



REPUBBLICA ITALIANA

Regione Lombardia

BOLLETTINO UFFICIALE

MILANO - GIOVEDÌ, 27 MAGGIO 2004

2° SUPPLEMENTO STRAORDINARIO

Sommario

C) GIUNTA REGIONALE E ASSESSORI

DELIBERAZIONE GIUNTA REGIONALE 17 MAGGIO 2004 - N. 7/17533 (5.3.4)
Limitazione all'utilizzo di specifici combustibili per il riscaldamento civile nei «comuni critici», nelle «zone critiche» e negli «agglomerati», come individuati ai fini della zonizzazione del territorio regionale, nell'ambito del Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (P.R.Q.A.) 2

Anno XXXIV - N. 123 - Poste Italiane - Spedizione in abb. postale - 45% - art. 2, comma 20/b - Legge n. 662/1996 - Filiale di Varese

C) GIUNTA REGIONALE E ASSESSORI

(BUR2004031)

(5.3.4)

D.g.r. 17 maggio 2004 - n. 7/17533

Limitazione all'utilizzo di specifici combustibili per il riscaldamento civile nei «comuni critici», nelle «zone critiche» e negli «agglomerati», come individuati ai fini della zonizzazione del territorio regionale, nell'ambito del Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (P.R.Q.A.)

LA GIUNTA REGIONALE

Premesso che:

– con deliberazione 29 luglio 2003, n. 13858, la Giunta regionale lombarda ha disposto, ai fini del conseguimento degli obiettivi di qualità dell'aria ambiente previsti dal d.lgs. 4 agosto 1999, n. 351, di attuazione della direttiva 96/62/CE, la limitazione all'utilizzo, a decorrere dall'1 ottobre 2004, di specifici combustibili per il riscaldamento civile nei «comuni critici», nelle «zone critiche» e negli «agglomerati», cioè nelle parti di territorio in cui i livelli di uno o più inquinanti comportano il rischio di superamento o il superamento dei valori limite e delle soglie di allarme stabiliti per tali inquinanti e pertanto oggetto del Piano Regionale per la Qualità dell'Aria (P.R.Q.A.) predisposto ai sensi dell'articolo 4, comma 1, lettera a), del d.P.R. 24 maggio 1988, n. 203 e successivamente degli articoli 7, 8 e 9 del citato d.lgs. 351/99;

– in particolare, tale provvedimento è stato adottato in applicazione dell'articolo 11 del d.p.c.m. 8 marzo 2002 (Disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione) che dispone la limitazione, da parte delle Regioni, ove tale misura sia necessaria per il conseguimento degli obiettivi di qualità dell'aria, dell'utilizzo dei combustibili individuati dal medesimo articolo 11, nell'ambito dei piani e dei programmi di cui agli articoli 8 e 9 del d.lgs. 351/99;

– con ordinanze n. 2248 e n. 2263, adottate nella Camera di Consiglio del 17 dicembre 2003, il T.A.R. per la Lombardia, I sezione di Milano, ha accolto le domande incidentali di sospensione della summenzionata d.g.r. 29 luglio 2003, n. 13858, limitatamente al divieto di uso di olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati negli impianti termici civili, «vista l'ordinanza della Quarta sezione del Consiglio di Stato del 28 gennaio 2003 e rilevato che persiste, allo stato, la carenza istruttoria evidenziata in tale ordinanza» (l'ordinanza della IV sez. del Consiglio di Stato, accogliendo l'appello avverso l'ordinanza T.A.R. Lazio n. 3735/02, ha disposto la sospensione dell'efficacia dell'articolo 8 del d.p.c.m. 8 marzo 2002, limitatamente all'uso dell'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati per il riscaldamento domestico/civile, ai fini di un'adeguata istruttoria preordinata a valutare in concreto gli eventuali effetti inquinanti prodotti dall'impiego di tale combustibile);

– proprio in considerazione della motivazione riportata nell'ordinanza del C. di S. la Giunta regionale lombarda ha ritenuto di riformulare la deliberazione 6 agosto 2002, n. 10203, che già disponeva la limitazione all'utilizzo dei combustibili previsti all'articolo 11 del d.p.c.m. 8 marzo 2002 nelle «zone critiche» del proprio territorio, al fine di dare puntuale contezza delle ragioni, riportate nella suddetta d.g.r. 29 luglio 2003, n. 13858, per cui determinati combustibili, tra cui l'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati, sono più inquinanti rispetto ad altri (in particolare gasolio e gas naturale), a parità di calore prodotto;

– pertanto veniva fatto espresso richiamo alla letteratura scientifica ed alle relazioni sugli studi svolti in merito alla individuazione dei fattori di emissione dei combustibili per il riscaldamento civile, di livello sia nazionale che internazionale, dall'analisi delle quali si evince chiaramente che la combustione dell'olio combustibile comporta emissioni specifiche maggiori rispetto a quelle generate dalla combustione del gas naturale e del gasolio, con riferimento a tutti gli inquinanti, ad eccezione del CO;

– la medesima deliberazione, sospesa oggi dalle ordinanze nn. 2248 e 2263 del T.A.R., riportava inoltre le considerazioni, che qui si ribadiscono, volte a motivare la necessità di disporre la limitazione dell'uso di specifici combustibili per il riscaldamento civile, al fine di rafforzare l'effetto delle altre azioni intraprese dalla Regione Lombardia fin dal 1988, nell'ambito dell'attività di pianificazione prevista dalla normativa di riferimento, per il contenimento delle emissioni inquinanti deri-

vanti dagli impianti industriali e di produzione di energia elettrica, nonché dal riscaldamento civile, dal traffico veicolare, etc.;

– ad ulteriore conferma ed approfondimento delle asserzioni già sostenute sui maggiori effetti inquinanti prodotti dall'impiego dell'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati e in conseguenza delle ordinanze del T.A.R., sopra richiamate, la Direzione Generale Qualità dell'Ambiente della Regione Lombardia, avvalendosi della propria Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (A.R.P.A.), quale ente preposto, in attuazione della legge 61/94 e della legge regionale 16/99, allo svolgimento, tra l'altro, di attività di studio e di ricerca tecnico-scientifica nel campo della prevenzione e della tutela ambientale, ha predisposto una **Relazione** tecnico-scientifica sulle emissioni di inquinanti dalla combustione in impianti termici civili, il cui contenuto, elaborato sulla base dei dati disponibili a livello regionale, nazionale ed internazionale, evidenzia in particolare che:

- i dati di letteratura ed i risultati disponibili delle analisi effettuate in Lombardia, nonché la descrizione delle caratteristiche tecnico-impiantistiche fornite dai costruttori di impianti termici, rilevano come la combustione dell'olio comporti emissioni specifiche maggiori di quelle del gas naturale e del gasolio per tutti gli inquinanti, tranne che per il CO, fra cui le polveri fini, l'anidride solforosa, i metalli pesanti e l'anidride carbonica; sono superiori anche le emissioni di ossidi di azoto per quanto dipendenti anche dalle modalità di combustione;
- le **polveri fini** emesse dall'uso dell'olio sono fino a due ordini di grandezza superiori a quelle del metano e fino ad un ordine di grandezza superiore a quello del gasolio (vedi Tab. 7.8 e 7.9 della **Relazione**); trattasi dell'inquinante le cui emissioni sono direttamente oggetto di politiche di riduzione in ambito europeo, nazionale e regionale;
- l'**anidride solforosa**, emessa dall'olio in quantitativi di 300 volte superiori a quelli del gas naturale e fino al 50% superiore al gasolio (vedi Tab. 7.1), è particolarmente importante perché è direttamente coinvolta nella formazione di particolato secondario; non essendo industrialmente applicabili i processi di desolfurazione agli oli combustibili, ne consegue che, relativamente all'impiego di olio combustibile, non potranno essere ottenute in futuro riduzioni significative delle emissioni di anidride solforosa;
- gli **ossidi di azoto**, emessi dall'olio in misura da tre a sette volte superiore al metano e da due a tre volte superiore al gasolio (vedi Tab. 7.2), intervengono nella formazione del PM10 secondario ed inoltre contribuiscono al superamento attuale del limite e del margine di tolleranza per l'NO_x e per l'NO₂ previsti dal d.m. 2 aprile 2002, n. 60;
- le **emissioni di composti organici volatili (COV) e di ossido di carbonio** presentano una grande variabilità, spiegabile per la notevole influenza delle modalità di combustione, dei carichi e dei possibili transitori per tali emissioni (vedi Tab. 7.3 e 7.5);
- i **metalli pesanti**, in particolare il nickel, presente in maniera significativa nell'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati ed emesso in misura maggiore (almeno due ordini di grandezza) dall'olio rispetto al gas naturale (vedi Tab. 7.10), sono composti di provata tossicità per l'organismo umano e più in generale per gli ecosistemi (vedi Tab. Allegato I al d.p.c.m. 8 marzo 2002);
- l'**anidride carbonica**, principale gas ad effetto serra, è emessa in quantitativi leggermente superiori dalla combustione dell'olio combustibile rispetto al gasolio, ma soprattutto rispetto al gas naturale, che pure contribuisce all'effetto serra a causa delle perdite nel sistema di produzione e di distribuzione.

Considerato che la limitazione all'uso dell'olio combustibile di cui trattasi, disposta dal d.P.C.M. 8 marzo 2002 ed estesa a tutto il territorio nazionale, differisce da quella prevista dalla Regione Lombardia che invece è rivolta ad una parte del territorio regionale, individuata in forza di specifici poteri di cui al d.lgs. 4 agosto 1999, n. 351 ed è finalizzata, a contenere l'immissione di inquinanti in atmosfera per il conseguimento dei limiti di qualità dell'aria.

Evidenziato a tal fine che:

– il d.p.c.m. 8 marzo 2002 è rivolto a disciplinare le caratteristiche merceologiche dei combustibili;

- l'articolo 8 del predetto d.p.c.m., sospeso dal Consiglio di Stato limitatamente all'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati, riguarda il divieto di impiego su tutto il territorio nazionale di tale combustibile per specifici impianti;

- la norma che autorizza le regioni, nell'ambito delle azioni e dei programmi volti al miglioramento e al risanamento della qualità dell'aria, a disporre la limitazione dell'uso di determinati combustibili per il riscaldamento civile, è contenuta negli articoli 7, 8 e 9 del d.lgs. 351/99 e nell'art. 11 del d.p.c.m. del marzo 2002, non sospeso dal C. di S.;

- l'articolo 8 e l'articolo 11 operano quindi, anche concettualmente, in ambiti e con finalità del tutto differenti tra loro, dal che discende il permanere della competenza delle regioni a limitare, nell'ambito dei piani e dei programmi volti al conseguimento degli standard fissati dalla normativa e pertanto in applicazione degli articoli 8 e 9 del d.lgs. 351/99, l'uso del suddetto olio combustibile e dei suoi derivati con decorrenze e per impianti diversi da quelli indicati dal d.p.c.m. del marzo 2002, relativamente ad aree delimitate del territorio, ove la concentrazione degli inquinanti supera i limiti di qualità dell'aria.

Considerato inoltre che l'applicazione della misura della limitazione dell'uso degli oli combustibili, come prevista dalla Regione Lombardia, assolve anche ad un criterio di proporzionalità tra misura e obiettivo e di gradualità, in quanto:

- la limitazione all'uso di olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati interesserebbe il 7% del territorio regionale ed una popolazione di circa 4 milioni di abitanti (sui circa 9 milioni dell'intera regione);

- la limitazione non si applicherebbe agli impianti termici con potenzialità superiore ai 10 MW (perché dotabili di sistemi di abbattimento degli inquinanti) e per tali impianti le prescrizioni sono comunque scaglionate nel tempo;

- la medesima limitazione permetterebbe una riduzione delle emissioni di PM10 nella stagione termica pari a circa 200 tonnellate, corrispondenti a circa il 5% del totale delle emissioni in tale periodo.

Ritenuto, per le considerazioni e le motivazioni sopra svolte e alla luce dei contenuti della Relazione tecnico-scientifica sulle emissioni di inquinanti dalla combustione in impianti termici civili predisposta dalla D.G. Qualità dell'Ambiente, che fornisce una valutazione concreta, supportata da dati di analisi e di letteratura, sugli effetti inquinanti dell'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati, di limitare, a decorrere dall'**1 ottobre 2004**, per gli impianti di combustione ad uso civile, di cui all'articolo 2, comma 1, lettera b) e comma 2 del d.p.c.m. 8 marzo 2002, installati nei «comuni critici», nelle «zone critiche» e negli «agglomerati», come individuati dalle dd.g.r. 19 ottobre 2001, n. 6501 e 6 dicembre 2002, n. 11485, l'utilizzo dei combustibili previsti all'articolo 11, comma 1, lettere e) ed f) del medesimo d.p.c.m. 8 marzo 2002, affidando il controllo del rispetto di tale disposizione ai Comuni ed alle Province, nell'ambito delle funzioni svolte ai sensi del d.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, modificato con d.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551.

Considerato peraltro che l'impiego, per gli impianti di cui trattasi, dei combustibili di cui all'articolo 11, comma 1, lettera e) (olio combustibile ed altri distillati pesanti di petrolio) e lettera f) (emulsioni di acqua-olio combustibile o acqua-altri distillati pesanti di petrolio) del d.p.c.m. 8 marzo 2002, aventi determinate caratteristiche merceologiche, solo unitamente all'adozione di adeguate e specifiche tecnologie di combustione e di abbattimento, permette di conseguire livelli di emissione paragonabili a quelli che si otterrebbero con l'utilizzo di combustibili sostitutivi, caratterizzati da migliori qualità merceologiche, ai fini di una combustione meno inquinante.

Ritenuto pertanto che, in deroga alla limitazione sopra specificata, gli impianti aventi potenzialità termica maggiore di 10 MW, ai quali possono essere applicate tecnologie di combustione e di abbattimento disponibili sul mercato, in grado di conseguire limiti di emissione compatibili con le finalità di risanamento della qualità dell'aria ambiente, possano utilizzare, successivamente alla suddetta data dell'**1 ottobre 2004**, i combustibili di cui all'articolo 11, comma 1, lettere e) ed f), del d.p.c.m. 8 marzo 2002, a condizione che siano rispettate le prescrizioni, che si condividono, individuate dalla competente struttura regionale.

All'unanimità di voti espressi nelle forme di legge

DELIBERA

1. di approvare il documento allegato alla presente deliberazione, di cui costituisce parte integrante e sostanziale, denominato «Relazione tecnico-scientifica sulle emissioni di inquinanti dalla combustione in impianti termici civili»;

2. di limitare, a decorrere dall'**1 ottobre 2004**, per gli impianti di combustione ad uso civile, di cui all'articolo 2, comma 1, lettera b) e comma 2 del d.p.c.m. 8 marzo 2002, installati nei «comuni critici», nelle «zone critiche» e negli «agglomerati», come individuati dalle dd.g.r. 19 ottobre 2001, n. 6501 e 6 dicembre 2002, n. 11485, l'utilizzo dei combustibili previsti all'articolo 11, comma 1, lettere e) ed f) del medesimo d.p.c.m. 8 marzo 2002, affidando il controllo del rispetto di tale disposizione ai Comuni ed alle Province, nell'ambito delle funzioni svolte ai sensi del d.P.R. 26 agosto 1993, n. 412, modificato con d.P.R. 21 dicembre 1999, n. 551;

3. di disporre che, in deroga alla suddetta limitazione, gli impianti aventi potenzialità termica maggiore di 10 MW, che alla data di entrata in vigore del d.p.c.m. 8 marzo 2002 già utilizzavano i combustibili di seguito specificati, possono impiegare, oltre la suddetta data dell'**1 ottobre 2004**, i combustibili di cui all'articolo 11, comma 1, lettera e) (olio combustibile ed altri distillati pesanti di petrolio) e lettera f) (emulsioni di acqua-olio combustibile o acqua-altri distillati pesanti di petrolio), del medesimo d.p.c.m. 8 marzo 2002, a condizione che vengano rispettate le seguenti prescrizioni:

a) *limiti di emissione riferiti al 3% di ossigeno libero nei fumi anidri:*

$SO_2 + NOX \text{ (come } NO_2) + NH_3 \text{ (come } NO_2) \leq 800 \text{ mg/Nmc}$

$Polveri \leq 50 \text{ mg/Nmc}$

b) durante ogni stagione termica (15 ottobre - 15 aprile) devono essere effettuati almeno due controlli analitici delle emissioni, distanziati tra loro da un minimo di 60 a un massimo di 105 giorni, i cui esiti devono essere trasmessi, entro il 15 giugno di ogni anno, agli Enti competenti per i controlli, individuati all'articolo 31 del d.lgs. 31 marzo 1998, n. 112;

4. di disporre altresì che, a decorrere dal 1 ottobre 2006, i suddetti impianti possono continuare ad utilizzare i medesimi combustibili di cui al punto 2, alle seguenti condizioni:

a) *limiti di emissione riferiti al 3% di ossigeno libero nei fumi anidri:*

$SO_2 + NOX \text{ (come } NO_2) + NH_3 \text{ (come } NO_2) \leq 600 \text{ mg/Nmc}$

$Polveri \leq 20 \text{ mg/Nmc}$

b) installazione di un sistema di monitoraggio delle emissioni per gli inquinanti di cui alla lettera a) e collegamento alla rete di controllo delle emissioni dai grandi impianti; in questa condizione, i limiti si intendono medi giornalieri per l'intero impianto, calcolati sulle ore di effettivo funzionamento di ciascun generatore;

5. di disporre la pubblicazione della presente deliberazione sul Bollettino Regionale della Regione Lombardia.

Il Segretario: Sala

ALLEGATO

**RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA
SULLE EMISSIONI DI INQUINANTI DALLA COMBUSTIONE
IN IMPIANTI TERMICI CIVILI**

Relazione tecnico-scientifica
Emissioni di inquinanti dalla combustione civile

INDICE

1. Introduzione e scopi della ricerca

- 1.1 Inquinamento atmosferico: quale problema?
- 1.2 La necessità di un nuovo provvedimento di limitazione degli oli combustibili
- 1.3 Consumo di olio combustibile
- 1.4 Peso delle emissioni da olio combustibile in Lombardia
- 1.5 Metodologia del rapporto

2. Inquinanti considerati e rilevanza per l'inquinamento atmosferico

- 2.1 SO₂
- 2.2 NO_x
- 2.3 COV
- 2.4 CO
- 2.5 CO₂
- 2.6 PTS, PM10, PM2,5
- 2.7 Metalli pesanti
- 2.8 Diossine

3. Caratteristiche dei combustibili considerati

- 3.1 Caratteristiche dei Combustibili
- 3.2 Olio
- 3.3 Distillati (Gasolio)
- 3.4 Gas Naturale
- 3.5 GPL
- 3.6 Carbone

4. Tipologie di tecnologie di combustione in ambito civile

- 4.1 La combustione
- 4.2 Tecniche di combustione
- 4.3 Apparecchi di combustione: bruciatori

5. Emissioni dalla combustione civile: dati specifici per la Lombardia

- 5.1 Indagine 2003 (ARPA Lombardia, 2003)
- 5.2 Indagine 2001 (Comune di Milano, 2001)
- 5.3 Indagine 1999 (PMIP Milano, 1999; PMIP Monza, 1999; PMIP Parabiago 1999)
- 5.4 Indagine 1994 (PMIP Milano, 1994)
- 5.5 Dati IRER (IRER, 2002)
- 5.6 Confronto fra i dati

6. Emissioni dalla combustione civile: dati di letteratura

- 6.1 Dati italiani
- 6.2 Dati europei - EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook
- 6.3 Dati statunitensi (A.P. 42 - US-EPA)
- 6.4 Dati IPCC (International Panel on Climate Change)

7. Discussione dei risultati

- 7.1 Ossidi di zolfo
- 7.2 Ossidi di azoto
- 7.3 COV - idrocarburi incombusti
- 7.4 Monossido di carbonio
- 7.5 Biossido di carbonio
- 7.6 Polveri (PTS, PM10 e PM2,5)
- 7.7 Metalli pesanti
- 7.8 Diossine

8. Conclusioni**9. Riferimenti bibliografici****10. Acronimi utilizzati**

TABELLE

ALLEGATI (*Omissis*) (1)**1. Introduzione e scopi della ricerca****1.1 Inquinamento atmosferico: quale problema?**

Il d.P.R. del 24 maggio 1988, n. 203 definisce in modo ampio ed esteso il termine di inquinamento atmosferico:

«ogni modificazione della normale composizione o dello stato fisico dell'aria atmosferica dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati».

