

# Formazione di polveri sottili IN APPARECCHI TERMICI A LEGNA

Ripercussione sulla salute umana e confronto con la fuliggine prodotta dai motori diesel

Pubblichiamo la seconda parte di uno studio approfondito sulle emissioni di polveri sottili prodotte dalla combustione del legno. Gli autori analizzano e confrontano le emissioni dei moderni apparecchi automatici e di quelli tradizionali, valutandone la reattività biologica. La prima parte è stata pubblicata nel numero di settembre 2008 di Agriforenergy.

NORBERT KLIPPEL  
e THOMAS NUSSBAUMER

Verenum, Zurigo  
norbert.klippel@verenum.ch  
thomas.nussbaumer@verenum.ch

## 6 Test sulle cellule

### 6.1 Possibili meccanismi di nocività

A causa delle loro dimensioni gli aerosol di combustione degli apparecchi a legna e dei motori diesel giungono all'interno di tutte le zone degli organi respiratori. La nocività biologica per inalazione di polveri sottili non-radioattive può manifestarsi essenzialmente con le tre tipologie che seguono.

1. Danno diretto alle cellule con la conseguente morte cellulare di una parte di esse.
  2. Danno ai cromosomi di alcune cellule, senza che muoia una parte rilevante della popolazione cellulare. Rotture cromosomiche mal riparate possono divenire potenziali precursori di cellule cancerogene.
  3. Danno del corpo tramite la risposta immunitaria sulle sostanze tossiche inalate.
- Nel presente studio sono stati esaminati gli indicatori relativi ai primi due meccanismi di nocività, attraverso test biologici su culture cellulari.

### 6.2 Metodologie

Gli esperimenti biologici-cellulari sono stati eseguiti con cellule fibroplastiche del polmone V79 del criceto cinese [10]. Il vantaggio di questo tipo di cellule consiste nel fatto che i nuclei cellulari hanno dei cromosomi formati diversamente, e per questo i danni cromosomici si riconoscono facilmente. In una prima serie di test è stata esaminata la tossicità delle polveri. Oltre a ciò, è stata aggiunta alla soluzione nutrizionale della cellula una quantità nota di particolato sottile.

La percentuale di sopravvivenza delle cellule è stata esaminata per differenti concentrazioni medie di particolato. Per la misurazione dell'attività cellulare, accompagnata alla sopravvivenza delle stesse, è stato

eseguito un test dell'attività mitocondriale, che si effettua con un metodo di prova corrispondente (Test-XTT [11]).

In una seconda serie di test sono stati esaminati i danni cromosomici dipendenti dalla concentrazione aggiunta di particolato. Da un lato i danni cromosomici si rilevano dall'individuazione di rotture cromosomiche, dall'altra si esamina l'eventuale formazione dei cosiddetti microgranuli. Questi microgranuli sorgono da frammenti cromosomici spezzati e costituiscono una misura delle rotture cromosomiche durante la divisione cellulare. In questi esperimenti è stata determinata la concentrazione di crescita, da cui si comprovano le rotture cromosomiche, ovvero i microgranuli.

Gli esperimenti biologici sono stati eseguiti presso l'istituto tedesco RCC Cytotest Cell Research di Darmstadt.

### 6.3 Campionatura

Per l'esecuzione dei test biologici è stata fatta una campionatura sui piccoli focolari, parallelamente alla misurazione gravimetrica delle polveri. A tale proposito è stata introdotta una parte dei fumi in due

bottiglie di lavaggio con acqua distillata e successivamente raffreddata. La gran parte del particolato non è precipitata perché le particelle di fuliggine sono idrofobe. Tali particelle sono state raccolte su un filtro ausiliario piano a temperatura ambiente, successivamente applicato. Sia il liquido nelle bottiglie di lavaggio, che le particelle sul filtro ausiliario sono stati analizzati per determinate prove.

Nel corso del malfunzionamento della stufa semplice di metallo, con emissioni di polveri maggiori di 5.000 mg/m<sup>3</sup>, è risultato un carico del filtro molto elevato, ed il liquido nelle bottiglie di lavaggio aveva assunto una colorazione marrone scuro, (Figura 13). Sia il filtro, sia il liquido avevano un odore acre.

La campionatura per la stufa a caricamento automatico e per il motore diesel è avvenuta presso l'EMPA di Dübendorf [8]. Al momento del collaudo sono state condotte delle approfondite campionature tramite l'ausilio di grandi filtri piani per i gas di scarico di un'auto passeggeri dotata di motore diesel e priva di filtro antiparticolato, come le norme Euro 3 imponevano.

Figura 13: ripartizione granulare delle particelle nei fumi della stufa a pellet con funzionamento a pellet di legno e di cereali.





