



INNOVHUB
STAZIONI SPERIMENTALI
PER L'INDUSTRIA



STAZIONE SPERIMENTALE
PER I COMBUSTIBILI

Innovazione e ricerca

Studio comparativo sulle emissioni di apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet

INNOVHUB STAZIONI SPERIMENTALI PER L'INDUSRIA

CAMERA DI COMMERCIO
INDUSTRIA ARTIGIANATO
E AGRICOLTURA MILANO

*Dal 1786 l'istituzione
al servizio del sistema
produttivo.*

SEDE OPERATIVA

Via Galileo Galilei, 1
20097 San Donato Milanese MI
Tel +39 02.51604.1
Fax +39 02.514286

info.ssc@mi.camcom.it
www.innovhub-ssi.it
P.IVA 05121060965
C.F. 97425580152

Extended Summary

Sommario

Premessa 2

INTRODUZIONE..... 3

STUDIO COMPARATIVO – PARTE BIBLIOGRAFICA..... 6

 Il settore riscaldamento in Italia 6

 La produzione di inquinanti dal settore riscaldamento 9

 Tipologia 9

 Inventari delle emissioni..... 12

 Fattori di emissione 16

 Analisi degli impatti sull’ambiente e sulla salute 17

STUDIO COMPARATIVO - PARTE SPERIMENTALE..... 22

 Selezione degli apparecchi 22

 Selezione dei combustibili 23

 Impianti sperimentali 24

 Caratterizzazione iniziale/finale (pellet)..... 25

 Caratterizzazione caldaie murali (gas/GPL)..... 26

 Caratterizzazione preliminare – fattori di emissione delle stufe a pellet 26

 Caratterizzazione preliminare – risultati caldaie murali (gas naturale/GPL)..... 28

Conclusioni 35

 Bibliografia..... 36

Premessa

L'indagine di Innovhub - Stazioni Sperimentali per l'Industria "**Studio comparativo sulle emissioni da apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet**" parte dalla considerazione che il settore del riscaldamento ha un ruolo significativo nel produrre quelle emissioni inquinanti in atmosfera che generano rilevanti problemi di qualità dell'aria in molte aree italiane con frequenti periodi di crisi, che si collocano sempre durante la stagione invernale, quando gli impianti di riscaldamento sommano il proprio contributo a quelli del traffico e delle emissioni industriali. La rielaborazione delle serie storiche delle emissioni totali dei differenti settori (ISPRA 2016), ha condotto ad una significativa rivalutazione del peso del riscaldamento domestico in particolar modo per quanto riguarda il particolato (PM), gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e le diossine (PCDD-PCDF). Uno studio modellistico (ENEA 2015), ha evidenziato l'impatto negativo che le attuali politiche di decarbonizzazione basate, tra l'altro, sull'incentivazione dell'utilizzo delle biomasse hanno sulla qualità dell'aria. La validità di queste stime e di questi risultati si basa sull'attendibilità dei dati relativi ai fattori di emissione utilizzati nei calcoli; fattori che devono essere sperimentalmente determinati e periodicamente aggiornati sulla base dell'evoluzione tecnologica degli impianti e della qualità dei combustibili.

L'obiettivo del presente studio è quello di fornire nuovi, più aggiornati e più approfonditi **dati relativi alle emissioni associate al settore riscaldamento** con specifica attenzione per il riscaldamento domestico, attraverso un confronto diretto fra i principali combustibili impiegati. La parte sperimentale dello studio si focalizza sul **confronto diretto fra i combustibili gassosi** (gas naturale e GPL), che rappresentano la quota maggiore di questo settore, **e le biomasse**. In particolare, al fine di raffrontare fra loro soluzioni fra le quali esiste una diretta competizione, si sono messe a paragone le caldaie murali e le stufe a pellet, in quanto applicabili alle medesime tipologie di abitazioni ed utilizzabili in maniera simile, anche dal punto di vista della fruibilità dell'utente. Non sono invece stati presi in considerazione i caminetti e le stufe a caricamento manuale, in quanto richiedono una costante cura da parte dell'utilizzatore, che deve provvedere all'accensione manuale ed alla periodica ricarica del combustibile nel corso dell'intera giornata, se si intende mantenere una temperatura costante negli ambienti serviti; ciò implica una "filosofia abitativa" completamente differente rispetto all'impiego del tutto automatizzato delle caldaie domestiche a gas. Al contrario, le moderne stufe a pellet, dotate di sistemi di accensione e regolazione automatica, che prevedono una programmazione della temperatura dei locali o delle tempistiche di accensione e spegnimento dell'apparecchio, ne consentono una gestione flessibile anche da parte di utenti spesso assenti dall'abitazione oppure altrimenti impegnati, senza che ciò pregiudichi il grado di confort dei locali. Molte stufe a pellet sono altresì collegabili ad un impianto di distribuzione dell'aria calda o dell'acqua calda (termo-stufe) andando così a integrare o sostituire completamente le funzioni di una caldaia mono-familiare. L'analogia si estende anche alle modalità di approvvigionamento del combustibile, in quanto il pellet è necessariamente acquistato tramite canali commerciali di vendita e distribuzione, così come per i combustibili fossili, al contrario la legna da ardere è spesso autoprodotta dall'utilizzatore finale, che dispone di terreni propri o dell'accesso a boschi comuni nei quali approvvigionarsi.

Il presente studio non si sofferma invece a considerare gli aspetti relativi alle emissioni di CO₂, prodotte dai diversi combustibili, o agli aspetti relativi alla neutralità carbonica delle biomasse, valutazioni queste che sono alla base delle politiche di riduzione delle emissioni di gas serra. Ciò in quanto questi temi sono stati ampiamente e accuratamente trattati nel recente Studio ENEA “Gli impatti energetici e ambientali dei combustibili nel settore residenziale”, del quale questo lavoro si configura come una naturale estensione e supporto sperimentale.

INTRODUZIONE

La qualità dell'aria rappresenta un elemento rilevante per l'ambiente e per la salute umana: per queste ragioni, normative via via più stringenti sono state introdotte nel corso degli ultimi decenni per ridurre quelle emissioni che sono la causa dell'inquinamento atmosferico. Le **principali sorgenti antropiche** di questo inquinamento sono rappresentate dai settori industriali, del trasporto e del riscaldamento. I primi due settori sono stati oggetto di numerose regolamentazioni in tutti i paesi industrializzati a partire dagli anni '70; in particolare gli impianti industriali sono stati i primi ad essere soggetti a limiti alle emissioni ed all'obbligo di adottare tecnologie atte a ridurre la produzione di sostanze inquinanti o ad abatterle prima della loro immissione in atmosfera. Per questa ragione ed anche come conseguenza della progressiva deindustrializzazione di molte aree, in passato caratterizzate da una intensa produzione industriale, l'andamento delle emissioni inquinanti globalmente prodotte dall'industria, in molti paesi avanzati, è andata progressivamente riducendosi nel corso degli anni. Parallelamente anche il settore autotrazione ha visto una costante e progressiva riduzione delle sue emissioni specifiche, anche in questo caso grazie a legislazioni che hanno incentivato il ricambio del parco di autoveicoli circolanti e indirizzato lo sviluppo di mezzi via via meno inquinanti. Come conseguenza di ciò, in un panorama di progressiva riduzione delle emissioni inquinanti totali, il peso relativo del settore del riscaldamento degli edifici è andato crescendo, divenendo uno dei contributi preponderanti per molti dei principali inquinanti atmosferici. In questo settore infatti le politiche sono state meno incisive e meno univoche nel porre l'aspetto ambientale al centro delle scelte di sviluppo. Se da un lato, infatti, il progresso nella tecnologia ha portato alla produzione di apparecchi e impianti intrinsecamente più efficienti e meno inquinanti, dall'altro si sono prodotte ed in parte favorite o incentivate delle transizioni dagli effetti ambivalenti o globalmente negativi sul piano ambientale. In quest'ottica va considerato il processo di *fuel switching* dai combustibili liquidi (olio combustibile e gasolio) verso quelli gassosi (gas naturale e GPL), ma contestualmente anche verso la biomassa solida e ugualmente va considerata la progressiva transizione da impianti centralizzati a impianti mono-famigliari.

La valutazione complessiva dell'impatto ambientale di un determinato settore o di una tecnologia o di un combustibile dipende da molteplici fattori che concorrono a determinare l'effetto finale che tale settore, tecnologia o combustibile hanno a livello locale, regionale, nazionale o globale. In effetti il livello di inquinamento atmosferico riscontrabile in una determinata area dipende dal numero di sorgenti emissive presenti, dall'emissione specifica associata a ciascuna di esse, a sua volta determinata dal flusso di massa di ogni inquinante emesso da una data sorgente, ma anche dalle condizioni meteorologiche e orografiche dell'area considerata, che possono favorire o impedire la dispersione degli inquinanti emessi nella medesima area oppure trasportarne altri

provenienti da aree limitrofe. Per queste ragioni una completa valutazione del ruolo delle diverse sorgenti o la previsione dell'efficacia di una data misura tecnica o politica richiede l'utilizzo di sofisticati modelli matematici per tener conto di tutte le variabili in gioco.

A livello specifico, il parametro indicativo delle emissioni prodotte da una particolare tipologia di sorgente è rappresentato dal **fattore di emissione (FE)**, che indica la quantità di un certo inquinante, espressa in g o mg, a seconda dei casi, in rapporto ad una unità di riferimento, che varia con la tipologia di sorgente. Nel caso della produzione industriale questa rappresenta in genere la quantità di prodotto, ad esempio le tonnellate di vapore generate da una caldaia. Nel settore dei trasporti il FE si esprime in g/km e varia non solo con la tipologia di veicolo e di combustibile, ma anche con le modalità di guida, in special modo con la velocità di riferimento. Nel settore del riscaldamento domestico il FE si esprime in genere come g/GJ, facendo quindi riferimento all'energia termica totale prodotta dall'impianto e quindi indirettamente alla massa di combustibile bruciato, essendo questi due valori direttamente legati tramite il potere calorifico del combustibile stesso.

Tutte le informazioni relative alle emissioni prodotte in una data area confluiscono nei cosiddetti inventari delle emissioni i quali tengono conto di tutte le sorgenti presenti. Per quanto riguarda le sorgenti industriali i dati sono, in genere, facilmente disponibili, in quanto ogni impianto che produce emissioni in atmosfera è sottoposto ad autorizzazioni specifiche ed a monitoraggi continui o periodici delle concentrazioni degli inquinanti in tutti i flussi gassosi convogliati prodotti dall'impianto stesso; a questa logica sfuggono soltanto gli impianti più piccoli, per i quali è comunque possibile produrre stime abbastanza accurate sulla base di dati di riferimento per ogni tipologia di impianto. Più complessa è la stima nel caso delle sorgenti da traffico, in questo caso infatti i fattori di emissione di ciascuna tipologia di veicolo devono essere combinati con informazioni statistiche relative alla flotta circolante ed all'intensità di traffico nell'area di riferimento. Non più complessa, ma generalmente oggetto di minor approfondimento è la stima delle emissioni prodotte dal settore del riscaldamento. Le sorgenti in questo caso sono estremamente numerose e soltanto di recente è iniziata in alcune regioni italiane la compilazione di un catasto degli impianti termici, che consente di quantificare e localizzare per potenza e tipologia gli impianti esistenti; anche laddove questo processo è più avanzato molti dati, in particolar modo quelli relativi ai piccoli apparecchi a biomassa, sono ancora carenti. L'altro aspetto, fonte di grande incertezza nella stima dei dati emissivi, è legato alla estrema variabilità dei fattori di emissioni misurati su diverse tipologie di apparecchi e con diversi combustibili; enormi sono infatti le differenze fra i fattori di emissione riscontrati per apparecchi diversi, in special modo per alcune tipologie di inquinanti come CO e particolato. In particolare, nel caso degli apparecchi a biomassa la variabilità riscontrata anche all'interno di una classe di apparecchi omologhi è estremamente elevata e fonte di grande incertezza. L'ultimo aspetto che introduce ulteriore variabilità nelle stime delle emissioni del settore riscaldamento è la dipendenza dell'utilizzo di questo dalle condizioni climatiche, variabili di anno in anno, ma anche differente da utente a utente e difficilmente misurabili se non mediante indagini statistiche; anche in questo caso ciò è particolarmente vero per la biomassa, il cui utilizzo sfugge in larga misura a misurazioni dirette in mancanza di sistemi di contabilizzazione automatici, come è invece per i combustibili gassosi.

In alternativa il contributo di una particolare sorgente o meglio di una classe di sorgenti può essere determinato a posteriori attraverso misure dirette, condotte nell'area di interesse, laddove sia

possibile identificare dei traccianti specifici che possano essere associati in maniera univoca alla sorgente di interesse.

Mediante l'impiego di queste tecniche sono stati condotti diversi studi su differenti aree del territorio nazionale per valutare il contributo delle diverse sorgenti o dei diversi combustibili e per valutare l'effetto delle presenti e future politiche energetiche ed ambientali.

STUDIO COMPARATIVO – PARTE BIBLIOGRAFICA

Il settore riscaldamento in Italia

Gli impianti

La più recente indagine statistica che include il settore del riscaldamento domestico è stata condotta dall'ISTAT e pubblicata nel dicembre 2014, dalla quale emerge che circa il 98% delle famiglie che risiedono in Italia dichiara di possedere un impianto per il riscaldamento dell'abitazione. La Tabella 1e la Figura 1 mostrano la **distribuzione delle diverse tipologie di impianti e di combustibili**. Vi è una predominanza nell'uso del metano, tranne che nel caso degli apparecchi singoli che sono alimentati principalmente a biomassa.

