

# FUMO DI LEGNA: NATURALE MA TOSSICO

**Gianni Comini**

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

*gianni.comini@cism.it*

24 marzo 2023

## 1 Nuove evidenze e vecchie convinzioni

In una combustione ideale, la legna produrrebbe soltanto anidride carbonica, vapore d'acqua e residui minerali non combustibili che resterebbero nel focolare sotto forma di cenere. Purtroppo, le combustioni reali sono quasi sempre incomplete poiché, nella pratica, è pressoché impossibile far incontrare ogni singola molecola di "legno combustibile" (spesso proveniente da tronchetti, cippati o altre pezzature medio-grandi), con un numero di molecole d'aria "comburenti" sufficienti a garantire una reazione chimica di ossidazione completa. Poiché "il diavolo sta nei dettagli", proprio tra gli incombusti si trovano numerosi inquinanti che, insieme con le particelle di cenere più piccole, vengono trasportati nell'atmosfera dai fumi.

Per questo motivo, fin dagli anni '80 del secolo scorso, la letteratura scientifica ha sottolineato la tossicità del fumo di legna indicandolo come principale responsabile delle emissioni di due tra gli inquinanti più pericolosi: le Particelle di Materia (PM) "sottili" e gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA).

Le particelle abbastanza sottili da restare in sospensione nell'atmosfera vengono classificate, a seconda delle loro dimensioni, come: PM10 o "(relativamente) grossolane" e PM2.5 o "fini", dove il numero indica la dimensione massima dell'insieme espressa in millesimi di millimetro. L'Organizzazione Mondiale della Sanità (Agenzia dell'ONU che si occupa della salute), l'Unione Europea e l'Italia hanno fissato dei limiti di concentrazione in atmosfera per le particelle PM10 e PM2.5, a causa della loro capacità di causare malattie respiratorie e cardiovascolari. (Come vedremo meglio nel seguito, le dimensioni delle particelle sono di particolare rilievo poiché, quanto sono minori tanto maggiore è la capacità di penetrare nel sistema respiratorio e da questo, se le dimensioni sono sufficientemente ridotte, anche nel sistema cardiovascolare, producendo gravi infiammazioni in entrambi).

Gli idrocarburi policiclici aromatici IPA appartengono alla categoria dei microinquinanti in quanto possono avere effetti tossici già a concentrazioni molto più modeste di



Figura 1: Inquinamento da fumi di legna in un'area montana durante la stagione di riscaldamento [Confederazione Svizzera - Ufficio Federale dell'Ambiente].

quelle normalmente osservate per gli inquinanti “classici”. Il più importante degli IPA è il benzo-a-pirene BaP ( $C_{20}H_{12}$ ), un idrocarburo aromatico costituito da cinque anelli benzenici condensati (ovvero uniti tra loro attraverso gli atomi di carbonio) che la IARC (Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro) classifica come “cancerogeno per l'uomo”. Gli IPA possono formarsi in tutte le combustioni incomplete di sostanze organiche a base di carbonio e idrogeno, e nei generatori di calore a legna si formano dalla combustione incompleta della cellulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) che è il componente principale del legno.

Nonostante le evidenze sanitarie, molti si ostinano a considerare la legna un combustibile “ecologico” in quanto “naturale” ed usato dall'umanità sin dalla preistoria. D'altra parte, va rilevato che l'attuale (2023) entusiasmo per il riscaldamento a legna appare stimolato da regolamenti urbanistici ancora molto tolleranti sulle emissioni di caminetti e stufe, dall'assenza di accise sul legno e, magari, anche dalla possibilità di approvvigionamenti senza fattura. In questo modo, la legna risulta molto meno costosa, per unità di calore generato, dei concorrenti gas, gasolio e olio combustibile mentre, da parte dei decisori, non sembra esserci troppa fretta di adottare provvedimenti restrittivi al suo consumo, in quanto vige la convinzione che tali provvedimenti colpirebbero, soprattutto, le aree montane dove quasi tutte le abitazioni sono dotate di caminetti e/o stufe a legna. (In alcune di queste aree, il risultato poco entusiasmante è quello fotografato nella Figura 1).

Si è così creata una situazione nella quale a soffrire maggiormente sono i centri abitati più importanti nei quali, in assenza di vento durante la stagione di riscaldamento, l'aria diventa irrespirabile a causa dei troppi fumi generati da caminetti e stufe a legna installati in abitazioni che sono dotate anche di impianti di riscaldamento a gas o gasolio. In questo modo, al fastidio di non poter più rinnovare l'aria nei locali quando sono in azione i caminetti e le stufe dei vicini, si aggiungono veri e propri rischi sanitari che, come vedremo, sono accentuati per le fasce di popolazione più deboli (bambini, anziani e fragili).

In presenza di opinioni, interessi e comportamenti contrastanti, il giudizio di sostenibilità sull'impiego della legna nel riscaldamento non può essere solo tecnico, ma nemmeno solo economico, e non può certamente trascurare gli aspetti sanitari. Al fine di arrivare a un giudizio non basato su vecchie convinzioni o nuove ideologie occorre, però, essere informati e, nel seguito, si cercherà di fornire un'informazione sull'argomento il più possibile oggettiva, fondata sulla valutazione dei dati di letteratura e rispondente solo alle esigenze dell'attendibilità tecnico-scientifica.

## 2 Le fasi della combustione di legna

Nella combustione di legna si possono distinguere tre fasi: essiccazione, pirolisi (ovvero degrado strutturale della matrice solida con emissione di gas combustibili) e combustione vera e propria. (Si tenga presente che la legna solida non brucia come tale ma che a bruciare sono i gas emessi dalla legna portata ad alta temperatura).

Nella fase iniziale la legna deve liberarsi dell'umidità mediante fornitura di calore e conseguente essiccazione. Per questo motivo, all'aumentare del contenuto di umidità della legna aumenta il calore necessario per far evaporare l'acqua e, quindi, diminuiscono il potere calorifico e la temperatura nella camera di combustione. (Nei focolari, infatti, è bene utilizzare legna stagionata "secca" e non legna "fresca" umida ottenendo, come vedremo, il beneficio aggiuntivo di ridurre le emissioni di COV, ovvero Composti Organici Volatili).

La fase di pirolisi della legna inizia ad una temperatura di circa 200°C e continua fino a circa 500°C coinvolgendo, in successione, i composti organici volatili, le emicellulose (polisaccaridi di composizione simile alla cellulosa che formano le matrici strutturali delle piante) e la cellulosa. Teoricamente, alla fine della pirolisi, nel focolare dovrebbe restare soltanto il residuo solido non combustibile sotto forma di cenere ma, in pratica, anche le particelle di cenere più piccole vengono trasportate dai fumi incrementando le emissioni di particolato.

La fase di combustione dei gas emessi inizia intorno ai 500°C e porta i fumi sino ai 1000°C circa quando, idealmente, i prodotti della reazione sono completamente ossidati. In realtà, come si è già osservato, è pressoché impossibile ottenere combustioni complete di legna in quanto:

- nella camera di combustione la miscelazione tra aria e combustibile è spesso inadeguata (il più delle volte a causa di una carenza complessiva di aria comburente);
- l'apporto d'aria, soprattutto durante la combustione di legna in pezzatura grossa, non è mai uniforme e, di conseguenza, le temperature nel focolare sono troppo basse in punti dove c'è un forte eccesso (o difetto) d'aria, e troppo alte nei punti dove il rapporto tra aria e combustibile è prossimo al valore stechiometrico;
- i tempi di contatto tra legna e aria in camera di combustione sono spesso insufficienti;
- nelle fasi di accensione e spegnimento le combustioni sono sempre irregolari e, di conseguenza, quasi sempre incomplete.

Le combustioni incomplete della legna si traducono in aumenti delle emissioni di particelle sottili carbonizzate (“fuliggine” in italiano o “black carbon” cioè carbone nero in inglese), idrocarburi policiclici aromatici IPA, monossido di carbonio CO e composti organici volatili COV.