Figura 14: prove su filtro di un motore diesel (a sinistra) e su una stufa a caricamento automatico (a destra).

La campionatura per l'apparecchio a legna con caricamento automatico è avvenuta utilizzando lo stesso tipo di filtro, applicato ad un modello a carica dal basso con 100 kW di potenza.

I test condotti sui filtri evidenziano un netto contrasto (Figura 14). Sebbene i filtri dell'apparecchio automatico a legna siano stati maggiormente caricati, sono rimasti bianchi, mentre tutti i filtri applicati al diesel si presentavano di colore nero.

I campioni così raccolti hanno potuto essere analizzati chimicamente, ma risultavano limitatamente appropriati per i test cellulari biologici, dato che le polveri e la fuliggine raccolte non si possono separare del tutto

dai filtri per particolato. Per esperimenti biologici particolarmente sensibili è stato utilizzato un altro campione di fuliggine da diesel. Questa fuliggine proviene da un filtro per particolato di grandi dimensioni e da un campionamento con una velocità di flusso molto bassa, come nel caso di un bus cittadino dotato di motore diesel Euro 2. A causa della bassa velocità di filtraggio il filtro ha potuto essere caricato decisamente molto di più per un lasso di tempo più lungo, inoltre la fuliggine si lascia togliere in forma di polvere secca, senza causare lo strappo delle fibre del filtro. Questa campionatura è stata messa a disposizione dalla ditta TTM.

Durante il funzionamento ottimale della stufa a legna, le concentrazioni di polveri nei fumi erano troppo scarse per raccogliere quantità sufficienti per esperimenti cellulari biologici. Per questo motivo, al fine di avere un punto di partenza dell'azione delle polveri prodotte in condizioni di combustione medie e buone, sono state prelevate delle polveri dalla canna fumaria della stufa in fase di collaudo, prima dell'inizio dell'intero ciclo di prove. Le polveri presenti all'interno della canna fumaria provenivano dal funzionamento di differenti stufe collaudate per un periodo di tempo di parecchi mesi. Questa prova serve per valutare il funzionamento medio.

### 6.4 Tossicità cellulare

In una delle prime serie di test è stata confrontata la citotossicità delle campionature dei filtri delle automobili diesel con quelle degli apparecchi a legna a caricamento automatico. In figura 15 è riportato il livello di sopravvivenza cellulare in funzione della concentrazione di particolato nella soluzione nutrizionale del mezzo cellulare.

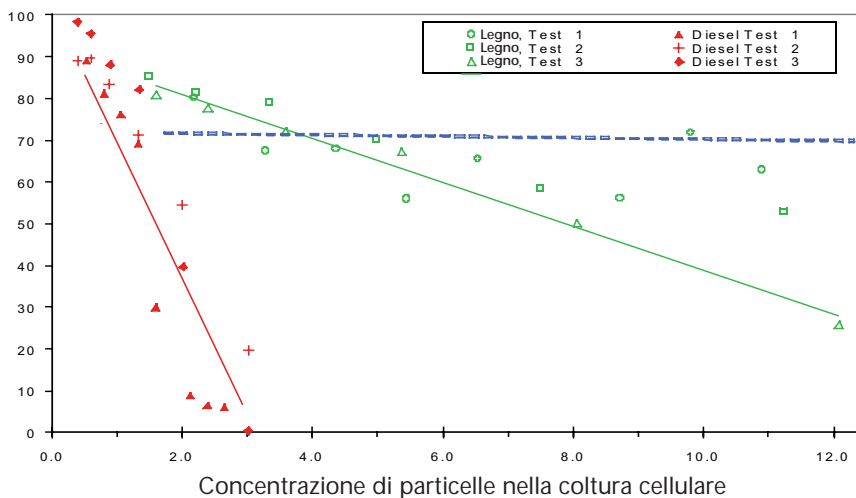
Innanzitutto, le polveri raccolte sono state completamente disperse insieme al filtro, nel liquido di coltura cellulare. Questo liquido non conteneva cellule vive. Dopo di che si è proceduto alla separazione, nel miglior modo possibile, delle fibre del filtro dal liquido, al fine di disporre di una miscela concentrata di soluzione nutrizionale con particolato. Questa soluzione è stata aggiunta ad una coltura cellulare con differenti diluizioni. L'osservazione del livello di sopravvivenza cellulare è avvenuta con una misurazione dell'attività mitocondriale delle cellule trattate, posta a confronto con un gruppo di riferimento di cellule non trattate.

Come prova parallela sono stati preparati dei filtri privi di particolato, allo stesso modo di quelli caricati. La soluzione di concentrato così ottenuta, priva di particolato, conteneva tuttavia delle fibre di filtro non completamente separate.