Il problema dell'inquinamento atmosferico si presenta quindi come estremamente complesso per l'insieme degli elementi che lo compongono e lo caratterizzano.

Le tipologie degli inquinanti e delle sue sorgenti, i possibili effetti dannosi prodotti sull'ambiente naturale e antropico, le differenti scale spaziali e temporali di riferimento del fenomeno, i tempi necessari alla manifestazione degli effetti dannosi e di quelli richiesti per l'osservazione dei risultati dell'applicazione degli interventi di risanamento, l'ingovernabilità degli episodi atmosferici e delle modificazioni prodotte dalla meteorologia a scala locale e dalla climatologia su quella globale, le condizioni socio-economiche delle aree in osservazione, sono solo alcuni degli elementi da prendere in considerazione.

Una diversa combinazione di tali elementi conduce ai differenti e ben noti problemi di inquinamento atmosferico quali gli inquinamenti acuti su scala urbana, l'ozono troposferico, le deposizioni acidificanti ed eutrofizzanti, i cambiamenti climatici, la riduzione dell'ozono stratosferico, l'inquinamento transfrontaliero, la radioattività ambientale.

Di particolare interesse ai fini della presente relazione sono i fenomeni di inquinamento atmosferico su scala urbana e sub-urbana.

L'ambito urbanizzato è fortemente influenzato dall'elevata densità di attività umane che richiedono, per il loro mantenimento, consistenti trasformazioni energetiche.

Le principali responsabilità sono da ricercare nella densità del traffico veicolare, nel riscaldamento domestico invernale e nelle attività industriali.

Il conseguente fenomeno d'inquinamento appare particolarmente evidente in alcune aree urbanizzate della pianura padana dove, oltre alla considerevole densità abitativa ed industriale, insistono condizioni meteo-climatiche particolarmente sfavorevoli alla dispersione degli inquinanti.

La distribuzione spaziale delle temperature con andamento decrescente dal centro verso la periferia delle più vaste aree urbane di pianura, fenomeno noto come isola di calore, contribuisce poi in modo definitivo alla formazione di una vera e propria bolla che trattiene ed accumula al suo interno tutte le emissioni di gas inquinanti.

Il più noto fenomeno d'inquinamento a questa scala è conosciuto con il nome di smog, fenomeno perlopiù dovuto a biossido di zolfo, particolato, ossido di carbonio e composti organici volatili.

Oltre allo smog classico, dovuto principalmente all'azione di polveri e biossido di zolfo, in condizioni di forte radiazione solare si parla di smog fotochimico, dovuto anche all'azione di ossidi di azoto, ossido di carbonio e composti organici volatili che portano ad una nuova trasformazione degli inquinanti quali particolato secondario (PM10 e PM2,5) e ozono.

Questo ultimo fenomeno, oltre a colpire gli stessi centri urbani, si manifesta in modo molto importante in aree suburbane sottostante a quelle urbane, dove maggiore è il trasporto degli elementi precursori e l'incidenza della radiazione solare.

Nonostante la presenza di composti chimici pericolosi nello smog fotochimico, la letteratura internazionale (WHO, 2003) non riporta effetti acuti particolarmente gravi durante il verificarsi degli episodi di inquinamento atmosferico acuto da ozono (irritazioni e difficoltà respiratorie).

La stessa letteratura internazionale, invece, denuncia la estrema pericolosità per la salute umana degli episodi acuti di inquinamento atmosferico per smog classico, specialmente a causa delle polveri fini.

Al momento non sono note distinzioni nell'effetto sulla salute umana e sull'ambiente in genere di particolato primario e secondario.

(1) Gli originali degli atti che risultano dichiarati allegati alla presente deliberazione e non vengono riprodotti nel presente Bollettino, possono essere consultati presso la D.G. Qualità dell'Ambiente Struttura Protezione Aria.

Nel corso degli anni le direttive europee, le norme nazionali e regionali e le conseguenti azioni di pianificazione e programmazione degli interventi per il risanamento della qualità dell'aria, hanno portato un consistente miglioramento complessivo della stessa.

A fronte di una diminuzione delle concentrazioni degli inquinanti convenzionali come NO_x , SO_2 e PTS, riconducibile alla riduzione d'uso di combustibili pesanti di scarsa qualità ambientale per il riscaldamento civile quali olio combustibile e carbone a favore di altri più leggeri a minor impatto quali il gasolio desolfurato ed il gas naturale, all'adozione di nuove tecniche motoristiche e all'adozione dei catalizzatori per i veicoli accompagnate ad una riformulazione della composizione dei carburanti e all'adozione di migliori tecnologie in ambito industriale, si assiste oggi anche per l'emanazione di nuovi limiti di qualità dell'aria all'emergenza degli inquinanti secondari (ozono) e delle polveri fini (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$).

1.2 La necessità di un nuovo provvedimento di limitazione degli oli combustibili

A livello comunitario e a livello nazionale, significativi miglioramenti della qualità dell'aria sono stati ottenuti attraverso l'adozione di provvedimenti legislativi che hanno imposto l'uso di nuove tecnologie motoristiche con marmitta catalitica (riduzione di NO_x , CO e COV) e la desolforazione dei combustibili (riduzione SO_2).

Le riduzioni nel tenore di zolfo nei combustibili/carburanti sono state premiate con una consistente riduzione della presenza dei suoi composti gassosi in atmosfera.

Anche in Regione Lombardia sono stati compiuti numerosi sforzi per la riduzione delle emissioni inquinanti in particolare polveri, anidride solforosa ed ossidi di azoto.

Dalle ricerche svolte in Regione Lombardia (PUMI, 2003) risulta tuttavia che una consistente percentuale dal 30 ad oltre il 40% di PM_{10} e di $\text{PM}_{2,5}$ è ancora costituita da composti dello zolfo e dell'azoto.

I provvedimenti di limitazione degli oli combustibili, così come già fatto per il carbone, si inquadrano nelle politiche regionali per l'ulteriore riduzione dei livelli di polveri fini in atmosfera al fine di conseguire il rispetto dei nuovi limiti di qualità dell'aria imposti dalla recente normativa italiana ed europea che sono attualmente superati per PM_{10} , NO_x e NO_2 nelle zone critiche e di risanamento individuate dalla Regione con d.g.r. 6501 del 2001 e successiva integrazione.

Pur se l'olio combustibile non è oggi il combustibile più utilizzato per il riscaldamento domestico, la sua riduzione d'uso è necessaria per perseguire con determinazione, efficienza ed equità gli obiettivi.

Pur se l'inquinamento dell'aria è determinato da una moltitudine di fonti, ognuna di per se non in grado di determinare l'intero effetto dannoso, è da tenere in considerazione che una rigorosa politica ambientale non può permettere la persistenza di fonti inquinanti per cui sia stato dimostrato il contributo specifico maggiore ad altre oggi disponibili a costi non eccessivi. Se fosse infatti accettabile il criterio che, ad esempio, l'uso di olio costituisce oggi una fonte residuale di inquinamento per via del numero limitato di impianti, si aprirebbe la strada al riutilizzo di altre tecnologie inquinanti, ad esempio i veicoli senza marmitta catalitica, gli impianti a carbone ecc.

Considerato il non lieve vantaggio competitivo economico con altri combustibili, la non riduzione/limitazione dell'olio potrebbe innescare un procedimento inverso di incentivazione nell'uso di questo combustibile al posto di altri combustibili a minore impatto specifico. Ciò potrebbe comportare non solo un mancato miglioramento dei valori di qualità dell'aria ma addirittura un loro peggioramento rispetto quanto già acquisito.

Un altro fattore che porta a ritenere necessarie le azioni di riduzione delle emissioni di SO_2 e NO_x è la necessità di ottemperare alle direttive comunitarie. La Decisione del Consiglio Europeo 2003/507/CE del 13 giugno 2003 chiede infatti per l'anno 2010 una riduzione percentuale di SO_2 e NO_2 rispettivamente del 70% e del 48% rispetto i valori emissivi del 1990.

Secondo le stime effettuate da ENEA (Corinair 1990) e da ARPA - Regione Lombardia (Inemar 2001 - dati per revisione pubblica) la riduzione nelle emissioni di SO_2 sul territorio lombardo è stata del 58% nel periodo 1990-2001. Sul fronte delle azioni regionali sono quindi necessari sforzi ulteriori.

Le ragioni di una necessità di limitare le fonti più inquinan-

ti risiedono quindi nel fatto che non esiste un intervento risolutivo unico del problema.

Una politica efficace di miglioramento della qualità dell'aria si basa su numerosi provvedimenti che, ognuno con il loro contributo, possono se sommati permettere il raggiungimento degli obiettivi.

L'intervento di limitazione dell'uso dell'olio appartiene all'insieme degli interventi individuati per l'attuazione di questa politica

1.3 Consumo di olio combustibile

I consumi di olio a uso di riscaldamento (residenziale, commerciale e istituzionale) in Lombardia stimati dall'inventario emissioni regionale ammontano a circa 240.000 t (9.740.000 GJ), concentrati in prevalenza nei centri urbani di grandi dimensioni (per almeno il 50% in Provincia di Milano).

Su base regionale l'olio rappresenta il 3-4% dei consumi energetici per il riscaldamento civile.

Da un rapporto della Stazione Sperimentale dei Combustibili (SSC, 2003) e da un analogo rapporto Comitato Termotecnica Italiano (CTI, 2003) si intuisce che i consumi di olio combustibile sono destinati a salire (tendenza già nota nel 1997); secondo il documento del CTI risulta addirittura che alcuni impianti sono stati recentemente convertiti da gas a gasolio ad olio.

1.4 Peso delle emissioni da olio combustibile in Lombardia

In Figura 1.1 sono indicati i contributi percentuali delle emissioni dalla combustione dell'olio combustibile nel settore residenziale rispetto al totale delle emissioni dal comparto delle emissioni da combustioni non industriali, nei diversi contesti territoriali, come desunti dai dati dell'inventario emissioni della Regione Lombardia (Regione Lombardia, 2003).

Si nota come l'olio combustibile sia responsabile mediamente di circa il 20-25% delle emissioni di SO_2 nel settore del riscaldamento. Per le polveri fini, mentre a livello regionale il contributo emissivo è di circa il 10%, tale contributo sale al 33% nelle aree critiche e al 48% nel comune di Milano.

Pur se consumi maggiori di olio si hanno per la produzione di energia, di cemento e per le raffinerie, va notato che questi consumi avvengono in impianti localizzati al di fuori dei centri urbani, con emissioni che prima dello scarico in atmosfera sono abbattute mediante impianti di depurazione e poi scaricate in camini in quota alti spesso dai 100 ai 250 metri.

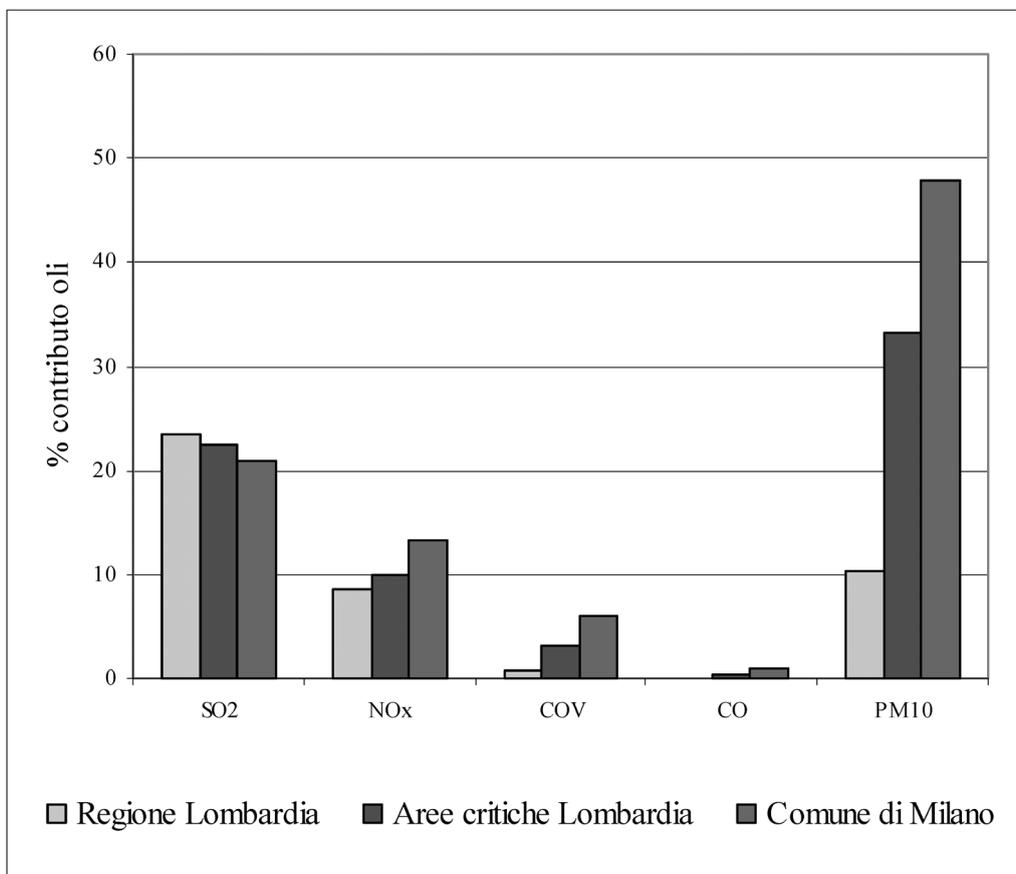
Viceversa le emissioni dell'olio combustibile bruciato nel settore residenziale non prevedono l'adozione di tecnologie di depurazione, sono ovviamente concentrate nei centri abitati e con emissioni a bassa quota che restano intrappolate nella atmosfera urbana. In questo ambito il contributo all'inquinamento urbano non appare trascurabile e la sua riduzione deve essere un obiettivo da considerare.

Va infatti ricordato che la «rilevanza di alcune emissioni» va contestualizzata in quanto non coincide necessariamente con la «rilevanza dell'esposizione umana» diretta.

In generale l'esposizione è regolata, oltre che dalla localizzazione della popolazione, dalle modalità di emissione in atmosfera (altezza del punto di emissione, velocità di innalzamento dei fumi) e dalle caratteristiche meteo-climatologiche delle zone di emissione, parametri che regolano il trasporto e la diffusione e quindi le concentrazioni in atmosfera e i depositi al suolo.

È quindi presumibile che le pur minori emissioni nei centri urbani dovute all'uso dell'olio possano avere effetti significativi sui livelli di esposizioni della popolazione alle polveri fini.

Figura 1.1 Contributo delle emissioni dall'olio combustibile alle emissioni totali delle combustioni civili e industriali in Lombardia



1.5 Metodologia del rapporto

Nel presente rapporto sono confrontati i fattori di emissione reperiti nella letteratura internazionale per i diversi inquinanti e combustibili.

Dopo un'analisi degli inquinanti oggetto dello studio (capitolo 2), dei combustibili in commercio (capitolo 3) e delle tecnologie di combustione utilizzate in ambito domestico (capitolo 4), nel capitolo 5 sono riportati i fattori di emissione disponibili per il territorio regionale, mentre nel capitolo 6 i valori desunti dalla letteratura nazionale ed internazionale.

I dati dei fattori di emissione sono un elemento fondamentale per quantificare il peso delle diverse tipologie di sorgenti, come generalmente viene effettuato negli inventari delle emissioni.

Come noto, per fattore di emissione si intende l'emissione per unità di attività della sorgente.

I fattori di emissione sono ampiamente utilizzati in letteratura per la stima delle emissioni. Questo metodo si basa dunque su una relazione lineare fra l'attività della sorgente e l'emissione, secondo una relazione che a livello generale può essere ricondotta alla seguente:

$$E_i = A \times FE_i$$

dove:

E_i = emissione dell'inquinante i (g anno⁻¹);

A = indicatore dell'attività, ad es. quantità prodotta, consumo di combustibile (t anno⁻¹);

FE_i = fattore di emissione dell'inquinante i (g t⁻¹ di prodotto).

La bontà di questa stima dipende dalla precisione dei «fattori di emissione», tanto maggiore quanto più si scende nel dettaglio dei singoli processi produttivi, utilizzando specifici fattori di emissione caratteristici della tipologia impiantistica.

Per i processi di combustione viene generalmente scelto, come indicatore di attività, il consumo di combustibile, mentre per i processi industriali gli indicatori privilegiati sono la quantità di prodotto processata o il numero di addetti.

Nel capitolo 7 infine è effettuato un quadro riassuntivo delle emissioni dei diversi inquinanti in relazione al tipo di combustibile.

Pur se le emissioni dipendono anche da altri fattori come le condizioni di combustione, l'adeguatezza, la taglia e l'efficienza dell'impianto, la tecnica di combustione e il grado di manutenzione, le caratteristiche del combustibile utilizzato in impianti non assoggettati a tutti i presidi di controllo di tipo tecnologico (sistemi di abbattimento degli effluenti gassosi) e gestionale normalmente in uso in ambito industriale, si confermano un fattore di primaria importanza per ogni valutazione successiva.

2. Inquinanti considerati e rilevanza per l'inquinamento atmosferico

Dalla combustione di ogni combustibile fossile si sviluppano quali prodotti della combustione l'anidride carbonica ed il vapor d'acqua. In relazione alla presenza di impurezze nei combustibili ed in seguito alle modalità di combustione possono essere presenti anche altri prodotti i principali dei quali sono gli ossidi di zolfo, gli ossidi di azoto, le particelle sospese, gli idrocarburi incombusti e l'ossido di carbonio, in seguito descritti.

2.1 SO₂

È un gas incolore, non infiammabile dall'odore pungente, molto solubile in acqua. Deriva dall'ossidazione dello zolfo presente nei combustibili fossili, carbone e petrolio.

Effetti sull'uomo e sull'ambiente: a basse concentrazioni è un gas irritante per la pelle, gli occhi e le mucose dell'apparato respiratorio, mentre a concentrazioni più elevate può provocare patologie respiratorie come asma e bronchiti.

In atmosfera l'SO₂ si ossida ad anidride solforica e, in presenza di umidità, si trasforma in acido solforico, responsabile del fenomeno delle piogge acide, con conseguenti danni sugli ecosistemi acquatici e sulla vegetazione.

Si genera dalla combustione dello zolfo contenuto nel combustibile che si trasforma in modo stechiometrico in anidride solforosa. Una piccola frazione (2-3%) può essere trasformata per la presenza di elementi che svolgono un'azione catalitica, quali il vanadio ed il ferro, in anidride solforica. Gli ossidi di zolfo si ritrovano pressoché completamente nei fumi al camino.

Solo per le combustioni di carbone su griglia una parte de-

gli ossidi di zolfo viene fissata dalla componente alcalina delle ceneri realizzando così un parziale abbattimento.

2.2 NO_x

In atmosfera sono presenti sia il monossido di azoto (NO) sia il biossido di azoto (NO₂), quindi si considera come parametro rappresentativo la somma pesata dei due, definita ossidi di azoto (NO_x).

Il biossido di azoto è un gas di colore rosso bruno, dall'odore pungente ed altamente tossico e corrosivo. È un inquinante secondario che si produce per ossidazione del monossido di azoto, di limitata tossicità.

I principali effetti sull'uomo e sull'ambiente dall'inhalazione del biossido di azoto sono una forte irritazione delle vie aeree. L'esposizione continua a concentrazioni elevate può causare bronchiti, edema polmonare, enfisema.

L'NO₂ contribuisce alla formazione dello smog fotochimico, in quanto precursore dell'ozono troposferico, e concorre al fenomeno delle piogge acide, reagendo con l'acqua e originando acido nitrico.

Gli NO_x scaricati dai processi di combustione sono formati per circa il 95% da NO e per il 5% da NO₂, e si formano per ossidazione parziale delle molecole di azoto dell'aria o dell'azoto contenuto nel combustibile.

Nella combustione - in ambiente ossidante - di combustibili fossili hanno luogo essenzialmente tre meccanismi di formazione di NO e NO₂ ed un quarto di formazione di N₂O.

Termal NO_x. Consiste nella combinazione dell'azoto e dell'ossigeno atmosferici, ed è basato sulla cinetica di Zel'dovich; essa ha luogo nella zona «a valle» di quella di formazione di radicali ed è piuttosto lenta paragonata alla cinetica di formazione dei radicali. È il principale meccanismo che si sviluppa nella combustione di gas, ed è favorito dalle alte temperature.