RISCALDAMENTO CASA					
	Impianto centralizzato	Impianto autonomo	Apparecchi singoli fissi	Apparecchi singoli portatili	Totale
	% famiglie	% famiglie	% famiglie	% famiglie	% famiglie
Metano	83,8	86,5	6,1	-	70,9
Energia elettrica	1,4	0,4	17,7	54,2	5,1
Biomasse	0,7	4,8	73,9	-	14,5
GPL	2,5	5,3	2,3	45,8	5,8
Gasolio	11,6	3	-	-	3,7

Tabella 1 Distribuzione degli impianti e dei combustibili in Italia (ISTAT 2014)

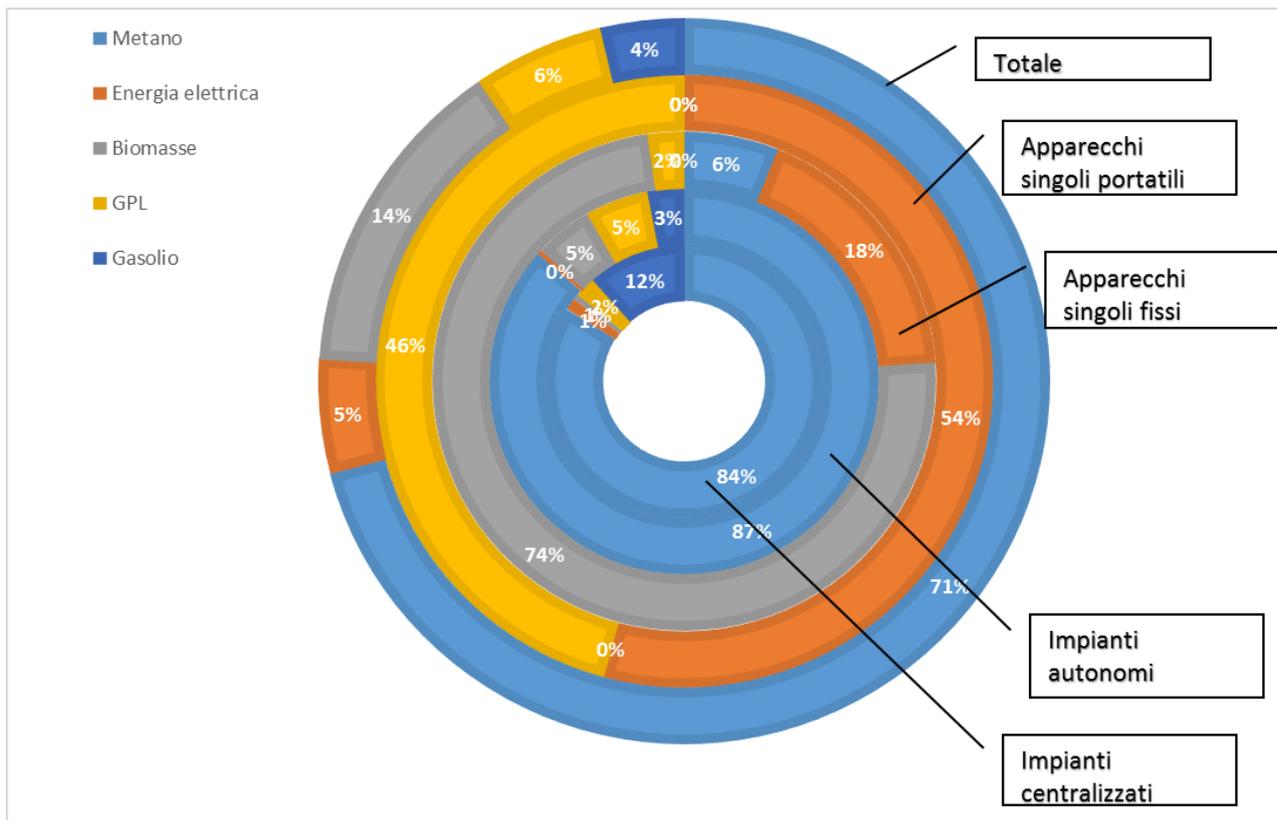


Figura 1 Distribuzione degli impianti e dei combustibili in Italia (ISTAT 2014)

Gli impianti per il riscaldamento civile in Italia sono regolamentati, sul piano legislativo dalla Parte 2 del Titolo V del D.L.gs 152 del 2006 e s.m.i. che definisce inoltre, nel suo Allegato X, le tipologie e le caratteristiche di combustibili impiegabili in questi impianti; rimangono comunque esclusi dal campo di applicazione del decreto tutti gli impianti e gli apparecchi di potenza nominale inferiore a 35 kW. Esistono poi svariate norme tecniche, molte delle quali armonizzate, che si applicano a tutte le differenti tipologie di caldaie e apparecchi per il riscaldamento degli ambienti (*space heaters*): in particolare, gli apparecchi alimentati con combustibili gassosi (2° famiglia, gas naturale e 3° famiglia, GPL) rientrano nel campo di applicazione del recente Regolamento (UE) 2016/426 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 marzo 2016, che ha abrogato la DIRETTIVA APPARECCHI A GAS 2009/142/EC, mentre gli apparecchi a biomassa solida rientrano nel campo di applicazione del Regolamento Prodotti da Costruzione 305/2011, in vigore dal 1 luglio 2013. Queste norme tecniche armonizzate identificano le caratteristiche tecnico-costruttive, di sicurezza ed eventualmente i limiti emissivi per le diverse classi di apparecchi, che devono essere rispettate ai fini dell'apposizione della marcatura CE e quindi per consentirne l'immissione sul mercato europeo. In alcuni casi è già stata approvata una Direttiva, la 2009/125/CE denominata Ecodesign, che prevede maggiori e più stringenti limiti in termini di efficienza ed emissioni; tale direttiva è già entrata in vigore per alcuni settori, dal 2015 per le caldaie a gas, mentre per altri entrerà in vigore successivamente, nel caso di stufe e caminetti nel 2022.

I combustibili e i consumi

Sul piano energetico generale una delle più recenti e ufficiali fonti di dati è rappresentata dal documento del Ministero dello Sviluppo Economico su "LA SITUAZIONE ENERGETICA NAZIONALE

NEL 2015”, pubblicato nel giugno 2016, il quale, per molti dati fa a sua volta riferimento al già citato rapporto ISTAT del 2014. Nel capitolo 4, dedicato ai consumi delle famiglie, sono riportati i principali dati relativi ai consumi energetici finali, questi ammontano a poco meno di 30 Mtep, per gli usi domestici, che includono riscaldamento/raffrescamento, acqua calda, uso cucina e elettrodomestici.

Dal punto di vista dei quantitativi totali impiegati, a fronte di un consumo totale di 19,2 Mt di legna e pellet, **il consumo medio per le famiglie che hanno dichiarato di utilizzare biomasse è di circa 3,1 tonnellate a famiglia l’anno principalmente rappresentato da legna (circa 90%) mentre la restante parte è costituita da pellet.** La tipologia di dotazioni utilizzata per le biomasse è soprattutto il camino o la stufa tradizionale (77,6%), apparecchi che scaldano solo il locale dove sono collocati (inclusi i camini ventilati), mentre solo il 13,6% delle famiglie utilizza tecnologie innovative (camini o stufe) collegate ai termosifoni ed in grado di scaldare più stanze dell’abitazione. Il restante 7,8% utilizza altre apparecchiature quali ad esempio scaldabagni/scaldacqua singoli, apparecchi per cucinare, eccetera.

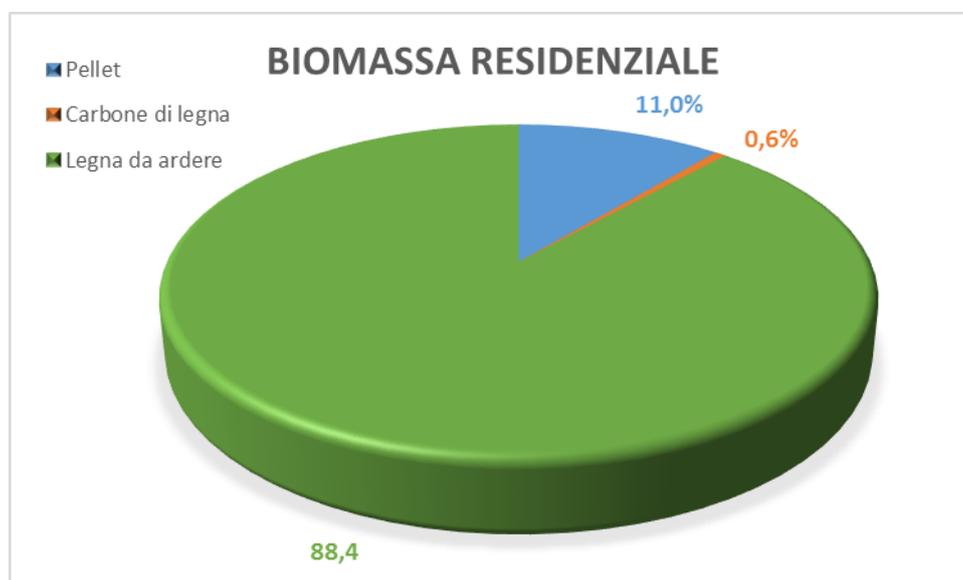


Figura 2 Utilizzo della biomassa nel settore residenziale

L’indagine ISTAT evidenzia come, durante l’inverno, l’impianto di riscaldamento venga utilizzato, in media, per poco meno di 8 ore al giorno, con variazioni significative da nord (9 ore) a sud (6 ore), ma anche rispetto all’età degli occupanti dell’abitazione. Gli impianti centralizzati sono accesi più a lungo (9 ore e 10 minuti in media) rispetto a apparecchi singoli (8 ore e 40 circa) e autonomi (7 ore e 20). Gli impianti a biomasse vengono accesi per un numero medio di ore superiore al complesso dei sistemi di riscaldamento in uso presso le famiglie italiane: si tratta di oltre 9 ore complessive quotidiane, ciò come conseguenza della minore efficienza degli apparecchi in quanto tali e degli impianti nel loro complesso, stufe e caminetti tradizionali, quindi non collegati ad un sistema di distribuzione del calore, tendono a surriscaldare l’area dell’abitazione nella quale sono collocati, ma richiedono più tempo perché il calore si distribuisca in tutti gli ambienti dell’abitazione.

Per quanto riguarda il settore Termico nel suo complesso, che assomma a quasi la metà dei Consumi Finali Lordi (CFL), il contributo delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) è andato crescendo fortemente negli ultimi anni, raggiungendo il 18% contro meno del 5% di 10 anni fa, fra queste fonti il contributo delle bioenergie è dominante. Nel 2014 risultano consumati circa 9,9 Mtep di energia da FER per riscaldamento; in particolare, 9,0 Mtep sono stati consumati in modo diretto (attraverso caldaie, stufe, camini, pannelli solari, pompe di calore, impianti di sfruttamento del calore geotermico), mentre circa 1 Mtep di consumi è relativo al calore prodotto da attività di trasformazione, principalmente impianti di cogenerazione e sistemi di teleriscaldamento alimentati da bioenergie. In particolare è proprio il settore termico quello nel quale il dato rilevato ha superato maggiormente, addirittura del doppio, i valori obiettivo previsti nel Piano Energetico Nazionale (PAN) al 2020, previsioni che sono state superate anche nel settore elettrico, solo del 35% e che non sono stati raggiunti in quello dei trasporti, come evidenziato dai dati del GSE.

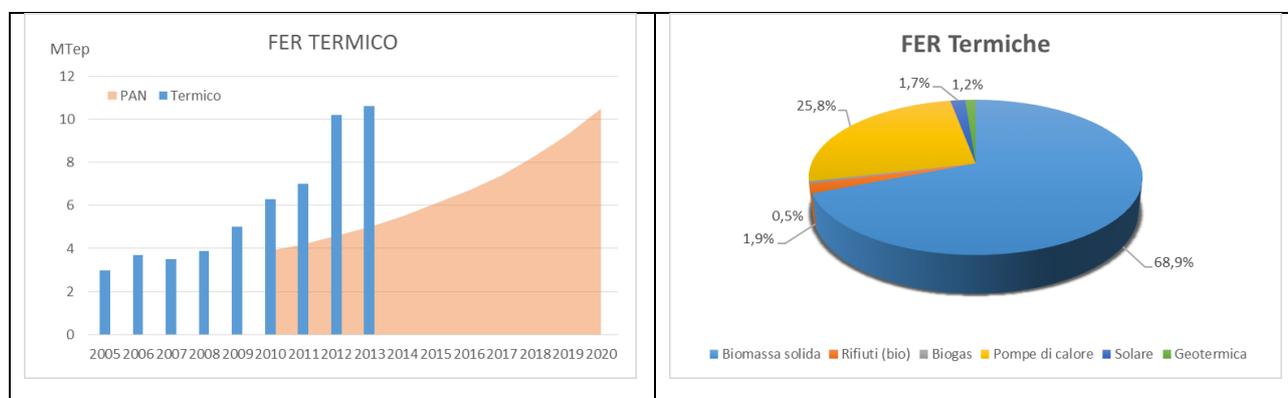


Figura 3 Le Fonti Energetiche Rinnovabili nel settore Termico (GSE 2013)

La produzione di inquinanti dal settore riscaldamento

Tipologia

Gli inquinanti emessi dagli impianti per il riscaldamento civile e domestico, sono quelli tipicamente prodotti dai processi di combustione e, in quanto tali, dipendono da tre fattori principali che pesano in misura variabile e non facilmente stimabile a priori: **la tipologia e la qualità del combustibile, la tecnologia di combustione e le condizioni operative di combustione.**

La natura del combustibile influenza molto i meccanismi di combustione, in quanto questi sono significativamente diversi quando a bruciare è un solido, un liquido oppure un gas. A titolo puramente indicativo e generale si può affermare che i combustibili gassosi (gas naturale e GPL), essendo costituiti da molecole più semplici possono raggiungere più rapidamente e facilmente un grado di combustione completo. I combustibili liquidi e ancor più quelli solidi, subiscono un processo di combustione più complesso. Benché anche per questi combustibili sia possibile raggiungere una completa combustione, ciò è in pratica più difficile, in special modo per i solidi dove residui della combustione incompleta sono sempre presenti tanto in fase solida, come carbonio residuo nelle ceneri, quanto in fase gassosa, sotto forma di idrocarburi di varia natura.

Altro aspetto che differenzia i combustibili in funzione della loro tipologia, ma che dipende anche dalla qualità specifica di ciascun combustibile, è la presenza di elementi diversi dal carbonio e dall'idrogeno che ne sono i componenti principali dal punto di vista energetico. Elementi come ossigeno, azoto e zolfo possono essere originariamente presenti in tutti i combustibili, ma sono riscontrabili nei prodotti finali in misura assai diversa in funzione dei trattamenti che questi subiscono prima della loro distribuzione. Piccole quantità di specie solforate sono presenti dall'origine nei combustibili gassosi, mentre altre sono aggiunte per garantirne l'odorizzazione, mantenendosi comunque a livelli minimi. Concentrazioni più o meno levate di zolfo sono riscontrabili nel gasolio in funzione del processo di raffinazione dal quale esso è prodotto. La biomassa legnosa è per sua natura povera di zolfo, ma ricca di componenti inorganiche che, a seguito della combustione, vanno per la maggior parte a costituire le ceneri residue, che devono essere raccolte dal focolare e smaltite periodicamente, ma che in piccola parte, rispetto al totale, si liberano in atmosfera sotto forma di polveri. Queste ceneri inorganiche sono per la maggior parte costituite da sali di elementi alcalini o alcalino terrosi (Na, K, Mg, ...) e contengono solo minime quantità di metalli pesanti (Pb, Cr, ...), per questa ragione esse non presentano un particolare rischio per la salute e per l'ambiente in fase di smaltimento, o quando dispersi in atmosfera.

Sono altri, invece, i componenti del **particolato aerodisperso (PM)** a rappresentare un rilevante rischio per la salute dei soggetti esposti, in maniera continuativa, a concentrazioni superiori alle soglie individuate a livello internazionale. Si deve innanzitutto puntualizzare che il PM, presente in atmosfera, può essere stato emesso come tale dalle diverse sorgenti, oppure può essersi formato, tramite reazioni che hanno luogo in tempi più lunghi, direttamente nell'atmosfera stessa a partire da precursori, come gli ossidi di zolfo e di azoto, che sono a loro volta inquinanti emessi da diverse sorgenti; per questa ragione questa frazione del particolato è detta secondaria. Il particolato primario è in parte un prodotto della combustione incompleta, in quanto costituito prevalentemente da carbonio e generato, attraverso reazioni successive, a partire da composti organici semplici derivanti dal combustibile che non riesce a bruciare completamente. Buona parte di queste specie incombuste vengono liberate come tali all'interno dei fumi e quantificate in termini di Carbonio Organico Totale (COT); una parte però subisce processi di addizione e agglomerazione portando alla formazione di quella che viene comunemente chiamata fuliggine o più tecnicamente *soot*. Fra queste specie sono spesso presenti, in misura variabile, alcuni composti classificati come tossici e cancerogeni: fra essi in particolare appaiono gli **Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)**, dei quali il benzo[a]pirene è uno dei componenti più noti e rappresentativi. Il processo di formazione di questi composti può aver luogo con tutti i combustibili ed è stato particolarmente studiato nel caso dei motori a combustione interna, in special modo ad alimentazione diesel, ma le evidenze sperimentali hanno mostrato come la combustione della biomassa sia la principale fonte non industriale di questa classe di inquinanti, in special modo se si considera la legna da ardere bruciata in focolari aperti o comunque in apparecchi di vecchia concezione.

