione incompleta) presenta una tossicità circa 10 volte più alta (gli IPA risultano 20 volte maggiori) rispetto alla fuliggine del Diesel. Se confrontata con il particolato inorganico, la tossicità è perciò circa 100 volte più alta.

I fattori d'emissione fin qui presentati indicano solo la concentrazione di massa del particolato senza alcun riferimento al livello di tossicità dello stesso. Sulla base dei risultati di queste importanti ricerche, le comparazioni delle fonti d'emissione di particolato devono tener conto anche delle notevoli differenze, in termini di tossicità, del particolato inorganico prodotto da apparecchi tecnologicamente avanzati rispetto a quello prodotto da apparecchi tradizionali nella pratica quotidiana [10].

Filtri (300x400 mm) dopo il campionamento del particolato. A sinistra: *motore diesel (filtro caricato con 0,6 g di particolato).* A destra: *combustione quasi completa del legno (filtro caricato con 1 g di particolato)*

Misure primarie e secondarie

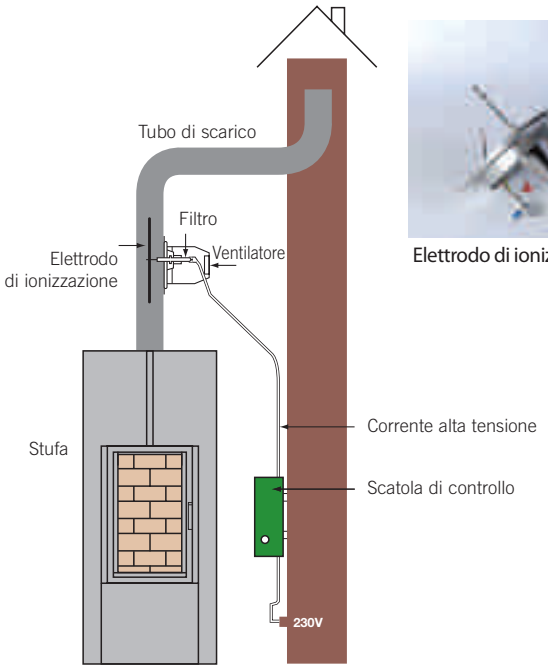
Le misure di riduzione delle polveri si dividono in **misure primarie**, che si riferiscono ai nuovi sviluppi tecnologici degli apparecchi (geometria della camera, immissione di aria, regolazioni) e **misure secondarie** che invece si riferiscono ai sistemi di separazione (filtri).

Riguardo agli **apparecchi domestici manuali** esistono ancora ampi margini di miglioramento con ricorso a misure primarie quali l'equipaggiamento degli apparecchi con opportuni sistemi di regolazione e controllo che permettano di migliorare le fasi più critiche del processo di combustione. L'altro elemento fondamentale sul quale si deve agire è la qualità della legna da ardere. Bassi contenuti idrici (M<20%), di cenere e una pezzatura idonea dei ciocchi giocano un ruolo fondamentale sulla riduzione del fattore di emissione degli apparecchi domestici [12].

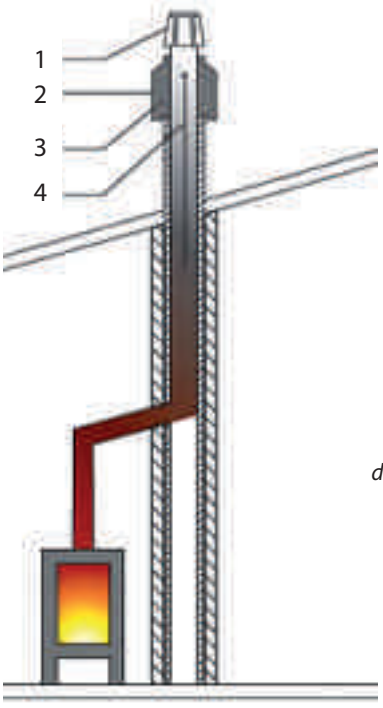
Anche sul lato dello sviluppo tecnologico delle **caldaie** ci sono certamente ancora margini di miglioramento; ad esempio recenti ricerche hanno dimostrato come attraverso una calibrata gradazione dell'aria comburente e un minore eccesso d'aria (in particolare nella zona del letto di braci) si possa ottenere un significativo effetto di riduzione dell'emissione di polveri (–70-80%) [11]. Riguardo alle piccole caldaie a pellet (10-25 kW) sono in corso attività di ricerca sul miglioramento della fase di ossidazione (post-combustione) agendo su aria secondaria, temperatura e turbolenza con il supporto di modelli di simulazione (CFD). Con questo nuovo concetto si ritiene raggiungibile il limite di emissione di 10 mg/Nm^3 [15].