Le particelle carbonizzate sono le maggiori responsabili del caratteristico odore della fuliggine depositata nella canna fumaria o trasportata nell’atmosfera dai fumi mentre, come si è detto, le sostanze incombustibili danno luogo a cenere, ovvero a particelle che restano nel focolare se sono di pezzatura relativamente grande o se ne vanno con i fumi se sono di pezzatura abbastanza fine.

Come si è già osservato, dalle combustioni incomplete della cellulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ), componente principale del legno (e da tutte le combustioni incomplete di sostanze organiche a base di carbonio e idrogeno, inclusi, ad esempio, i cibi alla griglia), possono formarsi idrocarburi policiclici aromatici (cioè derivati del benzene il cui anello è rappresentato nella Figura 2 a sinistra). Il più importante degli IPA è il benzo-a-pirene BaP ( $C_{20}H_{12}$ ), costituito da cinque anelli benzenici condensati (ovvero uniti attraverso gli atomi di carbonio) la cui struttura è schematizzata nella Figura 2 a destra (nota come logo della campagna anti-inquinamento da IPA).

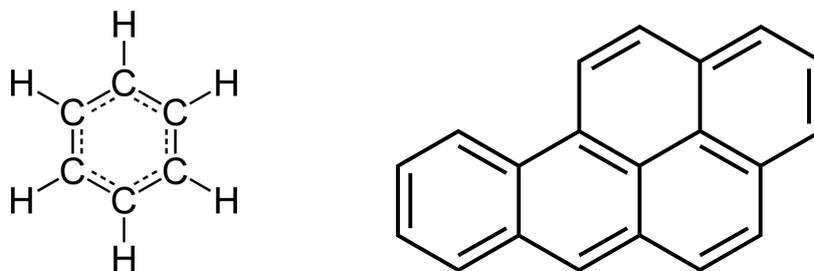


Figura 2: Anello benzenico a sinistra e i cinque anelli benzenici condensati del benzo(a)pirene a destra, utilizzati come logo nella campagna anti-inquinamento da IPA.

(A questo punto, però, uno potrebbe chiedersi perché il benzo-a-pirene non si forma anche nelle combustioni di metano. I motivi sono due: il primo è che combustibile e comburente sono più facilmente miscelabili in proporzioni adeguate nelle combustioni di aria e metano, entrambi gas. Il secondo, meno intuitivo, sta nel fatto che è più facile passare alla struttura del BaP partendo dalla cellulosa anziché dal metano. Senza entrare in dettagli chimici, ci si può limitare alle formule “brute” focalizzando l’attenzione sui rapporti C/H tra numero di atomi di carbonio e numero di atomi di idrogeno nei due combustibili. Nella cellulosa si ha  $C/H = 6/10 = 3/5$  e nel metano si ha  $C/H = 1/4$ , mentre nel benzo(a)pirene risulta:  $C/H = 20/12 = 5/3$ . Di conseguenza si intuisce che è più facile arrivare al  $C/H = 5/3$  del BaP partendo dal  $C/H = 3/5$  della cellulosa piuttosto che dal  $C/H = 1/4$  del metano.)

Come si è visto, nella letteratura scientifica e nella normativa vi è concordanza sul fatto che la tossicità a medio e lungo termine dei fumi di legna sia dovuta, soprattutto, agli alti contenuti di particolato (PM) e di idrocarburi policiclici aromatici (IPA). Per dare il giusto spazio a questo poco encomiabile primato, le emissioni di PM ed IPA saranno discusse in paragrafi ad esse dedicati. In questo paragrafo, per completare la panoramica

sommatoria sulle emissioni legate alla combustione di legna, basta aggiungere qualche considerazione sugli “altri” inquinanti presenti nei fumi di legna: due tipologie di incombusti (CO e COV), e due prodotti di reazione: ossidi di azoto (NOX dove X sta per miscela di monossido NO e biossido NO<sub>2</sub>) e biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>).

Il monossido di carbonio CO si forma quando vi è insufficiente apporto d’aria ai focolari e, da questo punto di vista, i caminetti aperti con tiraggio insufficiente sono estremamente pericolosi. (In difetto d’aria, dalla combustione del carbonio si forma CO, che richiede un solo atomo di ossigeno per atomo di carbonio, e non biossido di carbonio CO<sub>2</sub> che richiede due atomi di ossigeno per atomo di carbonio). Il monossido di carbonio è molto tossico e provoca gravissimi danni immediati se emesso all’interno dei locali abitati: basti pensare che una concentrazione di CO nell’aria, compresa tra lo 0,2 e lo 0,4% causa perdita di conoscenza e morte in circa 15 minuti. Se trasportato nell’atmosfera dai fumi, il monossido di carbonio contribuisce “solo” ad aggravare l’inquinamento ambientale.

I composti organici volatili COV provengono dalle sostanze “aromatiche” contenute nel legno fresco. Dopo il taglio degli alberi queste sostanze non si formano più ed, anzi, tendono a “volatilizzarsi” nel tempo e, quindi, a ridursi fortemente in percentuale durante la stagionatura. I COV emessi all’interno dei locali abitati danno luogo ad effetti che vanno dal disagio sensoriale (a breve termine) fino a gravi alterazioni dello stato di salute (a medio e lungo termine), mentre i COV liberati dalla combustione e trasportati nell’atmosfera dai fumi contribuiscono “solo” all’inquinamento ambientale.

Generalmente, gli ossidi di azoto si formano nelle combustioni ad alta temperatura, quando l’ossigeno dell’aria comburente reagisce con l’azoto dell’aria stessa anziché con il combustibile. Le combustioni di biomasse non sono omogenee e in qualche punto la temperatura può certamente essere alta al punto da generare ossidi di azoto NOX (dove la sigla sta per miscela di monoossido NO e biossido NO<sub>2</sub>) a partire dall’aria comburente. Nella combustione di biomasse, tuttavia, il meccanismo di gran lunga prevalente per la formazione degli NOX è l’ossidazione dell’azoto contenuto nelle piante. Infatti, le emissioni di ossidi di azoto non variano al variare della pezzatura del legno dai tronchetti ai pellet.

Gli ossidi di zolfo (tra i quali il biossido, o l’anidride solforosa, SO<sub>2</sub> prevale di gran lunga sul monossido SO), si trovano nei fumi solo se il combustibile di partenza contiene zolfo. Poiché le concentrazioni di zolfo possono essere elevate nelle biomasse erbacee ma sono abbastanza basse nella legna, la concentrazione di anidride solforosa nei fumi di legna è generalmente limitata.

## 2.1 Generatori di calore a legna

Le principali tipologie di generatori di calore a legna utilizzate in Italia sono richiamate nella Figura 3 dove, procedendo da sinistra a destra e dall’alto in basso si distinguono:

- **Caminetto aperto** nel quale il fuoco è in vista e solo un buon tiraggio con aria esterna opportunamente convogliata impedisce la fuoriuscita dei fumi verso il locale riscaldato. Lo scambio termico ha luogo essenzialmente per irraggiamento, mentre la mancanza di convezione e la necessità di operare con un forte eccesso d’aria