Quest'ultime hanno comunque causato dei danni nelle prove cellulari. Il livello di sopravvivenza intermedia era praticamente indipendente dalla quantità di concentrato aggiunto, arrivando a circa il 70%. Da ciò risulta che i danni cellulari sono significativi solo quando causati da particolato aggiunto nei casi in cui il livello di sopravvivenza sia inferiore al 70%.

Il danno cellulare causato dal particolato del diesel era evidentemente maggiore di quello provocato dal particolato degli apparecchi a caricamento automatico (figura

Figura 15. Test di citotossicità per polveri prodotte da un apparecchio a caricamento automatico confrontato con la fuliggine del diesel. La linea tratteggiata indica il limite della sensibilità dimostrativa di questo test. Il danno è significativo solo ad un livello di sopravvivenza al di sotto del 70%.



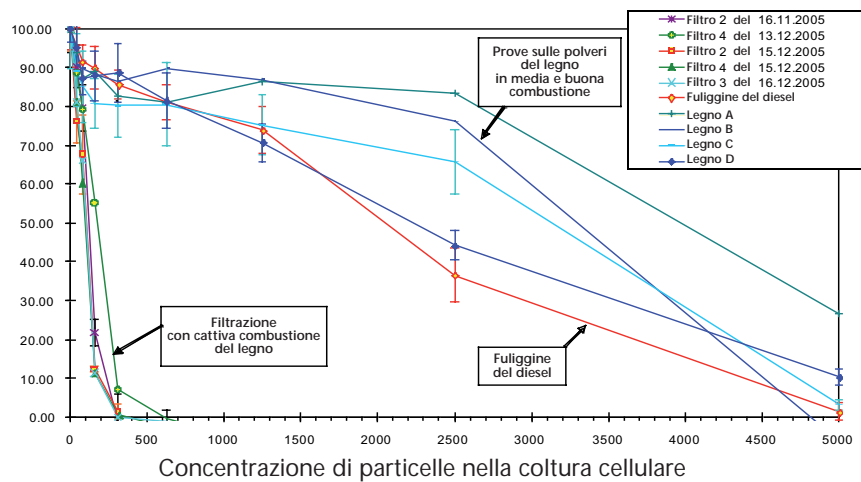
15). Ad una concentrazione di particolato diesel pari a 3 mg/ml tutte le cellule sono morte, mentre alla stessa concentrazione di particolato prodotto dalla stufa a caricamento automatico il danno cellulare resta ancora nei limiti dimostrativi.

Poiché questo tipo di stufa a caricamento automatico emette prevalentemente sali inorganici, si è proceduto ad aggiungere alle culture cellulari, quale ulteriore test comparativo, una soluzione pura di sali di potassio. Questa prova presenta il vantaggio che non vi è più alcuna fibra di filtro nella soluzione di coltura cellulare e, quindi, possono essere rilevati anche i piccoli danni. Una soluzione di  $K_2SO_4$  o di KCl ha praticamente condotto alla stessa curva d'effetto di dosaggio di quella del particolato prodotto dalla stufa a caricamento automatico. Anche le particelle di sale puro sono quindi tossiche per le cellule, se in alte concentrazioni. La tossicità osservata per le particelle prodotte dagli apparecchi termici a caricamento automatico può, perciò, essere spiegata solo dalla loro componente principale, i sali inorganici.

Le emissioni di particolato dei piccoli apparecchi sono da ricondurre solo parzialmente alla formazione di sostanze inorganiche. Ad alte emissioni, la formazione di fuliggine è dominante e produce l'annerimento dei filtri. A condizioni ottimizzate ci si attende una miscela formata da fuliggine e sali inorganici. I quattro test parziali relativi alle polveri da combustione di legno prelevate dalla canna fumaria dell'impianto di prova, producono delle curve di danno cellulare corrispondenti, che si collocano tra la fuliggine diesel e le polveri contenenti sali, prodotte dalla combustione automatica della legna (figura 16). Come base comparativa, in questo caso, è stata utilizzata la fuliggine in forma di polvere prodotta dal diesel, per escludere, in seguito al passaggio attraverso le fibre del filtro, l'effetto di sfondo.

Le campionature con i filtri risultavano fortemente caricate a causa della pessima combustione ( $\geq 5 \text{ g/m}^3$  di emissioni), cosicché risultava possibile una buona separazione del particolato di fuliggine dai filtri. I test cellulari hanno evidenziato una chiara tossicità, significativamente più alta di quella della fuliggine diesel. Impurità residuali di fibre del filtro non presentano alcun significativo effetto in test reattivi, cosicché il danno osservato è chiaramente da ricondurre al particolato di fuliggine di legna. Un confronto con il 50% della concentrazione di danno, evidenzia come il particolato di fuliggine di

Figura 16: test di citotossicità per particolato di legna da piccoli apparecchi a confronto con la fuliggine del diesel.



legna, causato da una cattiva combustione è circa 10 volte più tossico della fuliggine di diesel (figura 14).