Prompt NO_x. Meccanismo particolarmente rapido ed attivo nella combustione di carbone e combustibili liquidi, ha due diverse origini:

- i picchi di O, N, e OH nella zona di formazione di radicali possono accelerare fortemente le reazioni della cinetica di Zel'dovich;
- l'azoto combustibile, genera azotati intermedi: questi, in ambiente ossidante, portano alla formazione di NO_x. In combustori tradizionali il rapporto tra *prompt* e *thermal* NO_x varia all'incirca da 1/8 a 1/10; però la tendenza ad una marcata riduzione dell'NO_x termico emesso rende attuale il problema del controllo dei *prompt* NO_x.

Fuel NO_x. Meccanismo che trae origine dalla presenza nel combustibile di composti azotati i quali, dopo una serie di reazioni di formazione di cianogeni, ossicianogeni e composti ammoniacali, vengono infine ossidati generando NO_x.

La percentuale di NO_x da combustibile è nulla per il gas naturale, circa il 20% per il gasolio, circa il 50% per l'olio combustibile e circa il 60% per il carbone ed è direttamente correlata con il contenuto di azoto organico dei combustibili che è trascurabile per il gas, dello 0,1-0,2% per il gasolio, dello 0,5-1% per l'olio combustibile, a seconda del greggio di provenienza e del processo di raffinazione, e dell'1-2% per il carbone, in dipendenza delle diverse qualità e provenienze. A parità di impiego, le emissioni di questa componente di NO_x aumentano passando dal gas naturale, al gasolio, all'olio combustibile e al carbone.

N₂O da combustione magra. Infine, per miscele aria-combustibile magre, con fiamme a temperature più basse, tipiche della combustione con premiscelamento.

Va ricordato che le tecnologie di combustione a bassa emissione di NO_x riducono principalmente gli NO_x termici e hanno scarsa influenza sulla formazione degli NO_x da combustibile. Per questo motivo i risultati migliori si ottengono quando queste tecnologie si applicano alla combustione del gas naturale, in cui il 90% degli NO_x prodotti è di origine termica.

È quindi possibile ridurre la formazione degli NO_x controllando le modalità di combustione, mediante l'abbassamento della pressione parziale dell'O₂ libero nelle zone di fiamma ad alta temperatura facendo ricorso ad una distribuzione controllata dell'aria, ricircolando i fumi, o abbassando le temperature mediante camere di combustione a bassi carichi termici specifici.

2.3 COV

Sono una classe di composti organici molto vari: idrocarburi alifatici, aromatici (benzene, toluene, xileni), ossigenati

(aldeidi, chetoni), ecc. Lo stato di aggregazione (solido, liquido e gassoso) in cui possono presentarsi e la loro reattività dipendono dalla diversa struttura molecolare.

Come gli NO_x sono i precursori dell'ozono troposferico; gli effetti sull'uomo e sull'ambiente sono molto differenziati in funzione del composto; tra gli idrocarburi aromatici volatili il benzene è il più pericoloso perché risulta essere cancerogeno per l'uomo.

2.4 CO

Si origina in caso di cattiva ed incompleta combustione dovuta a difetto di aria, per basse temperature di combustione, per cattiva miscelazione tra combustibile e comburente.

I meccanismi di formazione di CO sono più complessi di quelli per NO_x in quanto CO è una specie che si forma comunque in qualsiasi ossidazione di un HC, e perché, a causa della temperatura elevata in camera di combustione, si ha sempre equilibrio chimico tra CO e CO₂. Le reazioni che ossidano CO a CO₂ hanno bisogno di eccesso di O₂ e di T non troppo bassa, altrimenti non procedono e si ha il cosiddetto «quenching» del CO.

Da quanto esposto emerge la competizione tra formazione di NO_x e ossidazione di CO. I due vanno in direzioni opposte con la temperatura (e quindi anche con il rapporto miscela).

È possibile ridurre le emissioni agendo sulle condizioni di combustione ed è poco influenzata dalle caratteristiche del combustibile.

2.5 CO₂

Caratteristiche fisico chimiche: detto anche biossido di carbonio, in natura è presente sotto forma di gas che può essere liquefatto sotto pressione. A temperature inferiori a -78°C (temperatura di sublimazione) si trova sotto forma di solido, noto come ghiaccio secco.

Origine: è un tipico prodotto della combustione dei composti organici e la sua concentrazione nell'atmosfera è ora tenuta sotto costante controllo, per il suo possibile ruolo nel cosiddetto effetto serra. È un sottoprodotto di numerosi processi industriali, ma viene recuperata soprattutto dai processi di produzione dell'ammoniaca e dell'idrogeno. Viene utilizzata tra l'altro come fluido refrigerante, negli estintori, come agente schiumogeno e nelle bibite gassate.

Effetti sull'uomo e sull'ambiente: innocuo per l'uomo, ma responsabile, anche se non unico, del cosiddetto «effetto serra», costituisce il prodotto finale di ogni ossidazione di sostanza organica; inoltre è un costituente naturale dell'aria che, per la sua capacità di assorbire i raggi infrarossi, gioca un ruolo importante per il bilancio termico dell'atmosfera terrestre.

Dagli inizi del secolo scorso si è osservato un costante aumento del tasso di CO₂ nell'atmosfera, nonostante l'enorme effetto tamponante degli oceani, in seguito all'aumento dei gas di combustione e di scarico, per cui si è attribuita la generale tendenza all'aumento della temperatura media, riscontrata dalla fine dell'800, all'accresciuto effetto serra esercitato dalla CO₂.

L'organismo umano nella sua funzione respiratoria è largamente indipendente dalle variazioni rilevate del livello di CO₂ in atmosfera e quindi generalmente per questo motivo non viene analizzata in modo sistematico. Al contrario il suo accumulo in ambienti chiusi determina fenomeni di soffocamento progressivo e a concentrazioni superiori al 6% provoca danni acuti.

2.6 PTS, PM10, PM2,5

Il particolato atmosferico è costituito dall'insieme delle particelle solide e liquide presenti nell'atmosfera con caratteristiche aerodinamiche, chimico-fisiche e termodinamiche che ne consentono il trasporto e la diffusione nel mezzo aria.

In linea generale, le polveri sono costituite da una parte inorganica incombustibile (le ceneri vere e proprie) e da una parte di incombusti (il residuo carbonioso).

Il particolato di interesse più strettamente sanitario è quello costituito dalle polveri fini che per le loro caratteristiche (dimensione, densità, forma), sono in grado di superare le vie aeree superiori e penetrare nei polmoni.

Di norma la classificazione granulometrica delle polveri è basata sul diametro aerodinamico equivalente, d_{ae} , vale a dire il diametro di una particella sferica avente densità unitaria (1g/cm³) e caratteristiche dinamiche di sedimentazione uguali alla particella considerata.

Le frazioni di particolare interesse del particolato fine sono il PM10 e il PM2,5, definite rispettivamente il particolato con $d_{ac} < 10 \mu\text{m}$ e quello con $d_{ac} < 2.5 \mu\text{m}$.

Per quanto riguarda i meccanismi di emissione si possono individuare due tipologie di sorgenti che concorrono alla presenza di particolato in atmosfera: le sorgenti primarie e secondarie. Le prime vi contribuiscono direttamente con materiale che si ritrova nel particolato senza modifiche sostanziali di natura chimica. Le seconde sono rappresentate da processi chimico-fisici localizzati nell'atmosfera stessa che, da precursori già disponibili da attività antropiche o naturali, generano specie secondarie di particolato fine non direttamente emesse dalla sorgente.

Le frazioni sistematicamente rappresentative della composizione del particolato fine, verso cui si stanno orientando le proposte di procedura standard per la caratterizzazione chimica, sono:

- **Materiale geologico.** È il pulviscolo proveniente dall'erosione della crosta terrestre e pertanto il prodotto di una fonte primaria. La componente è caratterizzata in prevalenza da ossidi di alluminio, silicio, calcio, ferro ed altri ossidi metallici caratteristici della geologia dell'area in cui si effettua il rilevamento. Il contributo al PM10 tende ad essere superiore al 50% quando si attenuano le sorgenti di carbonio organico e carbonio elementare proveniente dalle combustioni (tipicamente in regime estivo). Il contributo del materiale geologico al PM2,5 risulta in genere modesto (5-10%), soprattutto in presenza di elevati contributi dalla combustione e dalla produzione di aerosol secondari (nitrato e solfato di ammonio e organici semivolatili) (Chow & Watson, 1998; Kim et al., 2000; Magliano et al., 1999).

Questa componente traccia di norma l'attività di emissioni diffuse primarie quali le polveri risospese da traffico, i lavori edilizi stradali, i lavori di agricoltura e l'erosione della crosta terrestre ad opera del vento.

- **Solfati.** Tendono ad essere prodotti di fonti secondarie perché costituiti in prevalenza da solfato e bisolfato d'ammonio, risultati dalla reazione dell'ammoniaca con acido solforico. Quest'ultimo è prodotto in atmosfera da reazioni che convertono SO_2 in acido solforico per azione dei radicali OH in fase gassosa e per azione di H_2O_2 , O_3 e O_2 in fase liquida, con Fe e Mn come catalizzatori. A causa della lentezza con cui viene ossidata l' SO_2 in atmosfera, i gradienti spaziali delle concentrazioni di solfato nel particolato su piccola media scala (decine di chilometri), sono piuttosto bassi, mentre diventano significativi su scala di centinaia e migliaia di chilometri (Harrison & Yin, 2000).

Significative presenze di solfato di sodio si possono trovare in zone costiere dove l'acido solforico viene neutralizzato da aerosol di cloruro di sodio. I solfati solubili si concentrano per la maggior parte nella frazione PM2,5, ad eccezione del gesso ed altri solfati di origine terrestre insolubili, classificati di norma nella frazione geologica.

- **Nitrati.** Sono importanti prodotti secondari derivanti dalla conversione in acido nitrico di NO_2 e NO , e dalla neutralizzazione di quest'ultimo prevalentemente da parte dell'ammoniaca, per dare nitrato d'ammonio in forma di particolato ultrafine, di norma tutto compreso nel PM2,5. La produzione di acido nitrico si sviluppa di giorno attraverso la sequenza di reazioni che vedono agire nella fase iniziale l'ozono e successivamente radicali NO_3 . La reversibilità dell'equilibrio gas/particella tra l'ammoniaca e l'acido nitrico gassoso e nitrato d'ammonio particolato rende conto delle perdite di particolato fine durante il campionamento, al variare delle condizioni di temperatura e umidità.

Il gradiente spaziale delle concentrazioni è più pronunciato di quello dei solfati a causa della maggiore rapidità con cui viene ossidato l' NO_2 atmosferico (Harrison & Yin, 2000).

La neutralizzazione dell'acido nitrico da parte di cloruro di sodio, spiega la presenza di nitrato di sodio nel particolato di zone costiere.

- **Ammonio.** Per effetto della presenza di ammonio solfato, bisolfato e nitrato, questo ione viene ad essere una delle presenze più importanti nel particolato largamente concentrato nel PM2,5. Un'accurata analisi delle presenze di ammonio nelle frazioni PM10 e PM2,5 è riportata in Chow et al., 1996.

- **Cloruri.** È una presenza tipica di aerosol costieri, ma possono provenire anche da materiali per il trattamento antigelo delle strade in inverno. Le emissioni di acido cloridrico, tipicamente da inceneritori ed altre attività industriali, possono contribuire, dopo neutralizzazione con ammoniaca in atmosfera, in forma di aerosol di cloruro d'ammonio.

- **Elementi metallici.** È una caratterizzazione che oltre a individuare elementi di interesse per la loro tossicità, fornisce indicazioni sulle sorgenti primarie del particolato, nel senso che particolari configurazioni di gruppi di elementi, individuate di norma da analisi «cluster», possono tracciare l'attività delle fonti di provenienza.

Si identificano in particolare elementi di origine crostale (Si, Al, K, Ca, Ti, Mn, Fe) ed elementi in tracce tossici caratteristici di sorgenti antropiche (Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Hg, Zn, As) (Marcazzan et al., 2000; Marcazzan et al. 2000a).

- **Carbonio organico (OC).** Possono derivare contributi primari da sorgenti, che sono in generale attività di combustione e contributi secondari da reazioni di precursori in atmosfera. Pandis et al. (1992) identificano tre meccanismi di formazione di particolato organico fine secondario: (1) condensazioni di prodotti finali di reazioni fotochimiche del tipo chetoni, aldeidi, acidi organici e idroperossidi; (2) adsorbimento di organici su particelle solide, tipicamente gli idrocarburi policiclici aromatici; (3) dissoluzione di gas solubili in grado di reagire nelle particelle, ad esempio le aldeidi.

Il contributo diretto delle sorgenti e l'attività di produzione secondaria, determina la presenza nel particolato di centinaia se non migliaia di composti organici semivolatili ($\text{C}_{20} - \text{C}_{40}$). In mancanza di specificità molecolare è il metodo di campionamento e analisi che ne definisce operativamente gli esatti confini.

Assieme ai nitrati rappresentano la frazione più importante del PM2,5 e spesso anche del PM10 (Chow & Watson, 1998).

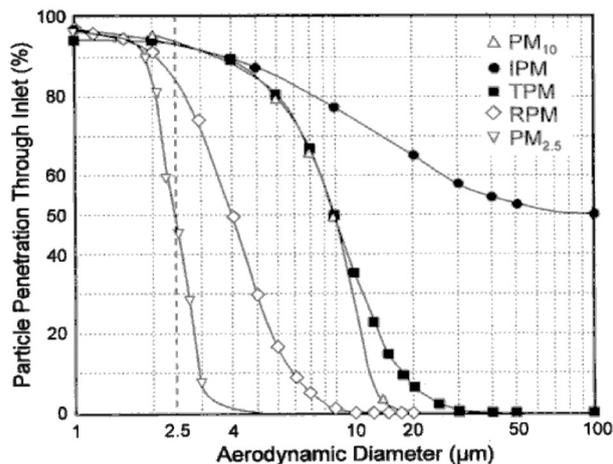
- **Carbonio elementare (EC).** Anche questa componente è definita operativamente dal metodo di determinazione. Oltre al carbonio elementare in senso stretto l'EC comprende di norma organici non volatili ad alto peso molecolare e di colore nero tipo tar, sostanze biologiche e coke. Le fonti principali sono esclusivamente emissioni primarie in genere da attività di combustione fissa e mobile.
- **Acqua.** La presenza nel particolato di sali igroscopici e di acido solforico possono determinare, soprattutto in condizioni di umidità relativa atmosferica elevata, un significativo assorbimento di vapore acqueo in grado di incidere, se persistente nelle fasi di misura, sulla determinazione della granulometria e della massa (Chow & Watson, 1998).
- **Materiali biologici.** Possono includere sia piccoli microrganismi come batteri, virus e spore, sia pollini e frammenti di cellulosa (Matthias-Maser & Jaenicke, 1994). Con esclusione dei virus, questi componenti sono compresi nella frazione più grossolana del particolato e sono caratterizzate nella generalità degli studi come carbonio organico. Con lo scopo di individuare presenze di particolare interesse per gli effetti sulla salute o per l'identificazione del ruolo delle fonti, alcuni studi procedono ad una caratterizzazione più fine dei macrocomponenti, il carbonio organico, ad esempio (Jeon et al., 2001) o evidenziando componenti particolari come l'ossolato (Poore, 2000).

Dal punto di vista sanitario, il PM10 può essere considerato come la frazione di polveri che non viene trattenuta nelle vie aeree superiori e giunge fino ai bronchi polmonari; il PM2,5, invece, rappresenta la frazione di polveri inalate che possono penetrare nei bronchioli e negli alveoli polmonari. In fig. 2.1 viene mostrata la penetrazione nell'albero bronchiale delle varie tipologie di polveri (US-EPA, 1999b).

Le polveri dalla combustione del carbone e dell'olio sono costituite in prevalenza da ceneri con una percentuale di incombusti variabile dal 7-10% al 50%. È intuitivo che su questa frazione di incombusti è possibile operarne una riduzione già in camera di combustione, migliorando l'atomizzazione del combustibile favorita con i combustibili più fluidi ed evitando fenomeni di repentino raffreddamento della fiamma

che possano provocarne lo spegnimento. Non è possibile invece ridurre l'emissione di ceneri, dovute alla loro presenza nel combustibile, mediante le sole tecniche di combustione.

Fig. 2.1 Penetrazione % delle polveri nell'albero bronchiale (US-EPA, 1999b)



Il particolato PM₁₀ mostra effetti consistenti sulla mortalità giornaliera: in particolare le persone anziane o sofferenti di patologie cardiache o respiratorie sono più esposte al rischio di aumento di mortalità giornaliera.

Inoltre occorre considerare che effetti clinici modesti, come una leggera riduzione delle prestazioni polmonari, che il singolo può anche non avvertire, hanno invece una grande rilevanza epidemiologica e un grande impatto sulla salute pubblica, anche in termini di costi.

L'aumento di PM₁₀ viene in particolare associato con un aumento della sintomatologia asmatica e con l'aumento di visite del medico generale per asma.

In diversi studi di laboratorio, inoltre il particolato mostra azione mutagena sui batteri, connessa con la presenza di chetoni, aldeidi, composti chinolinici ed idrocarburi policiclici aromatici.

L'esposizione a livelli ambientali di PM₁₀ più alti di 40 µg/m³ è stata associata a una diminuzione della qualità del seme in giovani maschi e ad un aumento del rischio di ritardo della crescita intrauterina nel primo mese di gravidanza.

Stime e proiezioni attribuiscono al particolato fine conseguenze paragonabili a quelli del fumo attivo di sigaretta e maggiori di quelle dell'esposizione passiva o ambientale al fumo.

2.7 Metalli pesanti

Con il termine metalli pesanti si intendono le specie metalliche, presenti in forma particolata a temperatura ambiente, generalmente di origine antropica, quali Cd, Cr, Ni, Cu, Pb, Hg, Zn, As. Si tratta di composti di elevata tossicità e a volte di persistenza e bioaccumulabilità nell'ambiente.

2.8 Diossine

Con il termine «diossine» si considera un'ampia classe di microinquinanti, comprendente 75 composti congeneri di polioclorodibenzodiossine (indicati come PCDDs o CDDs) e 135 composti congeneri di policlorodibenzofurani (PCDFs o CDFs). Si tratta di composti organici aromatici alogenati, indicati con il termine PCDD/Fs, con proprietà fisico-chimiche simili e variabili con il numero e la posizione degli atomi di alogeni sostituenti.

La diossina più ampiamente studiata è la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-diossina (2,3,7,8 TCDD), che rappresenta il congenero più tossico e costituisce il composto di riferimento per questa classe di inquinanti. Si ritiene che essa abbia attività teratogena e cancerogena e che possa provocare danni ai sistemi immunitario, endocrino e riproduttivo (US-EPA, 1994; WHO, 1999; NIEHS, 2001); a causa della sua liposolubilità e della relativa resistenza alla degradazione metabolica, è un contaminante ambientale persistente ed è quindi in grado di accumularsi lungo la catena alimentare, costituendo una minaccia su grande scala ed a lungo termine per la salute pubblica e la qualità dell'ambiente.

Le diossine sono presenti generalmente come miscele complesse di congeneri e per descrivere in modo aggregato la tos-

sicità equivalente della miscela sono assegnati, ai singoli congeneri, Fattori di Tossicità Equivalente (TEF o I-TEF), che rappresentano una stima della tossicità delle varie diossine rispetto alla tossicità della 2,3,7,8-TCDD, a cui è quindi assegnato un TEF pari a 1; i TEF dei diversi congeneri, variabili fra 0.5 a 0.001, sono mostrati in Tabella 1.

La tossicità equivalente (TEQ) di una miscela è definita come la somma delle tossicità equivalenti dei vari congeneri presenti: essa viene calcolata per ciascuno di essi moltiplicando la singola concentrazione (C_i) per lo specifico fattore di tossicità (TEF_i), ottenendo così la specifica TEQ_i di ciascun congenero i ; dalla somma poi delle varie TEQ_i dei congeneri si ottiene la TEQ della miscela:

$$TEQ = \sum_i TEQ_i = \sum_i TEF_i * C_i \quad (1)$$

Negli ultimi dieci anni l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), ha via via modificato il valore di dose giornaliera tollerabile (TDI - Tolerable Daily Intake) per le diossine, portandolo nel 1990 a 10 pgTEQ (kg-bw)⁻¹ (picogrammi per chilogrammo di peso corporeo) e abbassandolo nel 1998 a 1 pgTEQ (kg-bw)⁻¹ (WHO, 1998).