Fra gli altri inquinanti, prodotti da tutti i combustibili e legati più al processo di combustione che non alla natura del combustibile bruciato c'è il monossido di carbonio, che è il principale prodotto della combustione incompleta. La carenza di ossigeno o comunque l'insufficiente mescolamento del combustibile con il comburente sono alla base della formazione del CO, che può essere favorita anche da una precoce raffreddamento della fiamma, che non consente il completamento delle reazioni di combustione.

All'estremo opposto vi sono gli ossidi di azoto, che possono prodursi a partire dall'azoto presente nel combustibile o, come più spesso accade nei combustibili qui considerati, derivare dall'azoto dell'aria. In questo caso sono le alte temperature a favorirne la formazione, penalizzando in questo caso i combustibili gassosi che tendenzialmente presentano più elevate temperature di fiamma.

Con queste considerazioni si è già entrati nel campo di influenza delle tecnologie di combustione: queste ultime infatti determinano le modalità in cui il combustibile viene alimentato ed entra in contatto con l'aria comburente, i tempi di residenza e le temperature nella camera di combustione ed in ultima analisi governano il processo di combustione stesso. Per queste ragioni e in conseguenza di quanto detto sopra, un medesimo combustibile può produrre inquinanti in misura assai diversa in funzione del livello tecnologico dell'apparecchio al quale è alimentato. Negli ultimi decenni i progettisti si sono mossi verso la realizzazione di bruciatori e camere di combustione che garantiscano una maggior efficienza di combustione, il che implica una minor emissione di CO e di altri prodotti della combustione incompleta. D'altro canto la riduzione delle emissioni di NOx è stata perseguita attraverso la realizzazione di bruciatori low-NOX che riducono la temperatura di fiamma. Nel settore degli apparecchi a gas ciò ha portato alla progressiva introduzione dei bruciatori premiscelati a micro-fiammelle, operanti in condizioni modulanti e a basse emissioni di ossidi di azoto, che accoppiati a scambiatori ad alta efficienza hanno definito lo standard delle moderne caldaie a condensazione. Nel campo degli apparecchi a biomassa, l'innovazione tecnologica, finalizzata alla riduzione degli inquinanti emessi, è iniziata più di recente: essa ha riguardato un po' tutte le tipologie di apparecchi, ad eccezione dei caminetti aperti, ormai considerati obsoleti e non più in produzione come sistemi di riscaldamento, e si è incentrata su una maggior flessibilità nella gestione dell'aria comburente, mediante l'introduzione di registri di regolazione dell'aria primaria, secondaria e terziaria, al fine di ridurre le emissioni di CO, COT e particolato carbonioso. La principale innovazione del settore è stata però rappresentata dall'introduzione delle stufe e delle caldaie a pellet, che, attraverso un sistema di alimentazione meccanico, una gestione forzata dell'aria comburente e la presenza, in molti casi, di una sonda lambda di controllo della combustione, consentono di raggiungere livelli di efficienza e di emissioni ben inferiori a quanto mai raggiungibile con la combustione tradizionale della legna in ciocchi. Restano comunque alcuni aspetti non affrontabili, mediante una ottimizzazione delle tecnologie di combustione, come la componente inorganica del particolato, che non può essere significativamente ridotta se non mediante sistemi di abbattimento a valle, che sino ad ora non si sono dimostrati idonei all'applicazione sulle piccolissime scale domestiche qui considerate.

L'ultimo fattore, citato all'inizio, che influenza significativamente le prestazioni ambientali di un impianto, anche se è spesso sottovalutato, è rappresentato dalle condizioni operative di funzionamento dell'impianto stesso, che a loro volta dipendono dalle condizioni di installazione, manutenzione e gestione quotidiana. In effetti anche un combustibile di buona qualità, alimentato ad un apparecchio di elevate prestazioni può produrre risultati assai peggiori di quanto ci si potrebbe attendere se gestito in maniera impropria o comunque non ottimale. Analogamente il corretto dimensionamento e il corretto funzionamento degli impianti fumari ha una notevole influenza tanto sui rendimenti quanto sulle emissioni degli impianti a gas, così come di quelli a biomassa. Un tiraggio non adeguato peggiora notevolmente le condizioni di combustione e non consente una completa evacuazione dei prodotti della combustione, l'accoppiamento di questi due fattori comporta non soltanto problemi ambientali, ma rischi per l'utente, a causa della possibile formazione di

concentrazioni pericolose di monossido di carbonio all'interno dei locali dove l'apparecchio è installato.

Inventari delle emissioni

Come già accennato nell'introduzione, tutti i dati relativi alle emissioni inquinanti rilasciate in atmosfera, in una data area, confluiscono nei cosiddetti inventari delle emissioni: a livello nazionale l'inventario delle emissioni di riferimento è gestito, aggiornato e pubblicato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). Il più recente rapporto è stato pubblicato nel 2016 (Informative Inventory Report 2016) e contiene i dati aggiornati a tutto il 2014, partendo dal 1990. Nel periodo considerato quasi tutti gli inquinanti hanno mostrato una tendenza alla riduzione, specialmente per quanto riguarda gli inquinanti principali: -93% per SOx, -61% per NOx, -69% per CO, -57% per NMVOC (Composti Organici Volatili Non Metanici) e -94% per il Piombo.

Se si concentra l'attenzione sul settore residenziale (codice SNAP 0202, nella classificazione adottata) si riscontrano i dati riportati in Tabella 2 per gli inquinanti di maggiore rilevanza per questo settore.

Tabella 2 Serie storica delle principali emissioni inquinanti in atmosfera

		1990	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
SOx	Gg	61	25	18	14	14	13	9	9	8	6	7	6	5
NOx	Gg	49	49	45	46	45	47	50	50	50	42	46	46	39
CO	Gg	786	887	897	924	1087	1496	1774	1707	1638	1059	1486	1488	1291
CH4	Gg	44	50	52	56	66	90	106	103	98	64	91	91	79
NMVOC	Gg	99	109	108	111	130	178	211	203	195	127	179	179	156
PM10	Gg	67	71	68	69	81	112	133	128	122	79	113	114	99
PAH	kg	32	35	35	38	46	63	74	71	67	42	61	61	52

Storicamente, gli ossidi di zolfo hanno rappresentato forse il principale dei problemi ambientali legati al riscaldamento domestico.

Oggi in Italia, l'SOx nel settore residenziale proviene esclusivamente dalla combustione di olio combustibile (BTZ) e gasolio da riscaldamento: la riduzione dei volumi utilizzati di questi prodotti, in particolare del BTZ, bandito negli impianti di piccola e media potenza, e la riduzione della concentrazione di zolfo nel gasolio, giustificano la progressiva e massiccia diminuzione delle emissioni contabilizzate. A seguito della parallela riduzione delle emissioni di SOx nel settore industriale, per effetto dell'introduzione delle tecnologie DeSOx, e di quelle del settore autotrazione, come conseguenza dell'utilizzo del diesel a bassissimo contenuto di zolfo, il contributo percentuale del settore residenziale è rimasto però invariato.

Nel caso degli ossidi di azoto è il contributo del traffico ad essere dominante, senza significative riduzioni percentuali nei 25 anni considerati, sebbene anche in questo caso i quantitativi totali si siano ridotti sensibilmente. Le emissioni di NOx del settore residenziale si sono mantenute invece pressoché costanti, producendo un incremento del contributo percentuale di questo settore.

Anche le emissioni globali di CO hanno subito una progressiva sensibile diminuzione, in special modo nel settore autotrazione dove si è osservata una riduzione di un fattore 10 nei 25 anni considerati,

il settore industriale, che sempre rappresentato un contributo minoritario ha avuto una modesta decrescita delle emissioni totali. In netta controtendenza è invece il settore residenziale, che a seguito di un incremento delle emissioni stimate e per effetto della diminuzione delle altre sorgenti, è passato dall'11% al 55% del contributo percentuale. Questo andamento, comune a molti altri inquinanti è attribuito da ISAPRA all'aumento dell'utilizzo delle biomasse nel riscaldamento domestico, ma di questo aspetto si discuterà più diffusamente nel seguito.

La maggiore sorgente antropica di idrocarburi volatili non metanici è rappresentata dalla produzione e dall'uso dei solventi (non mostrato nel grafico a barre e contabilizzato nella categoria "Altro" nei grafici a torta). Il traffico rappresentava il secondo contributo nel 1990, ma è sceso al terzo posto nel 2014, sorpassato dal settore residenziale, tra i pochi a vedere un aumento in valore assoluto negli ultimi anni, come già visto per CO.

Nel caso del PM10 la riduzione delle emissioni totali è molto meno marcata e riguarda soprattutto il settore industriale e quello del trasporto su strada, riduzione compensate dall'aumento delle emissioni nel settore residenziale, che vede quasi raddoppiate le sue emissioni annue e la propria percentuale sulle emissioni totali. Anche in questo caso la responsabilità di questo incremento è attribuita al maggior consumo di

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA, altrimenti detti PAH dall'acronimo inglese) hanno subito una modesta riduzione del 22% nel periodo considerato, con però una sostanziale variazione nella distribuzione delle sorgenti. Il settore industriale che rappresentava il contributo preponderante nel 1990 ha diminuito drasticamente le sue emissioni, a fronte di un altrettanto notevole incremento del settore residenziale, che nel 2014 è arrivato a rappresentare il 70% delle emissioni totali. Ciò è attribuito da ISPRA all'aumento dell'impiego della biomassa legnosa nel riscaldamento domestico.

Andamento analogo a quello degli IPA è osservato per le diossine, per le quali, a fronte di una riduzione complessiva delle emissioni del 47% dal 1990, il contributo del settore residenziale è più che raddoppiato mentre si è ridotto ad un decimo quello dell'incenerimento dei rifiuti, storicamente importante e oggetto di particolare preoccupazione nell'opinione pubblica.

Come spiegato in precedenza, i dati emissivi riportati negli inventari delle emissioni sono stimati sulla base di indagini statistiche relative alle "attività" presenti sul territorio considerato, vale a dire: quantità di combustibili bruciati, volumi delle produzioni industriali, dati statistici sul parco dei veicoli circolanti, moltiplicati per i corrispondenti fattori di emissione; soltanto per i grandi impianti industriali possono essere messi a disposizione flussi di massa effettivamente misurati sul campo. Ciò implica che i risultati ottenuti siano del tutto dipendenti dall'attendibilità di questi dati di attività e dalla correttezza dei fattori di emissione impiegati. I dati sui consumi energetici nel settore residenziale sono ottenuti da ISPRA a partire dalla combinazione dei dati del MiSE con quelli di ENEA e mostrati in Figura 4.

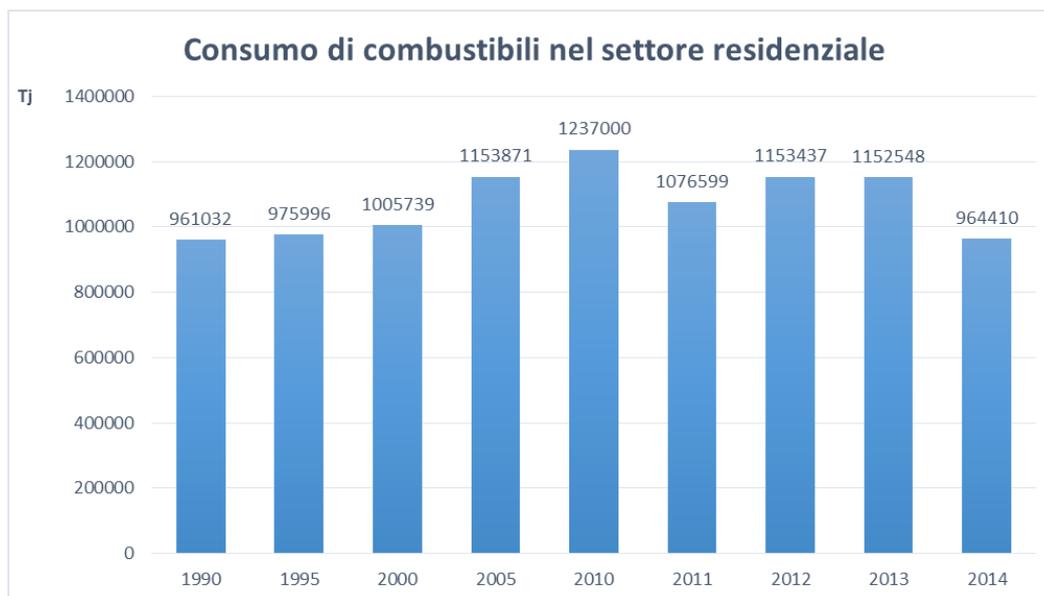


Figura 4 Dati sui consumi energetici nel settore residenziale

I consumi totali risultano essere sostanzialmente costanti e principalmente influenzati dall'andamento delle temperature invernali. Il passaggio successivo consiste nel ripartire questi consumi totali fra i diversi combustibili ed attribuire a ciascuno di essi un fattore di emissione specifico per ogni singolo inquinante, che tenga conto del parco degli apparecchi e degli impianti installati in Italia e la sua evoluzione. Nel caso degli impianti a gas il rapporto ISPRA cita studi condotti dal CESI nel 2005, da ENEA e da ASSOTERMICA nel 2003 per quantificare la distribuzione degli impianti in funzione della tecnologia, a partire dai quali sono stati estrapolati dei valori per il periodo considerato: su questa base, ad esempio, il fattore di emissione per gli NOx è stato progressivamente ridotto dai 50 g/GJ del 1990 ai 31 g/GJ del 2014 per seguire l'evoluzione tecnologica e la penetrazione nel mercato dei bruciatori LowNOx. .

Una particolare attenzione è stata rivolta alle emissioni dalla combustione delle biomasse legnose nel settore civile; sono stati presi in considerazione da ISPRA tre indagini sul consumo di combustibili legnosi nel riscaldamento domestico e sulle relative tecnologie di combustione: la prima di Gerardi e Perrella del 2001 che valutava le tecnologie per la combustione della legna fino al 1999, la seconda di ENEA del 2007 e l'ultima di ISPRA stessa del 2013. Dal compendio di queste è derivata la distribuzione degli apparecchi domestici a biomassa riportata in Tabella 3. Inoltre ISPRA prende esplicitamente in considerazione lo studio ISTAT del 2014 sui consumi energetici residenziali, già citato, sottolineando come questi dati abbiano comportato un raddoppio delle stime precedentemente inserite nel Bilancio Energetico Nazionale (BEN); a seguito di ciò uno speciale tavolo di lavoro costituito da ISPRA, MiSE e GSE ha provveduto a ricostruire le serie storiche, utilizzando dati relativi alla silvicoltura e all'importazione di legname, nonché tenendo conto delle variazioni di fabbisogno legate all'andamento dei gradi giorno nelle diverse stagioni invernali.

Tabella 3 Diffusione delle tipologie degli apparecchi a biomassa

	1999	2006	2012
	%	%	%
Caminetti a legna	51,3	44,7	51,2
Stufe a legna	28,4	27,6	22,9
Caminetti avanzato	15,4	20,2	15,8
Stufe a pellet	0	3,1	4
Stufe avanzate	4,8	4,4	6

I fattori di emissione medi utilizzati sono stati ricostruiti a partire dall'andamento della distribuzione degli apparecchi e dai risultati dello studio condotto dalla Stazione Sperimentale per i Combustibili pubblicato nel 2012 sulle emissioni delle principali tipologie di essenze legnose utilizzate in Italia e utilizzando l'EMEP/EEA Guidebook. Tali fattori sono riassunti in Tabella 44.