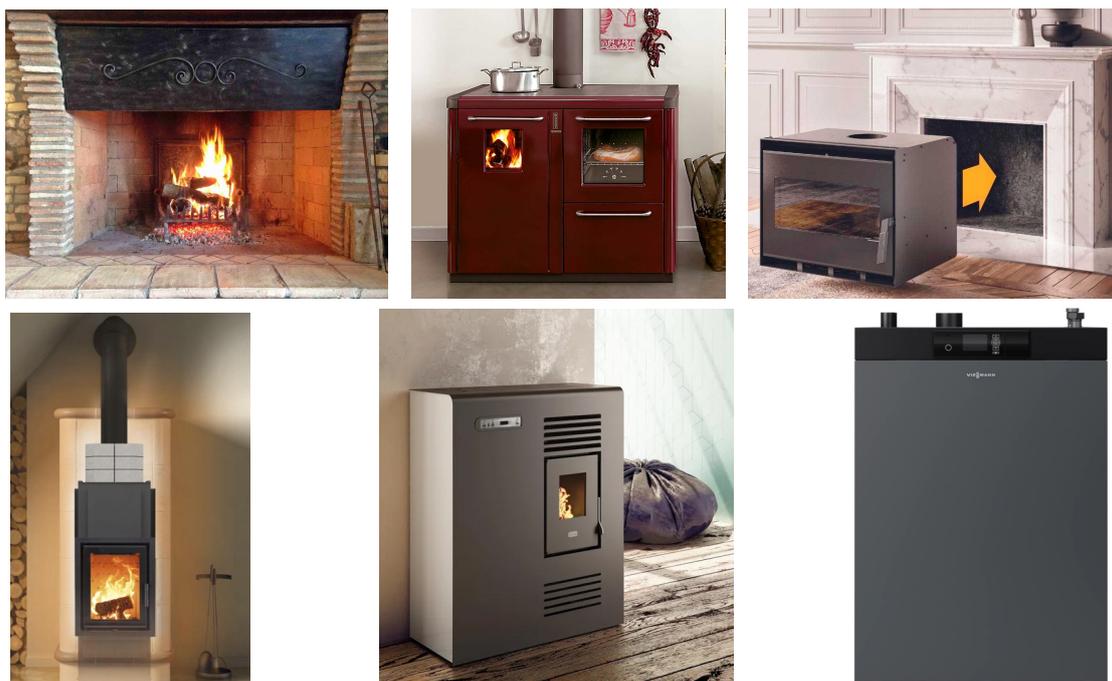


Figura 3: Generatori di calore a legna. In alto da sinistra: caminetto aperto, cucina a legna tradizionale, caminetto chiuso con inserto. In basso da sinistra: stufa moderna con tre accumulatori a piastre, stufa a pellet, caldaia a pellet.

fanno sì che l'efficienza sia molto bassa, ovvero che la maggior parte della legna sia sprecata dal punto di vista termico.

- **Stufa tradizionale del tipo “cucina economica”** nella quale lo scambio termico con l'ambiente ha luogo per irraggiamento e per convezione naturale (non forzata). Di conseguenza, l'efficienza termica è bassa e la sicurezza lascia a desiderare, soprattutto per la necessità di aprire spesso lo sportello per il carico della legna e lo smaltimento della cenere.
- **Caminetto chiuso** nel quale un apposito inserto consente di utilizzare al meglio uno spazio pensato, probabilmente, per un focolare aperto salvaguardando, nello stesso tempo, le persone da possibili avvelenamenti con monossido di carbonio. Lo scambio termico per irraggiamento si riduce rispetto alle stufe tradizionali ma, se l'inserto è dotato di ventilatore, l'aria ambiente viene riscaldata per convezione forzata migliorando l'efficienza termica complessiva.
- **Stufa moderna a legna** nella quale lo sportello è a tenuta stagna e, ad esempio, la presenza di piastre (come nella figura), consente di accumulare una certa quantità di calore da cedere all'ambiente dopo lo spegnimento del focolare. La sicurezza è buona ma l'efficienza, almeno nelle versioni non ventilate, è bassa.
- **Stufa moderna a pellet** nella quale vengono utilizzati, come combustibile i pellet, cioè trucioli di legno pressati in forma di cilindretti. Date le ridotte dimensioni

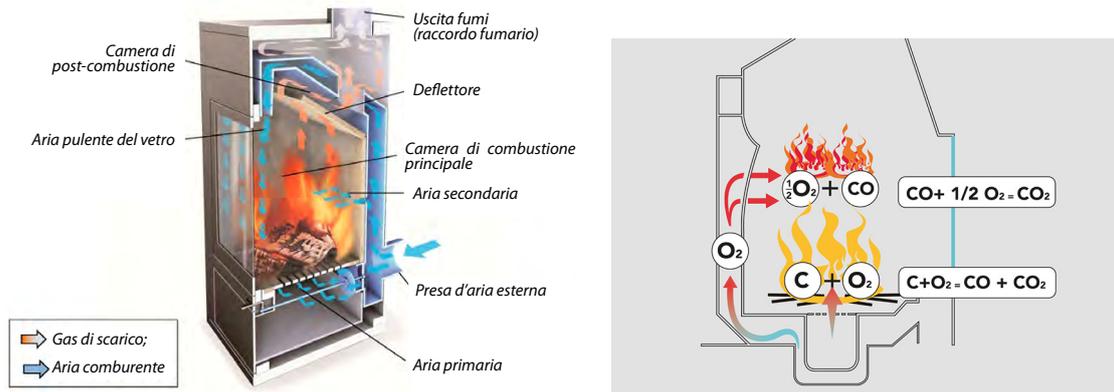


Figura 4: Stufa a due flussi. A sinistra: schema costruttivo [TFZ Straubing] e a destra: reazioni chimiche nella combustione principale e nella post-combustione, dove CO rappresenta tutti gli incombusti [Palazzetti].

dei pellet, le stufe che li impiegano possono essere alimentate automaticamente regolando la portata di combustibile in base alle esigenze termiche. Come si nota anche nell'immagine riportata, le stufe a pellet sono sempre ventilate e l'efficienza termica è buona.

- **Caldia a pellet** nella quale vengono ancora utilizzati i pellet ma, come suggerisce il nome, il calore viene ceduto non all'aria ambiente ma all'acqua dell'impianto di riscaldamento. (Infatti, nell'immagine si distinguono, oltre all'imbocco del camino, gli attacchi per l'entrata e l'uscita dell'acqua dell'impianto di riscaldamento). Poiché lo scambio termico con l'acqua nelle caldaie è più efficiente dello scambio termico con l'aria nelle stufe, le caldaie a pellet sono caratterizzate da efficienze dell'ordine, nelle migliori caldaie a pellet, delle efficienze delle caldaie a gasolio.

L'evoluzione tecnologica degli ultimi anni ha permesso il graduale aumento dell'efficienza dei generatori di calore a legna e la contemporanea riduzione delle emissioni. A titolo di esempio, e senza entrare in troppi dettagli tecnologici, ci si può limitare alla descrizione del miglioramento forse più importante: l'introduzione della combustione con due flussi d'aria schematizzata nella Figura 4. Come si vede nello schema costruttivo a sinistra, l'aria comburente presa dall'esterno è suddivisa in due flussi: il flusso primario entra dal basso e consente la combustione principale, mentre il flusso secondario entra da un lato e rende possibile la post-combustione. (Nelle stufe con vetro, come quella rappresentata in figura, un terzo flusso addizionale di aria pulita lambisce il vetro con funzioni di anti sporco prima di essere utilizzato come aria primaria).

Dal punto di vista della "chimica" della combustione, nella Figura 4 a destra, sono evidenziate le reazioni che hanno luogo nelle due fasi della combustione, facendo riferimento al solo carbonio come rappresentativo di tutte le sostanze combustibili contenute nella legna. La combustione principale del carbonio (C) lascia molti incombusti pericolosi (CO) che, in teoria, la post-combustione dovrebbe eliminare completamente trasformandoli in prodotti innocui (CO<sub>2</sub>) ma, in pratica, riesce solo a ridurre fortemente.