L'abbassamento di tale soglia è stato fortemente sollecitato dall'Agenzia statunitense per l'ambiente (EPA), che ha definito la dose giornaliera accettabile (ADI - Acceptable Daily Intake) pari a 0.006 pgTEQ (kg-bw)⁻¹, cioè circa 1670 volte inferiore a quella dell'OMS. La controversia principale riguarda il presupposto, assunto dall'OMS, dell'esistenza di una soglia di sicurezza per l'esposizione alle diossine, al di sotto della quale non possa esservi alcun effetto negativo sulla salute. Pur se gli studi più recenti sembrano indicare l'assenza di tale livello soglia (US-EPA, 1994), rimane ampio il dibattito in sede sulla effettiva rilevanza del potere cancerogeno della diossina.

Per via della loro tossicità, notevole è l'attenzione in diverse sedi internazionali per ottenere l'eliminazione graduale delle diossine, e di altre sostanze inquinanti tossiche, persistenti e bioaccumulative dall'ambiente. Nel 1990, nell'ambito della terza Conferenza Internazionale sul Mare del Nord, si convenne sulla necessità di ridurre l'emissione di diossine ed altri composti, almeno del 70%; la necessità di eliminare gradualmente le sostanze tossiche persistenti e bioaccumulabili è stata ulteriormente ribadita nel 1992 dalla Convenzione di Parigi; nel 1993 la Convenzione di Barcellona ha raccomandato la graduale cessazione, entro il 2005, delle immissioni di composti organoalogenati, da fonti terrestri nel Mar Mediterraneo. In Nordamerica, la Commissione Congiunta Internazionale dei Grandi Laghi, ha esortato gli Stati Uniti ed il Canada ad iniziare una graduale eliminazione del cloro e dei composti clorurati dai processi industriali (IJC, 1994).

Le diossine sono uno dei 12 composti chimici cosiddetti 'Pops' (persistent organic pollutants) per cui 122 paesi hanno concordato, nella sessione UNEP, svoltasi a Johannesburg nel dicembre 2000, pesanti limitazioni nella loro produzione, importazione, esportazione ed utilizzo (Strydom et al., 2001).

3. Caratteristiche dei combustibili considerati

Nelle centrali termiche per uso civile possono essere utilizzati tutti i combustibili previsti dall'art. 6 del d.p.c.m. 8 marzo 2002.

I combustibili sono sostanze capaci di liberare energia termica a seguito della loro reazione chimica, detta comunemente combustione, con l'ossigeno dell'aria detta comburente.

I combustibili sono principalmente costituiti da carbonio ed idrogeno contenuti in misura variabile, sono presenti anche altri elementi che spesso nel processo di combustione liberano sostanze inquinanti.

3.1 Caratteristiche dei Combustibili

Potere calorifico superiore (PCS): è la quantità di calore che si rende disponibile per effetto della combustione completa a pressione costante della massa unitaria del combustibile quando i prodotti della combustione siano riportati alla temperatura ambiente iniziale del combustibile e del comburente.

Potere calorifico inferiore (PCI): è dato dal PCS diminuito del calore di condensazione del vapor d'acqua formatosi durante la combustione. Poiché il vapor d'acqua non viene condensato in caldaia è quindi al PCI che si fa riferimento parlando genericamente di potere calorifico dei combustibili.

Un kg di carbonio bruciando completamente libera 34,03 MJ (8.130 kcal) e si trasforma in anidride carbonica (CO₂);

un kg di idrogeno bruciando libera 144,4 MJ (34.500 kcal) e si trasforma in acqua che si libera allo stato di vapore.

Un quadro riassuntivo dei poteri calorifici dei combustibili è riportato in tabella 3.1.

Tab. 3.1 Poteri calorifici dei combustibili considerati

COMBUSTIBILE	POTERE CALORIFICO INF. (GJ/t o MJ/kg)	POTERE CALORIFICO INF. (kcal/kg)
gas naturale (metano)	48,9	11.689
gas petrolio liquido (GPL)	46,0	10.994
benzina senza piombo	43,9	10.495
benzina con piombo	43,9	10.495
kerosene	43,1	10.301
gasolio	42,7	10.196
gasolio per autotrasporto (diesel)	42,7	10.196
olio combustibile	40,7	9.728
carbone per cokeria	31,0	7.396
coke da carbone	29,3	6.997
carbone da vapore	25,2	6.011
torba	25,0	5.972

Si definisce «viscosità dinamica» la forza occorrente per far scorrere una superficie piana unitaria rispetto ad una eguale superficie posta a distanza unitaria.

«Viscosità cinematica» è data dal rapporto tra la viscosità dinamica e la densità ed è indice della difficoltà allo scorrimento che un fluido ha in un tubo. La temperatura ha una

notevole influenza sulla viscosità. Per i liquidi la viscosità diminuisce con la temperatura, (per i gas è il contrario). Nelle tabelle merceologiche i combustibili sono classificati rispetto alla loro viscosità a 50 °C, ed è espressa in °E (gradi Engler).

Un quadro riassuntivo delle caratteristiche dei combustibili è riportato in tabella 3.2.

Tab. 3.2 Caratteristiche dei combustibili considerati

nome U.S.A.	corrispondenza	tenore S (%) ⁽¹⁾	colore	viscosità a 40 °C (mm ² /s)	viscosità a 50 °C (°E)	densità (t/m ³)
no. 1 distilled oil	kerosene	< 0,2	chiaro	2,0 - 7,4		0,83
no. 2 distilled oil	gasolio	< 0,2	ambrato	2,0 - 7,4		0,85
no. 3 residual oil	olio comb. fluidissimo	< 0,3			< 21,2	
no. 4 residual oil	olio comb. fluido	< 0,3	scuro		21,2 - 37,4	
no. 5 residual oil	olio comb. semifluido	< 0,3	scuro		37,5 - 91,0	
no. 6 residual oil	olio comb. denso	< 0,3	scuro		> 91	0,95

⁽¹⁾ valore massimo ammesso per legge in Italia per la combustione nel riscaldamento civile

3.2 Olio

Per olio combustibile pesante si intende qualsiasi liquido derivato dal petrolio con codice NC da 2710 00 71 a 2710 00 78, che per i suoi limiti di distillazione rientra nella categoria di oli pesanti destinati ad essere usati come combustibile e di cui meno del 65% in volume, comprese le perdite, distilla a 250 °C secondo il metodo ASTM D86. In questa definizione

sono compresi i bitumi, è invece escluso l'olio combustibile bunker, usato nella navigazione marittima.

L'olio combustibile è quindi l'olio residuale, non distillato, disponibile in commercio.

I residui comprendono l'olio combustibile fluidissimo, con viscosità inferiore a 3 °E, l'olio combustibile fluido, con viscosità compresa tra 3 e 5 °E, l'olio combustibile semifluido ed il

denso con viscosità superiore rispettivamente di 5 e 12 °E a 50°C. Hanno PCI dell'ordine di 39,8 - 41,9 GJ/t (9.500-10.000 kcal/kg), inferiore al gasolio per il maggior contenuto in carbonio rispetto all'idrogeno; hanno un tenore in ceneri variabile da 50 a 2000 mg/kg.

Nelle ceneri sono contenute percentuali variabili di vanadio e nickel fino a 50 mg/kg, sodio, ferro, ed altri elementi in tracce.

Il contenuto in zolfo deve essere secondo la normativa italiana inferiore allo 0,3% (3.000 mg/kg).

Non esistono a livello industriale impianti in grado di desolforare i residui di distillazione. Per ottenere oli allo 0,3% di zolfo è necessario partire da greggi del tipo a basso tenore di zolfo, che devono poi essere opportunamente miscelati anche con partite di distillati.

In USA gli oli sono classificati a seconda della loro viscosità. Gli oli distillati sono l'olio n. 1, definito kerosene, e l'olio n. 2, definito gasolio (US-EPA, 2003). Dall'olio n. 3 all'olio n. 6 si ha la classe degli oli combustibili residui. Come avviene in Italia, sono possibili miscelazioni di oli residui con partite di distillati (oli n. 3 e n. 4). Il 5 è a volte denominato olio semi-fluido, mentre l'olio n. 6 rappresenta l'olio più comune nel riscaldamento domestico USA. Sulla base dei dati di viscosità, l'olio n. 6 corrisponde alle caratteristiche merceologiche dell'olio combustibile denso commercializzato in Italia.

Negli Stati Uniti sono invece ammessi combustibili con elevato tenore di zolfo (anche oltre il 4%). Non essendo industrialmente praticata la desolfurazione degli oli residui di distillazione tramite appositi impianti, per ricavare gli oli a basso tenore di zolfo è necessario usare greggi già alla partenza poveri di zolfo, o diluire gli oli residuo con distillati poveri di zolfo.

3.3 Distillati (Gasolio)

Con il termine gasolio si intende qualsiasi combustibile liquido derivato dal petrolio con codice NC 27100 00 67 o 27100 00 68, che per i suoi limiti di distillazione rientra nella categoria dei distillati medi destinati ad essere usati come combustibile o carburante e di cui almeno l'85% in volume, comprese le perdite, distilla a 350 °C secondo il metodo ASTM D86. Sono esclusi dalla presente definizione i gasoli specificati dal codice NC 27100 00 66, destinati alla propulsione dei veicoli o automotrici ferroviarie.

Il gasolio è comunemente identificato come l'olio distillato leggero disponibile in commercio, denominato a volte Kerosene o Diesel (per gli usi per autotrazione).

I distillati comprendono il Kerosene ed il Gasolio, hanno PCI di circa 42,7 GJ/t (10.200 kcal/kg), sono pressoché esenti da ceneri con un contenuto max in vanadio e nickel di 15 mg/kg, hanno un contenuto max. in zolfo fissato per legge pari allo 0,2 in peso 0,2 cioè 2.000 mg/kg ed una viscosità molto bassa da 2 a 7,4 mmq/s. a 40 °C.

Con riferimento alla classificazione statunitense, il gasolio corrisponde come detto in precedenza all'olio residuo n. 1 e 2.

3.4 Gas Naturale

Il gas naturale è il combustibile gassoso più usato in Italia.

Il gas naturale è usato principalmente per generare potenza elettrica per industrie e per aziende di servizio pubblico, per produrre vapore e calore per processi industriali, e calore per spazi residenziali e commerciali.

Il gas naturale consiste di un'alta percentuale di metano (generalmente oltre l'85%) e percentuali variabili di etano, propano, butano, e gas inerti (tipicamente azoto, biossido di carbonio ed elio).

Il metano alla distribuzione in Italia, avendo subito all'origine processi di deacidificazione e purificazione è pressoché esente da zolfo e da idrocarburi superiori. Essendo un gas purificato è ovviamente esente da ceneri.

Il PCI del metano è di circa 48,9 GJ/t (8.500 kcal/Nmc).

3.5 GPL

Molto più limitato è l'utilizzo del GPL (Gas di Petrolio Liquefatto)

È una miscela di idrocarburi tra i quali vi sono principalmente il propano e il butano. Questi due gas passano allo stato liquido in modo abbastanza agevole e questo ne permette lo stoccaggio ed il trasporto in condizioni di facilità. L'origine del GPL è duplice: può essere estratto da giacimenti di

gas naturale o derivare da procedimenti di raffinazione del petrolio. Attualmente in Europa il GPL è per circa il 55% estratto da giacimenti di gas naturale e per il restante 45% derivato dalla raffinazione del petrolio.

Consiste in una miscela di idrocarburi che include, come maggiori componenti, il propano ed il butano e, come componenti minori, iso-butano, propilene, butilene - 1.

I GPL hanno un contenuto di zolfo max variabile da 10 mg/Nmc per il propano speciale a 25 mg/Nmc per il butano tecnico. Le piccole quantità di zolfo variano secondo l'origine del prodotto: nel prodotto di estrazione da gas naturale sono praticamente nulle, mentre in quello da raffinazione dipendono dalla qualità del greggio e dal grado di elaborazione dei processi diretti alla sua eliminazione.

Il propano ed il butano sono i principali componenti, ma in ogni paese sono usati differenti rapporti di miscelazione che riflettono i prezzi, le strutture di produzione e le condizioni climatiche dei mercati locali.

Senza dubbio differenti miscele di GPL hanno differenti caratteristiche fisiche e chimiche, che - sebbene minime - possono implicare un differente comportamento nell'uso.

Il PCI medio del GPL è di circa 46,0 GJ/t (10.994 kcal/Mmc).

3.6 Carbone

Il carbone è una combinazione complessa di materia organica e di cenere inorganica formatasi in ere geologiche da successivi strati di vegetazione caduta. I carboni sono classificati in gradi in funzione della loro progressiva alterazione nella naturale metamorfosi da lignite ad antracite. Il grado del carbone dipende dalle materia volatile, dal carbonio fissato, dall'umidità intrinseca e dall'ossigeno, sebbene nessun parametro definisca il grado.

Tipicamente il grado del carbone cresce come la percentuale di carbonio fissato cresce e la percentuale di sostanze volatili decresce.

I diversi tipi di carbone in commercio hanno un PCI variabile: le ligniti hanno PCI dell'ordine delle 14,7 GJ/t (3.500 kcal/kg), i carboni da vapore, il coke e l'antracite PCI tra 20,9 e 29,3 GJ/T (5.000 e 7.000 kcal/kg).

Una caratteristica negativa dei carboni, come di altri combustibili, è quella di contenere impurezze che possono contribuire alla formazione di sostanze inquinanti in fase di combustione, ricordiamo in proposito le ceneri, lo zolfo, l'azoto, la radioattività.

Le ceneri sono sostanze non combustibili che possono arrivare fino al 15% in peso, sono costituite da minerali silicei e calcarei e contengono elementi metallici in tracce.

Lo zolfo è il responsabile della formazione dell'anidride solforosa. Lo zolfo può essere presente come zolfo inorganico in particolare allo stato di solfuro pirritico e come zolfo organico. Il primo può essere ridotto in fase di purificazione (beneficatio) del carbone mediante processi di flottazione; per il secondo sono ancora in fase di studio processi di riduzione mediante attacchi con batteri e/o estrazione con solventi. Il contenuto totale in zolfo non può superare l'1% per legge.

L'azoto è presente in quantitativi variabili, se sotto forma di composti organici in fase di combustione può combinarsi con l'ossigeno per dare ossido d'azoto.

La radioattività è causata dalla presenza di uranio e torio elementi a vita radioattiva molto lunga (miliardi di anni). Il loro contenuto medio nel carbone è di 1-2 ppm per l'uranio, 3-6 ppm per il torio a cui corrisponde una radioattività di 0,3 - 0,6.10⁻¹² Ci/gr. Nella catena di decadimento si formano tra l'altro Radio, Radon, Polonio e Piombo. Uranio, radio e torio si ripartiscono in modo uniforme tra le ceneri leggere e pesanti. Il radon che è gassoso esce dal camino, il piombo ed il polonio si arricchiscono di un fattore 3-5 nelle frazioni più fini. Quello della radioattività è comunque un problema secondario, infatti i livelli di concentrazione degli elementi radioattivi nelle ceneri è spesso inferiore a quello di alcuni terreni (10-30 ppm di U e Th nelle ceneri contro valori di 200 ppm in alcuni terreni agricoli del Lazio e della Campania o nei centri pozzolanici).

4 La combustione in ambito civile

4.1 La combustione

È la reazione chimica tra combustibile e comburente (ossigeno dell'aria) con sviluppo di calore. Elementi della combustione sono il combustibile, l'aria comburente e l'innesco del-

la combustione. Infatti perché avvenga la combustione è necessario che una parte del combustibile venga portata ad una temperatura elevata detta «temperatura di accensione» cioè si inneschi la combustione.

La quantità d'aria necessaria alla combustione dipende invece dalla composizione chimica del combustibile ed è tanto maggiore quanto più elevato il PCI. Nella pratica l'aria impiegata è sempre maggiore della teorica, la parte eccedente viene chiamata «eccesso d'aria». Si definisce invece «coefficiente di eccesso d'aria» il rapporto tra l'aria effettiva e quella teorica.

4.2 Tecniche di combustione

4.2.1 Combustibili solidi

Si svolge in tre stadi. Liberazione delle sostanze volatili, combustione delle sostanze volatili in fase gassosa, combustione del materiale carbonioso residuo.

Praticamente la combustione avviene o disponendo il carbone a strati su griglie, o inviandolo polverizzato in camera di combustione, o ancora alimentandolo in un letto fluido.

Negli impianti termici civili la tecnologia praticamente applicata è quella della griglia.

Nella combustione su griglia l'aria primaria viene soffiata dal basso attraverso lo strato di carbone, in questa fase si forma in forte quantità ossido di carbonio che successivamente viene bruciato sopra lo strato di carbone inviando aria secondaria con questo tipo di combustione sono necessari eccessi d'aria fino al 50-60%.

Più regolare è la combustione del carbone polverizzato che avvenendo in una fase più omogenea richiede minori eccessi d'aria del 20-40%.

Più avanzata se pur limitatamente diffusa la combustione su letti fluidi. Si ricorda che l'aria teorica per bruciare un kg di carbone è di circa 9 Nmc.

4.2.2 Combustibili liquidi

Le tecniche di combustione si basano sulla nebulizzazione del liquido in particelle le più piccole possibili.

Per l'alta temperatura di fiamma le goccioline di combustibile evaporano bruciando allo stato gassoso, le parti restanti formano carbonio libero che in parte brucia ed in parte si ritrova nei fumi come fuliggine.

È intuitivo che aumentando la viscosità dal gasolio all'olio

diventi più difficile la nebulizzazione del combustibile, nei bruciatori alimentati ad olio si applicano elevate temperature di preriscaldamento del combustibile per abbassarne la viscosità all'atto dell'alimentazione in caldaia.

La presenza nell'olio di molecole altobollenti, correlabili con la percentuale di residuo carbonioso, sfavorisce la loro evaporazione per cui c'è una maggiore tendenza a formare fuliggine rispetto ai combustibili più leggeri.

Una particella smette infatti di bruciare, originando fuliggine e idrocarburi incombusti o per mancanza del contatto con l'aria, condizione favorita da una nebulizzazione grossolana del combustibile, o per contatto con una zona fredda come le pareti della camera di combustione. È perciò necessario fornire l'aria di combustione con la giusta turbolenza ed avere le goccioline il più possibile di dimensioni ridotte ed avere una geometria di fiamma adatta alla configurazione della camera di combustione.

Gli eccessi d'aria variano da un minimo del 4% per gli impianti di taglia maggiore fino ad un 20% per quelli più piccoli.

L'aria teorica di combustione varia con la composizione ma si può stimare in circa 11Nmc per kg di olio combustibile.

Negli oli sono presenti inoltre le ceneri formate da sostanze non combustibili che possono arrivare fino a 2.000 mg/Kg, sono costituite da minerali silicei e calcarei e contengono elementi metallici in tracce.

Data la loro natura, tranne una ridotta percentuale che si deposita in caldaia e nei camini, si ritrovano nei fumi in emissione sotto forma di polveri che vanno a sommarsi alla fuliggine.

Nella tabella seguente sono comparati i combustibili liquidi che in base al d.p.c.m. 8 marzo 2002 possono essere utilizzati negli impianti termici civili.

Dalle loro caratteristiche merceologiche, riportate nelle colonne (A) sono state ricavate nelle colonne (B) le corrispondenti emissioni massime potenzialmente ottenibili dalla loro combustione in impianti che, come quelli termici civili, non sono dotati di tecnologie di abbattimento dei prodotti della combustione.

I calcoli sono stati fatti assumendo che dalla combustione di 1 kg di gasolio o olio combustibile si sviluppino 13 mc di fumi.