Tabella 4 Fattori di emissione medi relativi alla combustione delle biomasse legnose (SSC, 2012)

	1990	1995	2000	2005	2010	2014
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ
NOx	50	55	59	61	61	60
CO	6000	5791	5591	5427	5395	5275
NM VOC	762	715	672	643	638	631
SO2	10	11	12	13	13	12
NH3	9	7	6	6	6	6
PM10	507	465	428	408	404	407
PM2,5	503	461	424	404	400	402
BC	40	37	35	34	34	34
PAH	0,25	0,24	0,23	0,22	0,22	0,22
Dioxin (∑g/GJ)	0,48	0,47	0,45	0,44	0,44	0,42
PCB	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006	0,00006
HCB	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
As	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0005
Cd	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Cr	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003
Cu	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Hg	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Ni	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Pb	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Se	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0005
Zn	0,1	0,1	0,1	0,09	0,09	0,09
B(a)	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07
B(b)F	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
B(k)F	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
IND	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04

Una conclusione definitiva su questa questione a lungo dibattuta potrà essere trovata con l'introduzione del catasto degli impianti termici, previsto dal D. lgs. 192/05, che però non tutte le regioni hanno ancora avviato e che, laddove già esiste, è ancora incompleto proprio per quanto riguarda i piccoli impianti a biomassa.

Fattori di emissione

Il concetto di fattore di emissione è già stato introdotto ed ampiamente utilizzato nei paragrafi precedenti di questo studio, ma viene ora più diffusamente analizzato, vista la sua centralità nella valutazione comparativa dell'impatto ambientale dei diversi combustibili. In particolare si mettono a confronto quelle che sono le fonti di questi dati, analizzando i principali e più recenti lavori scientifici che hanno permesso di determinarli, attraverso misure dirette condotte in laboratorio o in campo o mediante altri strumenti di calcolo.

Un fattore di emissione è generalmente ottenuto mediante una misura sperimentale condotta per lo più in laboratorio, in condizioni controllate e ripetibili utilizzando strumenti di misura sufficientemente sensibili ed accurati da garantire l'accuratezza del dato misurato. Per tale misura si ricorre, ove possibile, a metodiche standardizzate per garantirne la ripetibilità, anche se talvolta si preferisce sviluppare procedure specifiche che garantiscano una maggior aderenza dei risultati ottenuti in laboratorio alle condizioni reali. Ciò è particolarmente vero nel caso dei piccoli generatori a biomassa, in particolare quelli a caricamento manuale. In queste stufe o caminetti le modalità operative adottate dall'utilizzatore, in termini di modalità e frequenza di caricamento e ricarica del combustibile, procedure di accensione, gestione dell'aria comburente, si ripercuotono fortemente sui risultati ottenuti, specialmente per quanto riguarda le emissioni di polveri. Le procedure di gestione degli apparecchi previste dalle pertinenti norme tecniche, tendono a ottimizzare le condizioni di combustione, minimizzando le emissioni, ma queste condizioni si discostano molto da quelle, assai meno ottimali, che l'utente medio adotta nella gestione quotidiana. Ciò comporta una estrema variabilità nei fattori di emissioni reperibili in letteratura, perché oltre ad essere differenti i combustibili impiegati dai diversi autori, sono anche diversi gli apparecchi e le modalità di esecuzione delle prove.

Molti sono gli articoli scientifici o i rapporti ufficiali che riportano fattori di emissione per diverse tipologie di combustibile e di impianti di riscaldamento, anche se la maggior parte degli studi recenti si focalizza sulle biomasse, mentre assai poco è stato recentemente pubblicato sui combustibili fossili convenzionali. Ciò è una diretta conseguenza della crescente attenzione verso l'effetto dell'inquinamento prodotto dall'utilizzo di combustibili legnosi, anche a fronte dell'incrementato utilizzo di questi ultimi in tutta Europa, come conseguenza delle politiche di decarbonizzazione attuate. Al contrario, per gli altri combustibili si riscontra un basso interesse in quanto si ritengono ormai consolidati i dati relativi ai fattori di emissione di questi ultimi e non necessari ulteriori approfondimenti. Ciò è vero in generale, anche se in relazione all'Italia la penetrazione nel mercato delle caldaie a condensazione è relativamente recente e, a differenza di altri paesi, solo adesso si sta cominciando ad averne una percentuale significativa nell'installato, con effetti positivi sul piano dell'efficienza e delle emissioni.

Tutti i risultati bibliografici finora raccolti sono riportati nella tabella allegata al rapporto finale.

A titolo puramente illustrativo sono riportati in Figura 5 i risultati di calcoli comparativi che, sulla base dei diversi fattori di emissioni per alcune differenti sorgenti di PM, mettono a confronto l'equivalenza tra diverse attività che rilasciano la stessa quantità di particolato in atmosfera. Nell'esempio, 100 grammi di PM sono prodotti da autoveicoli di tipologia diversa che percorrono un diverso numero di km, da impianti industriali che trattano diverse quantità di materiali o nel caso del riscaldamento da impianti di uguale potenza che funzionano per un diverso numero di ore. In questo modo si evidenzia la potenzialità dei fattori di emissione nel confronto tra sorgenti tra loro molto eterogenee.

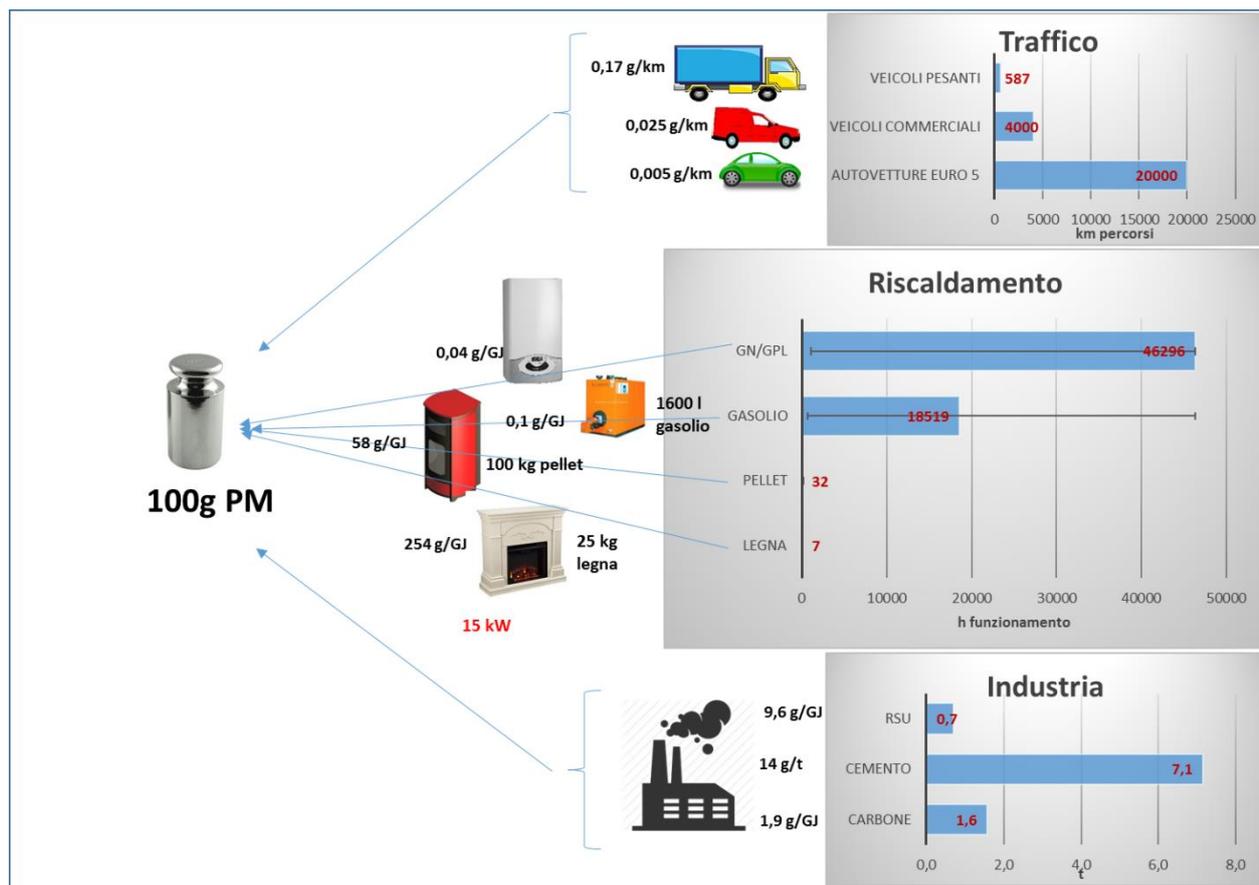


Figura 5 Calcoli comparativi sulla base dei diversi fattori di emissioni per alcune differenti sorgenti di PM

Analisi degli impatti sull'ambiente e sulla salute

Una volta identificate le emissioni prodotte da una determinata tipologia di impianto e di combustibile, occorre quantificare l'impatto che le sorgenti effettivamente presenti in un dato territorio hanno sulla qualità dell'aria di quel medesimo territorio o in quelli circostanti. Ciascuna tipologia di inquinante può avere un effetto rilevante a livello locale, regionale o globale a seconda delle sue caratteristiche e dell'interazione che questo ha con l'ambiente.

La CO₂ è l'esempio più evidente di una specie il cui effetto sull'ambiente è esclusivamente globale. Nonostante l'incremento osservato negli ultimi decenni, la CO₂, nelle concentrazioni rilevate in atmosfera, non ha effetti negativi sulla salute umana o su altre forme di vita animali o vegetali e non

produce alterazioni dell'ambiente locale. Però l'incremento della sua concentrazione media a livello planetario, così come per altri gas a effetto serra, è considerata responsabile del progressivo rialzo della temperatura media terrestre e indirettamente del verificarsi di fenomeni climatici estremi, associati all'innalzamento delle temperature. In quest'ottica risulta evidente che non ha alcuna importanza dove la CO₂ venga rilasciata, dal momento che essa si distribuirà uniformemente in tutta l'atmosfera nel corso del lunghissimo tempo di permanenza di questo gas.

Al contrario, maggiore è l'interazione negativa, che una data specie ha con l'ambiente e le forme di vita, maggiormente localizzata sarà la sua azione. Ad esempio composti altamente tossici come le diossine e cancerogeni come gli IPA, che peraltro tendono ad accumularsi per lungo tempo nel suolo, nelle acque e persino negli organismi viventi, hanno un elevatissimo impatto locale, vale a dire nell'area di ricaduta diretta di una specifica sorgente emissiva. È proprio all'interno di quest'area che possono osservarsi incrementi, più o meno significativi, nell'incidenza di talune patologie legate agli inquinanti emessi. Su una scala un po' più estesa agiscono inquinanti come gli ossidi di zolfo e di azoto che, nelle concentrazioni presenti in aria ambiente, possono rappresentare un rischio per la salute umana e per l'ambiente, ma che soprattutto interagiscono con l'atmosfera per produrre particolato secondario e piogge acide, inoltre gli ossidi di azoto sono precursori delle reazioni di formazione dell'ozono. Questi effetti si osservano su scala regionale e sono il prodotto della somma di più sorgenti emissive.

Un caso particolare è rappresentato dal particolato, esso infatti non è costituito da una singola specie chimica, bensì varia molto in termini di composizione, dimensioni e proprietà tossicologiche. Il particolato atmosferico, in effetti, non è soltanto la somma del particolato primario emesso dalle singole sorgenti, che sono peraltro molto eterogenee e producono particelle molto differenti, bensì esso è in parte il prodotto della condensazione di specie organiche emesse dalle medesime sorgenti o addirittura generato da reazioni secondarie che hanno luogo in atmosfera, anche grazie all'azione della radiazione solare. Queste ultime reazioni producono il cosiddetto particolato secondario che può svilupparsi da precursori gassosi emessi da sorgenti che di per sé non emettono significative quantità di particolato primario. La composizione e la dimensione del particolato hanno a loro volta un notevole effetto sulle sue proprietà tossicologiche: la presenza di metalli pesanti o composti organici cancerogeni rende questo inquinante potenzialmente molto pericoloso per la salute umana, in particolare quando le dimensioni delle particelle sono microniche o sub-microniche queste possono facilmente penetrare nel sistema respiratorio e, nel caso delle nano-particelle, attraversare le membrane cellulari e entrare nella circolazione sanguigna.

Si può facilmente comprendere, sulla base di quanto esposto, che la sola conoscenza delle sorgenti emissive, quale è quella fornita dagli inventari delle emissioni, non è sufficiente a stimare la concentrazione di ciascun inquinante in atmosfera. Per fare ciò, occorre tener conto, in primo luogo, di come le emissioni provenienti dalle singole sorgenti si disperdono e ciò dipende dall'orografia dell'area e da fattori meteorologici che governano il rimescolamento dell'atmosfera e lo spostamento delle masse d'aria inquinate da un'area geografica ad un'altra. Ci sono poi gli aspetti relativi alle possibili trasformazioni chimiche che gli inquinanti subiscono in atmosfera, così come il riassorbimento di questi da parte dell'ambiente, o la loro eventuale risospensione, ad esempio ad opera del traffico. Per tener conto di tutti questi fattori occorre utilizzare modelli matematici complessi che richiedono l'utilizzo di strumenti di calcolo idonei. La trattazione delle potenzialità e

dei campi di applicazione di questi modelli esula dalle finalità del presente studio e verranno solamente riportati i risultati di alcuni lavori condotti a livello nazionale o regionale.

ENEA ha realizzato nel 2016 uno fra i più completi studi sull'impatto delle politiche di decarbonizzazione e di sostegno alle fonti rinnovabili sul sistema energetico nazionale, e in particolare sul settore del riscaldamento civile. Lo studio conduce una valutazione sugli impatti futuri (all'orizzonte 2020 e 2030) di diversi scenari, condotta con l'ausilio di strumenti modellistici; in particolare mediante d'impiego del modello energetico TIMES-Italia, in uso presso l'UC-Studi ENEA, per quantificare gli scenari energetici di riferimento ed alternativi. Gli elementi principali di questi scenari, soprattutto in relazione alle fonti energetiche e ai combustibili utilizzati hanno costituito la base per il calcolo delle emissioni di inquinanti atmosferici e la definizione di corrispondenti mappe di concentrazione degli stessi per mezzo del modello GAINS-Italia. Gli scenari proposti da ENEA non sono previsioni di come il sistema energetico evolverà nel futuro bensì immagini alternative ma intrinsecamente coerenti del modo in cui un sistema può svilupparsi sulla base di un insieme di ipotesi verosimili. In particolare sono stati elaborati da ENEA tre scenari energetici:

- Lo scenario di Riferimento (RIF) che proietta l'evoluzione del sistema energetico a partire dalla legislazione vigente e dalle tendenze in atto in ambito demografico, tecnologico ed economico.
- Lo scenario a Biomassa costante (BIOcost). Sostanzialmente questo scenario permette di raggiungere la stessa riduzione delle emissioni di CO₂ dello scenario di Riferimento, ma con un mix leggermente diverso da quest'ultimo, imponendo un consumo di biomasse non superiore a quello delle ultime stime ISTAT.
- Lo scenario Decarbonizzazione 2030 (DEC) che quantifica l'impatto sul sistema energetico di una riduzione di circa il 36% rispetto ai livelli del 2005 delle emissioni di CO₂ e che ingloba un insieme di obiettivi, politiche e misure paragonabile al quadro energetico delineato dalla Strategia Energetica Nazionale secondo l'evoluzione della situazione normativa, economica ed energetica italiana attuale.