Tabella 1 – Confronto fra i fattori di emissione (emissione per unità di combustibile bruciato, espressa in giga Joule di energia) di diversi inquinanti prodotti dagli apparecchi a legna e da altri combustibili usati per riscaldare nelle abitazioni. Fonte: Inventario Inemar, ARPALombardia (2018)

	PM10	NOX	SO2	CO	COV	Black carbon	B(a)P
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	mg/GJ
Legna – Caminetto aperto	860	100	13	5.000	1.000	59	180
Legna – Caminetto chiuso	380	100	13	4.000	500	59	100
Legna – Stufa tradizionale	480	100	13	5.000	300	47	250
Legna – Stufa avanzata	380	100	13	4.000	300	60	100
Legna – Stufa a pellet	76	100	13	150	15	11	50
Gas naturale	0,2	35	0,5	25	5	0,01	0,001
GPL	0,2	50	0,2	10	2	0,01	0,001
Gasolio	5,0	50	47	20	3	0,2	0,08
Olio combustibile	15	150	146	16	12	0,5	0,08

## 2.2 Emissioni dei combustibili usati per il riscaldamento

Da quanto detto sinora, emerge chiaramente che le combustioni complete sono pressoché impossibili da ottenere con i combustibili solidi, mentre è noto che, con i combustibili gassosi, le combustioni complete sono la “regola” e che, con i combustibili liquidi, le combustioni complete sono approssimate tanto meglio quanta più fine è la polverizzazione, ovvero quanto minore è la viscosità dei liquidi polverizzati. (In tale contesto, tutti sanno, ad esempio, che la viscosità del gasolio è molto inferiore a quella dell’olio combustibile).

La Tabella 1, compilata da Caserini sulla base dell’INventario delle EMissioni in ARia (INEMAR) dell’ARPAL (Azienda Regionale per la Protezione Ambientale della Lombardia) conferma questi presupposti. Infatti, dalla tabella si evince che le emissioni specifiche (esprese in grammi, o milligrammi, di inquinante per gigajoule, ovvero miliardi di joule di energia) dei combustibili usati per il riscaldamento degli edifici sono molto alte per la legna, molto basse per il gas naturale e i GPL (gas di petrolio liquefatti che evaporano prima della combustione), soddisfacenti per il gasolio e certamente insufficienti, anche se inferiori a quelle della legna, per l’olio combustibile.

(Per giustificare la presenza in tabella della voce indipendente “Black carbon” va detto che con PM10 si indicano “tutte” le Particelle di Materia con diametro medio minore o uguale ai 10 millesimi di millimetro, ma che una “frazione” di queste particelle è costituita da fuliggine chiamata Black carbon in quanto costituita, come si è detto, da particelle di carbonio, generalmente molto piccole, non completamente bruciate).

A questo punto può essere interessante notare che le emissioni specifiche di particolato (PM10) per i caminetti a legna sono  $860/0,2 = 4.300$  volte superiori a quelle di una caldaia a gas naturale e  $860/15 = 57,3$  volte superiori a quelle di una caldaia a olio combustibile; le emissioni di fuliggine sono 5.900 volte superiori a quelle di una caldaia a gas naturale e 118 volte superiori a quelle di una caldaia a olio combustibile e le emissioni di IPA sono 180.000 volte superiori a quelle di una caldaia a gas naturale e 2.250 volte superiori a

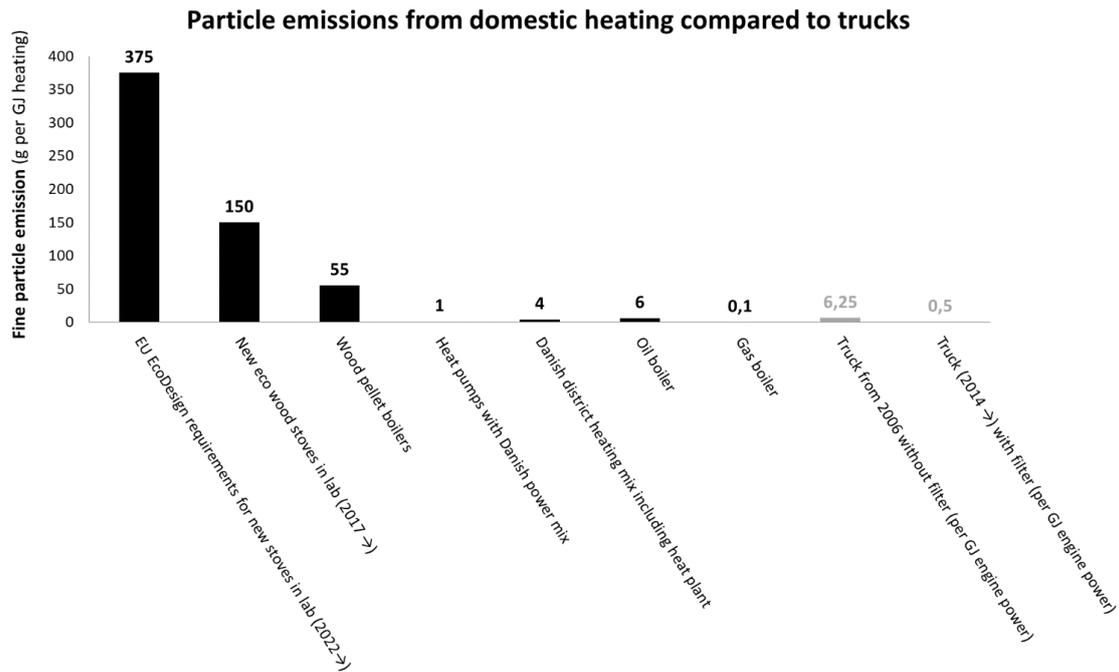


Figura 5: Confronto delle emissioni specifiche di particelle PM2.5 (espresse in g/GJ) tra autocarri con e senza filtro antiparticolato e i sistemi di riscaldamento domestico usati in Danimarca [Green Transition - Denmark].

quelle di una caldaia a olio combustibile. Detto diversamente, a parità di potenza termica prodotta, le emissioni generate da un solo caminetto a legna sono pari a quelle di:

- 4.300 caldaie a gas o 57 caldaie a olio combustibile per il particolato PM10;
- 5.900 caldaie a gas o 118 caldaie a olio combustibile per la fuliggine (black carbon);
- 180.000 caldaie a gas o 2.250 caldaie a olio combustibile per gli IPA.

Un altro confronto interessante è stato fatto in Danimarca tra le emissioni di PM2.5 dei sistemi di riscaldamento domestico e degli autocarri. Senza insistere sui valori riportati nella Figura 5 che non trovano corrispondenza nella situazione italiana, ai fini che qui ci si propone basta confrontare le emissioni delle stufe a legna conformi alla norma EU EcoDesign 2022 (Progettazione Ecomompabile EU 2022), con le emissioni di caldaie a gas e ad olio combustibile ma, soprattutto, con le emissioni di “nuovi” autocarri, immatricolati dopo il 2014 e, quindi, dotati di filtro antiparticolato, e “vecchi” autocarri, immatricolati tra il 2006 e il 2014 e, quindi, senza filtro antiparticolato.

(Può essere interessante notare che con “new eco wood stoves” cioè “nuove stufe ecologiche a legna” nella figura si intendono le stufe a legna che hanno ottenuto il marchio di qualità ambientale Nordic Swan introdotto nel 1989 dal Consiglio dei Ministri Nordici e che, almeno nel caso considerato, impone requisiti di sostenibilità superiori a quelli previsti dall’Unione Europea).

Ciò premesso, procedendo come in precedenza si trova che le emissioni specifiche di particolato (PM<sub>2.5</sub>) di una nuova stufa a legna EU EcoDesign 2022 sono  $375/0,1 = 3.750$  volte superiori a quelle di una caldaia a gas naturale e  $375/6 = 62,5$  volte superiori a quelle di una caldaia a olio combustibile. Pertanto, a parità di potenza termica, le rilevazioni danesi indicano che una caldaia a legna nuova emette PM<sub>2.5</sub> come:

- 3.750 caldaie a gas o 62 caldaie a olio combustibile.

Gli esiti del confronto con gli autocarri sono ancora più preoccupanti: a una nuova stufa EcoDesign 2022 è consentito di emettere per unità di energia prodotta  $375/0,5 = 750$  volte più PM<sub>2.5</sub> di un nuovo autocarro con filtro antiparticolato, e  $375/6,25 = 60$  volte più PM<sub>2.5</sub> di un vecchio autocarro senza filtro antiparticolato. Poiché il rapporto tra la potenza di un autocarro e quella di una stufa è pari a 10 circa (20 kW per la stufa e 200 kW per l'autocarro) i risultati ottenuti vanno divisi per 10 e, di conseguenza, risulta che una nuova stufa a legna EU EcoDesign 2022 emette PM<sub>2.5</sub> come:

- $750/10 = 75$  nuovi autocarri con filtro antiparticolato o
- $60/10 = 6$  vecchi autocarri senza filtro antiparticolato.