Combustibile 3% O ₂ gas e liquidi 6% O ₂ solidi	Zolfo % m/m (A)	Emissione SO ₂ mg/Nmc (B)	Ni + V mg/kg (A)	Emissione mg/Nmc (B)	Ceneri mg/kg (A)	Emissione * di ceneri ottenibile confrontata con il limite previsto dal d.p.c.m. per le polveri di 50 mg/mc (B)
Gasolio (all.1 tab.1)	0,2	314	15	1,15	no	trascurabile
Olio fluidissimo btz (tab1 colonna 1)	0,3	471	50	3,84	500	38
Olio fluido btz (tab1 colonna 3)	0,3	471	50	3,84	1000	77
Olio semifluido btz (tab1 colonna 5)	0,3	471	50	3,84	1500	115
Olio denso btz (tab1 colonna 9)	0,3	471	50	3,84	2000	154

(*) Nelle polveri emesse al camino oltre alle ceneri si trova anche la fuliggine che si forma in quantitativi maggiori nella combustione degli oli rispetto ai gasoli. D'altro canto una certa percentuale di polveri si deposita in caldaia e nei condotti fumi, determinando però una riduzione dei rendimenti termici e la necessità di smaltire rifiuti.

La tabella mostra come l'olio combustibile in base alle caratteristiche merceologiche ammesse dalla normativa determini potenzialmente un impatto specifico sulle emissioni di SO₂, ceneri e metalli pesanti quali Ni e V più inquinante rispetto al gasolio.

Considerando che il gas metano è privo di zolfo, ceneri e metalli pesanti come Ni e V il divario come beneficio ambientale per un suo impiego rispetto all'olio combustibile diventa ancora più netto.

4.2.3 Combustibili gassosi

I metodi di combustione variano secondo le modalità di miscelazione del gas con l'aria comburente.

Si ha la «Combustione per diffusione» quando l'aria lambisce il getto del gas, si ha la «Combustione per premiscelazione» quando l'aria comburente è miscelata al gas prima dell'accensione. L'aria teorica di combustione di 1 Nmc di metano può essere determinata con precisione e corrisponde a 9.57 Nmc.

4.3 Apparecchi di combustione: bruciatori

4.3.1 Bruciatori

Servono a bruciare i combustibili solidi polverizzati, i liquidi ed i gassosi. Sono caratterizzati da un campo di potenzialità, devono garantire la stabilità della fiamma, controllarne la geometria e dare sicurezza di esercizio. La combustione degli idrocarburi avviene allo stato di vapore e perciò necessario che il bruciatore ne favorisca l'evaporazione.

Per i bruciatori di combustibili liquidi lo stesso deve venire polverizzato in minutissime goccioline, previo riscaldamento se necessario per abbassarne la viscosità sotto i 3 °E, mediante energia meccanica o con l'energia di un fluido ausiliario di polverizzazione che può essere vapore (max 1-2% della potenza del generatore) o anche acqua in emulsione.

Per i bruciatori a gas occorre avere una buona miscelazione tra il gas e l'aria per evitare la formazione di incombusti e di sacche di gas potenzialmente pericolose per possibili esplosioni.

Le caldaie a tubi di fumo sono progettate in modo che i gas

caldi di combustione fluiscono attraverso i tubi, che riscalda-no l'acqua circolante fuori dai tubi stessi. Queste caldaie sono utilizzate principalmente per sistemi di riscaldamento, per la produzione di vapore per processi industriali (o come caldaie per la produzione di potenza termica trasportabile).

4.3.2 Generatori di calore

Sono caratterizzati dalle seguenti grandezze:

Potenza: quantità di calore prodotta in un ora, si esprime in W o kcal/h.

Carico termico specifico: è dato dal rapporto tra la quantità di calore sviluppata nell'unità di tempo ed il volume della camera di combustione; si esprime in W/mc o in kcal/h.mc. Il carico termico influenza le emissioni di NO_x. Negli impianti per garantire valori bassi di emissioni di NO_x è fondamentale un corretto accoppiamento bruciatore-caldaia. All'esposizione in Fiera (Marzo 2004) dedicata agli impianti termici civili i produttori garantivano con i loro migliori impianti in catalogo i seguenti valori di NO_x: per impianti a gas naturale 70 mg/kWh, per impianti a gasolio 120 mg/KWh, per impianti ad olio combustibile 500 - 650 mg/KWh (Riello, 2004).

Rendimento: è dato dal rapporto tra il calore trasmesso al fluido e quello sviluppato dalla combustione.

I rendimenti si collocano attorno al 90% ed oltre riferito al PCI del combustibile impiegato.

Nelle caldaie ad olio la cenere e la fuliggine liberate in fase di combustione, se non scaricate direttamente ai camini, tendono a depositare nelle pareti uno strato di materiale che sfavorisce lo scambio di calore e riduce il rendimento del generatore.

L'olio combustibile che genera una maggiore quantità di ceneri e fuliggine rispetto a gasolio e metano, tende ad abbassare in rendimenti di caldaia se questa non è sottoposta ad una frequente pulizia.

Recentemente sono state introdotte in commercio caldaie a condensazione alimentate esclusivamente a gas naturale con rendimenti fino al 107% riferito al PCI.

5. Emissioni dalla combustione civile: dati disponibili in Lombardia

Nel presente capitolo sono riportati i fattori di emissione relativi agli impianti termici civili desunti dalle misure effettuate alle emissioni di un campione rappresentativo di impianti presenti in Regione Lombardia.

Come noto la legge 10/91 ha affidato ai Comuni con più di 40.000 abitanti, e per la restante parte del territorio alle Province, il controllo della combustione degli impianti termici adibiti al riscaldamento e/o alla produzione di acqua sanitaria per uso civile. A far tempo dall'entrata in vigore di detta norma le ASL prima e l'ARPA successivamente non sono più competenti al controllo delle emissioni in atmosfera.

Tuttavia, al fine di raccogliere informazioni utili per la determinazione dei fattori di emissione dei diversi inquinanti e per la valutazione delle emissioni rispetto ai valori guida riportati nella d.g.r. 5/64263 del 1995, le ASL prima e poi ARPA Lombardia hanno effettuato, a partire dai primi anni '90, in-

dagini conoscitive sulle emissioni dagli impianti di combustione civile. Dette ricerche sono state condotte in collaborazione con l'U.O. Impiantistica dell'ASL competente.

Queste indagini, anche se determinanti per la conoscenza dell'impatto ambientale derivante da questa tipologia d'impianti, trovano sempre maggiore difficoltà ad essere effettuate, sia per l'assenza di un ruolo definito di controllo di ARPA che per l'assenza di limiti alle emissioni (se non come valori guida) e, in pratica, si possono realizzare solo in presenza della disponibilità dei gestori degli impianti termici.

Diverse indagini sono state comunque condotte nel corso degli scorsi anni su impianti termici ad uso riscaldamento, prevalentemente nella città di Milano e nel suo hinterland. Nella stagione termica invernale 2002-2003 sono state effettuate verifiche anche ad impianti di altre province quali quelle di Cremona, Sondrio, Pavia.

Sono risultati complessivamente disponibili dati di emissione in atmosfera relativi a circa 300 impianti, composti da circa 500 generatori, di cui sono state misurate le concentrazioni in emissione di CO, NO_x, SO₂ e polveri.

Si tratta, quindi, di un campione significativo di impianti che può essere ritenuto anche un campione statisticamente rappresentativo della tipologia impiantistica presente nella Regione Lombardia.

I fattori di emissione sono stati calcolati rapportando il flusso di massa orario al peso unitario dell'indicatore (consumo di combustibile), sempre riferito ad un'ora.

Per quanto riguarda le tecnologie di abbattimento degli inquinanti, solo uno dei grandi impianti centralizzati di quartiere, siti nel comune di Milano, ha adottato sistemi di abbattimento delle emissioni, in particolare, nel caso, specifico delle polveri e dell'SO₂.

Qualche altro impianto ha migliorato il rendimento di combustione adottando la regolazione automatica della combustione tramite sistemi automatici di misura della temperatura, dell'ossigeno e/o del CO. Non è ancora molto diffuso il controllo in continuo di questi parametri, anche se più di recente si osserva una maggiore presenza di analizzatori per la gestione remota degli eventi.

5.1 Indagine 2003 (ARPA Lombardia, 2003)

L'indagine condotta nella stagione termica invernale 2002-2003 è stata effettuata da ARPA Lombardia su richiesta della Regione Lombardia con la finalità di aggiornare le informazioni sul contributo all'inquinamento atmosferico dato da questa tipologia d'impianti. L'indagine è stata condotta in cinque diverse aree regionali ed in particolare sul territorio dei dipartimenti di Cremona, Monza, Parabiago, Pavia e Sondrio.

Sono stati indagati impianti alimentati a gas naturale, a gasolio e a olio combustibile.

In Tabella 5.1 sono riportate le tipologie impiantistiche considerate.

In Tabella 5.2 si riportano, invece, i fattori di emissione medi determinati in questa campagna analitica.

Tab. 5.1 Distribuzione e tipologia degli impianti verificati in Regione Lombardia nella stagione termica 2002_2003 (ARPA Lombardia 2003)

Dipartimento	Impianti (n°)	Generatori (n°)	Potenza dei generatori (kW/h)	Gas naturale	Gasolio	Olio combustibile denso	Olio combustibile semifluido
Cremona	3	3	200-450		3		
Monza	7	13	450-1.000			6	1
Parabiago	5	7	300-700		4	1	
Pavia	10	18	500-5.000; 14.000	6	4		
Sondrio	6	6	300-2500			6	

5.2 Indagine 2001 (Comune di Milano, 2001)

In Tabella 5.3 si presentano alcuni dati di emissione misurati alle emissioni degli impianti termici ispezionati, ai sensi della L10/91, dai verificatori del comune di Milano. In Tabella 5.4 si riportano i corrispondenti fattori di emissione.

Dato che le verifiche degli ispettori comunali hanno come fine il solo controllo dell'efficienza della combustione e non anche dell'impatto emissivo in atmosfera, i dati riportati si riferiscono al solo CO e, solo per alcuni generatori alimentati a gasolio, si dispone anche delle misure di NO_x.

5.3 Indagine 1999 (PMIP Milano, 1999; PMIP Monza, 1999; PMIP Parabiago 1999)

Questa indagine è stata effettuata dal PMIP dell'ASL Città di Milano, dalla ASL 3 di Monza e dalla ASL 1 di Parabiago nella stagione termica 1998/1999 ed ha riguardato impianti termici civili di potenzialità compresa tra i 5,8 e i 71 MW. Le misure hanno interessato impianti localizzati in Milano e provincia, prevalentemente adibiti al riscaldamento e alla produzione di acqua calda di edifici pubblici quali ospedali e scuole.

Il lavoro del PMIP di Parabiago ha utilizzato i dati inerenti 14 impianti, di cui 6 funzionanti a metano ed 8 a gasolio, scelti all'interno di un campione di 100 impianti. I dati forniti sono relativi a SO₂, NO_x e CO.

I fattori di emissione, riportati in Tabella 5.5, sono stati calcolati utilizzando il consumo orario misurato di combustibile e i dati di concentrazione dei singoli inquinanti alle emissioni.

I valori separati dal trattino rappresentano rispettivamente i valori minimi e massimi, mentre quelli riportati tra parentesi () sono i «valori medi pesati» sulla base della maggiore frequenza nel campione.

5.4 Indagine 1994 (PMIP Milano, 1994)

Questa indagine condotta nella stagione termica 1993/1994, nata dalla collaborazione tra l'U.O. Impiantistica e l'U.O. Chimica della ASL Città di Milano, ha interessato 199 generatori di calore, individuati come campione rappresentativo della realtà del comune di Milano in base alla distribuzione sul territorio e alla potenzialità dei generatori compresa tra 34,9 kW e 2330 kW.

Il valore del fattore di emissione per l'SO₂ (249 g/GJ), è riferito ad un olio ricostruito (es. Ecoden).

I valori medi dei fattori di emissione, determinati anche in questo caso utilizzando dati misurati di consumo di combustibile e degli inquinanti emessi, sono riportati in forma riassuntiva in Tabella 5.6; fra parentesi è indicato l'intervallo dei valori registrati.

5.5 Dati IRER (IRER, 2002)

Su incarico della Regione Lombardia (deliberazione n. 7/7302, Seduta dell'11 dicembre 2001) IRER ha effettuato una ricerca finalizzata all'individuazione dei fattori di emissione e dei sistemi di abbattimento del PM10 dagli impianti termici e dai veicoli.

Sono state condotte (presso la Stazione Sperimentale dei Combustibili di San Donato Milanese) prove di combustione in diversi impianti termici utilizzando gasolio per riscaldamento commerciale. Inizialmente è stato utilizzato un bruciatore usato di vecchia tecnologia, rappresentativo di una larga parte dei sistemi attualmente in uso nel riscaldamento civile. Successivamente sono stati valutati i benefici offerti da possibili interventi migliorativi. Il primo consiste nell'impiego di un bruciatore di nuova tecnologia, il secondo nell'installazione di un sistema catalitico per il trattamento delle emissioni del bruciatore di vecchia tecnologia.

Per ciascun impianto sono stati determinati i fattori di emissione degli inquinanti SO₂, NO, NO₂, NO_x, COV, CO, CO₂, PTS e PM10.

Il gasolio utilizzato in queste prove ha tenore di zolfo pari allo 0,158% in massa, 0% in volume di acqua e sedimenti, ceneri < 0,001% in massa, densità pari a 844,5 kg/mc, carbonio pari all'86,4% in massa, PCI eguale a 42,83 MJ/kg.

Le prove sono state effettuate in condizioni stazionarie, con la concentrazione di ossigeno nei fumi imposta variando la portata dell'aria nel bruciatore.

Nella ricerca sono stati determinati anche i fattori di emissione dall'utilizzo di combustibili alternativi quali gasolio emulsionato e biodiesel.

Una sintesi dei fattori di emissione determinati è mostrata in Tab. 5.7.

Si nota come i fattori di emissione di PM10 relativi ad impianti di nuova tecnologia sono più bassi di quelli relativi a bruciatori di vecchia tecnologia, anche se in carenza di ossigeno (fumi con 0,6% di O₂) le emissioni di polveri fini dai nuovi bruciatori (e anche di altri inquinanti fra i quali il CO) tornano su valori più elevati.

L'uso di gasolio emulsionato con acqua permette di migliorare la combustione ottenendo una nebulizzazione più fine ed uniforme del liquido, abbassa la temperatura della fiamma riducendo l'emissione di NO_x e ritarda leggermente la combustione consentendo una riduzione del particolato.

Essendo i due fluidi immiscibili, per ottenere emulsioni stabili occorre un particolare processo di mescolamento e l'aggiunta di un additivo stabilizzante. L'utilizzo del gasolio emulsionato ha comportato una diminuzione delle emissioni di SO₂ in quanto il gasolio di partenza era a più basso tenore di zolfo (solo lo 0,03% in peso), mentre il contenuto di acqua nel gasolio emulsionato è dell'11,3%. Densità e viscosità sono invece maggiori rispetto a quelle del gasolio comune.

Il biodiesel (una miscela di esteri metilici ottenuti da oli vegetali quali colza, girasole, soia attraverso una reazione di transesterificazione con metanolo) ha il vantaggio di non influire direttamente sul bilancio globale della CO₂ nell'atmosfera; pur presentando emissioni quasi nulle di SO₂, e riduzioni nelle emissioni in condizioni stazionarie di idrocarburi incombusti, di CO e di polveri fini, produce significative quantità di CO, COV e particolato nei transitori, in modo tale da annullare i vantaggi del periodo stazionario. Lo stesso comportamento si registra per il gasolio emulsionato.

5.6 Confronto fra i dati

I fattori di emissione determinati sperimentalmente mettono in evidenza una significativa differenza tra le emissioni generate dalla combustione dei diversi combustibili.

In particolare l'olio combustibile presenta i fattori di emissione maggiori (e quindi un maggior contributo all'inquinamento atmosferico) rispetto al gasolio e al gas naturale, come peraltro atteso e giustificato dalla composizione chimica dei combustibili. Il fattore di emissione del SO₂ è direttamente proporzionale alla concentrazione di zolfo nel combustibile utilizzato, mentre quello degli NO_x è correlato oltre che alla presenza di azoto nel combustibile, anche alla tecnologia di combustione, alla temperatura e distribuzione dell'aria nella fiamma, fattori questi che influenzano anche i livelli di emissione del CO.

Le differenze sono significative anche perché non vengono utilizzate tecnologie di abbattimento degli inquinanti. L'utilizzo di queste tecnologie, peraltro condizionato dalla reale possibilità di ammortamento dei costi aggiuntivi derivanti dalla loro installazione e gestione, ha portato, ad esempio, ad un valore minimo del fattore di emissione di SO₂ dall'olio combustibile pari a 1 g/GJ (indagine 1998/1999). In quell'unico caso si è constatata la presenza di un sistema avanzato di controllo e quindi di gestione della combustione e di un presidio depurativo di abbattimento delle emissioni a secco di detto inquinante.

Data l'onerosità e la complessità di queste tecnologie, che non sono peraltro applicabili a livello di impianto condominiale, la scelta di un combustibile a minor impatto ambientale diventa la strada privilegiata per contrastare l'inquinamento atmosferico.

6. Emissioni dalla combustione civile: dati di letteratura

Nel presente capitolo è effettuata una revisione dei fattori di emissione dal riscaldamento domestico disponibili nella letteratura scientifica nazionale ed internazionale

Tutti i fattori di emissioni sono espressi in g/GJ (grammi di inquinante per Giga-Joule di combustibile). I poteri calorifici dei diversi combustibili sono stati illustrati al capitolo 3. I fattori di emissione mostrati derivano da diverse fonti nazionali ed internazionali, principalmente:

- dati contenuti nella raccolta dei fattori di emissione da parte del CTN (Centro Tematico Nazionale) Aria-Clima-Emissioni.
- altri dati italiani disponibili in letteratura
- Guidebook dell'Agenzia Europea per l'Ambiente nelle diverse versioni disponibili
- lavori dei gruppi di lavoro della task force sugli inventari delle emissioni UN-ECE (EMEP-Corinair)

- dati dell'agenzia statunitense per l'ambiente (E.P.A.)
- fattori di emissioni IPCC (International Panel on Climate Change).

Pur se le metodologie e il grado di approfondimento dei diversi lavori non sono sempre direttamente confrontabili, un quadro riassuntivo dei dati reperiti è riportato nel successivo capitolo 7.

6.1 Dati italiani

6.1.1 Dati CTN-ACE

Il CTN-ACE con la collaborazione di ANPA ha realizzato il «Manuale dei fattori di emissione nazionale», che comprende i fattori inseriti utilizzati in ambito italiano da APAT, dalle regioni e dalle ARPA regionali per la redazione degli inventari delle emissioni. Dopo una prima versione cartacea disponibile al pubblico nel 2002 (CTN-ACE, 2002), il database è stato reso disponibile al pubblico a partire da marzo 2004 (CTN-ACE, 2004).

È stata utilizzata la classificazione SNAP 1997, sviluppata dall'EEA e adottata in ambito europeo, che individua 409 singole attività emmissive, e le organizza in 76 settori e 11 macrosettori.

I dati che vengono riportati sono quelli utilizzati nella predisposizione dell'inventario nazionale e rappresentano tutte le attività ritenute rilevanti a tale scopo. Alcuni sono fattori medi (ad esempio per il settore trasporti su strada) altri derivano da realtà specifiche e puntuali. La fonte principale di riferimento dei fattori di emissione è la guida europea «Atmospheric Emission Inventory Guidebook» (EMEP/CORINAIR, 1999), altri sono stati ricavati in ambito internazionale (IPCC, US-EPA).

Per alcune attività i fattori di emissione derivando da studi condotti da associazioni di categoria (es. Assopiastrelle, ANDIL, Assovetro, ecc.) e da comunicazioni personali di aziende.

Per alcuni settori ENEA ed ANPA hanno effettuato nuove elaborazioni sulla base di dati presenti nel primo database utilizzato per la redazione delle emissioni dell'inventario Corinair 1990. Dopo la prima bozza di Manuale dei fattori di emissione distribuita nel 2002 è stata distribuita nel 2004 una nuova versione con fattori di emissione derivanti da sperimentazioni nazionali.

I dati di fonte CTN sono illustrati in Tab. 6.1.1 in forma sintetica e in allegato 6.1.1 nella versione originale.

6.1.2 Indagine DIAR Politecnico di Milano

Una prima serie di dati di fattori di emissione per utenze civili da riscaldamento sono disponibili in un'indagine effettuate dal DIAR del Politecnico di Milano negli anni 1992-1993 (Cernuschi-Giugliano 1993) nell'ambito di una ricerca CNR-ENEL.