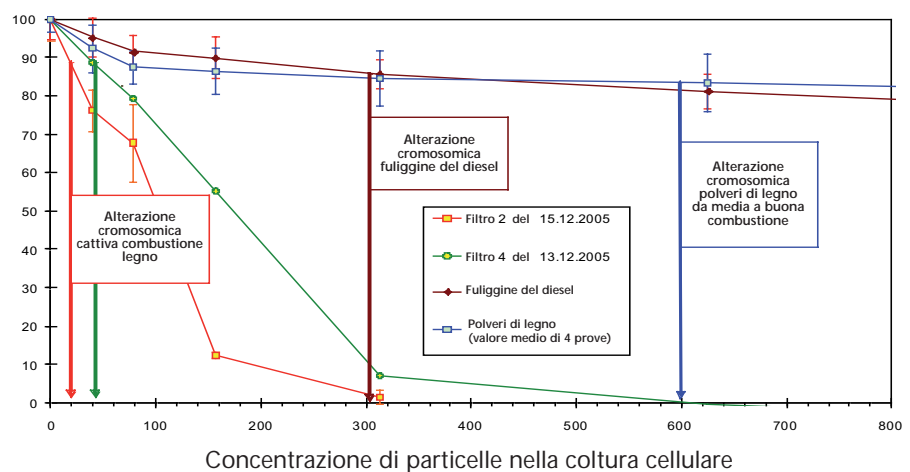
### 6.5 Test microgranulari per difetti cromosomici

Inoltre per campioni scelti sono stati eseguiti dei test sui microgranuli, per dimostrare la concentrazione di soglia relativa a difetti cromosomici. Risultato di questi esperimenti è stato un quadro comparativo simile a quello dei test di citotossicità, ma con concentrazioni decisamente inferiori (figura 17). Per i campioni delle polveri del diesel e della legna raccolte dalla canna fumaria, le concentrazioni soglia sono ri-

sultate intorno ai 300  $\mu\text{g/ml}$  e a 600  $\mu\text{g/ml}$  per il verificarsi di rotture cromosomiche. Questa differenza, apparentemente così marcata, corrisponde ad un grado nella serie di diluizione scelta, ed è ai limiti della rilevanza. Pertanto, similmente al test di citotossicità, anche in questo caso, la campionatura delle polveri di legna è da intendersi paragonabile poco meno tossica di quella della fuliggine del diesel.

Una differenza molto chiara e significativa è stata data dal test microgranulare per entrambe le campionature, nel caso di una cattiva combustione da legna. In questo caso, la concentrazione di soglia per il verificarsi di un danno è risultata pari a 6

Figura 17: test microgranulare per fuliggine di legna prodotta da piccoli apparecchi, a confronto con la fuliggine del diesel.



µg/ml e a 20 µg/ml. Anche qui il risultato del test microgranulare è correlato a quello della citotossicità, ovvero la campionatura leggermente meno tossica, presenta una concentrazione di soglia più alta per la comparsa di rotture cromosomiche. Per paragone, nel caso delle campionature prodotte da cattiva combustione di legna, per il verificarsi di rotture cromosomiche si è evidenziata una concentrazione di soglia almeno 15 volte più bassa.

**7 Analisi policiclica degli idrocarburi aromatici nelle campionature di polveri IAP**

Alcuni idrocarburi aromatici policiclici (IAP) sono notoriamente cancerogeni. L'elemento più noto in questo ambito è il Benzo(a)pirene. L'autorità ambientale americana, EPA (Environmental Protection Agency) ha presentato una lista di 16 IAP che rappresentano sostanze determinati effetti cancerogeni. Gli IAP si generano come prodotti di sintesi della combustione della legna, e sono emessi solo nel caso di una combustione incompleta dei fumi. Per verificare se la maggiore tossicità della campionatura causata da combustione incompleta è correlata con un contenuto alto di IAP, è stata eseguita un'analisi chimica della stessa, posta a confronto con una campionatura di fuliggine di diesel. Il risultato dell'analisi degli IAP è riassunto in tabella 1 e mostra come le polveri prodotte dalla cattiva combustione della legna, con 1,12 g/kg ovvero 0,112 % in peso, presentino un contenuto di IAP circa 20 volte maggiore rispetto alla fuliggine di diesel. Nel particolato della legna sono alte le concentrazioni di Fluorene, Fenantrene, Fluorantene e Pirene. Il Fluorene è fra gli IAP particolarmente tossici ed è, tra l'altro, impiegato nella produzione dei pesticidi. Il Pirene è già stato citato come possibile causa di allergie.