ENEA arriva attraverso il confronto fra questi scenari a concludere che:

- “Tutti gli scenari esaminati mostrano che le emissioni complessive di inquinanti come il particolato primario si riducono all'orizzonte del 2030 per effetto del miglioramento delle tecnologie adottate, tuttavia le riduzioni sono chiaramente minori laddove si ha un aumento dell'utilizzo di biomassa legnosa nel settore residenziale.”
- “In tutti gli scenari permangono in Italia alcune zone sensibili per le quali le concentrazioni di particolato resterebbero superiori non solo ai 10 µg/m³ considerati dall'OMS ma anche ai più elevati limiti europei. Per tali aree sensibili un'ulteriore riduzione delle concentrazioni, finalizzata al contenimento dei rischi per la salute, richiederebbe l'imposizione di standard emissivi molto più stringenti sui piccoli impianti a biomasse legnose nel residenziale oppure misure atte a scoraggiare l'uso stesso delle biomasse legnose in impianti domestici e a favorire la sostituzione di camini aperti/chiusi con tecnologie efficienti, a gas o con produzione di calore da altre rinnovabili (elettriche o termiche).”

A supporto e convalida di queste considerazioni ottenute sulla base di analisi modellistiche possono essere richiamati altri studi sperimentali che si sono focalizzati sulla caratterizzazione del PM atmosferico campionato in specifiche aree, al fine di identificare in campo il contributo delle differenti sorgenti. Ciò può essere fatto mediante tecniche analitiche che vanno a ricercare specifici traccianti chimici, che sono esclusivamente associabili ad una particolare sorgente. Nel caso della combustione delle biomasse il levoglucosano, prodotto intermedio della combustione parziale della cellulosa è il principale marcante, insieme ad alcuni metalli come Mg e K, anch'essi prevalentemente associabili ai combustibili solidi di origine vegetale. Diversi studi (Colombi et al. 2008, Pirovano et al. 2005, AIRUSE 2014-2015, Lanzani et al. 2015), recentemente condotti nella valle Padana, hanno confermato le stime ottenute in via teorica, mostrando come il contributo al PM totale misurato in atmosfera durante la stagione invernale, vari dall'8 al 24 % in aree urbane, come la città di Milano, salga dal 15 al 25% nelle aree rurali, ma arrivi al 35% nelle zone alpine e prealpine, dove maggiore è l'impiego della legna. Queste ripartizioni tengono ovviamente conto del totale del particolato atmosferico, comprensivo di quello secondario e di quello dovuto alla risospensione, e sono quindi necessariamente più basse rispetto alle ripartizioni fornite dagli inventari relativi alle sole emissioni primarie.

Tutte queste considerazioni acquisiscono una particolare rilevanza alla luce dell'impatto sanitario dell'inquinamento atmosferico, e più in particolare le alte concentrazioni di PM, sulla salute umana. Molte ricerche a livello internazionale hanno messo in evidenza la correlazione fra i superamenti delle soglie di attenzione fissate per la qualità dell'aria outdoor e indoor e l'insorgere di gravi patologie e l'incremento della mortalità. Una disamina critica della letteratura scientifica in questo campo esula dalle competenze degli estensori del presente studio e dalle finalità del medesimo. Ci si limiterà perciò a riferire succintamente le risultanze del Progetto VIIAS (Valutazione Integrata dell'Impatto dell'Inquinamento atmosferico sull'Ambiente e sulla Salute), realizzato nel quadro delle iniziative del Centro Controllo Malattie (CCM) del Ministero della Salute, che ha effettuato la valutazione integrata dell'inquinamento atmosferico in Italia valutando l'intera catena di eventi (dalle politiche, alle fonti di esposizione, alle modalità di esposizione, all'impatto) che influiscono sulla salute della popolazione. Il progetto VIIAS è stato coordinato dal Dipartimento di Epidemiologia del Servizio Sanitario Regionale del Lazio. Hanno collaborato ENEA, le ARPA del Piemonte, Emilia Romagna e Lazio, il Dipartimento di Statistica, Informatica, Applicazioni "G. Parenti" dell'Università di Firenze, il Dipartimento di Biologia Ambientale Università di Roma La Sapienza, l'Università di Urbino, ISPRA, Zadig, Agenzia di comunicazione, informazione e formazione. Fra gli obiettivi dello studio vi era quello di quantificare l'impatto dell'inquinamento da PM_{2.5}, NO₂, ed O₃ sulla popolazione italiana in termini di casi di morte e di malattia attribuibili all'inquinamento e di anni di vita persi. La metodologia applicata fornisce una stima dei casi attribuibili all'inquinamento atmosferico in Italia e consente di quantificare il guadagno in termini di salute della popolazione italiana conseguente alle diverse politiche di riduzione delle emissioni negli scenari alternativi. In estrema sintesi il progetto VIIAS ha stimato un numero di decessi attribuibile all'esposizione al PM_{2.5} pari a oltre 34000 nel 2005, che si è ridotto a 21000 nel 2010, ma che potrebbe risalire a oltre 28000 nel 2020 nello scenario di mantenimento della legislazione corrente, mentre potrebbe attestarsi sui 23000 o ridursi a 18000 in caso di adozione di più restrittive politiche di contenimento delle emissioni. La medesima metodologia permette di stimare il numero di mesi di vita persi in

media per effetto dell'esposizione, questi variano da quasi 10 a poco più di 4 al variare delle condizioni di riferimento. Per quanto concerne l'NO₂ le prospettive sono più rosee con un decremento stimato nei decessi, attribuiti a questo inquinante, dagli oltre 23000 del 2005, a poco meno di 12000 nel 2010, per scendere ulteriormente nel 2020 tra 10000 a 5000 a seconda dello scenario considerato. Dal punto di vista geografico l'area maggiormente critica è rappresentata dall'intera Italia del nord, con un massimo in corrispondenza della Lombardia, ma esposizioni elevate e conseguentemente elevati tassi di decesso, sono riscontrate anche in Lazio e Campania, ma fortemente localizzate nelle aree urbane di Roma e Napoli.

Su un piano più specifico bisogna però sottolineare che nel caso del PM la composizione chimica e la distribuzione dimensionale di quest'ultimo possono avere una influenza significativa sull'effettivo impatto di questo sulla salute umana. Particelle di dimensione più piccola sono considerate molto più pericolose per la loro capacità di penetrare nell'organismo trasportando all'interno di esso gli eventuali composti tossici che essi contengono. La presenza nel PM di metalli pesanti e composti organici ad elevata tossicità è perciò da considerarsi maggiormente rischiosa per la salute umana. Ciò nonostante, non esistono ancora univoche correlazioni fra la tossicità del particolato e le sue caratteristiche; Stanek et Al. dell'EPA nel 2011 hanno pubblicato una review dei lavori presenti nella letteratura scientifica internazionale sulla correlazione fra la composizione del PM atmosferico e di conseguenza la relativa ripartizione tra le fonti emissive e gli effetti sulla salute ricavati da studi epidemiologici. Questi autori non sono riusciti a evidenziare un'univoca correlazione fra uno specifico gruppo di componenti del PM e gli effetti evidenziati sulla popolazione.

D'altro canto studi condotti in vitro hanno rilevato diverse risposte dei tessuti studiati al particolato in relazione alla sua composizione e alla sua origine. Nel caso specifico delle biomasse è noto che le condizioni di combustione e la tipologia di combustibile utilizzato (legna di diverse essenze, pellet di diversa qualità) hanno un pesante effetto sulla composizione del PM emesso oltre che sulla quantità totale. In particolare, nella combustione della legna, specialmente se condotta in apparecchi tradizionali produce una maggior presenza di carbonio nel PM e una più alta concentrazione di IPA. Ciò giustifica i risultati ottenuti da Fong et Al. che hanno mostrato una genotossicità del particolato prodotto da stufe e caminetti a legna rispetto al particolato diesel. Al contrario per quanto concerne il pellet esistono risultati non univoci: recentemente Longhin et Al (2016) dalla comparazione diretta del particolato emesso da caldaie a pellet e autoveicoli alimentati a gasolio, hanno evidenziato come la polvere da pellet, più ricca di sali inorganici e più povera di IPA e metalli di transizione, eserciti una minore attività biologica rispetto al particolato diesel nei meccanismi di carcinogenesi. D'altro canto Corsini et al. hanno condotto uno studio sul pellet di faggio e abete hanno rilevato modesti effetti di lesione del DNA paragonabili a quelli del particolato diesel sottolineando anch'essi l'importanza delle condizioni di combustione sugli effetti tossicologici.

STUDIO COMPARATIVO - PARTE SPERIMENTALE

L'indagine sperimentale si inserisce nel contesto più ampio di uno studio avente come principale oggetto la comparazione delle caratteristiche emissive da apparecchi per utenze residenziali (apparecchi per il riscaldamento domestico e la produzione di acqua calda sanitaria) alimentati con diversi combustibili: gas, GPL, gasolio, pellet.

In particolare, la parte sperimentale di questo studio prevede:

- La misurazione sperimentale delle emissioni di macro e micro inquinanti prodotte da caldaie murali a condensazione alimentate a gas naturale e a GPL
- La misurazione ed il confronto delle emissioni delle stufe a pellet in relazione alla qualità degli apparecchi ed alla qualità del combustibile utilizzato

Lo scopo è principalmente quello di valutare le emissioni specifiche dei principali macro e micro inquinanti prodotti da questi apparecchi per l'individuazione di più aggiornati e più approfonditi dati relativi alle emissioni associate al settore riscaldamento con specifica attenzione per il riscaldamento domestico, attraverso un confronto diretto fra i principali combustibili impiegati; in una seconda fase della sperimentazione sarà posta poi l'attenzione sull'evoluzione delle emissioni a seguito di un utilizzo prolungato delle stufe a pellet senza una loro specifica manutenzione, in quanto lo sporco e dei canali fumari, conseguente ad un prolungato utilizzo, è ritenuto influenzare negativamente le prestazioni in termini di efficienza e di emissioni.

Selezione degli apparecchi

Sulla base di dati provenienti da indagini di mercato di settore, sono state oggetto di prova due stufe a pellet, una di gamma medio-alta (11 kW) fra le più vendute in Italia, l'altra di tipo economico (7 kW) venduto nella grande distribuzione.

Entrambi i modelli sono dotati di una centralina elettronica di controllo delle funzioni operative dell'apparecchio che consente di programmare il funzionamento da parte dell'utente. Per ciascun modello sono state acquistate due unità per l'esecuzione della sperimentazione.

Le principali caratteristiche degli apparecchi a pellet, oggetto delle prove, sono riportate in Tabella 5.

Tabella 5. Caratteristiche delle apparecchiature a pellet

Marca / Modello	Stufa primo prezzo GDO (BG)	Stufa gamma medio – alta (AG)
Tipo di stufa	Stufa a pellet	Stufa a pellet
Potenza	2,65 – 7,45 KW	3,3 – 11,1 KW
Rendimento a capacità nominale/ridotta	91,0/92,7	91,8/96,1
Capacità serbatoio	13 kg	18 kg
Emissione di CO al 13% di O₂ a capacità nominale/ridotta	0,01 – 0,04 % (125 – 500 mg/m ³)	0,01 – 0,04 % (125 – 500 mg/m ³)
Emissione di polveri al 13% di O₂ a capacità nominale/ridotta	-	11,4 – 39,1 mg/m ³
Emissione di polveri al 13% di O₂ (media)	18,4 mg/m ³	-
Marcatura CE	si	si

È stato inoltre selezionato e acquistato un modello di caldaia a condensazione da 26 kW di fascia alta, disponibile in versione alimentata tanto a gas naturale, quanto a GPL. Le principali caratteristiche degli apparecchi a gas e GPL, oggetto delle prove, sono riportate in Tabella 6.

Tabella 6 Caratteristiche delle apparecchiature a gas/GPL

Marca / Modello	Caldaia a gas/gpl
Tipo di caldaia	Apparecchio di riscaldamento misto a condensazione
Potenza nominale Riscald./ sanit.	24,1 – 26,7 KW
Rendimento alla potenza nom. in regime a.t. / di produzione acqua calda sanit.	97,9/85,0
T regol. riscald.	20-85°C
T regol. acqua calda sanit.	30-60°C
T max fumi	75°C
Emissione di NOx media	26 mg/kWh
Emissione di CO media	15 mg/kWh
Marcatura CE	si

Selezione dei combustibili

Sono state contestualmente selezionate **due marche di pellet corrispondenti alle categorie A1 e A2** della classificazione di questo combustibile, stabilita dalla norma tecnica di riferimento, UNI EN ISO 17225-2:2014. Le due tipologie differiscono principalmente per il materiale di origine dal quale viene prodotto il pellet e dal contenuto di ceneri espresso come % in peso Tabella 7.

Tabella 7. Differenti caratteristiche del pellet selezionato (tratto da UNI EN 14961-2:2011)

Classe	A1	A2
Origine	Legno da albero ad alto fusto Residui legnosi non trattati chimicamente	Legna da alberi interi (escluse radici) Legno da albero ad alto fusto Residui da ciocchi di legna Corteccia (da lavorazioni industriali) Residui legnosi non trattati chimicamente
Ceneri (w%-dry) (secondo EN 14775)	< 0,7	< 1,5

Le analisi condotte in laboratorio hanno convalidato la classificazione dichiarata di entrambi i combustibili confermando, come parametro che principalmente distingue i due prodotti, il loro contenuto in ceneri, cioè la componente inorganica che rimane come residuo anche in caso di combustione completa.

Nel caso del pellet di classe A1 il contenuto in ceneri è pari a 0.3 %, mentre nel caso del pellet A2 questo contenuto arriva all'1.2 %, quindi ben 4 volte superiore rispetto al primo.

Per quanto riguarda le prove effettuate sulle caldaie murali, le tipologie di combustibile selezionate sono state: gas metano G20 e gpl in bombole G30.

Impianti sperimentali

Nel corso dell'intera sperimentazione gli apparecchi selezionati sono stati sottoposti ad una serie di verifiche sperimentali che hanno previsto:

- una **caratterizzazione preliminare** delle loro prestazioni e delle loro emissioni, prendendo in considerazione i principali parametri normati (CO, NOx, CO₂, O₂, polveri) o ritenuti più rappresentativi, anche in base a precedenti sperimentazioni e a dati rinvenuti in letteratura, del funzionamento con combustibile pellet (COT, IPA-idrocarburi policiclici aromatici);
- prove cosiddette "di **invecchiamento**" condotte facendo funzionare gli apparecchi a pieno regime per almeno 14 ore al giorno provvedendo alla manutenzione minima prevista dal costruttore (pulizia del cassetto ceneri, pulizia del bruciatore, pulizia dello scambiatore termico) e monitorando settimanalmente l'andamento dei principali parametri emissivi (CO, polveri);
- una **caratterizzazione finale** al termine della fase di invecchiamento che prevede la determinazione dei medesimi parametri considerati nella fase di caratterizzazione preliminare e la valutazione delle loro eventuali diversità o peculiarità.

Per sottoporre le stufe alle prove sperimentali sopra descritte è stato previsto l'impiego di due differenti apparati impiantistici, uno per la caratterizzazione iniziale e finale degli apparecchi ed uno per la conduzione delle prove di invecchiamento.

Caratterizzazione iniziale/finale (pellet)

Lo schema dell'impianto utilizzato per la determinazione dei fattori di emissione delle stufe a pellet e per la caratterizzazione iniziale (e finale) ad esse relativa è riportato in Figura 6.