L'indagine ha riguardato 13 impianti termici di diversa potenza nominale, per cui sono stati direttamente misurati i fattori di emissione in diverse condizioni di carico. Sono state effettuate misure per cinque caldaie alimentate a gas naturale con differenti potenze, in genere dal 100% ad un minimo del 40-50%. Sono state inoltre considerati 8 impianti alimentati a gasolio. I fattori di emissione, espressi in g/GJ, disponibili per macroinquinanti NO_x, CO, COV e PTS, sono illustrati in Tab. 6.1.2 e in allegato 6.1.2.

6.1.3 Indagine DIAR Politecnico di Milano - SNAM

In una successiva indagine realizzata in collaborazione con SNAM negli anni 1995-1996 (Cernuschi-Giugliano, 1997; Occhio e Riva, 1998) sono state considerate diverse serie di caldaie monofamiliari alimentate a gas naturale, differenziate a seconda della tecnologia e del tipo di misura effettuata. Sono state misure di fattori di emissione per caldaie sul campo e in laboratorio.

Relativamente alla tecnologia, si distingue tra caldaie convenzionali e caldaie a bassa emissione, ulteriormente suddivise a seconda del tipo di combustione, di premiscelazione e di riscaldamento.

Un'altra serie di fattori di emissione è data per 5 diversi impianti di diversa potenza nominale per diverse potenze effettive, in modo simile a quanto già visto nel precedente lavoro del 1993.

I fattori di emissione, espressi in g/GJ, disponibili per NO_x, CO, COV (non sono disponibili dati per il particolato) sono illustrati in Tab. 6.1.3 e in allegato 6.1.3.

Nel lavoro pubblicato da SNAM (Occhio e Riva, 1998) è stata effettuata una review dei dati disponibili in letteratura, riportati in Tab. 6.1.4. e in allegato 6.1.3

6.2 Dati europei - EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook.

6.2.1 Atmospheric Emission Inventory Guidebook, ver 1-3.

In ambito europeo la fonte principale di dati relativi alle emissioni è l'Emission Inventory Guidebook, sviluppato nell'ambito del progetto Corinair, e reso disponibile al pubblico in tre successive versioni (EEA, 1997, EEA, 2000, EEA, 2002). L'ultimo aggiornamento della terza del Guidebook è disponibile al pubblico a partire dall'ottobre 2003 (EEA, 2003).

Si tratta di una raccolta con alta completezza e affidabilità dei dati, frutto del lavoro di numerosi gruppi di lavoro a livello europeo. I dati sono stati disponibili e consultabile gratuitamente presso il sito Internet dell'Agenzia Ambientale Europea (EEA, 2003).

Nelle prime versioni del Guidebook non erano disponibili specifici fattori di emissioni per le emissioni diffuse dal riscaldamento civile. Informazioni relative ai fattori di emissioni nel macrosettore 2 potevano comunque essere dedotte sulla base dei dati riportati per «impianti puntuali» nel macrosettore 1 (combustioni per la produzione di energia), in cui venivano proposti valori anche per le attività del macrosettore 2 (combustione non industriale), come si evince dalla tabella a pagina B111-1 del Guidebook (EEA, 2003), riportata in Allegato 6.2.1.

I fattori di emissioni mostrati nelle tabelle 6.2.1 per gli inquinanti di interesse sono stati desunti dai dati riportati per la categoria «caldaie con potenza < 50 MW» nelle Tabelle 24 del Guidebook (EEA, 2003), riportate in Allegato 6.2.1 nella versione originale.

Una sintesi dei dati è quindi mostrata nelle tabelle 6.2.2 e 6.2.3.

Seppur nelle prime versioni del Guidebook non esisteva uno specifico capitolo per le emissioni da combustioni in ambito civile, la similarità delle caldaie (indipendentemente dalla tipologia civile o industriale) ha portato all'utilizzo dei dati relativi alle caldaie di piccola potenza anche l'ambito civile.

Va infine notato che nella versione del Guidebook 2003 e nelle precedenti la mancanza di uno specifico capitolo per i fattori di emissioni dalle combustioni civili non era dovuto al fatto che questo settore ha «un contributo di emissioni inquinanti inferiore all'1% del totale per ogni inquinante», come da alcune parti è stato erroneamente affermato, in quanto detta frase è riportata solo per alcune specifiche attività appartenenti al macrosettore 2 (combustioni non industriali), ovvero le attività 2.1.6 (attività commerciali e istituzionali), 2.2.5 (stufe, camini, impianti per la cottura dei cibi) e 2.3.5 (impianti in agricoltura); per questi impianti è infatti plausibile un contributo inferiore all'1% del totale nazionale, mentre le emissioni del settore civile sono responsabili di una quota che, seppur variabile a seconda dello specifico contesto nazionale, è largamente superiore all'1 %.

6.2.2 Atmospheric Emission Inventory Guidebook - aggiornamento macrosettore 2

Specifici dati relativi al macrosettore 2 (combustioni non industriali), sono stati resi disponibili dal gruppo di lavoro UN-ECE incaricato dell'aggiornamento del Guidebook. Questi dati, disponibili all'interno del gruppo di lavoro a partire dal 2003, sono stati resi pubblici dapprima in una versione draft 2.0 nel settembre - dicembre 2003 (EEA, 2003) e successivamente per una public review nell'aprile 2004 (EEA, 2004). Pur se non si tratta di dati non ancora definitivi, si tratta di una ampia rassegna di dati, prevalentemente europei, relativi ai principali inquinanti.

Essendo la documentazione originale estremamente voluminosa, i dati sono stati riassunti in forma estesa nell'Allegato 6.2.2, e in forma riassuntiva per inquinante nelle tabelle 6.2.4 - 6.2.12.

6.2.3 Dati europei - TFEIP

Nell'ambito dei lavori del expert panel «Combustion and industry» della Task Force Emission Inventory and Projection si è tenuto nell'aprile 2002 il workshop «Emissions from small and medium combustion plants» (UN-ECE TFEIP, 2002), nel quale sono stati considerati i fattori di emissione dalle piccole combustioni.

I dati sono mostrati in Tab. 6.2.13.

6.2.4 Dati CEPMEIP

Altri dati sono disponibili a livello europeo nell'ambito dei lavori di gruppi di lavoro e enti di ricerca sulle emissioni in atmosfera.

I fattori di emissione CEPMEIP (TNO, 2002) sono basati su dati raccolti nell'ambito del Programma Europeo Coordinato sugli Inventari delle Emissioni di Materiale Particolato (CEPMEIP), consultabile al sito web <http://www.air.sk/tno/cepmeip/act-rates.php> e aggiornato al 2002. Nell'ambito del progetto, numerosi esperti europei hanno raccolto e condiviso le informazioni disponibili in Europa. Queste informazioni sono state combinate con un precedente inventario europeo delle emissioni di particolato (Berdowsky et al., 2001) allo scopo di ottenere un insieme di fattori di emissione nell'ambito dei 10 maggiori settori emissivi definiti dal Guidebook del CORINAIR.

I dati sono mostrati in Allegato 6.2.3 e in forma sintetica in Tab. 6.2.14.

6.2.5 Dati RAINS

Nell'ambito del progetto RAINS (Lükewille et al, 2001) dell'Istituto austriaco I.I.A.S.A. (International Institute for Applied Systems Analysis), sono stati raccolti dati aggiornati al 2001 di emissioni relative di particolato.

Lo scopo del progetto RAINS è stato quello di raccogliere informazioni specifiche di ciascun paese per quantificare le deviazioni giustificabili dai valori riportati in letteratura. Quando questo non è stato possibile o quando una categoria di sorgenti fornisce solo un contributo minore alle emissioni totali, sono stati usati i fattori di emissione di letteratura. All'interno del modulo del particolato, i fattori di emissione senza abbattimento di PTS sono la base per la derivazione di fattori di emissione del range totale di concentrazione di massa del particolato. I fattori di emissione del particolato fine per due classi dimensionali, PM10 e PM2,5, sono stati calcolati dalle stime di PTS utilizzando tipici profili dimensionali specifici della sorgente, disponibili in letteratura.

I dati sono mostrati per gli inquinanti di interesse in allegato 6.2.4 nella versione originale e in Tab. 6.2.15a in forma sintetica.

Un'ulteriore serie di dati utilizzati nel progetto RAINS si trova in (Klimont et al., 2002). Sono forniti fattori di emissione di PTS, PM10 e PM2,5 per combustione residenziale di olio combustibile pesante, olio combustibile leggero e gas naturale. I fattori di emissione dell'olio leggero sono notevolmente inferiori a quelli dell'olio pesante, mentre per il gas naturale viene fornito un range.

Questi dati sono riportati in tabella 6.2.15b.

6.2.6 Dati UK database

Un'ultima fonte di dati è il database inglese del NAEI (National Atmospheric Emissions Inventory), realizzato dal National Environmental Technology Centre (NAEI, 2003), che raccoglie i dati relativi alle emissioni in atmosfera nel Regno Unito. I fattori di emissione reperibili sono relativi all'anno 2000, ultimo aggiornamento dell'inventario nazionale.

Mentre nelle precedenti versioni dell'inventario erano considerate le emissioni di fumo nero (una frazione di particolato) e di SO₂, nella nuova versione sono considerati numerosi inquinanti o gruppi di inquinanti, quali SO₂, NO_x, NMVOC, CH₄, CO, CO₂, N₂O, NH₃, PM10, fumo nero, piombo, altri metalli pesanti, alogeni e HFC.

I dati sono mostrati in Tab. 6.2.16 in forma sintetica per gli inquinanti di interesse e in Allegato 6.2.5 nella versione originale.

6.2.7 Dati Buwal

Nel rapporto dell'ufficio Federale Svizzero per l'Ambiente e i Boschi e il Paesaggio (BUWAL, 1995) sono forniti dati di fattori di emissione per impianti di riscaldamento monofamiliari (camini e stufe) e per impianti di riscaldamento ad uso civile.

Gli inquinanti considerati sono SO₂, NO_x, COV, CH₄, CO, CO₂, PTS e PM10.

I combustibili utilizzati sono legna, carbone, olio combustibile e gas naturale. Per il gas naturale e per l'olio combustibile si forniscono due dati: uno medio ed uno per tecnologia a bassa emissione di NO_x. La fonte di questi dati è il manuale dei fattori di emissione per sorgenti stazionarie (Handbuch «Emissionfaktoren fuer stationaere Quellen») del 1995.

I dati sono mostrati in Tab. 6.2.17.

6.3 Dati statunitensi (A.P. 42 - US-EPA)

Fra le fonti bibliografiche più complete per i fattori di emissione vi sono i rapporti a cura dell'Environmental Protection Agency degli Stati Uniti, organizzati nei documenti AP-42 (Compilation of Air Pollutant Emission Factors) presso il sito Internet del ClearingHouse for Inventories and Emission Factors (CHIEF) dell'EPA (US-EPA, 2003).

I dati sono disponibili anche su formato CD-ROM; nella presente indagine si è fatto riferimento ai fattori di emissione disponibili nella versione AIR-CHIEF n. 10, distribuita da US-EPA a partire dal gennaio 2003.

All'interno del pacchetto AIR-CHIEF è presente la versione 6.23 (October 2000) del «Factor Information Retrieval» (FIRE) Data System. Questo sistema contiene i fattori di emissione consigliati (in relazione alla tipologia industriale, ai processi emissivi e ai sistemi di abbattimento utilizzati), per la stima delle emissioni da circa 200 tipologie di sorgenti stazionarie, periodicamente aggiornati dall'«Emission Factor and Inventory Group».

I dati EPA sono riportati in allegato 6.3. Una sintesi dei valori per i diversi inquinanti e combustibili è riportata in Tab. 6.3.1.

6.4 Dati IPCC (International Panel on Climate Change)

Una fonte di dati molto recente è il database Emission Factor Database (EFDB) predisposto dall'International Panel on Climate Change (IPCC) in collaborazione con UNEP e WMO (IPCC, 2003).

I dati sono disponibili tramite CD-Rom o dal sito web IPCC con un database installabile su PC, provvisto di interfaccia Access e di possibilità di accesso a tabelle e query. I dati disponibili possono essere esportati su file excel ed ulteriormente elaborati.

Mentre la classificazione SNAP97 utilizzata da CORINAIR è costituito da tre livelli (group - macrosettore, subgroup - settore, activity - attività), la classificazione IPCC è costituita da 5 livelli dal livello 0 al livello 4. I livelli pari sono contrassegnati da numeri, quelli dispari da lettere.

Il database fornisce fattori di emissione per diversi gas serra (GHG): CO₂, CH₄, N₂O, 13 tipi diversi di HFC (clorofluorocarburi), 7 diversi tipi di PCF (perfluorocarburi), SF₆ (esafluoruro di zolfo).

Sono presenti anche dati relativi ad altri composti chimici, fra cui precursori di GHG o composti legati alla distruzione dell'ozono stratosferico: SO₂, NO_x, COV, CO, oltre che per altri inquinanti: NH₃, PTS, PM10, PM2,5, NF3, diossine e furani, idrocarburi policiclici aromatici.

Ciascun dato è corredato di spiegazioni sulla sua origine, sul paese che lo ha prodotto, sull'anno della sua pubblicazione, sulla sua qualità, e se disponibili informazioni, anche su parametri tecnici come il sistema di abbattimento eventualmente utilizzato.

Per le finalità del presente studio sono stati considerati i dati delle attività IPCC del macrosettore «Energia» - settore «Attività da combustione» - «Altri settori» - «Commerciale / Istituzionale» (1A14a) e «Residenziale» (1A14b).

Queste attività IPCC, corrispondenti al macrosettore 2 del codice SNAP97 (combustione non industriale), settori 1 (riscaldamento commerciale ed istituzionale) e 2 (riscaldamento residenziale).

I combustibili per cui sono forniti dati sono: carbonella (charcoal), coke da cokeria, carbone da coke, diesel, gasolio, nafta, metano, carbone bituminoso, olio combustibile, altri tipi di olio, carbone indifferenziato legna / rifiuti di legna.

Le fonti dei fattori di emissione per queste attività sono sia il CORINAIR 94 (già considerato al capitolo 6.2.2, sia le «Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories» con indicazioni sulle pagine e sulle tabelle del Manuale di Referimento.

I dati disponibili sono riportati in allegato 6.4, mentre un quadro riassuntivo di questi fattori di emissione IPCC è mostrato in tabella 6.4.1.

7. Discussione dei risultati

Un quadro riassuntivo delle emissioni dei diversi inquinanti nelle combustioni domestiche in relazione al combustibile utilizzato è riportato per ogni inquinante nei successivi paragrafi.

Nelle tabelle riassuntive sono riportati gli intervalli dei fat-

tori di emissione medi rilevati, valutati sulla base dei valori reperiti in letteratura, escludendo eventualmente valori singoli o riferiti a situazioni del tutto specifiche.

Il valore indicato come «migliore stima» rappresenta il valore considerato come valore medio più probabile per il contesto lombardo.

7.1 Ossidi di zolfo

I fattori di emissione per gli ossidi di zolfo dipendono dal tenore di zolfo del combustibile. In relazione al maggiore contenuto di zolfo, gli oli combustibili a parità di calore sviluppato possono generare fino al 50% in più degli ossidi di zolfo generati dal gasolio.

Le tecnologie di desolforazione disponibili nelle raffinerie permetteranno in futuro di abbassare ulteriormente il contenuto di zolfo nei gasoli (attualmente pari ad un massimo di 2.000 mg/kg), come già avviene per quelli per autotrazione, commercializzati con 350 mg/kg di zolfo ed in base alle ultime direttive CE con 50 ed addirittura 10 mg/kg.

Non essendo industrialmente applicabili i processi di desolforazione agli oli combustibili, analoghe riduzioni non potranno essere ottenute per il loro contenuto di zolfo bloccando quindi ulteriori piani di riduzione.

Un quadro riassuntivo delle emissioni di SO₂ dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.1

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale sono largamente inferiori a quelli di tutti gli altri combustibili, generalmente di 1-2 ordini di grandezza;
- i dati europei o sono disponibili soltanto per l'olio combustibile, oppure non fanno distinzione fra olio e gasolio, in quanto si tratta di dati di default in cui non è nota la tipologia di combustibile liquido (ad esempio l'UNECE-TFEIP considera soltanto la voce «combustibili liquidi» senza ulteriori differenziazioni). È probabile quindi che i due valori siano riferiti il primo ad un distillato e il secondo all'olio residuo;
- il fattore di emissione dal gasolio è per il CTN-ACE inferiore di circa 5 volte a quello dell'olio, considerato quindi con 1% di zolfo;
- il fattore di emissione fornito dal NAEI (Inventario Emissioni del Regno Unito) per l'olio combustibile è molto elevato rispetto ai dati Guidebook EEA, UNECE-TFEIP e US-EPA, ma confrontabile a quello del CTN-ACE. I due dati relativi al gasolio per il NAEI sono nettamente minori ad altri valori medi utilizzati in ambito europeo;
- il fattore di emissione per l'olio combustibile fornito dall'IPCC è molto elevato, confrontabile con quello del NAEI, ma quasi doppio rispetto al dato CTN-ACE;
- i fattori di emissione del Guidebook (e del UNECE-TFEIP) della metodologia semplificata e di default sono di un ordine di grandezza maggiori per il carbone rispetto all'olio;
- i dati US-EPA per i combustibili liquidi sono espressi in funzione del tenore di zolfo; in tabella 7.1 le emissioni di SO₂ sono state stimate in base a tenori di S pari a 0,2% per il gasolio/kerosene e 0,3% per l'olio combustibile (ossia per tutti gli oli residui indipendentemente dalla viscosità). I diversi valori sono relativi ai diversi tipi di oli.

I valori considerati come migliore stima sono quindi stati calcolati assumendo tenori di zolfo pari a 0,2% per il gasolio/kerosene e 0,3% per l'olio combustibile; considerando un potere calorifico di 40.7 GJ/t si ricavano fattori di emissione di circa 98 e 147 g/GJ. Si propongono quindi per questi due combustibili valori di miglior stima pari a 100 e 150 g/GJ.

Per il carbone si è considerato il valore CTN-ACE che corrisponde ad un tenore di zolfo dell'1%.

7.2 Ossidi di azoto

Un quadro riassuntivo delle emissioni di NO_x dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.2

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale sono generalmente confrontabili a quelli dagli altri combustibili, sebbene le sperimentazioni condotte su dati italiani hanno mostrato valori nettamente più bassi
- le emissioni da olio combustibile sono talvolta maggiori di quelle da carbone
- i dati NAEI non si discostano da quelli forniti dalle altre fonti

- il dato fornito dall'IPCC per il gasolio è largamente superiore a quello dell'olio, perché sotto la voce olio sono stati aggregati «olio combustibile» e «altri oli». Il fattore di emissione degli ossidi di azoto qui fornito per «gasolio» è relativo ad «altri oli»

- i dati BUWAL non si discostano da quelli forniti dalle altre fonti per il gas naturale. Per l'olio combustibile i dati sono confrontabili con i valori più bassi forniti dal Guidebook EEA nella metodologia semplificata e in quella di default. Per il carbone si hanno dati confrontabili con quelli NAEI e con i valori più bassi forniti dal Guidebook EEA.

Nei valori considerati nel range, riportati in tabella, non sono stati considerati i valori molto elevati forniti da IPCC e UNECE-TFEIP. Sono stati considerati come migliore stima i valori suggeriti dal CTN-ACE.

7.3 COV - idrocarburi incombusti

Un quadro riassuntivo delle emissioni di COV dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.3.

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale, dovuti probabilmente alle emissioni di idrocarburi metanici, sono generalmente confrontabili a quelli degli altri combustibili, in qualche caso addirittura più elevati (il fattore di emissione NAEI per il gas naturale è circa 2 volte maggiore di quello fornito per gasolio ed olio combustibile)
- il dato fornito dall'IPCC per il gas naturale è in assoluto il più alto, confrontabile con quello del gasolio
- i dati forniti dall'UNECE-TFEIP per i combustibili liquidi sono due: uno più basso per le caldaie vecchie di medie dimensioni, uno più alto per le utenze monofamiliari (20 volte maggiore del precedente)
- alcuni dati forniti da UNECE-TFEIP e da IPCC per il gasolio sono nettamente superiori a quelli mediamente registrati, anche superiori a quelli dell'olio; nella voce olio sono stati aggregati quelli indicati da IPCC come «olio combustibile» e «altri oli».

In Tabella 7.4 si trova un quadro riassuntivo delle emissioni di COT da Guidebook EEA e da NAEI, che non si discostano da quelle di COV.