**8 Conclusioni**

**8.1 Metodologie**

Nella presente indagine è stato presentato un metodo per il giudizio indicativo della rilevanza potenziale delle polveri sottili sulla salute. Per fare questo si è proceduto ad una campionatura del particolato nel flusso dei fumi, utilizzata dopo una preparazione di prova per test biologici

sulle cellule polmonari del criceto. I test cellulari eseguiti sulle particelle prodotte dalla combustione della legna e dai motori diesel ha permesso un confronto dell'effetto biologico delle polveri. Sono state esaminate la tossicità cellulare così come i difetti cromosomici come indicatori del potenziale cancerogeno. Un'informazione di questo tipo non può essere desunta dalle grandezze fisiche misurate tal quali nei gas di scarico, né essere determinata con sicurezza dalle singole analisi chimiche. Il metodo presentato rende possibile, pertanto, la supplementare comprensione di una caratteristica essenziale delle emissioni dei fumi, ed aiuta il completamento delle conoscenze della concentrazione delle masse di particolato e della distribuzione delle grandezze granulari, così come di eventuali analisi chimiche.

Il giudizio quantitativo dell'effetto delle particelle raccolte su campionature di filtri a bassa tossicità è limitato dal fatto che anche il materiale del filtro può causare una reazione biologica. La tossicità delle particelle raccolte sul filtro può, dunque, essere valutata solo da un determinato valore soglia, anche perché si è proceduto ad una prova parziale senza filtri, e per test futuri potrebbe essere introdotta una campiona-

tura con una sensibilità più alta. Inoltre, per l'esecuzione dei test qui presentati, è necessaria una quantità minima di particolato di alcuni grammi, che possono essere raccolte per contenuti assai ridotti di particolato nei fumi, solo con considerevole dispendio nel corso della prova. Per lo scarso flusso di massa del particolato, prodotto dalla combustione di legna molto buona in un piccolo focolare, nessuna particella corrispondente ha potuto perciò essere analizzata nel quadro della presente indagine.

Per dedurre le conseguenze delle polveri fini in ambiente aereo va osservato che, il metodo comprende solo la reattività biologica delle polveri sottili, così come quella delle sostanze nocive assorbite nelle polveri fini. Effetti di sostanze nocive in forma gassosa nei fumi, così come effetti combinati di gas nocivi e particelle non sono pertanto rilevati. Anche eventuali modifiche delle particelle nell'atmosfera non sono considerate, ed anche possibili variazioni tra campionature e test cellulari.

**8.2 Effetti sulla salute delle polveri fini esaminate**

Piccoli apparecchi termici e motori diesel a funzionamento normale mostrano delle emissioni di polveri sottili con concentra-

**Tabella 1: contenuto di idrocarburi aromatici policiclici (IAP) nella campionatura di polveri prodotte da cattiva combustione di legna relativa alla stufa 1, a confronto con la fuliggine di diesel.**

Componenti IAP		Polveri da combustione della legna	Fuliggine diesel
Naftalina	mg/kg	13	42
Acenaftilene	mg/kg	129	7.1
Acenaftene	mg/kg	17	<3
Fluorene	mg/kg	173	<3
Fenantrene	mg/kg	231	3.7
Antrace	mg/kg	65	<3
Fluorantene	mg/kg	154	<3
Pirene	mg/kg	170	<3
Crisene	mg/kg	54	<3
Benzo(a)antrace	mg/kg	44	<3
Benzo(b)fluoranthen	mg/kg	30	<3
Benzo(k)fluorantene	mg/kg	11	<3
Benzo(a)pirene	mg/kg	25	<3
Indeno(1,2,3-cd)pirene	mg/kg	9	<3
Dibenzo, a,h)antrace	mg/kg	< 8	< 3
Benzo(g,h,i)perilene	mg/kg	< 8	< 3
Contenuto di IAP secondo l'EPA nelle polveri	mg/kg	1.120	53
Contenuto di polveri nei fumi	mg/m <sup>3</sup>	5.000	100
Il contenuto di IAP secondo l'EPA ammonta, nei fumi, a	µg/m <sup>3</sup>	5.600	5,3



zioni di massa paragonabili, nell'ordine di grandezza di  $100 \text{ mg/m}^3$  e grandezze granulari simili, con un massimo intorno a  $0,1 \mu\text{m}$ . Nel caso di una combustione della legna molto incompleta, il contenuto delle polveri sale decisamente, fatto questo correlabile ad una contemporanea tendenza delle particelle a modificare il massimo delle grandezze granulari in particelle più grosse. Le polveri della legna e la fuliggine diesel sono, tuttavia, polveri più piccole di  $2,5 \mu\text{m}$  che, in ogni caso e prevalentemente, arrivano ai polmoni, e per questo potenzialmente rilevanti per la salute. Per la loro grandezza granulometrica, per tutti i tipi di polveri esaminate, si deve partire dal presupposto che possono penetrare nel tratto respiratorio, ed in particolare negli alveoli polmonari.