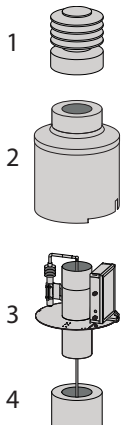
Riguardo alle **misure secondarie per gli apparecchi domestici**, sono stati messi a punto, e recentemente proposti sul mercato, dei minifiltri elettrostatici con una capacità di separazione del 50-80% (www.ruegg-cheminee.com; www.spartherm.com; www.oekotube.ch). Uno di questi filtri è stato testato dall'Università di Trento attraverso una campagna di misurazioni che sembra confermare la bontà del livello di separazione, tuttavia i risultati di questa ricerca non sono ancora stati resi pubblici.

Recentemente sono stati testati un minielettrofiltro (Spanner Re^2 GmbH) e un minicondensatore (SGL Carbon AG) rispettivamente su una **moderna caldaia** a legna (30 kW) e una a cippato (50 kW). L'elettrofiltro ha consentito di portare il livello di particolato sotto i 10 mg/Nm^3 mostrando un grado di separazione oscillante tra l'80 e il 90%. Il minicondensatore, invece, ha consentito di raggiungere livelli medi di separazione del 30% e un aumento del rendimento del 10% [12].



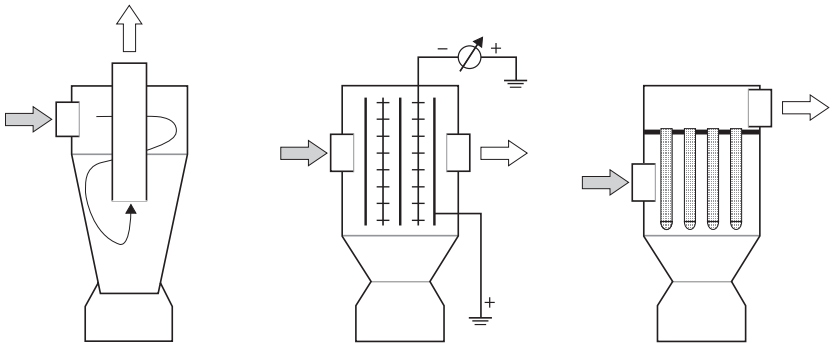
Elettrodo di ionizzazione





A sinistra: *minifiltro distribuito dalla Rüegg Cheminée*
A destra: *minifiltro distribuito dalla Ökotube*

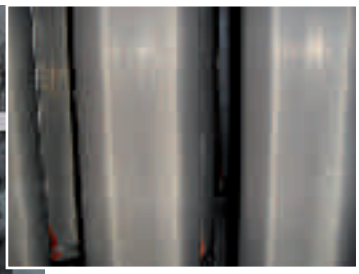
Figura 2.16 **Principi di funzionamento dei filtri a gravità (cicloni e multicicloni, sinistra) degli elettrofiltri (centro) e dei filtri a manica (destra) [16]**



In riferimento alle caldaie, i sistemi a gravità (ciclone e multiciclone) non hanno nessun effetto di separazione sul particolato, perciò a valle del multiciclone si deve ricorrere ai più costosi filtri a manica o agli elettrofiltri (figura 2.16).

La restrizione dei limiti che sarà imposta in vari stati mitteleuropei nel breve periodo (§3), ha stimolato la ricerca tecnologica e l'implementazione di nuovi filtri elettrostatici e a manica (in acciaio) applicabili in impianti inferiori a 1 MWt che consentono di mantenere l'emissione di polveri rispettivamente sotto i 20 e i 5 mg/Nm^3 [17]. Nel corso delle ultime edizioni dell'*Holzenergie-Symposium* di Zurigo (2006 e 2008) sono stati presentati i risultati di alcune interessanti ricerche e implementazioni di filtri, sia elettrostatici che a manica, applicabili alle caldaie di piccola e media potenza, alcuni dei quali sono già disponibili sul mercato [18-22].