### 3 Particolato ed idrocarburi policiclici aromatici

Come si è ripetutamente osservato, tra le emissioni inquinanti associate alla combustione della legna, quelle di particolato (PM) e di idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono, probabilmente, le più pericolose per la salute a causa della loro tossicità intrinseca e per il fatto di essere localizzate, prevalentemente, in aree residenziali. Inoltre, gli effetti dei due inquinanti sono sinergici (ovvero tendono a potenziarsi reciprocamente) dal momento che gli IPA si depositano sul particolato (al punto che, ad esempio, la Direttiva 2004/107/EC prevede che il monitoraggio degli IPA venga effettuato misurando il contenuto totale di BaP nella frazione PM<sub>10</sub> del particolato).

Secondo l'ISTAT, nel 2021 gli impianti di riscaldamento alimentati a biomasse in Italia erano il 15% del totale, contro l'81,9% del degli impianti a metano, mentre l'alimentazione a biomasse era di gran lunga prevalente per gli apparecchi singoli fissi come caminetti e stufe. (Le statistiche confermano, quindi, la sensazione che un numero crescente di famiglie, pur vivendo in abitazioni dotate di impianto di riscaldamento a gas naturale, usino caminetti e stufe a legna come sistema integrativo che consente di risparmiare sulle spese di riscaldamento).

D'altra parte, come si è visto, le emissioni specifiche della legna per i due inquinanti "tipici" considerati in questo paragrafo sono molto più elevate di quelle dei combustibili concorrenti e, di conseguenza, non è sorprendente che le emissioni totali di PM e IPA attribuibili alla legna siano percentualmente più elevate dei consumi di legna, al punto di essere molto importanti in assoluto come si evince chiaramente dalla Figura 6 riprodotta dall'Annuario dei Dati Ambientali 2021 dell'ISPRA.

La Figura 6 riporta gli andamenti, tra il 1990 e il 2019, delle emissioni nazionali assolute di particolato PM<sub>10</sub> e PM<sub>2.5</sub>, espresse in migliaia di tonnellate all'anno (kt/a) e suddivise per settori di attività come illustrato nella. Nella figura, le emissioni dovute

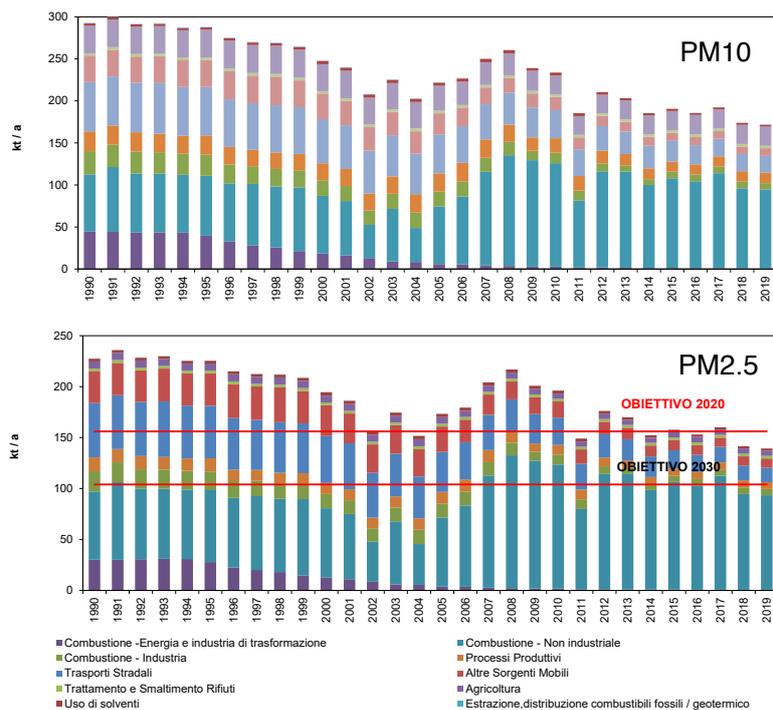


Figura 6: Emissioni nazionali assolute di particolato PM10 e PM2.5 nel 2021, espresse in migliaia di tonnellate all'anno [kt] e suddivise per settori di attività. [ISPRA modificata].

alla legna sono censite come: Combustione - Non industriale, ovvero in un settore nel quale, praticamente, tutte le emissioni di sono dovute alla legna poiché gli impianti di riscaldamento a gas naturale non emettono PM.

La situazione delineata dai grafici di Figura 6 è ben riassunta nei commenti dell'ISPRA riportati più sotto.

- Le emissioni nazionali di PM10 si sono ridotte nel periodo 1990-2019 del 41,3%. Tuttavia, pur con il trend complessivo in decrescita, dall'analisi di dettaglio settoriale, si sono evidenziati degli incrementi. In particolare, le emissioni provenienti dalla combustione non industriale sono cresciute del 38,8% tra il 1990 e il 2019, a causa dell'aumento registrato nella combustione di legna negli impianti di riscaldamento residenziali che, nel 2019, hanno rappresentato il settore più importante con il 54,7% di peso sulle emissioni totali. Nel medesimo periodo, le emissioni di PM10 derivanti dal trasporto stradale sono diminuite del 66% contribuendo alle emissioni totali con una quota emissiva dell'11,6% nel 2019.
- I livelli di emissione del PM2,5 sono pari nel 2019 a 139 kt (migliaia di tonnellate), ovvero al di sotto dell'obiettivo fissato per il 2020 (156 kt), essendosi ridotte del 38,7% rispetto ai valori del 1990. Nonostante il trend complessivo sia in decrescita, dall'analisi di dettaglio settoriale, si evidenziano degli incrementi. In particolare, le emissioni provenienti dalla combustione non industriale sono cresciute del 38,7% tra il 1990 e il 2019, a causa dell'aumento registrato nella combustione di legna

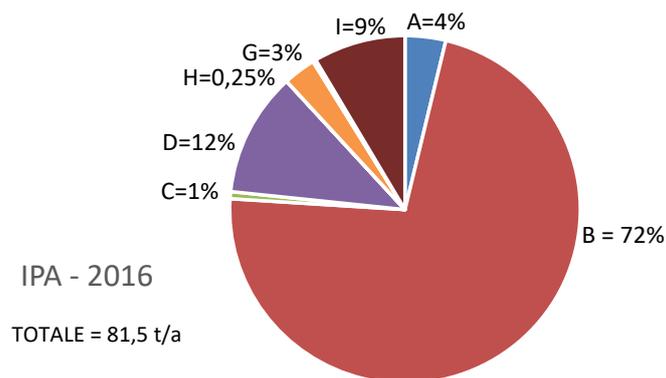


Figura 7: Ripartizione percentuali delle emissioni nazionali di idrocarburi policiclici aromatici nel 2016, suddivise tra i settori di attività: A - Combustione energia e industria di trasformazione, B - Combustione non industriale, C - Combustione industriale, D - Processi produttivi, G - Trasporti stradali, H - Altre sorgenti mobili e I - Trattamento e smaltimento rifiuti [elaborazione su dati ISPRA].

negli impianti di riscaldamento residenziali che, nel 2019, hanno rappresentato il settore più importante con il 66,6% di peso sulle emissioni totali.

Per quanto riguarda i dati sulle emissioni di idrocarburi policiclici aromatici in Italia, si può far riferimento al Rapporto ISPRA più recente che risale al 2019 (ma è basato sui dati del 2016). Dal diagramma a torta, riportato nella Figura 7 si evince che, nel 2016 in Italia, le emissioni totali di IPA sono state pari a 81,5 tonnellate, e che il 72% di esse è attribuibile alla combustione della legna (Settore B - Combustione non industriale).