Polveri fini prodotte da una combustione quasi completa della legna stagionata naturalmente, in apparecchi a legna con caricamento automatico, sono in gran parte inorganiche e costituite principalmente da sali. Queste polveri presentano una tossicità cellulare all'incirca cinque volte minore di quella della fuliggine diesel esaminata. È possibile che la differenza sia ancora maggiore, perché si rileva lo stesso effetto anche con il materiale del filtro puro.

Le polveri fini provenienti dalla canna fumaria dei piccoli apparecchi a legna alle condizioni di collaudo, mostrano una tossicità cellulare paragonabile alla fuliggine di diesel, ed un danneggiamento cromosomico simile.

Le polveri fini prodotte da combustione molto incompleta di legna a pezzi in una stufa a legna malfunzionante, sono costituite in gran parte da fuliggine e sostanze organiche; esse presentano un contenuto di IAP circa 20 volte più alto di quello della fuliggine diesel esaminata. Queste polveri di legna, di tipo fuliginoso, sono circa dieci volte più attive, in termini di tossicità cellulare e di danneggiamento cromosomico, rispetto alla fuliggine di diesel; esse sono quindi di due ordini di grandezza più nocive delle polveri saline di legna prodotte da un apparecchio automatico.

La fase di accensione negli apparecchi a legna determina un aumento delle emissioni di polveri fini e sostanze nocive in forma gassosa, derivanti dalla combustione incompleta. Perciò, per valutare le emissioni dei focolari a legna a caricamento manuale, il rilevamento della fase di accensione risulta decisivo. Il completamento della combustione porta come conseguenza alla gassificazione del carbone di legna con alte

emissioni di monossido di carbonio e, nella regola, solo a basse emissioni di polveri fini e di composti organici. Dato che le emissioni di monossido di carbonio sono appena rilevanti sulla salute rispetto alle polveri fini ed ai composti organici, il completamento della combustione non è critico dal punto di vista dell'igiene atmosferica, se paragonato alla fase di accensione.

L'importanza della fase di accensione è confermata anche dalle misurazioni pratiche eseguite in apparecchi a legna a caricamento manuale effettuate nel cantone svizzero di Zurigo [13]. Con una semplice sorveglianza dell'operato di tutti i giorni, si può desumere quanto segue: il fumo, (non il vapore d'acqua) può fuoriuscire solo durante un tempo breve, nel corso della fase di accensione, dato che esso è, nella regola, congiunto ad un significativo superamento del valore limite orientativo di  $150 \text{ mg/m}^3$  a  $13 \text{ Vol.-%}$  di  $\text{O}_2$ . In questo ambito si è definito uno spettro ottico del fumo con  $0\%$  (nessun fumo visibile),  $10\%$ , (appena visibile),  $20\%$ , (debolmente visibile), fino al  $100\%$  (fumo forte), mostrando che, nella regola, già dal  $20\%$  di fumo le emissioni di polveri fini risultavano superate. Viceversa, in base ad un'immagine non definita di fumo, non si possono constatare con certezza le scarse emissioni di polveri fini, perché anche una forte diluizione dei fumi creata con un'eccedenza d'aria, può far sì che sia appena visibile del fumo, ma che i valori di norma delle emissioni di polveri siano superati. Sebbene le emissioni di monossido di carbonio e polveri fini, come precedentemente descritto, non siano univocamente correlate, è risultato che, per le misurazioni scelte degli apparecchi a legna a caricamento manuale, il valore limite delle polveri resta nella regola contenuto se si rimane al di sotto dell'attuale valore limite di  $4.000 \text{ mg/m}^3$  di monossido di carbonio.

### 8.3 Conseguenze

Se gli apparecchi a legna automatici saranno dotati in futuro con dei separatori di particolato in grado di ridurre il carico di polveri a valori decisamente al di sotto di  $20 \text{ mg/m}^3$ , questi impianti contribuiranno solo in misura modesta ad emettere particelle prodotte dalla combustione di legna. Evidenziando poi, per queste particelle, una minore nocività, la percentuale rimanente, in confronto con le restanti fonti di emissione, viene valutata di poco più rilevante.

Le stufe a legna a caricamento manuale

mostrano, con valori di emissioni inferiori a  $20 \text{ mg/m}^3$  fino ad oltre  $5.000 \text{ mg/m}^3$ , ( $13 \text{ Vol.-%}$  di  $\text{O}_2$ ), una vasta gamma di emissioni di polveri fini.