Tuttavia, la reale applicabilità di questi filtri negli impianti medio-piccoli (<1MW) richiederà, almeno inizialmente, specifici incentivi pubblici.



Filtro a maniche in acciaio per caldaie >100 kWt prodotto da www.uniconfort.com. Il costo del filtro per applicazioni fino a 150 kWt è di ca. 10.000 € e garantisce un fattore di emissione di particolato <10 mg/Nm^3

Filtro ibrido elettrostatico-meccanico per caldaie serie Pyrot 220–540 KWt prodotto da www.viessmann.it. Il costo di questo filtro è di circa 15.000 € e garantisce un fattore di emissione di particolato <20 mg/Nm^3 [19]

3. NORMATIVA

Si riportano le principali norme e leggi vigenti in Italia e in alcuni paesi europei che regolamentano i limiti di emissione degli apparecchi termici, con particolare riferimento alle polveri totali. Le norme e le leggi citate fanno riferimento esclusivamente ai biocombustibili legnosi prodotti a partire da legno vergine non contaminato.
In questo capitolo si riportano altresì le tendenze in atto dei limiti di emissione, allo scopo di fornire dei riferimenti per il futuro aggiornamento e adeguamento della normativa nazionale.

NORMA UNI EN 303-5 3.1

La norma europea EN 303-5 (aprile 1999) è stata recepita (UNI EN 303-5) in Italia nel 2004. La norma fu redatta sulla base dell'esperienza dell'Istituto federale austriaco per l'ingegneria agraria di Wieselburg (BLT). Questo ha permesso un'unitarietà e omogeneità nella conduzione delle prove e nella stesura dei rapporti dei sistemi a combustione in tutta Europa.
Tale norma, applicata su base volontaria, è valida per apparecchi sia a caricamento manuale che automatico di potenza non superiore ai 300 kW termici.
Essa fornisce indicazioni sui seguenti aspetti:

- requisiti di progettazione e costruttivi;
- requisiti minimi dei combustibili di prova;
- livelli di rendimento;
- limiti di emissione (potenza nominale e minima);
- specifiche sulla conduzione della prova della caldaia;
- determinazione e calcolo dei valori di emissione.

Non si applica agli apparecchi per il riscaldamento diretto dei locali in cui sono installate. Nel caso di caldaie manuali le misure sono effettuate in due diverse fasi successive di combustione completa, compresa quindi la ricarica.
Le caldaie sono sottoposte alle procedure standard di prova del rendimento termico nominale e sono classificate in base a tre curve di rendimento in funzione della potenza termica nominale e un coefficiente di classe.
I valori di emissione delle polveri totali sono opportunamente differenziati in funzione del sistema di caricamento e della classe di potenza delle caldaia.

Limiti di emissione della UNI EN 303-5 per le tre classi di rendimento **Tabella 3.1**

Alimentazione	Potenza termica nominale kW	mg/Nm^3 al 10% di O_2								
		CO			OCG (=COV)			Polveri totali		
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Manuale	<50	25.000	8.000	5.000	2.000	300	150	200	180	150
	>50 <150	12.500	5.000	2.500	1.500	200	100			
	>150 <300	12.500	2.000	1.200	1.500	200	100			
Automatica	<50	15.000	5.000	3.000	1.750	200	100	200	180	150
	>50 <150	12.500	4.500	2.500	1.250	150	80			
	>150 <300	12.500	2.000	1.200	1.250	150	80			

Tutte le emissioni sono calcolate con riferimento ai fumi secchi al 10% di ossigeno e in condizioni normalizzate (mg/m^3) a 0 °C e 1.013 mbar

A dieci anni dalla sua emanazione, la norma EN 303-5 è in fase di revisione e aggiornamento da parte del preposto comitato CEN/TC 57/WG1 a causa dell'evoluzione costruttiva e funzionale degli apparecchi termici a biocombustibili legnosi. Una prima modifica proposta è l'estensione della norma sino a una potenza di 500 kW, inoltre si vuole introdurre il principio per il quale i risultati delle prove di combustione eseguite con il combustibile più "problematico" saranno valide anche per quello di qualità superiore.