Nella scelta dei valori indicati come miglior stima si è tenuto conto che mediamente il gasolio, pur registrando alcuni valori molto elevati, mostra fattori di emissioni valori inferiori a quelli del metano e nettamente inferiori all'olio combustibile.

7.4 Monossido di carbonio

Un quadro riassuntivo delle emissioni di CO dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.5

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale sono generalmente confrontabili a quelli degli altri combustibili, in qualche caso addirittura più elevati. Ad esempio il fattore di emissione NAEI per il gas naturale è maggiore dei dati forniti per il gasolio
- i dati del Guidebook EEA e dell'UNECE-TFEIP o sono disponibili soltanto per l'olio combustibile, oppure non fanno distinzione fra olio e gasolio, in quanto si tratta di dati di default in cui non è nota la tipologia di combustibile liquido
- i dati forniti dall'UNECE-TFEIP per i combustibili liquidi sono due: uno più basso per le caldaie vecchie di medie dimensioni, uno più alto per le utenze monofamiliari (50 volte maggiore del precedente).

Nei valori considerati nel range, riportati in tabella, non sono stati considerati i valori molto elevati forniti da UNECE-TFEIP. Sono stati considerati come migliore stima i valori suggeriti dal CTN-ACE.

7.5 Biossido di carbonio

Un quadro riassuntivo delle emissioni di CO₂ dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.6

Si nota come:

- non esistono significative differenze tra i valori dei fattori di emissione mostrati dalle diverse fonti
- i fattori di emissione del gas naturale sono minori di quelli degli altri combustibili

- non esistono significative differenze tra fattori di emissione del gasolio e dell'olio combustibile
- i fattori di emissione dal carbone sono maggiori di quelli dell'olio combustibile. Si ricorda che il fattore di emissione della CO₂ dipende dal tenore di carbonio del combustibile usato

7.6 Polveri (PTS, PM10 e PM2,5)

Un quadro riassuntivo delle emissioni di PTS dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.7

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale sono largamente inferiori a quelli di tutti gli altri combustibili
- i dati del Guidebook EEA e dell'UNECE-TFEIP o sono disponibili soltanto per l'olio combustibile, oppure non fanno distinzione fra olio e gasolio, in quanto si tratta di dati di default in cui non è nota la tipologia di combustibile liquido
- i dati CEPMEIP e RAINS distinguono l'olio combustibile dal gasolio, e forniscono un fattore di emissione da gasolio che è più di un ordine di grandezza inferiore a quello dell'olio.
- i dati US-EPA forniscono fattori di emissione per il gas naturale molto più elevati di quelli delle altre sorgenti. Tali valori non sono stati considerati in quanto si tratta di valori rilevati numerosi anni fa, relativi al totale del particolato (filtrabile+condensabile, e quindi non direttamente confrontabile con gli altri valori di PM10), in condizioni non chiaramente determinate; si aggiunga a questo che il gas naturale USA ha un contenuto di zolfo maggiore rispetto a quello commercializzato in Italia.

Un quadro riassuntivo delle emissioni di PM10 dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.8

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale sono inferiori a quelli di tutti gli altri combustibili con due eccezioni: il fattore di emissione CTN-ACE (di origine EPA) e quello del NAEI, che risultano maggiori di quelli del gasolio; nel caso del NAEI, il fattore di emissione dal gas naturale risulta maggiore di quello dall'olio e di un dato da carbone
- nella prima edizione del capitolo del Guidebook EEA per il macrosettore 2 (EEA, 2003b) e dell'UNECE-TFEIP o sono disponibili soltanto per l'olio combustibile, oppure non si fa distinzione fra olio e gasolio, in quanto si tratta di dati di default proposti indipendentemente dalla tipologia di combustibile liquido. È probabile che i due valori siano riferiti il primo ad un olio leggero distillato e il secondo all'olio residuo.
- nella seconda edizione del capitolo del Guidebook EEA per il macrosettore 2 (EEA, 2004) i fattori di emissione per combustibili liquidi fanno riferimento, come spiegato nelle note, ad un olio leggero che potrebbe essere assimilato al gasolio. Per l'olio pesante la nota propone l'adozione di un valore nettamente superiore, di circa 20 volte. Tale assunzione è comunque ancora oggetto di dibattito all'interno del gruppo di lavoro ed è quindi probabile che i dati finali proposti per la metodologia di default siano ancora diversi
- i dati CEPMEIP distinguono l'olio combustibile dal gasolio, e forniscono un fattore di emissione da gasolio che è un decimo di quello dell'olio. I dati RAINS ricalcano quelli CEPMEIP
- i dati US-EPA forniscono un fattore di emissione per il gas naturale molto più elevato di quello delle altre sorgenti. Come per le PTS, tale valore non è stato considerato in quanto si tratta di valori rilevati numerosi anni fa, relativi al totale del particolato (filtrabile+condensabile, e quindi non direttamente confrontabile con gli altri valori di PM10), in condizioni non chiaramente determinate; si aggiunga a questo che il gas naturale USA ha un contenuto di zolfo maggiore rispetto a quello commercializzato in Italia.

Un quadro riassuntivo delle emissioni di PM2,5 dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.9

Si nota come:

- i fattori di emissione dal gas naturale sono nettamente inferiori a quelli di tutti gli altri combustibili
- i dati del Guidebook EEA e dell'UNECE-TFEIP o sono

disponibili soltanto per l'olio combustibile, oppure non fanno distinzione fra olio e gasolio, in quanto si tratta di dati di default in cui non è nota la tipologia di combustibile liquido. È probabile che i due valori siano riferiti il primo ad un olio leggero distillato e il secondo all'olio residuo.

- i dati CEPMEIP distinguono l'olio combustibile dal gasolio, e forniscono un fattore di emissione da gasolio che è un ottavo di quello dell'olio. I dati RAINS ricalcano quelli CEPMEIP
- i dati US-EPA forniscono un fattore di emissione per il gas naturale molto più elevato di quello delle altre sorgenti. Come per le PTS, tale valore non è stato considerato in quanto si tratta di valori rilevati numerosi anni fa, relativi al totale del particolato (filtrabile+condensabile, e quindi non direttamente confrontabile con gli altri valori di PM10), in condizioni non chiaramente determinate; si aggiunga a questo che il gas naturale USA ha un contenuto di zolfo maggiore rispetto a quello commercializzato in Italia.

Per la determinazione dei range e dei valori medi si è fatto riferimento principalmente ai valori indicati dagli studi RAINS e CEPMEIP, che sono gli studi più avanzati in ambito europeo sulle emissioni delle polveri fini.

7.7 Metalli pesanti

Un quadro riassuntivo delle emissioni di metalli pesanti dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.10.

Si nota come:

- L'unica fonte che fornisce fattori di emissione per i metalli pesanti da combustione di gas naturale è US-EPA. I valori sono nettamente più bassi di quelli riscontrati per tutti gli altri combustibili, con l'unica eccezione del fattore di emissione dello zinco. Il Fe per questo inquinante è insolitamente alto, maggiore dei valori forniti dal Guidebook per il gasolio e dall'UNECE per gasolio ed olio. È comunque minore di quasi tutti i valori forniti dai Guidebook per l'olio e per il carbone.
- I valori più alti per i fattori di emissione di tutti i metalli pesanti si riscontrano per la combustione di olio combustibile e di carbone.

Per il nickel i valori più alti si hanno per l'olio combustibile, per tutti gli altri metalli pesanti i valori sono mediamente maggiori per il carbone.

7.8 Diossine

Un quadro riassuntivo delle emissioni di diossine dai diversi combustibili è riportato in Tabella 7.11.

Si nota come:

- I fattori di emissione forniti da UNECE-TFEIP si discostano da quelli del Guidebook soltanto per la combustione di carbone, per cui si ha un valore più basso.
- Nessuna fonte distingue il gasolio dall'olio combustibile (i fattori di emissione sono forniti in generale per combustibili liquidi).
- Il valore dell'US-EPA per l'olio combustibile, è meno della metà del valore fornito da UNECE-TFEIP e da Guidebook.
- I valori dei fattori di emissione da combustione di gas naturale sono inferiori a quelli relativi a tutti gli altri combustibili, mentre i valori più alti si hanno per la combustione di carbone.

8. Conclusioni

Un quadro riassuntivo dei fattori di emissioni rilevati nella rassegna svolta nei capitoli precedenti è riportato in Tab. 8.1 e Tab. 8.2.

Nella prima tabella è indicato l'intervallo dei valori disponibili, nella seconda le «miglior stime».

I dati di letteratura ed i risultati disponibili delle analisi effettuate in Lombardia rilevano come la combustione dell'olio comporta emissioni specifiche significativamente maggiori a quelle del gas naturale e del gasolio per quasi tutti gli inquinanti quali le polveri, l'anidride solforosa, i metalli pesanti e l'anidride carbonica; sono superiori anche le emissioni di ossidi di azoto per quanto dipendenti anche dalle modalità di combustione.

- **le polveri fini** emesse dall'uso dell'olio sono di due ordini di grandezza superiori a quelle del metano e un ordine di grandezza superiore a quello del gasolio; trattasi del-

l'inquinante le cui emissioni sono direttamente oggetto di politiche di riduzione in ambito europeo, nazionale e regionale;

- **l'anidride solforosa**, emessa dall'olio in quantitativi di 300 volte superiori a quelli del gas naturale e fino al 50% superiore al gasolio, è particolarmente importante perché coinvolta direttamente nella formazione di particolato secondario; non essendo industrialmente applicabili i processi di desolfurazione agli oli combustibili, ne consegue che, relativamente all'impiego di olio combustibile, non potranno essere ottenute in futuro riduzioni significative delle emissioni di anidride solforosa;
- **gli ossidi di azoto**, emessi dall'olio in misura da tre a sette volte superiore al metano e da due a tre volte superiore al gasolio, intervengono nella formazione del PM10 secondario ed inoltre contribuiscono al superamento attuale del limite e del margine di tolleranza per l'NO_x e per l'NO₂ previsti dal d.m. 2 aprile 2002, n. 60;
- **le emissioni di composti organici volatili (COV) e di ossido di carbonio** presentano una grande variabilità spiegabile per la notevole influenza delle modalità di combustione, dei carichi e dei possibili transitori per tali emissioni;
- **i metalli pesanti**, in particolare il nickel, presente in maniera significativa nell'olio combustibile 0,3% di zolfo e suoi derivati, sono composti di provata tossicità per l'organismo umano e più in generale per gli ecosistemi;
- **l'anidride carbonica**, emessa in quantitativi leggermente superiori dalla combustione dell'olio combustibile rispetto al gasolio, ma soprattutto rispetto al gas naturale, è il principale gas ad effetto serra.

L'intervento di limitazione dell'uso dell'olio appartiene all'insieme degli interventi individuati per l'attuazione della

strategia regionale di miglioramento della qualità dell'aria. Una politica efficace di miglioramento della qualità dell'aria si basa infatti su numerosi provvedimenti che, ognuno con il loro contributo, possono se sommati permettere il raggiungimento degli obiettivi.

Sulla base dei dati disponibili nell'inventario emissioni in atmosfera della Regione Lombardia (Inemar), si stima un'emissione di PM10 nelle aree critiche della Regione Lombardia (comuni «rossi») di circa 13.000 tonnellate/anno. Di queste circa 415 t/anno sono dovute alla combustione in ambito civile di olio (229 t/anno), gasolio (162 t/anno) e gas naturale (24 t/anno).

La sostituzione di olio e gasolio con metano permetterebbe la riduzione delle attuali emissioni di questi combustibili rispettivamente del 99,5 % e del 95 % (da 229 a 1.1 t/anno per l'olio e da 162 a 6.5 t/anno per il gasolio), con una riduzione complessiva delle emissioni dal settore riscaldamento del 92%. Complessivamente, sul totale delle emissioni di PM10 nelle aree e comuni critici, la riduzione ottenuta corrisponde al 3.4 % (per l'olio combustibile) e del 2.2 % (per il gasolio) delle emissioni totali di PM10 nelle zone e comuni critici.

Considerando che le emissioni dal riscaldamento civile sono concentrate nel solo semestre invernale, e crescono in particolare nei periodi più freddi, mentre le altre emissioni (ad esempio le emissioni da traffico) sono distribuite abbastanza omogeneamente all'interno dell'anno, si può ritenere che la riduzione nelle emissioni di PM10 ottenibile con la limitazione all'uso dell'olio combustibile nelle aree critiche sia circa il 5 % delle emissioni esistenti.

Si tratta di un contributo non trascurabile nell'ambito di una strategia che, come detto, riconosce la necessità di un'insieme coerente di misure non esistendo un intervento risolutivo unico del problema della qualità dell'aria in Lombardia.

	u.m.	METANO	OLIO	GASOLIO	TOTALE
Consumi di combustibili in Lombardia nel settore civile (dati INEMAR - Inventario Emissioni Aria)	1000 GJ	223.700	9.739	42.738	276.177
Fattore di emissione PM10	g/GJ	0,2	40	5	
Emissioni di PM10 in Lombardia nel settore civile	t/anno	45	390	214	648

Emissioni Aree critiche - comuni rossi (dati INEMAR - Inventario Emissioni Aria)	t/anno	24	229	162	415
Emissioni (Aree critiche - comuni rossi) con sostituzione olio e gasolio con metano	t/anno	24	1,1	6,5	32
Emissioni di PM10 evitate	t/anno		228	155	383

Percentuale riduzione (totale emissioni PM10 nelle aree e comuni critici = 7000 t/anno) - base annua	%		3,3	2,2	5,5
--	---	--	-----	-----	-----

Percentuale riduzione - semestre invernale (totale emissioni PM10 nelle aree e comuni critici = 4000 t/anno)	%		5,7	3,9	9,6
---	----------	--	------------	------------	------------

9. Riferimenti bibliografici

APAT (2002) Manuale dei fattori di emissione nazionali, CTN-ACE

ARPA Lombardia (2003) Misure di emissione dalla combustione domestica effettuati dai dipartimenti di Cremona, Monza, Parabiago, Pavia e Sondrio. Rapporto Interno Arpa Lombardia Settore Aria, U.O. emissioni.

Berdowski, J.J.M., Mulder, W., Veldt, C., Visschedijk, A.J.H., and Zandveld, P.Y.J. (1997) Particulate matter emissions (PM10 - PM2.5 - PM0.1) in Europe in 1990 and 1993. TNO-report, TNO-MEP - R 96/472.

BUWAL (1995) Handbuch «Emissionsfaktoren für Stationäre Quellen» (manuale «fattori di emissione per sorgenti fisse») BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft - ufficio Federale per l'Ambiente i Boschi e il Paesaggio)

BUWAL (2001) Massnahmen zur Reduktion von PM10-Emissionen. Schlussbericht. BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft - ufficio Federale per l'Ambiente i Boschi e il Paesaggio) Abteilung Luftreinhaltung und NIS, January, 2001

CEPMEIP (2002) Co-ordinated European Programme on

- Particulate Matter Emission Inventories, Projections and Guidance, Database presented on the Internet: <http://www.air.sk/tno/cepmieip/>
- Cernuschi e Giugliano (1993)** Caratterizzazioni di inquinanti da impianti di riscaldamento di utenze civili per al definizione di fattori di emissione, DIIAR (Politecnico di Milano)
- Cernuschi e Giugliano (1997)** Fattori di emissione e rendimento energetico di utenze di riscaldamento monofamiliari alimentate a gas naturale, DIIAR (Politecnico di Milano)
- Chow J.C. et al., (1996)** Descriptive analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} at regional representative location during SJVAQS/AUSPEX Atm. Environ. 30, 2079-2112.
- Chow J.C., Watson G.J. (1998)** Guideline on speciated particulate monitoring (Draft 3) US-EPA.
- CTI (2003)** Considerazioni tecniche sull'impiego dell'olio combustibile nel riscaldamento civile. Comitato Termotecnica Italiano
- CTN-ACE (2002)** Fattori di emissione medi italiani - Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni, Roma, aprile 2002
- CTN-ACE (2004)** Database dei fattori di emissione medi italiani - Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni, Roma, Vers. 2 settembre 2002
- Czekalski B., Drodz W.; (2003)**; EN-POL/ Results of investigation in Poland. Personal communication; October 2003
- EEA (1997)** Atmospheric Emission Inventory Guidebook, First Edition, EMEP-CORINAIR production. European Environment Agency, Copenhagen. CD-ROM Intec Sistemi s.p.a. <http://www.eea.dk/aegb/>
- EEA (2000)** Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Second Edition, EMEP-CORINAIR production. European Environment Agency, Copenhagen. <http://themes.eea.eu.int/toc.php/state/air?doc=39186&l=en>
- EEA (2002)** Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Third Edition, EMEP-CORINAIR production. European Environment Agency, Copenhagen. <http://reports.eea.eu.int/EMEP-CORINAIR3>
- EEA (2003)** Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 3rd edition October 2003 Update Technical report No 30. European Environment Agency, Copenhagen. <http://reports.eea.eu.int/EMEP-CORINAIR4>
- EEA (2003b)** Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Small Combustion Installations. Draft version 2.0. 17 dicembre 2003
- EEA (2004)** Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Small Combustion Installations. Draft version 3.0. 13 aprile 2004
- Harrison R.M., Yin J. (2000)** Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects in the health? Scienze of Tot. Envir. 249, 85-101.
- Hesling D. (2002)** Emission from stationary combustion sources smaller than 20kW in the Netherlands: methodology and emission factors; TNO, Netherlands, Atti UNECE TFEIP Combustion and Industry Expert Panel Workshop on: «Emissions from Small and Medium Combustion Plants», Ispra, April 2002, Procc. No.I.02.87.
- Hobson M., Thistlethwaite G., (2003)** Emission factors programme Task 7 - Review of Residential & Small-Scale Commercial Combustion Sources; AEAT/ENV/R/1407 Issue 1 <http://mica-dgfe.casaccia.enea.it/bollettino/anno/2001/boltrim.htm>
- IJC (1994)** Seventh Biennial Report on Great Lakes Water Quality, <http://www.ijc.org/ijcweb-e.html>. International Joint Commission
- IPCC (2001)** Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit, giugno 2001, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/gpauum.htm>
- IPCC (2003)** Database On Greenhouse Gas Emission Factors (EFDB) User Guide for Local CD-ROM application (Version 1.00)
- IRER (2002)** Individuazione dei fattori di emissione e dei sistemi di abbattimento del PM10 dagli impianti energetici e dai veicoli (Cod. IreR 2001C037) - Rapporto Finale - Milano, dicembre 2002
- IVD (1996)** Determination of Mean Emission Factors as Representative Figures for Emission of Stuttgart - Final Report to P&D. Project 29546364/ Emission Factors.
- Jeon et al. (2001)** Exploratory studies of PM₁₀ receptor and source profiling by GC/MS and principal component analysis of temporally and spatially resolved ambient sample J. Air Waste. Manage. Assoc., 51, 766-784.
- Kim B.M. et al. (2000)** Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} in the South Coast Air Basin of Southern California J. Air Waste. Manage. Assoc., 50, 2034-2059.
- Klimt Z., Cofala J., Bertok I., Amann M., Heyes Ch., Gyarfás F. (2002)** Modelling Particolare Emissions in Europe; A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs»; Interim Report IR-02-076, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria (can be found on the Internet at: <http://www.iiasa.ac.at/rains/reports/ir-02-076.pdf>).
- Kubica K., Ranczak J., Wilkosz K. (1999)** Report ICHPW 2696/99 «Determination of non-metanic organic compounds emission factors for solid fuels (coal coke), gas and oil fire appliances», Zabrze, 31 maggio 1999 (polish)
- Lammi K., Lehtonen E. and Timonen T. (1993)** Energiantuotannon hiukkaspäästöjen teknis-taloudelliset vähentämismahdollisuudet (Technical and economical alternatives to reduce particulate emissions from energy production). Helsinki, Finland, Ministry of the Environment, Report 120. 64 pp. (In Finnish with English summary.)
- Lükewille et al. (2001)** Progetto RAINS, I.I.A.S.A. (International Institute for Applied Systems Analysis)
- Magliano et al. (1999)** California Regional PM10/PM2.5 Air Quality Study: Objectives and Associated Data Analysis and Modeling Approaches, February 1999
- Marcazzan G., Vaccaro S., Valli G., Vecchi R. (2000)** Studio delle frazioni di PM₁₀ e PM_{2.5} del particolato atmosferico a Milano Ingegneria Ambientale, 7-8, 370-380.
- Marcazzan G., Vaccaro S., Valli G., Vecchi R. (2000a)** La composizione delle frazioni fini di particolato in località pedemontana Ingegneria Ambientale, 11-12, 595-598.
- Matthias-Maser, Jaenicke R. (1994)** Examination of atmospheric bioaerosol particles with radii < 0.2 µm, J. Aerosol Scienze, 25, 1605-1613.
- MICA (2001)** Ministero attività produttive, Direzione Generale dell'energia e delle risorse minerarie, Bollettino petrolifero Trimestrale - Anno 2001.
- NAEI (2003)** UK National Atmospheric Emissions Inventory, National Environmental Technology Centre.
- NIEHS (2001)** (National Institute of Environmental Health Sciences) The Netherlands, Dioxin Research.
- Occhio L., Riva A. (1998)** Caratterizzazione energetica ed ambientale degli apparecchi di riscaldamento monofamiliari a gas naturale (53° Congresso Nazionale ATI - Associazione Termotecnica Italiana)
- Ohlström M. (1998)** Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa (The fine particle emissions of energy production in Finland). Espoo, Finland, Technical Research Center of Finland, VTT Research Notes 1934. 114 pp. (In Finnish with English summary.)
- Pacyna J.M., Pacyna E.G., (2001)** An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. Environ. - Rev.2001, No 9 pp 269 - 298
- Pandis, S.N., Harley, R.A., Cass, G.R., and Seinfeld, J.H. (1992)** Secondary organic aerosol formation and transport. Atmos. Environ. 26A:2269-2282.
- Pfeiffer F., Struschka M., Baumbach G. (2000)** Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. UBA Texte 14/00, Umweltbundesamt, Berlin.
- PMIP Milano (1994)** Indagine sugli impianti termici ad uso riscaldamento nella città di Milano (Inventario delle emissioni, misura dei fattori di emissione, verifica del rendimento termico). PMIP (Presidio Multizonale di Igiene e Prevenzione) 2^a e 3^a Unità Operativa. Unità socio U.S.S.L. 75/III Milano

PMIP Milano (1999) Indagine sugli impianti termici civili della città di Milano con potenzialità comprese tra 5,8 e 71 MW (1998/99). PMIP (Presidio Multizonale di Igiene e Prevenzione) 2^a e 3^a Unità Operativa. ASL Città di Milano

PMIP Monza (1999) Rapporto di approfondimento sulle emissioni in atmosfera - Impianti di combustione non industriale di potenzialità compresa tra 5 e 40 MW. PMIP (Presidio Multizonale di Igiene e Prevenzione) Unità Operativa Chimica, ASL n. 3 Monza

PMIP Parabiago (1999) Rapporto di approfondimento delle sorgenti di «emissioni diffuse» in Regione Lombardia Comparto: Impianti di combustione residenziali Territorio: ASL Provincia di Milano n. 1

Poore M.W. (2000) Oxalic acid in PM_{2,5} particulate matter in California, J. Air Waste. Manage. Asso., 50, 1874-1875.