Sebbene tali emissioni dipendano dalla tecnologia della combustione, la gestione degli apparecchi, ovvero il modo in cui vengono utilizzati, perlomeno nel caso delle stufe a legna, può avere un influsso fondamentale e maggiormente determinate.

Infatti, le emissioni di una stufa a legna con marchio di qualità, normalmente al di sotto di  $50 \text{ mg/m}^3$ , sono aumentate quando, invece di un funzionamento ideale ottenuto con piccole cariche di ciocchi di legna asciutta di piccole dimensioni, si procede ad un funzionamento con una carica maggiore del solito, con grossi ciocchi di legna, raggiungendo un valore di circa  $250 \text{ mg/m}^3$ . Utilizzando legna umida le emissioni hanno raggiunto addirittura  $500 \text{ mg/m}^3$  circa.

In una stufa a legna semplice sono risultate, con cattive condizioni di funzionamento e registri dell'aria chiusi, emissioni di polveri pari a circa  $5.000 \text{ mg/m}^3$ , che, se confrontati con un funzionamento rilevato con piccole cariche di legna nella stessa stufa, rappresentano un aumento pari a più di  $100$ .

Per questa amplissima variabilità si deve partire dal presupposto che le emissioni degli apparecchi a caricamento manuale sono, nella pratica di tutti i giorni, decisamente sottovalutate.

La grande gamma delle emissioni di polveri fini tra funzionamento ottimizzato e non, chiarisce che per la prassi di tutti i giorni non solo deve essere imposto il divieto di bruciare rifiuti negli apparecchi a legna, ma che, contemporaneamente, sono necessarie delle misure che impediscano un funzionamento improprio con legna stagionata naturalmente.

Inoltre si deve partire dalla considerazione che il carico inquinante negli spazi domestici interni, causato da apparecchi a legna mal azionati, rappresenta un rischio esteso per la salute degli utenti. Esami eseguiti su persone che cucinavano su focolari semplici con legna, confermano anche un rischio di cancro polmonare paragonabile a quello del fumo [14].

Una stufa a legna con una divisione interna tra il vano di riempimento del combustibile e la camera di combustione, così come con una doppia combustione che avviene con un flusso di aria secondaria, miscelata in una zona rastremata prima della camera di postcombustione, ha raggiunto, con il funzionamento ottimizzato, emissioni di polveri fini molto basse, al di sotto di  $20$

mg/m<sup>3</sup>. Il vantaggio essenziale di questo principio di combustione consiste tuttavia nel fatto che anche a funzionamento normale, non sorvegliato, con tipici ciocchi di legna e vano di riempimento del combustibile pieno, i valori restavano contenuti e al di sotto di 50 mg/m<sup>3</sup>. Un drastico aumento delle emissioni a causa di un sovraccarico è escluso, per la modalità di costruzione. Il principio costruttivo palea, tuttavia, un rischio minore anche per tipi di utilizzo improprio. Nel caso di un carico con legna bagnata avviene, dopo breve tempo uno spegnimento, cosicché un funzionamento a lungo termine, con emissioni aumentate decisamente, non è possibile, contrariamente alla stufa semplice a legna esaminata. Dato che le attuali prescrizioni per il collaudo delle stufe non escludono

con sicurezza un funzionamento pressoché ideale durante la misurazione sul punto di collaudo, il principio della doppia combustione non mostra tuttavia un vantaggio rilevante rispetto alle stufe a legna convenzionali. Inoltre, per l'utente è possibile, in modo condizionato dal sistema, solo un tipo limitato di funzionamento, impostato per un corretto riscaldamento con ciocchi di legna. Per questa ragione, un principio funzionale nel tipo descritto o eventualmente ulteriori alternative a stufe a legna convenzionali, non si sono imposti sul mercato.

Nella pratica comune, per diminuire le emissioni di polveri fini dei nuovi focolari, dovrebbero essere introdotte, accanto alla conversione delle normative sinora vigenti, come la norma svizzera "Fair feuern", an-

che un sistema di rilievo degli apparecchi più vicina alle reali condizioni di utilizzo, per ricevere il marchio di qualità o l'omologazione del collaudo tipo. Per i collaudi, la considerazione della fase d'accensione è determinante, dato che, soprattutto durante questa fase, si sprigionano le emissioni rilevanti per la salute umana. ●

### Ringraziamenti

La presente indagine è stata sostenuta da:

- Bundesamt für Energie (BfE)
- Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- Direktion für Entwicklung und Zusammenarbeit (DEZA)
- Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Santiago de Chile.