Lungo il condotto di evacuazione fumi sono stati predisposti due punti di campionamento per la determinazione mediante analizzatori automatici continui dei gas di combustione (CO, NO_x, CO_T, CO₂, O₂) e il campionamento manuale discontinuo per la determinazione degli IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e delle polveri (PM).

Per quanto riguarda il materiale particolato è stato scelto di effettuare campionamenti a caldo (temperatura superiore ai 70°C cioè al disopra del punto di rugiada) e a freddo (al disotto dei 35°C al fine di garantire la condensazione e la "cattura" dei composti organici volatili non metanici (COVNM)).

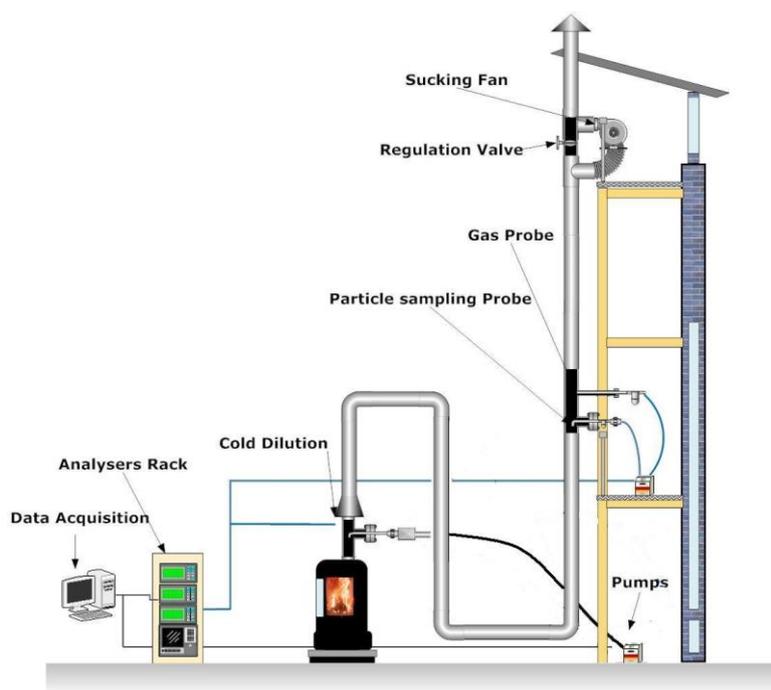


Figura 6 Schema dell'impianto utilizzato per la caratterizzazione iniziale degli apparecchi

Le polveri totali (PM) sono state determinate mediante campionamento isocinetico dei fumi di combustione utilizzando filtri in fibra di quarzo; la concentrazione delle polveri è stata calcolata successivamente per via gravimetrica.

Per quanto riguarda la determinazione degli IPA, il campionamento degli IPA è stato effettuato con una linea di prelievo isocinetico e con riferimento a metodi ISO ed EPA, con gli opportuni adattamenti resi necessari dalla diversa tipologia degli apparecchi utilizzati e dalle particolari modalità di prova previste dallo schema generale della sperimentazione. Successivamente i campioni sono stati analizzati mediante gascromatografia interfacciata a spettrometria di massa.

Caratterizzazione caldaie murali (gas/GPL)

Per quanto riguarda le caldaie murali, il sistema utilizzato per la caratterizzazione delle emissioni e riportato in Figura 7 è costituito da:

- un banco di prova, su cui è alloggiata tutta la componentistica per il controllo dei circuiti del liquido e del gas con i relativi sensori;
- una bilancia per la pesatura dell'acqua impiegata nel raffreddamento nel corso delle prove, con serbatoio in acciaio inox;
- un sistema di controllo ed acquisizione dati;
- un modulo di campionamento e analisi degli effluenti gassosi.

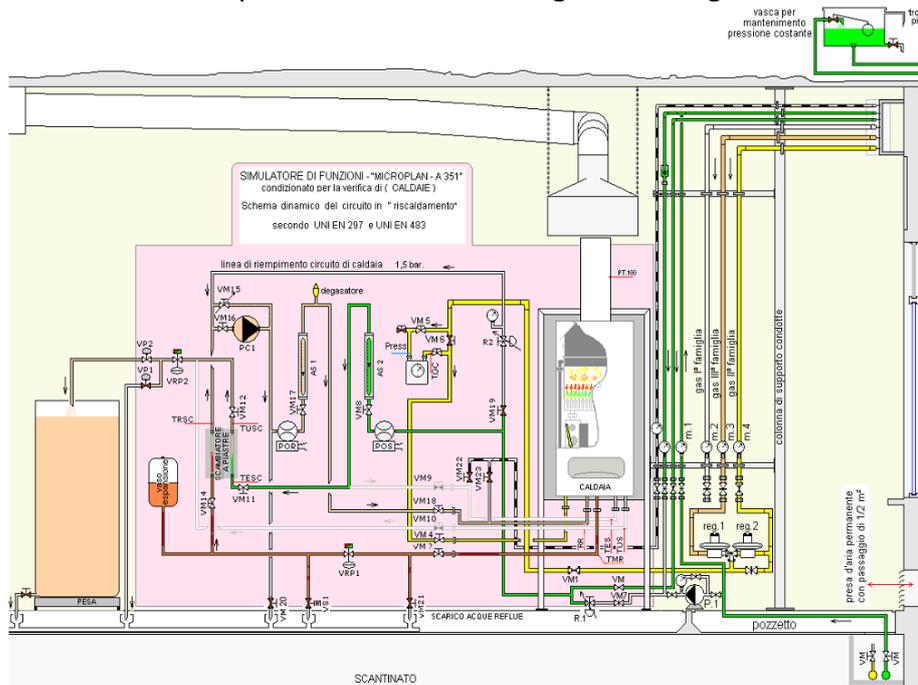


Figura 7 Schema del banco prove delle caldaie murali a gas

Caratterizzazione preliminare – fattori di emissione delle stufe a pellet

La caratterizzazione iniziale è stata condotta accoppiando le due stufe con le due tipologie di pellet, così da ottenere quattro distinte fotografie del comportamento di queste con combustibili che si trovano agli estremi della qualità attualmente distribuita. Per ciascuna di queste condizioni sono state determinate le emissioni e i relativi fattori di emissione di CO, NO_x, COV, PM e IPA.

In Tabella 8 sono riportati i dati relativi delle concentrazioni di inquinanti gassosi e delle polveri riferiti tutti al 13 % di ossigeno e il valore di ossigeno medio rilevato durante la prova.

I dati rilevati sugli apparecchi non invecchiati risultano in linea con i dati di letteratura e i precedenti studi condotti. Sulla base dei dati dichiarati in relazione alle emissioni di monossido di carbonio (CO), gli apparecchi risultano conformi a quanto prescritto dalla norma EN 14785:2006, requisito necessario per l'apposizione della marcatura CE (500 mg/m³ a potenza nominale e 750 mg/m³ a potenza minima, al 13% di O₂) ottenuti però utilizzando un pellet di classe A1. Il valore 737,1 mg/Nm³ ottenuto con la stufa di bassa gamma non può considerarsi direttamente confrontabile con il limite in quanto ottenuto con il pellet di bassa qualità.

I requisiti minimi previsti dalla direttiva Ecodesign (DIRETTIVA 2009/125/CE del parlamento europeo e del consiglio del 21 ottobre 2009 relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia) che entrerà in vigore a partire dal 2022 imporranno che le emissioni di PM degli apparecchi per il riscaldamento che utilizzano legno compresso granulare (pellet) non dovranno superare i 20 mg/m³ al 13% di O₂ e che le emissioni di CO degli stessi non dovranno superare 300 mg/m³ al 13% di O₂. Sulla base di tale direttiva gli apparecchi esaminati risulterebbero conformi, con la puntualizzazione riguardante la stufa di bassa gamma sopra descritta, per quanto riguarda le emissioni di CO, mentre non risulterebbero in linea per quel che riguarda le emissioni di particolato. La stufa di alta gamma se utilizzata con il pellet in classe A1 che è raccomandato per le prove di certificazione fornisce valori di polveri prossimi al requisito imposto dalla direttiva e in linea con quanto dichiarato dal costruttore che è pari a 11,4 e 39,1 mg/m³ (Emissione di polveri al 13% di O₂ a capacità nominale e ridotta rispettivamente).

Di seguito vengono sinteticamente riportati i risultati delle prove di caratterizzazione degli apparecchi a pellet per quanto riguarda le concentrazioni di inquinanti prodotte durante la combustione e i relativi fattori di emissione (valori medi su tre test) (Tabella 9 - Tabella 11) .

Tabella 8 Concentrazioni di gas e polveri riferite al 13 % di ossigeno (caratterizzazione preliminare)

APPARECCHIO	COMBUSTIBILE	CO	COV	NOx	PM
		mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
BG	pellet A1	168.4	48.2	140.8	52.5
BG	pellet A2	737.1	263.6	274.7	97.6
AG	pellet A1	209.1	7.9	161.8	28.5
AG	pellet A2	278.2	9.6	196	98.7

Tabella 9 Fattori di emissione medi di gas e polveri (caratterizzazione preliminare)

APPARECCHIO	COMBUSTIBILE	CO	COV	NOx	PM
		g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ
BG	pellet A1	141.4	40.5	118.2	44.1
BG	pellet A2	625.7	223.8	233.2	82.9
AG	pellet A1	175.6	6.7	135.9	23.9
AG	pellet A2	236.1	8.2	166.3	83.8

Tabella 10 Concentrazioni di IPA riferite al 13 % di ossigeno (caratterizzazione preliminare)

APPARECCHIO	COMBUSTIBILE	benzo(a)pirene
		µg/Nm ³
BG	pellet A1	0.21
BG	pellet A2	1.11
AG	pellet A1	0.26
AG	pellet A2	0.11

Tabella 11 Fattori di emissioni di IPA (BENZOaPIRENE) (caratterizzazione preliminare)

APPARECCHIO	COMBUSTIBILE	benzo(a)pirene µg/MJ
BG	pellet A1	0.18
BG	pellet A2	0.94
AG	pellet A1	0.22
AG	pellet A2	0.1

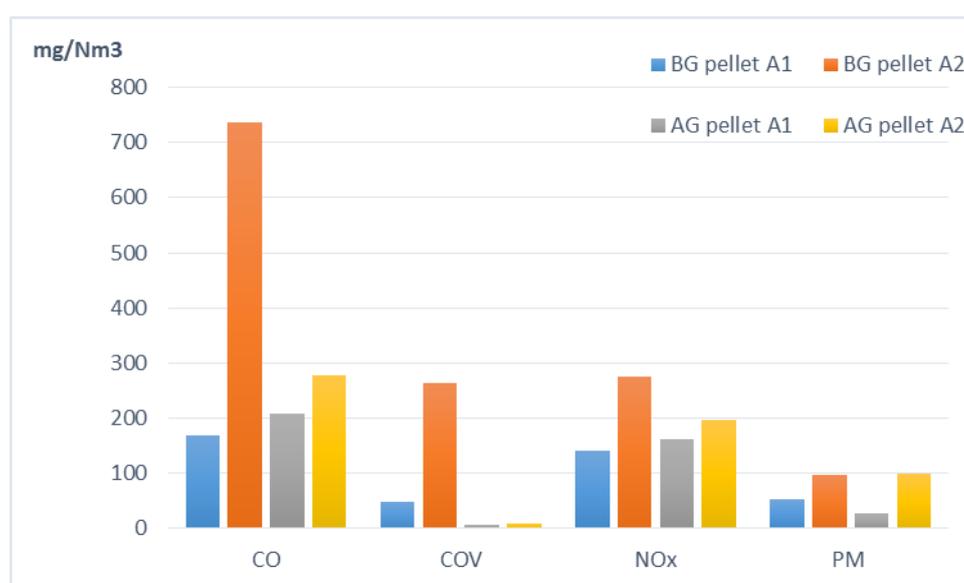


Figura 8 Stufe a pellet: Concentrazioni degli inquinanti nei fumi riferiti al 13% di O2

Caratterizzazione preliminare – risultati caldaie murali (gas naturale/GPL)

Ciascun apparecchio è stato preliminarmente caratterizzato in laboratorio per determinarne il rendimento e le emissioni specifiche. In particolare, sono stati determinati i fattori di emissione per i seguenti parametri emissivi:

- Monossido di carbonio (CO)
- Carbonio Organico Totale (COV)
- Ossidi di azoto (NOx)
- Polveri Totali (PM)
- Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA)

Ciascun parametro è stato misurato secondo le metodiche normalizzate esistenti.

Anche per questa tipologia di apparecchi vengono sinteticamente riportati in Tabella 12 e Tabella 13 i risultati delle prove di caratterizzazione sia per quanto riguarda le concentrazioni di inquinanti prodotte durante la combustione sia per quanto riguarda i relativi fattori di emissione (valori medi su tre test).

I dati riscontrati sono in linea con quanto dichiarato dal costruttore e con le classi di appartenenza degli apparecchi. Per quanto concerne i parametri non abitualmente misurati come PM e COV i

risultati sin qui ottenuti con i metodi adottati risultano inferiori ai limiti di rilevabilità delle metodiche stesse.

Tabella 12 Concentrazioni di gas e polveri riferite al 3 % di ossigeno (caldaia a gas naturale e GPL)

combustibile	CO	NOx	COV	PM
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³
G20	153.7	87.6	< 0.4	< 0.1
G31	128.0	60.5	< 0.4	< 0.1

Tabella 13 Fattori di emissioni di gas e polveri (caldaia a gas naturale e GPL)

combustibile	CO	NOx	COV	PM
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ
G20	56.6	32.3	< 0.15	< 0.04
G31	47.8	22.6	< 0.15	< 0.04

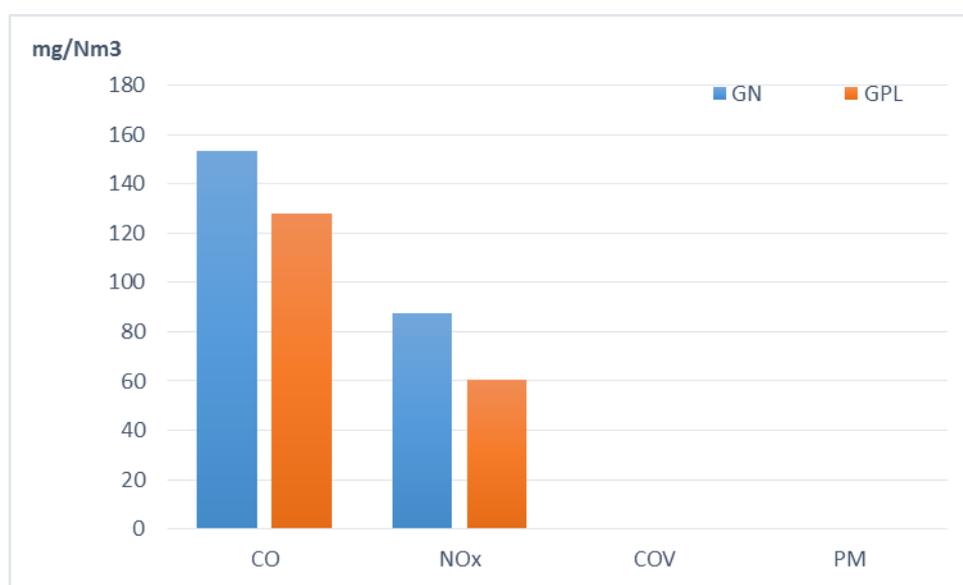


Figura 9 Caldaie murali: Concentrazioni degli inquinanti nei fumi riferiti al 3% di O₂

I valori dei fattori di emissione determinati sperimentalmente possono quindi essere messi a confronto con i dati disponibili ad oggi in letteratura per i combustibili non direttamente testati.