Altre proposte oggetto di discussione sono l'eliminazione delle prime due classi di rendimento (le meno restrittive) e la creazione delle nuove classi 4 e 5 per le quali saranno abbassati i limiti di emissione di polveri rispettivamente a 75 e 60 mg/Nm^3 per le manuali e 60 e 40 mg/Nm^3 per le automatiche. Il gruppo di lavoro (WG1) ha sottoposto il 30 aprile 2010 la proposta di revisione al Segretariato del CEN TC/57. La fase di valutazione è stata fissata dal 18 agosto 2010 al 17 gennaio 2011.

3.2 NORMATIVA ITALIANA

I limiti di emissioni e le caratteristiche delle biomasse combustibili sono definiti dal D.lgs. del 3 aprile 2006, n° 152 denominato "Norme in materia ambientale - Testo Unico Ambientale (TUA)". L'allegato 1 parte III del decreto stabilisce i valori d'emissione per specifiche tipologie d'impianti e al sottocapitolo 1.1 per impianti nei quali sono utilizzati combustibili solidi di cui all'allegato X, tra cui le biomasse combustibili (tabella 3.2). Si applica agli impianti nuovi e a quelli anteriori al 2006 autorizzati a partire dal 12 marzo 2002.

Per la norma italiana al di sotto dei 35 kW non esiste nessuna regolamentazione ai limiti di emissione. Inoltre non è fatta alcuna distinzione per quanto riguarda il sistema di alimentazione delle caldaia (manuale e automatico) e nemmeno sono distinti livelli minimi di rendimento degli apparecchi (classi).

Tabella 3.2 Limiti di emissione stabiliti dal D.lgs. 152/2006

	Potenza termica nominale installata				
	>35 <150 kW	>150 kW ≤3 MW	>3 ≤6 MW	>6 ≤20 MW	>20 MW
	Valori espressi in mg/Nm^3				
Polveri totali	200	100	30	30	30
Carbonio organico totale (COT)	-	-	-	30	20 10*
Monossido di carbonio (CO)	-	350	300	250 150*	200 100*
Ossidi di azoto (espressi in NO_2)	-	500	500	400 300*	400 200*
Ossidi di zolfo (espressi in SO_2)	-	200	200	200	200

I valori si riferiscono ad un tenore di ossigeno nell'effluente gassoso del 11%.
* Valori medi giornalieri

NORMATIVA IN ALTRI PAESI EUROPEI 3.3

AUSTRIA 3.3.1

L'Austria è il paese che ha elaborato e proposto la norma EN 303-5 e quindi l'ha adottata modificandola nei termini riportati nella tabella 3.3.
Fino a 300 kW, senza distinzione di classi di potenza e di tipologia di combustibile i limiti di emissione sono uguali per tutti gli apparecchi. Questi limiti sono validi per le aree residenziali.
Per le aree commerciali e industriali è in vigore un'altra legge che vale sia per caldaie ad acqua sia a vapore (tabella 3.4).

Limiti per le aree residenziali **Tabella 3.3**

Tipologia di alimentazione	Polveri totali	
	mg/MJ	mg/Nm^3
Manuale	60	88
Automatica	60	88

Limiti per le aree commerciali e industriali **Tabella 3.4**

Classi di potenza (MW)	Polveri (mg/Nm^3) (13% O_2)	
	Caldaia ad acqua	Caldaia a vapore
< 0,15	150	-
0,15-0,35	150	150
0,35-0,5	150	150
0,5-1	150	150
1-2	150	150
2-5	50	120
5-10	50	50
10-50	50	50
50-300	50	50
> 300	50	50

SVIZZERA 3.3.2

Verso la fine del 2007 è stato emanata una nuova legge (LRV 07) che ha rivisto i limiti di emissione stabilendo anche delle progressioni temporali come riportato in tabella 3.5.

Per potenze < 70 kW (apparecchi costruiti in serie)

Dal 1 gennaio 2008 possono essere messi in commercio solo gli apparecchi (sia apparecchi domestici che caldaie centralizzate) che riportano una dichiarazione di conformità con la quale il produttore/rivenditore assicura che:

- l'apparecchio è stato testato da un ente accreditato secondo la norma EN di riferimento;
- i risultati delle prove devono documentare l'osservanza dei limiti di emissione previsti.