### In collaborazione con

- EMPA Dübendorf
- Müller Holzfeuerungen, Balsthal
- Tiba Holzfeuerungen, Bubendorf
- Terraconsult, Bern
- RCC Cytotest Cell Research, Darmstadt, Deutschland
- Bachema Chemische Laboratorien, Schlieren.

### BIBLIOGRAFIA

- [10] Nussbaumer et al. (2004): Biomass combustion, Zurich  
Oser  
Ford, D.; Yerganian, G.: Observations on the chromosomes of Chinese hamster cells in tissue culture. *J. Natl. Cancer Inst.*, 21: 393-425, (1958)
- [11] Roehm, N., Rodgers, G.; Hatfield, S.; Glasebrook, A.: An improved colorimetric assay for cell proliferation and viability utilizing the tetrazolium salt XTT. *Journal of Immunological Methods*, 142 (1991), 257-265.
- [12] Mayer, A.: Persönliche Mitteilung, TTM, 2006
- [13] Wehrli, T.: *Messbericht*, Emissionsmessung an 4 Stückholzfeuerungen, Messbericht vom 28.7.06 zu Handen AWEL Kanton Zürich Abteilung Lufthygiene, Zürich 2006
- [14] Delgado, J.; Martinez, L.; Sanchez, T.; Ramirez, A.; Iturria, C.; Gonzalez-Avila, G.: Lung Cancer Pathogenesis Associated With Wood Smoke Exposure, *Chest* (2005) 128, 124-131

## Riassunto dell'articolo completo

Sono state oggetto di ricerca comparata le emissioni di polveri sottili provenienti da apparecchi a legna e da motori diesel, analizzando le seguenti caratteristiche: concentrazione di massa, numero e distribuzione delle grandezze del particolato e contenuto di idrocarburi aromatici policiclici (IAP). Inoltre, si è proceduto ad una campionatura delle polveri fini per valutarne la reattività biologica in vitro, su cellule polmonari di criceti cinesi. Le indagini svolte hanno permesso un'interpretazione della tossicità cellulare, così come dei difetti cromosomici, laddove questi ultimi fungono da indicatori per il potenziale cancerogeno.

Poiché nessun dato simile è noto, sono state sviluppate più varianti, differenziate per campionatura e preparazione del test. È stato dimostrato che il metodo scelto è appropriato

per valutare la reattività biologica del particolato esaminato in maniera comparativa. I test hanno evidenziato, inoltre, i seguenti risultati.

- Le polveri fini, in gran parte inorganiche, prodotte dalla combustione quasi completa di legna stagionata naturalmente in un apparecchio automatico, presentano una reattività biologica per lo meno quindici volte minore, in termini di tossicità cellulare e di difetti cromosomici, rispetto alla fuliggine diesel.
- La fuliggine della canna fumaria proveniente da tipici, piccoli apparecchi a legna, presenta una reattività biologica paragonabile alla fuliggine diesel.
- Le polveri fini prodotte da una combustione fortemente incompleta di legna stagionata naturalmente in una stufa a legna non funzionante correttamente, hanno una reattività biologica circa 10 volte più alta,

e 20 volte maggiore in termini di contenuto di idrocarburi aromatici policiclici, rispetto alla fuliggine diesel. Se confrontata con le polveri fini inorganiche, la reattività biologica è perciò circa 100 volte più alta.

- Le stufe a legna esaminate presentano un'ampia oscillazione delle emissioni di polveri fini, partendo da meno di 20 mg/m<sup>3</sup> per giungere fino a più di 5.000 mg/m<sup>3</sup> al 13 Vol.-% di O<sub>2</sub> (s.u). Il valore più alto corrisponde alle polveri prodotte da una stufa a legna funzionante in modo non corretto, e contemporaneamente presentano la più alta reattività biologica.

La grande variabilità non è tuttavia da ricondurre esclusivamente alla modalità di funzionamento. Il passaggio da un funzionamento idoneo ad uno che si rileva nella pratica quotidiana può determinare un aumento delle emissioni mag-

giore di 10 volte.

Questi aspetti non sono sufficientemente considerati nell'attuale collaudo degli apparecchi termici; infatti, in questa fase, dovrebbe essere stabilita una modalità di funzionamento maggiormente corrispondente alla pratica quotidiana.

In questo contesto la registrazione/acquisizione del procedimento d'accensione che porta all'aumento di polveri fini e composti chimici, risulta decisivo.

Con un pessimo funzionamento di una stufa a legna si è registrato un aumento delle emissioni maggiori di 100 volte. Questo dimostra che per un'efficace riduzione delle emissioni di polveri sottili provenienti da focolari a legna, non solo deve essere imposto il divieto di bruciare rifiuti, ma, anche nel caso di utilizzo di legna stagionata, deve essere richiesto un utilizzo appropriato.