Sugli andamenti delle emissioni di IPA dal 1990 al 2016, qui non riportati per brevità, l'ISPRA così si esprime:

- Le emissioni di IPA mostrano nel 2016 una riduzione complessiva rispetto al 1990 del -17,4%. Tuttavia esaminando il periodo 1990-2016 si rileva un andamento abbastanza costante dal 1990 al 1999, una brusca caduta tra il 1999 e il 2000 (-32,1%) e una ripresa a partire dal 2005. Il forte calo che si verifica nel 1999-2000 è da imputare principalmente ai miglioramenti tecnologici nei processi produttivi (acciaierie). Per contro, le emissioni del settore della combustione non industriale mostrano una rilevante crescita lungo tutto il periodo (+84,8%), accentuata da un ingente aumento di consumo di legna a uso riscaldamento. Questi due settori, la cui quota sul totale delle emissioni era nel 1990 rispettivamente pari al 45,6% e 32,3%, coprono nel 2016 rispettivamente l'11,5% e il 72,3% delle emissioni di IPA totali.

Una volta stabilita l'importanza quantitativa delle emissioni di particolato ed idrocarburi policiclici aromatici attribuibili alla combustione della legna non resta che descrivere sommariamente i rischi per la salute rappresentati da questi inquinanti.

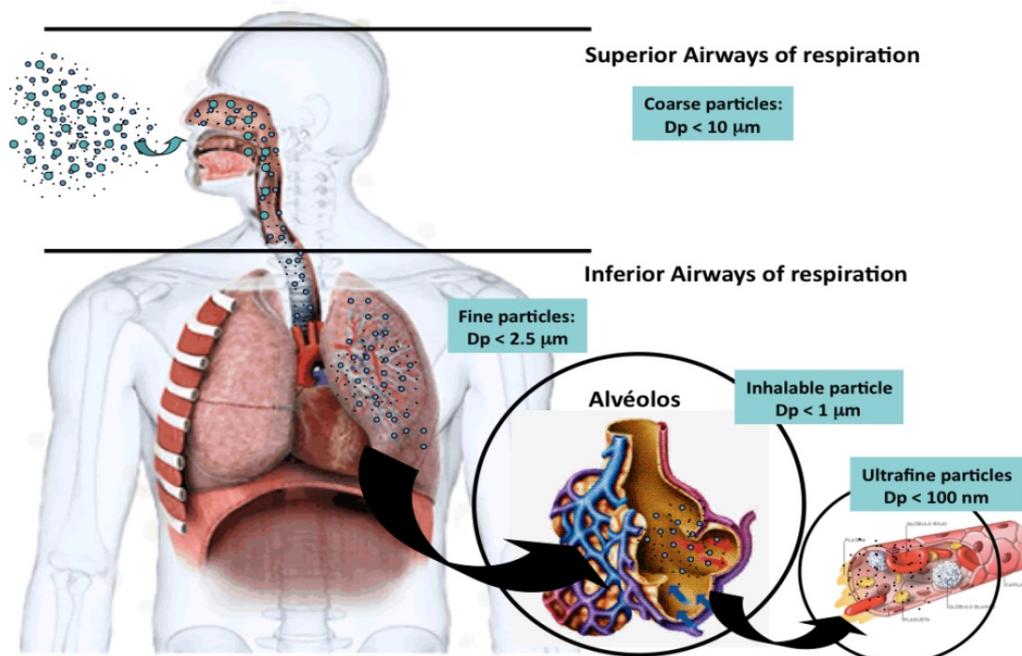


Figura 8: Penetrazione differenziale del particolato nel sistema respiratorio in funzione del diametro  $D_p$  delle particelle espresso in micron [ $\mu\text{m}$ ] ( $1 \mu\text{m} = 1$  milionesimo di metro cioè 1 millesimo di millimetro) e in nanometri [nm] ( $1 \text{ nm} = 1$  miliardesimo di metro) [Ozgen e al].

### 3.1 Il particolato e la salute umana

Come si può intuire dalla Figura 8, la pericolosità del particolato è inversamente proporzionale alle sue dimensioni perché al diminuire delle dimensioni aumenta la capacità di penetrare in profondità nell'apparato respiratorio. Più in dettaglio, la figura mostra che le particelle “grossolane” con diametro compreso tra 10 e  $2,5 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m}$ , ovvero 1 micron cioè 1 millesimo di millimetro) si fermano nelle vie aeree superiori, quelle “fini” con diametro compreso tra  $2,5$  e  $1 \mu\text{m}$  si fermano nei bronchi, mentre quelle con diametro inferiore ad  $1 \mu\text{m}$  arrivano agli alveoli polmonari e per questo motivo sono considerate “inalabili”. Le più piccole tra le particelle inalabili, talvolta definite “ultrafini” in quanto hanno diametro inferiore a  $0,1 \mu\text{m}$  (ovvero 0,1 millesimi di millimetro pari a 100 nm cioè 100 miliardesimi di metro), possono passare dagli alveoli, dove avviene lo scambio tra  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$ , al sistema cardiovascolare causando gravi infiammazioni.

(Gli effetti sulla salute delle particelle “fini” appartenenti alla classe PM1 sono stati messi in luce da studi relativamente recenti e, di conseguenza, non vi sono ancora limiti normativi per le PM1. A questo proposito, però, è opportuno osservare che la classe PM10 comprende “tutte” le particelle con dimensioni inferiori a  $10 \mu\text{m}$ , mentre la classe PM2.5 comprende tutte le particelle con dimensioni inferiori a  $2,5 \mu\text{m}$ . Pertanto la classe PM1 è un sottoinsieme della classe PM2.5, come entrambe le classi PM2.5 e PM1 sono sottoinsiemi della classe PM10.)

Secondo l'EPA - Environmental Protection Agency (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente) degli Stati Uniti, il particolato contenuto nel fumo di legna causa seri danni

sia a breve sia a lungo termine. Tra i danno a breve termine l'EPA cita:

- irritazioni di occhi, naso, gola e polmoni,
- crisi asmatiche e peggioramento di patologie in essere come l'enfisema e la bronchite cronica,
- aumenti del rischio di infarti e ictus.

Tra i possibili danni a lungo termine l'EPA include:

- l'insorgenza di bronchite cronica ed enfisema e
- in sinergia con gli IPA depositati sul particolato, anche mutazioni nel DNA che possono condurre al cancro ai polmoni.

Come spesso succede, gli adulti in buona salute hanno una resistenza migliore al fumo di legna mentre le categorie fragili vanno incontro alle conseguenze peggiori:

- i bambini perché, rispetto agli adulti, respirano una quantità maggiore di aria per unità di massa corporea in quanto i loro polmoni sono ancora in fase di sviluppo;
- gli anziani perché, molto spesso, sono affetti da qualche patologia cronica e, soprattutto, perché il loro ritmo cardiaco si adegua con maggiore difficoltà agli stress;
- gli adulti con patologie polmonari e cardiache, perché il fumo di legna peggiora i sintomi e può scatenare gravi crisi.

Molto concretamente, queste conseguenze si traducono in aumenti delle morti premature attribuibili all'inquinamento da PM2.5 (frazione particellare tipica del fumo di legna), come si vede dalla Mappa Eurostat riportata nella Figura 9.

### **3.2 Gli IPA e la salute umana**

Gli IPA, presenti nel pulviscolo atmosferico dei centri abitati, tendono ad unirsi alle particelle con dimensioni inferiori ai 2 millesimi di millimetro e, così veicolati, sono in grado di raggiungere gli alveoli polmonari e da questi possono arrivare al sistema cardiovascolare. Come si è già rilevato, gli IPA, oltre ad essere degli irritanti per il naso, la gola e gli occhi, hanno proprietà mutagene e cancerogene riconosciute classificazione IARC. Inoltre, molti ricercatori associano l'esposizione agli IPA anche ad un incremento della mortalità per malattie cardiopolmonari.