Sono esclusi gli apparecchi con marchio di qualità *"Holzenergie Schweiz"* rilasciato dopo il 31.12.2003 che potevano essere messi in commercio fino alla fine del 2009.

Per potenze < 70 kW (apparecchi artigianali)

Per gli apparecchi termici che riscaldano una singola stanza (es. stufe in maiolica ad accumulo, camini, stufe) che non possono essere testati al banco di prova, essendo costruiti artigianalmente presso l'utente, il legislatore ha provveduto quindi a stabilire le due seguenti modalità:

- devono essere progettati e costruiti secondo le norme dell'associazione svizzera degli impresari fumisti e piastrellisti (VHP), oppure
- devono essere dotati di un sistema di abbattimento delle polveri omologato con un livello di separazione di almeno il 60%.

Queste disposizioni sono valide solo per i nuovi apparecchi.

Per potenze comprese tra 70 e 500 kW

I limiti attualmente previsti (150 mg/Nm^3) per le caldaie possono essere rispettati senza l'applicazione di misure secondarie. A partire del 2012 il limite sarà abbassato a 50 mg/Nm^3, e si ritiene che le moderne caldaie possano rispettare anche tali valori [23]. Per gli impianti già esistenti si ha tempo 10 anni dall'entrata in vigore del limite per potersi adeguare.

Per potenze comprese tra 500 e 1000 kW

In questo range di potenza ricadono la maggior parte degli impianti a cippato e il legislatore ha posto le condizioni più restrittive anche in termini temporali facendo seguito alla grossa discussione sulle polveri sottili che c'è stata nell'inverno 2005-2006.

Per poter rispettare il limite di 20 mg/Nm^3 è necessario l'installazione di un filtro elettrostatico o a maniche [23]. Per gli impianti già esistenti si ha tempo 10 anni dall'entrata in vigore del limite per potersi adeguare.

Per potenze > 1 MW

L'istallazione di filtri (elettrofilto o filtri a manica) è necessaria per poter garantire il rispetto dei limite di 20 mg/Nm^3.

Tabella 3.5 **Nuovi limiti di emissione per la Svizzera**

Classi di potenza	Riferimento O_2 Vol %	Polveri (mg/Nm^3)	
		Dall'1 gennaio 2008	Dall'1 gennaio 2012
<70 KW	13	-	-
70-500 KW	13	150	50(*)
500-1000 KW	13	20	20
1 – 10 MW	11	20	20
> 10 MW	11	10	10

* Per le caldaie a legna sino a 120 kW il limite è posto a 100 mg/Nm^3

3.3.3 GERMANIA

Sono due i provvedimenti di legge che regolano le emissioni in atmosfera degli apparecchi termici:

- 1. BImSchV (entrata in vigore: 15 luglio 1988) che regola gli impianti di potenza inferiore a 1 MW termico;
- TA-Luft (entrata in vigore: 1 ottobre 2002) per impianti con un range di potenza compreso tra 1 MW e 50 MW.

I limiti attuali vengono descritti in tabella 3.6.

A luglio 2009 è stata approvata dal Governo federale la nuova versione della legge tedesca sulle emissioni in atmosfera per piccoli e medi apparecchi termici a combustibili solidi (ca. 1 milione di caldaie e ca. 14 milioni di apparecchi domestici). La proposta di modifica è stata inviata alla Commissione europea per la notifica di approvazione del testo di legge ottenuta la quale è stata definitivamente approvata dal Governo federale ed è entrata in vigore il 22 marzo 2010.

Limiti di emissione in vigore per la normativa tedesca **Tabella 3.6**

	U.M.	1.BImSchV				TA-Luft 5.4.1.3		
		15-50 kW	50-150 kW	150-500 kW	500-1000 kW	1-2,5 MW	2,5-5 MW	5-50 MW
		13% O_2				11% O_2		
Polveri totali	mg/Nm^3	150	150	150	150	100	50	20
CO	mg/Nm^3	4000	2000	1000	500	150	150	150
NOx	mg/Nm^3					250	250	250
SOx	mg/Nm^3					350	350	350

La principale novità introdotta della proposta di modifica riguarda gli apparecchi di potenza nominale medio-piccola.
L'introduzione di questa nuova disposizione avverrà in due diversi momenti:
1ª fase: dal 22 marzo 2010 al 31 dicembre 2014;
2ª fase: a partire dal 1° gennaio 2015.