Tabella 14 Fattori di emissione di riferimento individuati nello studio Innovhub-SSI

Combustibile	CO g/GJ	NOx g/GJ	SOx g/GJ	COV g/GJ	PM g/GJ	IPA benzo(a)pirene µg/MJ	NOTE
Gas Naturale	56.6	32.3	0.3 ^a	<0.15	<0.04	<0.08	^a valore medio di letteratura
GPL	47.8	22.6	2.2 ^b	<0.15	<0.04	<0.08	^b elaborazione ISSI sulla base di dati di specifica
Gasolio	3.7 ^c	34 ^c	19.3 ^c	1.1 ^c	0.1 ^c	0.08 ^a	^c dati ISSI su caldaie di potenza >150 kW ^a valore di letteratura
Legna	5862 ^d	122 ^d	10.7 ^d	536 ^d	254 ^d	68.7 ^d	^d dati ISSI
Pellet A1 stufa alta gamma	175.6	135.9	6.87 ^e	6.7	23.9	0.22	^e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A1 stufa bassa gamma	141.4	118.2	6.87 ^e	40.5	44.1	0.18	^e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A2 stufa alta gamma	236.1	166.3	12.8 ^e	8.2	83.8	0.1	^e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo
Pellet A2 stufa bassa gamma	625.7	233.2	12.8 ^e	223.8	82.9	0.94	^e valore teorico sulla base del contenuto di zolfo

Tabella 15 Differenze percentuali tra i fattori di emissione sperimentali di PM e IPA tra i diversi combustibili

VS.	Pellet A1 stufa alta gamma	pellet A1 stufa bassa gamma	Pellet A2 stufa alta gamma	Pellet A2 stufa bassa gamma	
Gas Naturale/GPL	-99.83	-99.91	-99.95	-99.95	PM%
Gas Naturale/GPL	-63.64	-55.56	-20.00	-91.49	B(a)P%

Tale confronto, riportato sinteticamente in Tabella 14, relativo ai fattori di emissione di polveri totali, CO e NOx è ben visibile anche nei grafici riassuntivi di Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13, Figura 14. Il confronto con i dati di letteratura può essere visto nei grafici di Figura 15, Figura 16 e Figura 17. Essi mostrano come, pur nell'ampia variabilità che contraddistingue i fattori di emissione relativi ai diversi combustibili, si possano identificare delle "fasce caratteristiche" per ciascun combustibile, entro le quali tali valori sono dispersi. **Nei grafici sono riportati i fattori di emissione reperiti nei vari lavori esaminati, oppure direttamente prodotti nell'ambito di questo studio o di altri condotti dai medesimi autori di questo: in alcuni casi si tratta di valori singoli in altri di valori medi di un intervallo di variabilità, riportato nei lavori originali in forma di serie di risultati omogenei oppure di incertezza sul singolo risultato.**

In particolare, ad esempio, soffermando l'attenzione sugli intervalli dei dati di letteratura dei fattori di emissione delle polveri, si osserva una marcata differenza fra i vari combustibili, con un incremento progressivo di un ordine di grandezza passando dai combustibili gassosi e il gasolio al pellet e altrettanto passando dal pellet alla legna.

A conferma di ciò, per quanto riguarda il PM, che rappresenta l'inquinante di maggior rilievo, i valori medi sperimentali dei medesimi fattori di emissione sono messi a confronto nel grafico in Figura 10.

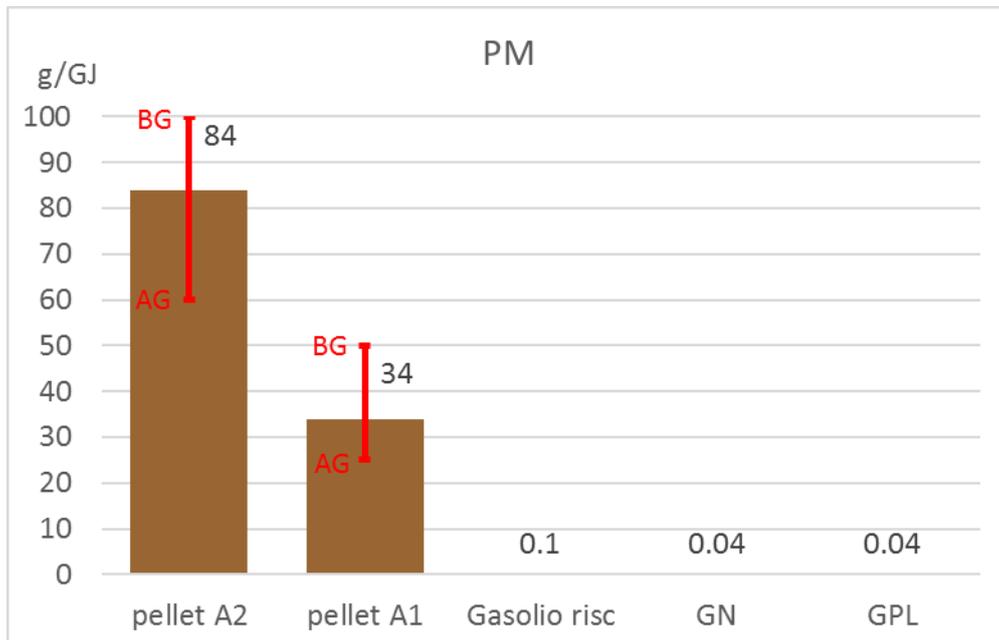


Figura 10 Confronto tra i fattori di emissione di PM per i combustibili considerati

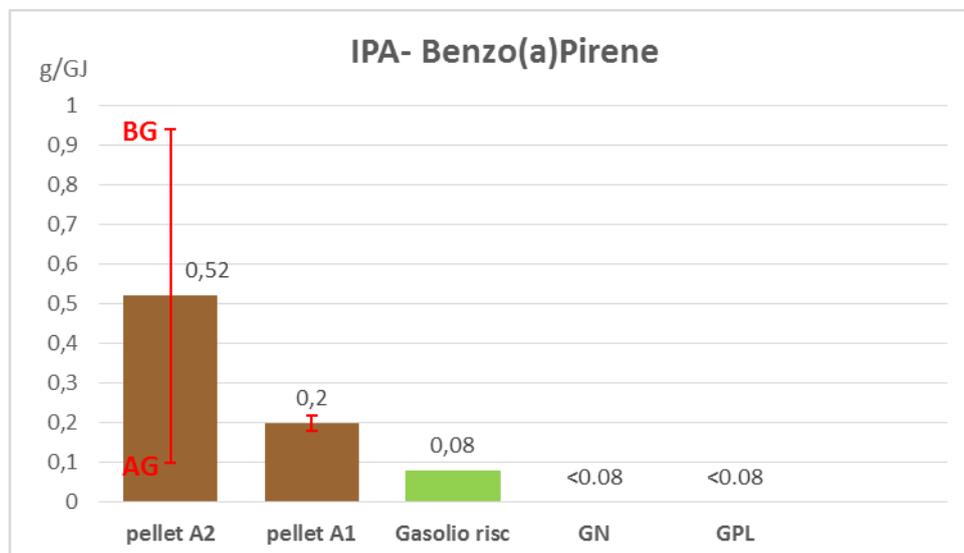


Figura 11 Fattori di emissione di Benzo(a)Pirene per i diversi combustibili

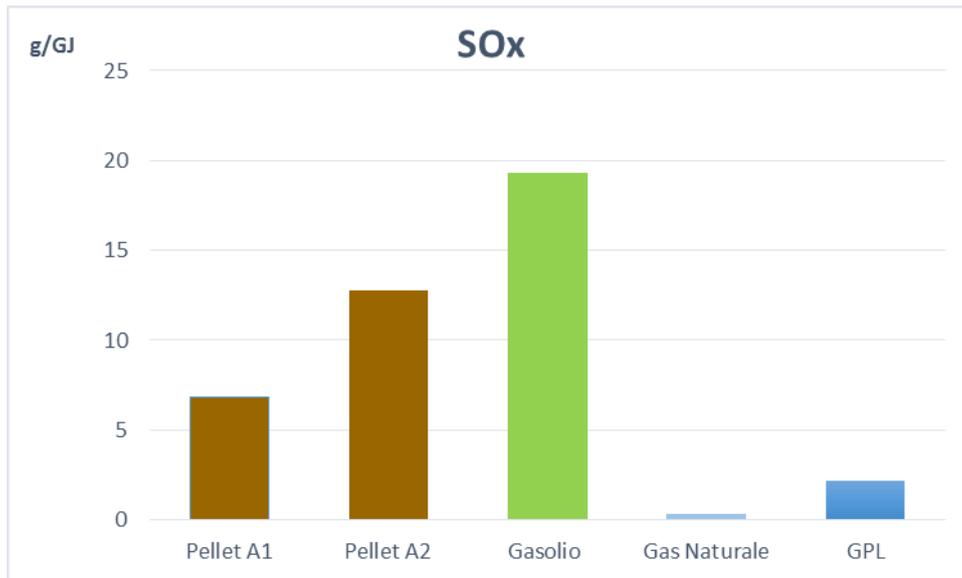


Figura 12 Fattori di emissione di SOx per i diversi combustibili

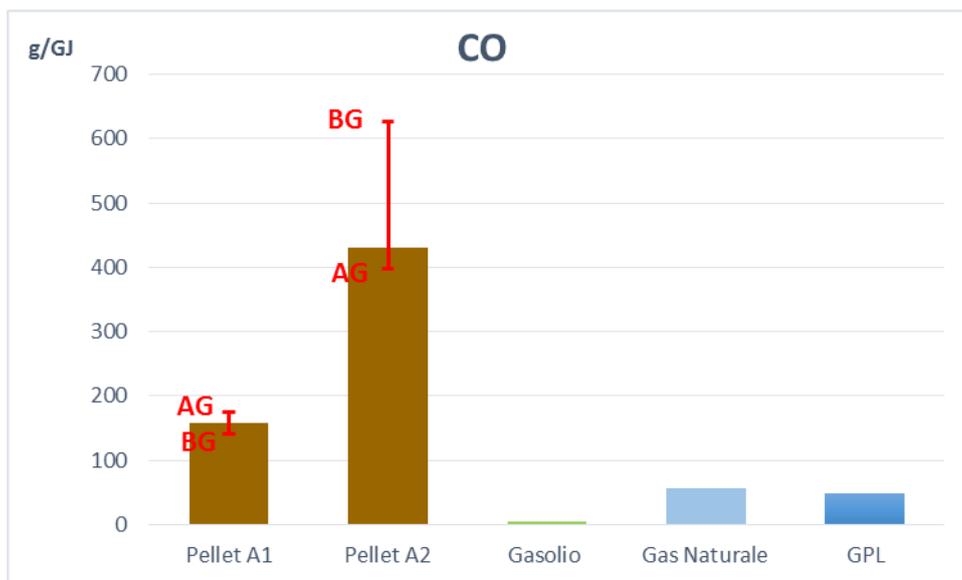


Figura 13 Fattori di emissione di CO per i diversi combustibili

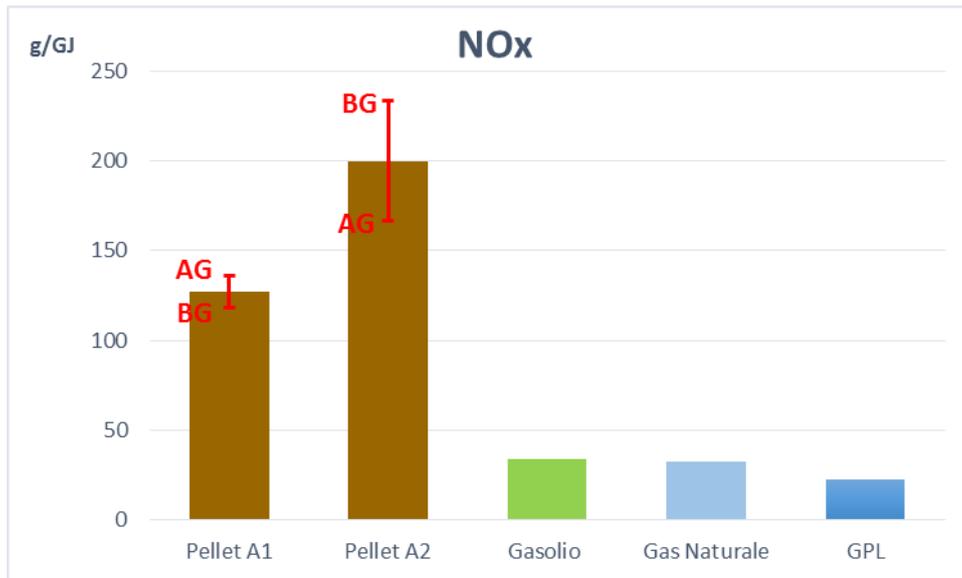


Figura 14 Fattori di emissione di NOx per i diversi combustibili

Per gli intervalli medi dei fattori di emissione del CO si osservano analoghi incrementi nel passaggio da un combustibile all'altro con una piena sovrapposizione tra le emissioni dei combustibili gassosi e liquidi.

Nel caso degli ossidi di azoto le differenze sono meno marcate, i valori relativi al pellet sono circa tre volte quelli rilevati per i combustibili gassosi e per il gasolio.