L'indice normalmente utilizzato per monitorare i livelli di IPA nell'aria è la concentrazione di benzo(a)pirene BaP, che oltre a essere il più importante degli IPA, si presenta in rapporto pressoché costante con gli altri IPA. Infatti, il Decreto Legislativo in materia di qualità dell'aria - n. 155/2010, stabilisce che il limite massimo per la concentrazione media annuale del BaP è pari a  $1 \text{ ng/m}^3$  (1 nanogrammo, cioè 1 miliardesimo di grammo per metro cubo), calcolato come media delle concentrazioni giornaliere di BaP e riferito al tenore totale di BaP presente nella frazione PM10 del particolato.

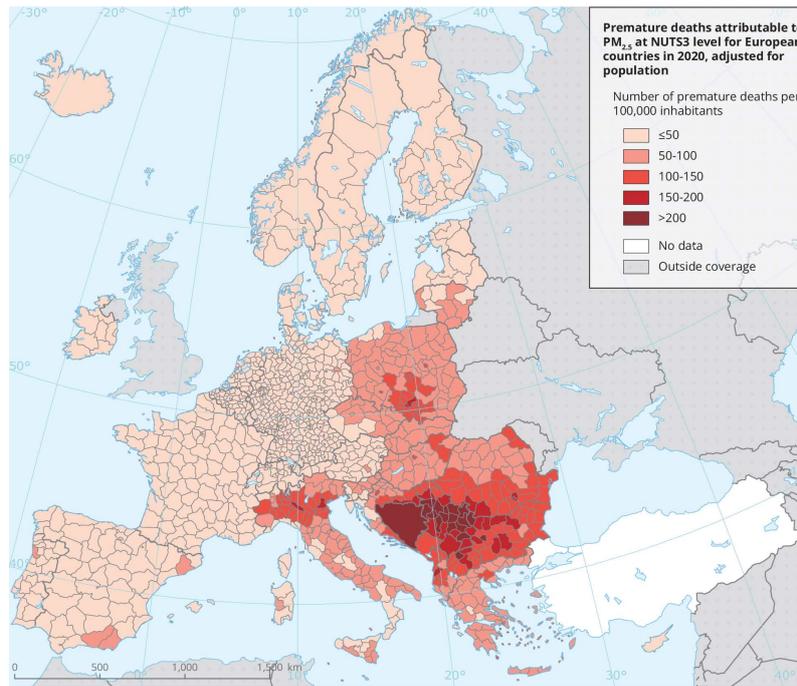


Figura 9: Morti premature per 100.000 abitanti nel 2020 in Europa, attribuibili all'inquinamento da PM<sub>2.5</sub> e misurate nelle diverse NUTS3 (Unità Statistiche di Terzo livello che, in Italia corrispondono all'incirca alle province) [Eurostat/GISCO].

Come si è già osservato, il BaP può formarsi in tutte le combustioni incomplete di sostanze organiche a base di carbonio e idrogeno, e nei generatori di calore a legna si forma in grandi quantità a partire dalla combustione incompleta della cellulosa, che è il componente principale del legno. In armonia con tale presupposto, uno studio recente dell'INAIL sull'inquinamento da IPA nella zona di Roma ha confermato che a causa, soprattutto, del riscaldamento domestico a legna, le concentrazioni di IPA invernali superano di circa 10 volte quelle primaverili. Inoltre, abbastanza sorprendentemente, lo stesso studio ha rivelato che gli abitanti delle zone urbane sono esposti agli IPA sia all'esterno sia all'interno delle abitazioni, in quanto gli IPA presenti all'esterno sono facilmente trasportati all'interno dalle infiltrazioni d'aria e, in aggiunta, altri IPA sono generati direttamente all'interno da attività come la cottura dei cibi.

Più in dettaglio, con riferimento alla media delle rilevazioni si è rilevato che:

- all'interno delle abitazioni, il totale degli IPA cancerogeni raggiunge 5,2 ng/m<sup>3</sup> in inverno, 0,62 ng/m<sup>3</sup> in primavera e 0,39 ng/m<sup>3</sup> in estate;
- nelle scuole, gli IPA all'interno sono pari a 6,1 ng/m<sup>3</sup> in inverno, 0,58 ng/m<sup>3</sup> in primavera e a 0,46 ng/m<sup>3</sup>, in estate;
- negli uffici, gli IPA sono a pari 5,0 ng/m<sup>3</sup> d'inverno e 0,43 ng/m<sup>3</sup> in primavera;
- nelle autovetture si registrano 4,67 ng/m<sup>3</sup> di IPA in inverno e 0,64 ng/m<sup>3</sup> in estate.

Per quanto riguarda gli impatti sanitari, l'INAIL ha studiato gli effetti dell'esposizione ad IPA sui volontari (tutti residenti nella zona di Roma). In particolare, sono stati indagati gli effetti acuti (variabilità giornaliera degli IPA in relazione alla mortalità) e gli effetti cronici (distribuzione geografica degli IPA ed attribuzione agli indirizzi dei soggetti partecipanti allo studio).

Nel primo caso, è stata evidenziata l'associazione tra esposizione agli IPA e mortalità per crisi acute, stimando un incremento di mortalità del 3,1% per aumenti di  $1 \text{ ng/m}^3$  nella concentrazione degli IPA verificatesi tra 2 e 5 giorni prima del decesso, con relazione tra dose e risposta di tipo lineare. Meno chiari, anche per il tempo necessariamente limitato (4 anni) che si è dedicato all'indagine, sono i risultati sugli effetti cronici per i quali si sono, comunque, stimati aumenti del rischio di decesso del 4% per cause naturali e cardiovascolari e dell'8% per tumore polmonare ad ogni aumento di  $1 \text{ ng/m}^3$  nella concentrazione degli IPA.

## 4 La risposta normativa

Con Decreto 7 novembre 2017 n. 186, l'allora "Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare" ha emanato il "Regolamento recante la disciplina dei requisiti, delle procedure e delle competenze per il rilascio di una certificazione dei generatori di calore alimentati a biomasse combustibili solide". In perfetto "burocratese" questo regolamento stabilisce "i requisiti, le procedure e le competenze per il rilascio di una certificazione ambientale dei generatori di calore alimentati con legna da ardere, carbone di legna e biomasse combustibili, ed inoltre individua le prestazioni emissive di riferimento per le diverse classi di qualità, i relativi metodi di prova e le verifiche da eseguire ai fini del rilascio della certificazione ambientale, nonché le indicazioni da fornire sulle corrette modalità di installazione e gestione dei generatori di calore".

Senza entrare in dettagli troppo tecnici, qui basta dire che tale sistema di "certificazione di prodotto" si applica a tutti i generatori di calore a legna ai quali viene attribuita una classe di qualità identificata mediante un numero crescente di "stelle", variabile da 1 a 5. In questo modo, ad un maggiore numero di stelle corrisponde una migliore "qualità" di prodotto, valutata in termini di:

- emissioni di particolato;
- emissioni totali di composti organici (COV e IPA);
- emissioni di ossidi di azoto (NOX);
- emissioni di monossido di carbonio (CO) e
- rendimento energetico.

Dal canto suo l'AIEL - Associazione Italiana Energie Agroforestali ha tradotto le prescrizioni ministeriali nell'etichetta di certificazione "AriaPulita", illustrata nella Figura 10. Tale etichetta, pur essendo necessariamente sintetica, è di facile lettura e fornisce una indicazione oggettiva sulle prestazioni ambientali ed energetiche dei generatori di calore

## Come leggere l'etichetta **ariaPULITA**



Figura 10: Certificato di qualità per i generatori di calore a legna) [AIEL].

a legna. In questo modo i consumatori possono scegliere consapevolmente il prodotto da acquistare mentre i decisori possono, se lo ritengono, stabilire dei limiti di utilizzo per i prodotti con un minor numero di stelle.

(I generatori di calore a legna più vecchi, evidentemente, non possono avere etichette ma, in linea di massima, si può considerare che i caminetti appartengono alla categoria 1 stella, mentre le stufe raramente superano le 2 stelle).