Le novità introdotte della nuova norma si possono così riassumere:

- regolamentazione delle emissioni per le potenze termiche nominali ≥4 kW. Questo per due motivi: la diffusione delle abitazioni a basso consumo e il crescente rendimento degli apparecchi;
- distinzione dei limiti di emissione anche in funzione del tipo di combustibile utilizzato nella prima fase;
- regolamentazione anche degli apparecchi termici domestici (camini aperti, inserti, stufe a legna, stufe in maiolica, cucine economiche).

Nuovi limiti di emissione per la normativa tedesca **Tabella 3.7**

1ª FASE - Dalla notifica EU al 31.12.2014	U.M.	≥ 4 ≤ 500 kW	> 500 kW
Polveri totali			
Legna, cippato, ramaglia e strobili	mg/Nm^3	100	100
Pellet DINplus 51731-HP, briquettes DIN 51731	mg/Nm^3	60	60
Monossidio di carbonio (CO)			
Legna, cippato, ramaglia e strobili	mg/Nm^3	1000	500
Pellet DINplus 51731-HP, briquettes DIN 51731	mg/Nm^3	800	500
2ª FASE - 01.12.2015		≥ 4 kW	
Polveri totali	mg/Nm^3	20	
Monossidio di carbonio (CO)	mg/Nm^3	400	

4. CONSIDERAZIONI E PROPOSTE

Allo scopo di caratterizzare l'uso energetico del legno per comprendere l'impatto di questa sorgente sulle emissioni in atmosfera, quale primo elemento conoscitivo sono stati stimati i consumi di biomasse legnose in Veneto.
Gran parte della biomassa legnosa (2 Mt) è impiegata come legna da ardere in apparecchi domestici (ca. 570.000) di basso livello tecnologico.
Il 25% delle biomasse consumate a scala regionale (≈500.000 t) sono impiegate in caldaie centralizzate, di cui la quantità più rilevante (ca. 40%) sono scarti di lavorazione reimpiegati nei processi energetici industriali per mezzo di caldaie con una potenza media di 1 MWt. Sulla base degli ultimi dati disponibili (2010), caratterizzati ancora da una notevole incompletezza, si stima che in Veneto siano installate ca. 1.000 caldaie a legna, cippato e pellet nell'intervallo di potenza fino a 500 kWt.

Dall'analisi degli indicatori tecnico-ambientali degli apparecchi, in particolare del fattore di emissione di particolato (PM), emerge che:

- gli apparecchi domestici manuali (tradizionali) sono caratterizzati dai maggiori fattori di emissione e soprattutto mostrano il più ampio *range* di variazione da 30 mg/Nm^3 a oltre 1.500 mg/Nm^3, rispettivamente nelle condizioni ottimali e nelle peggiori condizioni di funzionamento. Emerge quindi per questo tipo di apparecchi la notevole influenza della gestione (qualità del combustibile e modalità di accensione *in primis*) sul fattore di emissione;

- negli **apparecchi domestici manuali a legna** è stato evidenziato che accendendo il fuoco dall'alto si ottiene una riduzione del fattore di emissione variabile tra il 50 e l'80%;

- le **stufe a legna tecnologicamente avanzate**, che prevedono un vano di carico separato, una doppia combustione e l'immissione forzata di aria secondaria, in condizioni di utilizzo simili alla pratica quotidiana, consentono di ottenere un fattore di emissione inferiore ai 50 mg/Nm^3;

- tra gli apparecchi domestici, le **stufe a pellet** sono quelle che mostrano i più elevati rendimenti e i minori fattori di emissione, variabili tra 15 e 75 mg/Nm^3. Questi apparecchi risultano i meno influenzati dalla gestione, essendo il combustibile standardizzato e l'alimentazione automatica;

- nelle **moderne caldaie a legna a tiraggio forzato** con regolazione elettronica della potenza e della combustione, il tipico fattore di emissione si attesta intorno ai 50 mg/Nm^3 e mediamente negli ultimi anni sono stati rilevati valori prossimi ai 20-22 mg/Nm^3, inclusa l'accensione. In questo tipo di caldaie è fondamentale l'accumulatore;