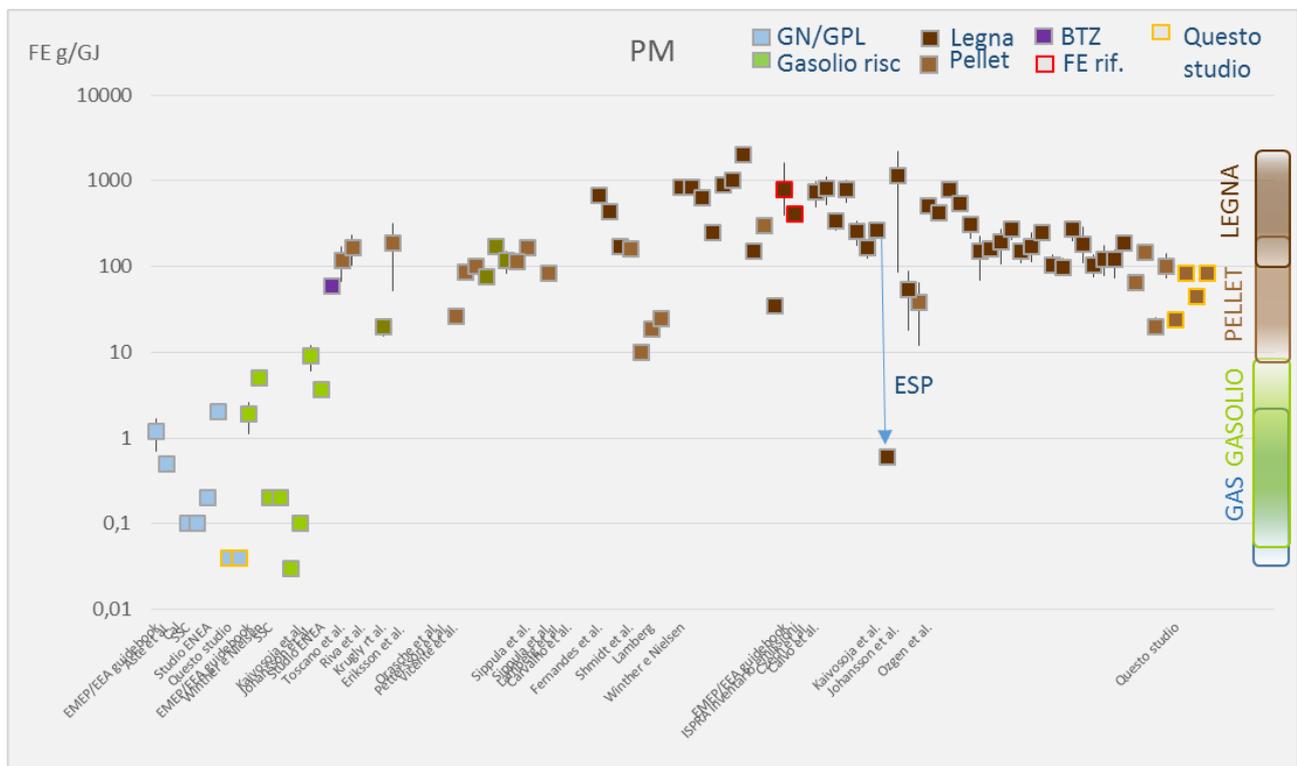


Figura 15 Fattori di emissione per il PM reperiti in letteratura o direttamente ricavati nella sperimentazione di questo studio

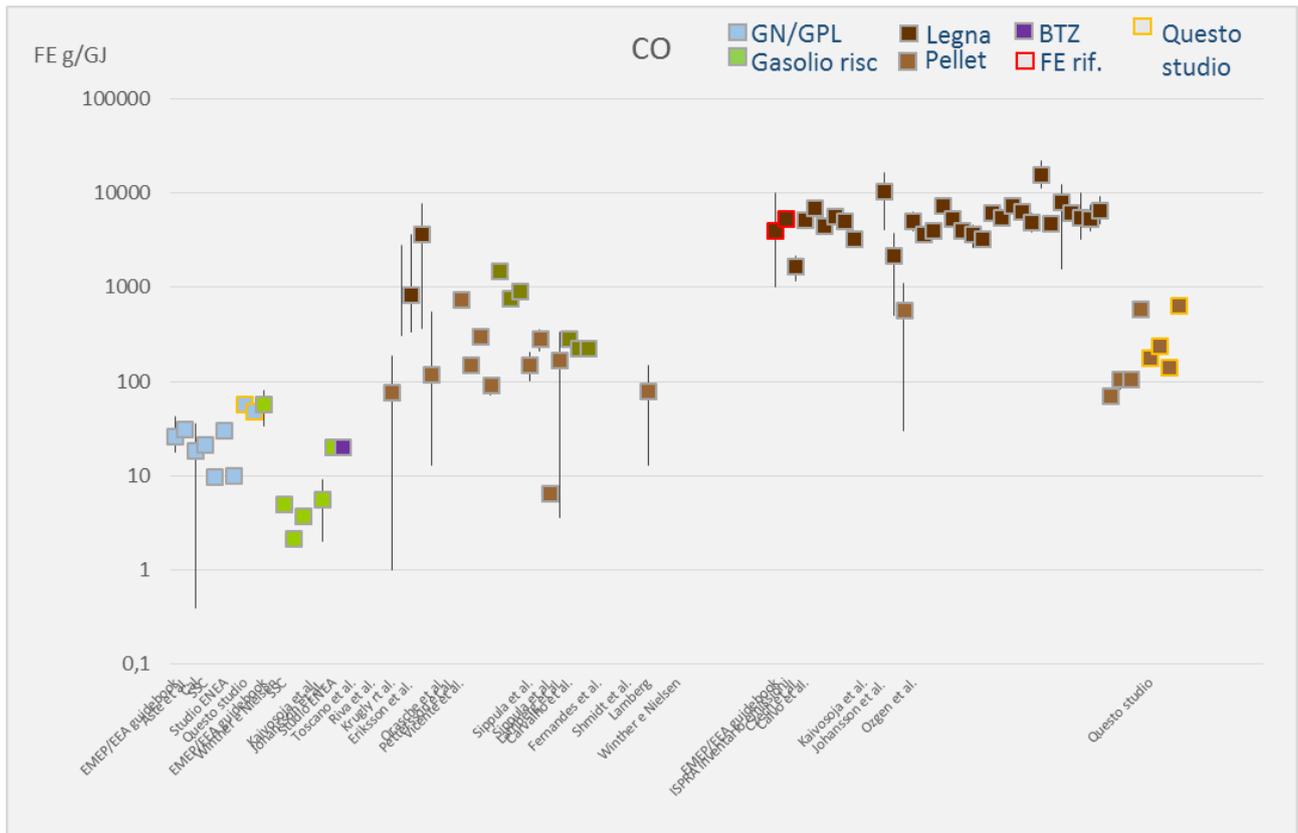


Figura 16 Fattori di emissione per il CO reperiti in letteratura o direttamente ricavati nella sperimentazione di questo studio

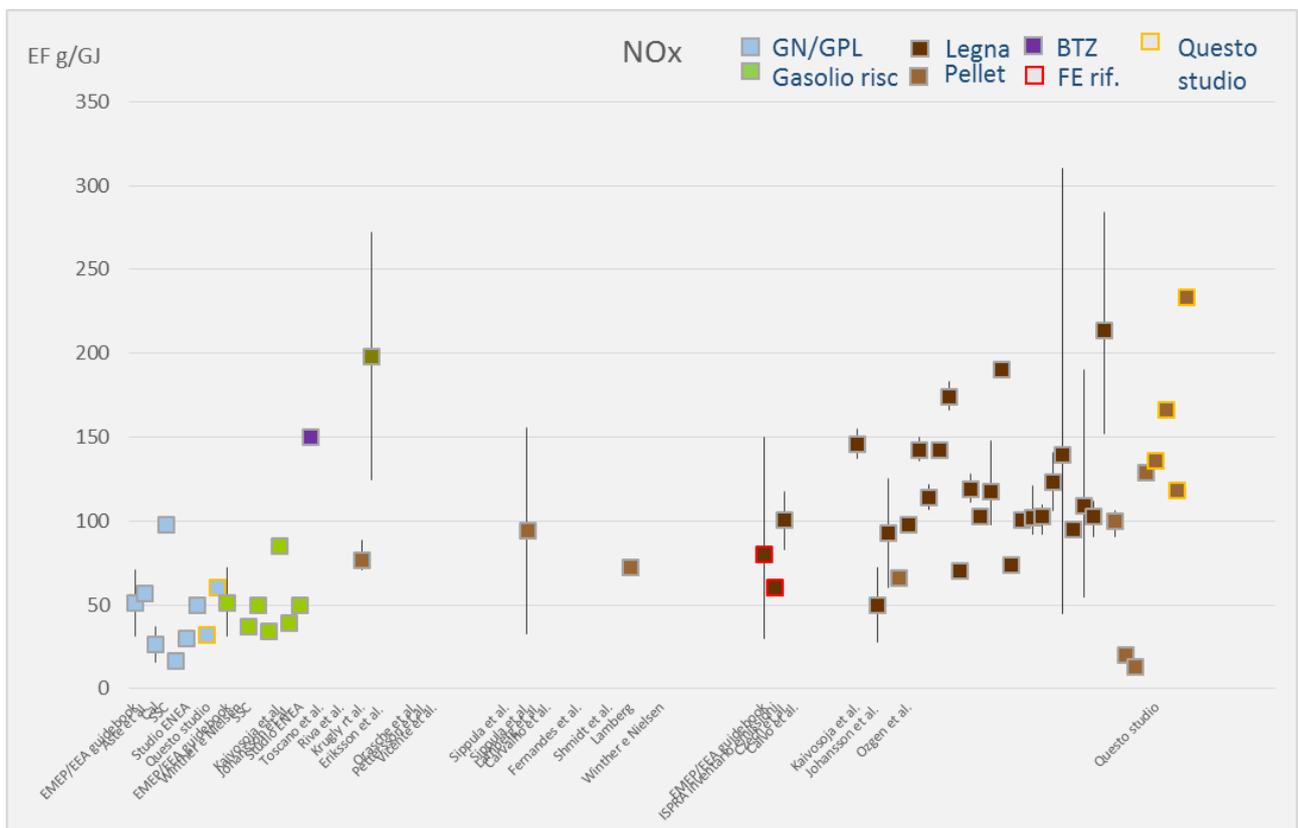


Figura 17 Fattori di emissione per gli NOx reperiti in letteratura o direttamente ricavati nella sperimentazione di questo studio

Conclusioni

In conclusione, è possibile affermare che:

- Si osserva una marcata differenza fra i vari combustibili, con un incremento progressivo di due ordini di grandezza nelle emissioni di PM passando dai combustibili gassosi e il gasolio al pellet e di un altro passando dal pellet alla legna da ardere.
- Gli specifici valori di CO misurati nel caso delle piccole caldaie a combustibili gassosi evidenziano emissioni di CO che risultano da tre a sei volte inferiori al pellet e cento volte inferiore alla legna.¹
- Nel caso degli ossidi di azoto le differenze sono meno marcate, i valori relativi al pellet sono circa tre volte quelli rilevati per i combustibili gassosi e per il gasolio.
- Nel caso degli ossidi di zolfo è invece il gasolio da riscaldamento a mostrare un fattore di emissione nettamente superiore a tutti gli altri combustibili, per effetto dello zolfo in esso presente. I valori di ossidi di zolfo ricavati per i combustibili gassosi risultano da 3 a 40 volte inferiori rispetto al pellet e da 10 a 30 volte inferiori rispetto alla legna.
- Per quanto concerne gli IPA con specifica attenzione al Benzo(a)Pirene come specie di riferimento, i valori più alti sono stati misurati in questo studio sul pellet benché valori estremamente più elevati siano riportati per la legna, al contrario la concentrazione nei fumi delle caldaie a gas naturale e GPL è risultata non rilevabile.
- Le caratteristiche tecniche degli apparecchi a pellet sono significativamente influenti: nel caso degli apparecchi di bassa gamma sono state misurate concentrazioni di PM più che doppie rispetto a quelli di alta gamma, quando alimentati con combustibile di classe A1.
- Ugualmente la qualità del pellet influenza notevolmente le emissioni di PM delle stufe. I valori possono più che triplicare passando dalla classe A1 alla classe A2.
- Utilizzando un pellet di qualità inferiore (A2) peggiorano significativamente le emissioni con entrambe le tipologie di apparecchi, senza che si osservino marcate differenze fra un apparecchio e l'altro.
- Questo studio, pur avendo preso in considerazione anche apparecchi a biomassa di gamma medio/alta, conferma il forte contributo della biomassa solida alle emissioni inquinanti del settore domestico in special modo per quanto riguarda il particolato.

¹ Il valore di CO relativo al gasolio è un dato riferito a caldaie a gasolio di impianti di taglia nettamente superiore (impianti condominiali centralizzati)

Bibliografia

A.I. Calvo , V. Martins, T. Nunes, M. Duarte, R. Hillamo, K. Teinil, V. Pont, A. Castro, R. Fraile, L. Tarelho, C. Alves; Residential wood combustion in two domestic devices: Relationship of different parameters throughout the combustion cycle; Atmospheric Environment 116 (2015) 72-82

H. Czech, O. Sippula, M. Kortelainen, J. Tissari, C. Radischat, J. Passig, T. Streibel, J. Jokiniemi, R. Zimmermann; On-line analysis of organic emissions from residential wood combustion with single-photon ionization time-of-flight mass spectrometry (SPI-TOFMS); Fuel 177 (2016) 334–342

L. S. Johansson, B. Leckner, L. Gustavsson, D. Cooper, C. Tullin, A. Potter; Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets; Atmospheric Environment 38 (2004) 4183–4195

G. Riva, E. Foppa Pedretti, G. Toscano, D. Duca, A. Pizzi; Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in domestic pellet stove emissions; Biomass and Bioenergy 35 (2011) 4261-4267

G. Toscano, D. Duca, A. Amato, A. Pizzi; Emission from realistic utilization of wood pellet stove; Energy 68 (2014) 644-650

T. Kaivosoja, P.I. Jalava, H. Lamberg, A. Virén, M. Tapanainen, T. Torvela, U. Tapper, O. Sippula, J. Tissari, R. Hillamo, M.-R. Hirvonen, J. Jokiniemi; Comparison of emissions and toxicological properties of fine particles from wood and oil boilers in small (20-25 kW) and medium (5-10 MW) scale; Atmospheric Environment 77 (2013) 193-201

E. Krugly, D. Martuzevicius, E. Puida, K. Buinevicius, I. Stasiulaitiene, I. Radziuniene, A. Minikauskas, L. Kliucininkas; Characterization of Gaseous- and Particle-Phase Emissions from the Combustion of Biomass-Residue-Derived Fuels in a Small Residential Boiler; Energy Fuels (2014), 28, 5057–5066

M. Winther, O. Nielsen; Technology dependent BC and OC emissions for Denmark, Greenland and the Faroe Islands calculated for the time period 1990e2030; Atmospheric Environment 45 (2011) 5880-5895

ISPRA 2016; Italian Emission Inventory 1990-2014 – Informative Inventory Report 2016

ISTAT 2014 Indagine ISTAT sui consumi energetici delle famiglie

AIEL, Valter Francescato; Evoluzione del consumo di legna e pellet e delle emissioni di PM10 dalla combustione residenziale in Italia; agriforenergy anno x n.1 febbraio 2016

S. Ozgen, S. Caserini, S. Galante, M. Giugliano, E. Angelino, A. Marongiu, F. Hugony, G. Migliavacca, C. Morreale ; Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets; Atmospheric Environment 94 (2014) 144-153

SSC 2005; Analisi comparativa di combustibili per uso civile; http://www.innovhub-ssi.it/c/document_library/get_file?uuid=7959f040-10b9-47c9-a56f-6a1c0c488934&groupId=11648

Fong, K.; Nussbaumer, T.; Health Effects of Aerosols from Wood Combustion, 16th ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH Zürich, 24.–27. June 2012

E. Longhin, M. Gualtieri, L. Capasso R. Bengalli, S. Mollerup, J.A. Holme, J. Øvrevik, S. Casadei, C. Di Benedetto, P. Parenti, M. Camatini. Physico-chemical properties and biological effects of diesel and biomass particles. *Environmental Pollution* 215 (2016) 366-375

E. Corsini, S. Budello, L. Marabini, V. Galbiati, A. Piazzalunga, P. Barbieri, S. Cozzutto, M. Marinovich, D. Pitea, C. L. Galli. Comparison of wood smoke PM_{2.5} obtained from the combustion of FIR and beech pellets on inflammation and DNA damage in A549 and THP-1 human cell lines. *Arch Toxicol* (2013) 87:2187–2199.

G. Lanzani, Exposure to particulate matter from wood burning for residential heating in the Po Valley

C. Colombi, S. Mossetti, C. Belis, V. Gianelle, M. Lazzarini, E. Angelino, E. Peroni, S. Della Mora; Sviluppo e applicazione di una metodologia multiapproccio al source apportionment del PM₁₀, Atti del terzo convegno nazionale PM2008, Bari 2008.

G. Pirovano, C. Colombi, A. Balzarini, G.M.Riva, V. Gianelle, G. Lonati; PM_{2,5} source apportionment in Lombardy (Italy): comparison of receptor and chemistry-transport modelling results". *Atm. Env.* 2015 Volume 106, April 2015, 56-70.

ENEA 2015 - Gli impatti energetici e ambientali dei combustibili nel settore residenziale, a cura di Maria Rosa Viridis, Maria Gaeta, Umberto Ciorba e Ilaria D'Elia (Unità Centrale Studi e Strategie), novembre 2015