Evidentemente, il Decreto Ministeriale ha chiamato in causa le Regioni (e, naturalmente, le Province Autonome di Trento e Bolzano) in quanto esercitano un ruolo centrale in materia di tutela della salute. Purtroppo, ancora una volta, le Regioni sono andate avanti in ordine sparso e, di conseguenza, è molto difficile riassumere, in questa sede, i diversi regolamenti con le loro sfumature. Va però segnalato che nell'area forse più critica, quella padana: Piemonte, Lombardia, Emilia-Romagna e Veneto, in accordo con il Ministero dell'Ambiente, hanno approvato misure di limitazione all'installazione e all'utilizzo dei generatori di calore a biomassa legnosa. Infatti dall'1 gennaio 2020 queste Regioni vietano:

- l'installazione di generatori di calore a legna con meno di 4 stelle e
- l'utilizzazione di generatori di calore a legna con meno di 3 stelle (sia pure con alcune eccezioni evidenziate nella Figura 11)

Altre Regioni, come ad esempio la Toscana, hanno adottato provvedimenti abbastanza "variegati", mentre un ultimo gruppo di Regioni non ha desisto alcuna limitazione all'installazione ed all'uso dei generatori di calore a legna, spesso con la motivazione di

	Installazione	Utilizzo
Lombardia Veneto		Da ★★★★★ in su
Emilia Romagna	Da ★★★★★ in su	Da ★★★★★ in su Non si applica nei territori sopra i 300 metri di altitudine e per le cucine a legna.
Piemonte		Da ★★★★★ in su nelle zone montane individuate dalla Giunta Regionale è possibile utilizzare stufe e caminetti di classe inferiore
Toscana	Costruzioni esistenti: Nessuna limitazione Nuove costruzioni o ristrutturazioni: Da ★★★★★ in su	Costruzioni esistenti: Nessuna limitazione Nuove costruzioni o ristrutturazioni: Comuni salubri: Nessuna limitazione; Comuni critici: 

Figura 11: Esempi di limitazioni regionali all'impiego dei generatori di calore a legna.

voler “aiutare economicamente le famiglie in periodi di grande difficoltà quale quello che stiamo vivendo”.

Ovviamente, i divieti approvati dalle Regioni che li hanno decisi, vogliono ottenere un'aria più pulita limitando l'uso di apparecchi per cucinare e riscaldarsi a nuclei familiari che, probabilmente, intendono solo risparmiare sulle spese per l'energia. Tuttavia, il divieto di utilizzo degli apparecchi più inquinanti è una modalità indispensabile per proteggere la salute di tutte le persone, anche di quelle con un reddito basso. Inoltre, è bene specificare che, nella maggior parte dei casi i divieti si applicano solo quando nelle abitazione sono presenti modalità alternative di riscaldamento (es. metano).

## Bibliografia

**AA Vari**, *How Wood Smoke Harms Your Health*, Dipartimento di Ecologia, Stato di Washington, 2012.

**AA Vari**, *Where There's Fire, There's Smoke*, European Environmental Bureau e Green Transition - Denmark, 2021.

**ARPAE**, *Impatto della combustione di legna e pellet sulla qualità dell'aria*, arpae.it, visto il 23 marzo 2023.

**ARPAV**, *Inventario regionale delle emissioni in atmosfera*, INEMAR Veneto 2017, 2021.

**O. Arrieta e al**, *Clinical and Pathological Characteristics, Outcome and Mutational Profiles Regarding Non-Small-Cell Lung Cancer Related to Wood-Smoke Exposure*, J. Thor. Oncol., vol. 7, pp. 1228-1234, 2012.

**S. Caserini**, *La combustione di legna in piccoli apparecchi domestici: impatti sulla qualità dell'aria e strategie di riduzione*, Ingegneria dell'Ambiente, vol. 5 (2), pp. 127-134, 2018.

**A. Ciccinielli e A. Katsogiannis editori**, *Environmental health: Urban air pollution and human health*, Current Opinion in Environmental Science & Health, Special Issue, vol. 8, 2019.

**G. Comini, G. Croce e S. Savino**, *Energetica Generale, Quinta Edizione*, SGEEditoriali, Padova, 2011.

**G. Comini e M. Libralato**, *Il Cambiamento Climatico - Il Punto di Vista Fisico-Tecnico, Nuova Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**G. Comini e M. Libralato**, *Verso una Nuova Energetica - Dalle Fonti Esauribili alla Decarbonizzazione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**G. Comini e G. Cortella**, *Fondamenti di Trasmissione del Calore, Terza Edizione Rivista e Aggiornata*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**G. Comini e S. Savino**, *Fondamenti Termodinamici dell'Energetica, Ristampa della Quarta Edizione*, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

**E. Corsini, M. Marinovich e R. Vecchi**, *Ultrafine Particles from Residential Biomass Combustion: A Review on Experimental Data and Toxicological Response*, Int. J. Mol. Sci., vol. 20, 4992, 2019.

**D.P. Croft e al**, *Associations between ambient wood smoke and other particulate pollutants and biomarkers of systemic inflammation, coagulation and thrombosis in cardiac patients*, Inhal. Toxicol., vol. 154, pp. 352-361, 2017.

**European Environmental Agency**, *Health impacts of air pollution in Europe*, 2022.

**C. Gariazzo e al**, *Association between short-term exposure to air pollutants and cause-specific daily mortality in Italy. A nationwide analysis*, Environmental Research, vol. 216, 114676, 2023.

**INAIL**, *Le polveri fini e ultrafini*, inail.it, visto il 23 marzo 2023.

**ISPRA**, *Annuario in Cifre, Annuario dei Dati Ambientali 2021*, 2022.

**D.G. Kaskaoutis e al**, *Impacts of severe residential wood burning on atmospheric processing, water-soluble organic aerosol and light absorption, in an inland city of Southeastern Europe*, vol. 280, 119139, 2022.

**B. Languille e al**, *Wood burning: A major source of Volatile Organic Compounds during wintertime in the Paris region*, *Sci. Tot. Env.*, 135055, 2020.

**LIFE+ EXPAH Project**, *Esposizione della popolazione a IPA*, Rapporto di sintesi, 2014.

**C. Lin e al**, *Extreme Air Pollution from Residential Solid Fuel Burning*, *Nature Sustainability*, vol. 1, pp. 512-517, 2018.

**B. Moench e al**, *Report on the Health Consequences of Wood Smoke*, Utah Physician for a Healthy Environment, 2015.

**L.T. Naeher e al**, *Woodsmoke health effects: a review*, *Environmental Research*, vol. 19(1), pp. 67-106, 2007.

**S. Ozgen e al**, *Effetti tossicologici del particolato ultrafine emesso da impianti residenziali a biomassa: note sul progetto TOBICUP*, *Ingegneria dell'Ambiente*, vol. 5 (1), pp. 55-60, 2018.

**M.C. Pietrogrande e al**, *Chemical composition and oxidative potential of atmospheric particles heavily impacted by residential wood burning in the alpine region of northern Italy*, *Atmospheric Environment*, vol. 253, pp. 291-305, 2018.

**PREPAIR**, *Brucia bene, non bruciarti la salute*, Progetto Life, 2019.

**Regione Lombardia**, *Inquinamento atmosferico: gli effetti potenziali sulla salute*, regione.lombardia.it, visto il 23 marzo 2023.

**Regione Lombardia**, *Gli impatti del riscaldamento a legna sulla salute e sulla qualità dell'aria*, regione.lombardia.it, visto il 23 marzo 2023.

**R. Trojanowskia e V. Fthenakis**, *Nanoparticle emissions from residential wood combustion: A critical literature review, characterization, and recommendations*, *RSER*, vol. 103, pp. 515-528, 2019.

**I. Tsiadora e al**, *Annual exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in urban environments linked to wintertime wood-burning episodes*, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 21, pp. 17865-17883, 2021.

**World Health Organization**, *WHO Global Air Quality Guidelines*, Electronic Version, 2021.