- nelle **caldaie a cippato di piccola e media potenza** (fino a ca. 500 kW) il fattore di emissione varia tipicamente nell'intervallo 75-150 mg/Nm^3. Tuttavia negli ultimi anni, nei modelli più evoluti, sono stati rilevati valori medi prossimi ai 30 mg/Nm^3. Negli impianti di potenza superiore, l'applicazione di filtri elettrostatici o a manica consente di raggiungere stabilmente valori inferiori ai 20 mg/Nm^3;

- le **caldaie a pellet** sono caratterizzate dai migliori valori di rendimento ed emissioni (10-50 mg/Nm^3);

- le **moderne caldaie** producono un particolato composto prevalentemente da sali minerali e si tratta quindi di un particolato inorganico la cui tossicità è 5 volte inferio-

re alla fuliggine del Diesel. Anche le stufe tecnologicamente avanzate producono un particolato di composizione molto simile. Al contrario nelle stufe a legna tradizionali, gestite secondo la comune pratica quotidiana, la tossicità del particolato è paragonabile a quella del Diesel e nel caso di cattivo funzionamento (non raro), a causa dell'aumento degli incombusti carboniosi e degli IPA nel PM, assume un grado di tossicità 10 volte superiore al Diesel e addirittura 100 volte superiore al PM inorganico delle caldaie;

- al fine di rispettare i limiti di emissione che saranno imposti nel breve e medio periodo in molti paesi europei, sono in corso attività di ottimizzazione dei processi di combustione (misure primarie) e di implementazione di sistemi filtro (misure secondarie) applicabili agli apparecchi di piccola e media potenza, alcuni dei quali sono già disponibili sul mercato;

- dall'analisi dello stato dell'arte e delle tendenze in atto della legislazione in alcuni paesi europei, caratterizzati da un mercato piuttosto evoluto, si può osservare che è in corso l'ampliamento della regolamentazione dei limiti di emissione anche per apparecchi di potenza molto ridotta (>4 kW) e contestualmente la progressiva riduzione dei limiti di emissione ed in particolare delle polveri.

A partire dalle considerazioni sopra riportate si delineano alcune proposte rivolte agli enti competenti finalizzate alla riduzione progressiva e realisticamente conseguibile del contributo della combustione del legno alle emissioni nocive in atmosfera:

- i dati evidenziano la necessità di incentivare la progressiva sostituzione degli apparecchi domestici con stufe tecnologicamente innovative e soprattutto con moderne caldaie centralizzate a legna, cippato e pellet a tiraggio forzato e regolazione elettronica della potenza e della combustione;

- per le caldaie a legna rendere obbligatoria l'installazione di un accumulatore adeguatamente dimensionato (cfr. UNI EN 303-5);

- promuovere una campagna di informazione sui temi: i) della qualità dei combustibili legnosi richiesta dai vari tipi di apparecchi, in particolare quelli manuali domestici, ii) sulle regole da seguire per la corretta gestione degli apparecchi;

- si ravvisa infine la necessità di procedere alla revisione della normativa nazionale in materia, tenendo in considerazione quanto già stato fatto e previsto in altri paesi europei e considerando almeno i seguenti aspetti:
  - estensione della regolamentazione dei limiti di emissione agli apparecchi domestici, a partire almeno da 15 kW;
  - stabilire una progressiva riduzione dei limiti di emissione definendo dei tempi di adeguamento ragionevolmente conseguibili dai produttori e stabilendo criteri che possano essere applicati in modo uniforme a livello nazionale;
  - recepimento delle specifiche tecniche EN 14961 nel D.lgs. 152/2006 riguardanti la classificazione dei biocombustibili solidi, mettendoli in relazione alle classi di qualità e al tipo di apparecchio;
  - favorire e incentivare l'introduzione di misure secondarie in particolare a partire dalle aree urbane densamente popolate.

BIBLIOGRAFIA

1 PIOL R. 2007. *L'inventario delle emissioni in atmosfera in Valbelluna*. ARPAV. Regione del Veneto.

2 FRANCESCATO V., ANTONINI E. 2009. *Impianti termici a legna cippato e pellet, tecnologie, aspetti progettuali e normativa*. ARSIA, Regione Toscana. ISBN 978-88-8295-110-8.

3 AA.VV. 1995. *La progettazione di impianti automatici di combustione a legna. Programma d'impulso PACER - Energie rinnovabili* Ufficio federale dei problemi congiunturali. Berna. ISBN 3-905232-82-0.

4 LOO VAN S., KOPPEJAN J. 2008. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*. London Sterling, VA. ISBN 978-1-84407-249-1.

5 HARTMANN H. (Hrsg.): *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen* 2007 (2. Auflage) Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR),Gülzow (DE) 224 S., ISBN 3-00-011041-0, Mai 2007.

6 GIUST A. 2009. *Fotografia della situazione normativa europea e risultati reali delle prove eseguite su alcuni prodotti da IMQ Primacontrol* www.imqprimacontrol.it. Atti dell'incontro tecnico organizzato da Progetto Fuoco. www.progettofuoco.com.

7 OMS 2000. *Air Quality Guidelines* - Second Edition - Particulate matter.

8 SCHWARZ M. 2006. *Argumentationsleitfaden Feinstaub*. Austrian Bio Energy Centre. www.abc-energy.at.

9 BENASSI A., FERRARIO M., SANSONE M., SUSANETTI L. 2005. *Polveri sottili e qualità dell'aria, la situazione in Veneto ed in Italia*. Legno Energia 3/2005.

10 NUSSBAUMER T., CZASCH C., KLIPPEL N., JOHANSSON L., TULLIN C. 2008. *Particulate emissions from Biomass Combustion in IEA Countries, survey on measurements and emission factors*. On behalf of IEA Task 32 and Swiss Federal Office of Energy (SFOE). ISBN 3-908705-18-5.

11 KLIPPEL N., NUSSBAUMER T. 2006. *Feinstaubbildung in Holzfeuerungen und Gesundheitsrelevanz von Holzstaub im Vergleich zu Dieselruss*. ISBN 3-908705-14-2. Nussbaumer T. (Hrsg.): 9. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

12 ELLNER-SCHUBERTH F., HARTMANN H., TUROWSKI P., ROßMANN P. 2010. *Partikelemissionen aus Kleinfeuerungen für Holz und Ansätze für Minderungsmaßnahmen*. Berichte aus dem TFZ 22. Straubing, März 2010.

13 NUSSBAUMER T., KLIPPEL N., OSER M. 2005. *Health relevance of areosols from biomass combustion in comparison to Diesel soot indicated by cytotoxicity tests*. ISBN 3-9501980-2-4. Ed. Obernberger I. Brunner T. in Areosols in Biomass Combustion.

14 OSER M. 2006. *Praxiserfahrungen mit Low-Particle-Feuerungen für Holzpellets*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 9. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

15 OBERBERGER I. BRUNNER T., BIEDERMANN F., KLAUSMANN W., HOFFMANN S., 2009. *Entwiklung einer Low-Dust Biomasse-Kleinfeuerung unter Ausnutzung von Primärmaßnamen*. Tagungsband 9. Industrieforum PELLETS, Stuttgart. www.pelletsforum.de.

16 NUSSBAUMER T. 2007. *Valutazione tecnico economica della separazione del particolato negli impianti di combustione automatizzati a legna con potenza compresa tra 100 kW e 2 MW*. Rivista tecnica Agriforenergy N° 1. Ed. AIEL

17 FRANCESCATO V. 2007. *Combustione del legno e polveri fini, fattori di emissione ed effetti sulla salute delle moderne caldaie di piccola e media taglia*. Sherwood n° 133.

18 BÄR R. 2006. *Praxiserfahrungen mit elektrischen Absheidern für Holzfeuerungen ab 200 kW*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 9. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

19 SCHMID R. 2006. *Rohrelektroabsheider fur Holfeuerungen ab 200 kW: Entwicklung und Praxiserfahrung*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 9. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

20 BLEUL T. 2008. *Elektroabscheider für Biomasse-Heizanlagen von 0 bis 150 kW*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 10. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

21 BOLLIGER R. 2008. *Elektroabscheider «Spider» für Holzfeuerungen bis 70 kW*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 10. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

22 SCHEIBLER M. 2008. *Metallgewebefilter für automatische Anlagen von 100 bis 540 kW*. Nussbaumer T. (Hrsg.): 10. Holzenergie-Symposium ETH Zürich.

23 KEEL A. 2008. *Konsequenter Vollzug nötig*. Erneuerbare Energie. Hrsg. Schweizerische Vereinigung für Sonnenenergie, Berna N 2.