PUMI (2003) Relazione finale Dicembre 2002 Progetto PUMI - Il Particolato Fine nell'Atmosfera Urbana Milanese (Attività svolte dalle Unità Operative coinvolte nel Progetto PUMI come previsto dalla Deliberazione della Giunta del comune di Milano n. 3528/2000 del 22 dicembre 2000 Prot. Gen. 6892.021/2000).

Regione Lombardia (2003) INEMAR - Inventario Emissioni in Atmosfera per il 2001 <http://www.ambiente.regione-lombardia.it/inemar/inemarhome.htm>

Riello (2004) Catalogo prodotti - Catalogo interattivo 2.0 - Marzo 2004

Socal (2003) Parere «pro veritate» relativo alle emissioni in atmosfera degli impianti di combustione per la climatizzazione invernale degli edifici ad uso civile ed assimilati. ANTA - Associazione Nazionale Termotecnica ed Aero-tecnica

SSC (2003) Stazione Sperimentale Combustibili - San Donato Commissione tecnico consultiva combustibili e carburanti Indagine sulle caratteristiche degli oli combustibili per uso civile d.p.c.m. 2 ottobre 1995

Strydom T., Stein R., Anastasiades A. (2001) *Convention finally agreed*, Environmental policy and law, 31/1.

TNO (1993) Emission Factors Manual PARCOPM-ATMOS. Emission Factors for Air Pollutants. Final version - TNO Report 92-233/112322-24285, 1992, 1993.

UBA (Umweltbundesamt) (1989) Luftreinhaltung'88, Tendenzen - Probleme - Lösungen. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin, in Dreiseidler et al. 1999.

UBA (Umweltbundesamt) (1998) Schriftliche Mitteilung von Hr. Nöcker vom 1 settembre 1998, UBA II 4.6. Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt), Berlin, in Dreiseidler et al. 1999.

UN-ECE TFEIP (2002) Combustion and industry export panel workshop on «Emissions from small and medium combustion plants», JRC, Ispra, 22-23 April 2002

US-EPA (1994) Health Assessment Document for 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD) and Related Compounds - Volume III, draft., (EPA/600/BP-92/001c).

US-EPA (1996) Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42) Volume 1, Stationery Point and Planning and Standards. Research triangle Park. North Carolina, 1996

US-EPA (1998) The Inventory of Sources of Dioxin in the United States, The Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment. Washington, DC, External Review Draft, (EPA/600/P-98/002Aa).

US-EPA (1998a) *Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, 5-th ed: EPA AP-42. United States Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, North Carolina

US-EPA. (1999b) Air quality criteria for particulate matter Vol.1, EPA 600/P-9902a, Washington.

US-EPA (2003) Clearing House for Inventories and Emission Factors (CHIEF) <http://www.epa.gov/ttn/chief/>

US-EPA (2003) Factor Information Retrieval (FIRE) System, Version 10, User's Manual. Final Version. Prepared by: Radian Corporation, Research Triangle Park, North Carolina. <http://www.epa.gov/ttn/chief/fire.html>

WHO (1999) *Dioxin and their effects on human health*, Fact Sheet No 225.

WHO (2003) Health effect of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report on a WHO working group. Bonn, Germany, 13-15 gennaio 2003

10. Acronimi utilizzati

ANPA: Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente
ARPA: Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente
AP-42: Compilation of Air Pollutant Emission Factors
CE: Comunità Europea
CHIEF: Clearing House for Inventories and Emission Factors
CORINAIR: CORE Inventory of air Emission
EEA: Environmental European Agency
ENEA: Ente Nazionale Energia e Ambiente
EPA: Environmental Protection Agency
ESP : Electro Static Precipitator
FE: Fattore di emissione
INEMAR: Inventario Emissioni Aria
PM10: Particolato fine < 10 µm
PM 2,5: Particolato fine < 2,5 µm
PRQA: Piano Regionale per la Qualità dell'Aria
PTS: Polveri Totali Sospese
SNAP 97: Selected Nomenclature for source of Air Pollution

Relazione tecnico - scientifica
Emissioni di inquinanti dalla combustione civile

TABELLE

**Tab. 5.2 Sintesi di fattori di emissione ottenuti dall'indagine ARPA 2003
 (ARPA Lombardia, 2003)**

COMBUSTIBILE	FATTORI DI EMISSIONE (g/GJ)		
	SO ₂	NO _x	CO
Gas naturale		45	8
Gasolio	27	42	7
Olio combustibile	80	138	2

Tabella 5.3 Dettaglio delle emissioni di alcuni impianti termici civili siti in Milano nell'indagine 2001

Combustibile	potenzialità al focolare kW/h	Temp. fumi °C	O ₂ %	NO _x mg/Nm3	CO mg/Nm3
Olio combustibile	386	282	11		455
Olio combustibile	820	324	3,4		336
Olio combustibile	151	229	12		213
Olio combustibile	349	179	6,7		206
Olio combustibile	407	211	7,9		148
Olio combustibile		227	7,5		143
Olio combustibile	406	216	9,8		137
Olio combustibile		222	7,4		131
Olio combustibile	318	198	5,2		126
Gasolio	250	155	6,2	203	0,0
Gasolio	281	155	5,4	205	1,3
Gasolio	71	239	5,9	290	2,5
Gasolio	315	178	6,0	259	1,7
Gasolio	546	178	7,0	217	6,3
Gasolio	250	198	8,4	218	76
Gasolio	141	151	6,7	242	4,5
Gasolio	546	28	7,5	220	28

Tabella 5.4 Fattori di emissione medi nell'indagine del Comune di Milano - 2001

	Unità di misura	NO _x	CO
Gasolio	g/GJ	62	4
Olio combustibile	g/GJ	-	56

Tab. 5.5 Sintesi di fattori di emissione nella campagna ARPA 1999 (PMIP Milano/Monza/Parabiago, 1999)

COMBUSTIBILE		FATTORI DI EMISSIONE (g/GJ)			
		SO ₂	NO _x	CO	PTS
gas naturale	PMIP Milano		24 - 56 (47)	0 - 2.890 (182)	
gasolio	PMIP Milano	21 - 74 (44)	33 - 76 (51)	0 - 34 (1,2)	7,4
olio combustibile	PMIP Milano	1-130 (74)	78 - 188 (138)	0 - 431 (45)	6,0
gas naturale	PMIP Monza		16 - 125 (63)	0 - 480 (39)	
gas naturale	PMIP Parabiago	0,89 - 3 (1,5)	20 - 42 (34)	0,9 - 9,5 (3,9)	
gasolio	PMIP Parabiago	79 - 192 (117)	49 - 69 (63)	1,5 - 8,1 (2,5)	

() i valori tra parentesi rappresentano i dati medi pesati, cioè quelli ricavati dalla classe più frequente di concentrazione

Tab. 5.6 Sintesi di fattori di emissione nella campagna ARPA 1994 (PMIP Milano, 1994)

COMBUSTIBILE	FATTORI DI EMISSIONE (g/GJ)			
	SO ₂	NO _x	CO	PTS
Gas naturale		2,7 - 94 (38)	1 - 2.190 (129)	
Gasolio	16 - 159 (57)	25 - 98 (63)	1 - 157 (12)	7,4
Olio combustibile	251	249	36	6,0

() i valori tra parentesi rappresentano i dati medi pesati, cioè quelli ricavati dalla classe più frequente di concentrazione

Tab. 5.7 Sintesi di fattori di emissione (IRER, 2002)

Tecnologia	% O ₂ fumi secchi	Combustibile	SO ₂	NO _x	COV	CO	PTS	PM10
			g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ
Bruciatore vecchio	3	Gasolio	71	49	0,83	9,7	0,75	0,75
Bruciatore nuovo	3,4	Gasolio	73	69	0,97	1,5	<0,03	<0,03
Bruciatore nuovo	0,6	Gasolio	67	50	0,17	29	0,39	0,36
Bruciatore vecchio con catalizzatore (Cat2)	3	Gasolio	63	55	0,11	4,9	0,42	0,22
Bruciatore vecchio con emulsione	3	Gasolio emulsionato	14	42	0,00	3,7	0,31	0,31
Bruciatore vecchio con biodiesel	3	Biodiesel	0,6	46	0,11	2,5	0,11	0,08

Tab. 6.1.1 Fattori di Emissione CTN-ACE (CTN-ACE, 2004)

Combustibili	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂	PM10
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	kg/GJ	g/GJ
gas naturale		50	25	55,46	6,7
gasolio	94	50	20	73,27	3,6
olio combustibile	487	150	16	74,62	58,7
carbone da vapore	646	50	5.000	94,07	439

Tab. 6.1.2 Sintesi di fattori di emissione (Cernuschi e Giugliano, 1993)

COMBUSTIBILE	Regime di funzionamento	FATTORI DI EMISSIONE (g/GJ)			
		NO _x	CO	COV	PTS
gas naturale	100%	46 - 77,9	5,5 - 35	0,5 - 4,4	0,05 - 0,8
gas naturale	0% - 100%	29 - 60	3,6 - 63,4	0,07 - 36,9	0,5
gasolio	100%	65,3 - 75	7,6 - 14,12	0,1 - 1,2	1,3 - 4
gasolio	0% - 100%	49,1 - 110	7 - 61,6	0,1 - 1,8	0,85 - 3,8

Tab 6.1.3 Sintesi di fattori di emissione (Cernuschi e Giugliano 1997)

COMBUSTIBILE	Condizioni di rilevamento	Regime di funzionamento	FATTORI DI EMISSIONE (g/GJ)		
			NO _x	CO	COV
gas naturale	in campo	100%	9,0 - 42	5,6 - 110	n.d.
gas naturale	in laboratorio	100%	7,8 - 63	15,3 - 39	0,8 - 5,6
gas naturale	in laboratorio	0% - 100%	3,0 - 48	10 - 230	1,4 - 43

Tab 6.1.4 Review di fattori di emissione di letteratura - usi civili, varie tipologie (Occhio e Riva, 1998)

COMBUSTIBILE	FATTORI DI EMISSIONE (g/GJ)				
	SO ₂	NO _x	CO	COV	PTS
gas naturale	0,12 - 0,24	5,0 - 58	3,0 - 23	1,0 - 3,3	1,7 - 1,9
GPL	0,24	64	9	2,4	2,1
gasolio	90,5	61	16	4,9	7
olio combustibile	147	160	16	5	32

Tab. 6.2.1 Fattori di Emissione Guidebook EEA (EEA, 2003)

			GUIDEBOOK 3					CORINAIR 90
			Tipologia di impianto					
inquinante	combustibile	u.m.	Caldaia	Caldaia a fondo secco	Caldaia a fondo umido	Combustione a letto fluido	Combustione su griglia	
NO _x	carbone	g/GJ		180		70	150	545
NO _x	olio	g/GJ		140 ; 180				24 ; 370
NO _x	gasolio	g/GJ		80 ; 100				50 - 269
NO _x	gas naturale	g/GJ		100 ; 48 - 333				22 - 350
COV	carbone	g/GJ	600					3
COV	olio	g/GJ						1,5 - 47,6
COV	gasolio	g/GJ	15					1,5 - 9,3
COV	gas naturale	g/GJ						2 - 4
CH ₄	carbone	g/GJ	10 ⁽¹⁾	0,6 ⁽²⁾	0,6 ⁽²⁾		0,7 ⁽²⁾	0,3 - 15
CH ₄	olio	g/GJ	1,6 ⁽¹⁾	0,7 ⁽²⁾	0,7 ⁽²⁾			0,1 - 10
CH ₄	gasolio	g/GJ	0,6 ⁽¹⁾	0,03 ⁽²⁾	0,03 ⁽²⁾			0,1 - 8
CH ₄	gas naturale	g/GJ	1,2 ⁽¹⁾	0,1 ⁽²⁾	0,1 ⁽²⁾			0,3 - 4
CO	carbone	g/GJ	195 ⁽¹⁾	14 ⁽²⁾	14 ⁽²⁾		121 ⁽²⁾	15
CO	olio	g/GJ	17 ⁽¹⁾	15 ⁽²⁾	15 ⁽²⁾			3 - 32,6
CO	gasolio	g/GJ	16 ⁽¹⁾	15 ⁽²⁾	15 ⁽²⁾			10 - 46,4
CO	gas naturale	g/GJ	9,6 ⁽¹⁾	19 ⁽²⁾	19 ⁽²⁾			0,05 - 60
CO ₂	carbone	kg/GJ	92 - 93 ; 89,6 - 94					
CO ₂	olio	kg/GJ	15 - 93					
CO ₂	gasolio	kg/GJ	73 - 74 ; 57 - 75					
CO ₂	gas naturale	kg/GJ	55 - 56 ; 44 - 57					
N ₂ O	carbone	g/GJ		0,8	0,8		0,8	14
N ₂ O	olio	g/GJ		46,5				1,4 - 14,8
N ₂ O	gasolio	g/GJ		15,7				0,6 - 14
N ₂ O	gas naturale	g/GJ		2,4				0,1 - 3

I dati di Corinair 90 non presentano alcuna differenziazione per potenza o tipologia dell'impianto

(1) caldaie commerciali, senza specificazione della potenza

(2) caldaie istituzionali, senza specificazione della potenza

Non sono forniti dati su FE dei metalli pesanti per caldaie < 50 MW

Tab. 6.2.2 Sintesi fattori di emissione Guidebook EEA (EEA, 2003)

Combustibile	NO _x	COV	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	kg/GJ	g/GJ
gas naturale	100 ; 48 - 333			9,6 ⁽¹⁾ ; 19 ⁽²⁾	55 - 56 ; 44 - 57	2,4
gasolio	80 ; 100	15	1,2 ⁽¹⁾ ; 0,1 ⁽²⁾	16 ⁽¹⁾ ; 15 ⁽²⁾	73 - 74 ; 57 - 75	15,7
olio	140 ; 180		1,6 ⁽¹⁾ ; 0,03 ⁽²⁾	17 ⁽¹⁾ ; 15 ⁽²⁾	15 - 93	46,5
carbone	70 ; 150 ; 180	600	10 ⁽¹⁾ ; 0,6 ⁽²⁾ ; 0,7 ⁽²⁾	195 ⁽¹⁾ ; 14 ⁽²⁾ ; 121 ⁽²⁾	92 - 93 ; 89,6 - 94	0,8

(1) caldaie commerciali, senza specificazione della potenza

(2) caldaie istituzionali, senza specificazione della potenza

Tab. 6.2.3 Sintesi fattori di emissione Guidebook EEA - CORINAIR 90 (EEA, 2003)

Combustibile	NO _x	COV	CH ₄	CO	N ₂ O
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ
gas naturale	22 - 350	2 - 4	0,3 - 4	0,05 - 60	0,1 - 3
gasolio	50 - 269	1,5 - 9,3	0,1 - 8	10 - 46,4	0,6 - 14
olio	24, 370	1,5 - 47,6	0,1 - 10	3 - 32,6	1,4 - 14,8
carbone	545	3	0,3 - 15	15	14

I dati di Corinair 90 non presentano alcuna differenziazione per potenza o tipologia dell'impianto

Tab. 6.2.4 Fattori di emissione di SO₂ per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2003b, EEA 2004)

Fonte	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
Olanda (Hesling, 2002)	0,22			87	60	
Polonia (Kubica et al., 1999)				110 ; 112 ; 140 ; 120		
Polonia (Czebalski et al., 2003)				105 ; 69		
UK (Hobson, 2003)		87				
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2003b)	0,5	100	100	100	1.000	30
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2003b)	0,5	150	150	150	1.000	40
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2003b)	0,5	100	100	100	1.000	50
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2003b)	0,5	150	150	150	1.000	50
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2003b)	0,5	150	150	150	1.000	30
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2004)	0,5	140	140	140	880	30
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2004)	0,5	140	140	140	880	40
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2004)	0,5	140	140	140	900	50
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2004)	0,5	140	140	140	900	50
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2004)	0,5	140	140	140	900	30

Tab. 6.2.5 Fattori di emissione di NOx per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2003b, EEA 2004)

	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
Olanda (Hesling D., 2002)	57,5			50	75	
Polonia (Kubica et al., 1999)	142 ; 59 ; 25 ; 38			43 ; 56 ; 60 ; 57		
Polonia (Czebalski et al., 2003)	64 ; 30 ; 29 ; 38 ; 23			66 ; 63		
UK (Hobson, 2003)		50				
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2003b)	60	60	60	60	150	100
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2003b)	70	100	100	100	200	150
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2003b)	70	70	70	70	200	150
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2003b)	70	100	100	100	200	150
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2003b)	70	100	100	100	180	150
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2004)	60	70	70	70	150	100
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2004)	70	100	100	100	190	150
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2004)	70	70	70	70	200	200
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2004)	70	100	100	100	200	200
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2004)	70	100	100	100	180	150

Tab. 6.2.6 Fattori di emissione di COV per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2003b, EEA 2004)

	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
Olanda (Hesling D., 2002)	6,3			15	60	
Polonia (Kubica et al., 1999)	8,9 ; 7,8 ; 6,2 ; 0,6			5 ; 4,2 ; 10 ; 2,1		
UK (Hobson, 2003)	3,0 ; 15	1,5 ; 7,5		10	25 - 583	480
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2003b)	10	15	15	15	450	850
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2003b)	3	10	10	10	120	180
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2003b)	10	15	15	15	300	400
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2003b)	3	15	15	15	200	250
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2003b)	2	5	5	5	20	60
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2004)	10	15	15	15	450	850
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2004)	3	10	10	10	100	190
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2004)	10	15	15	15	300	400
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2004)	3	15	15	15	200	250
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2004)	2	5	5	5	20	60

Tab. 6.2.7 Fattori di emissione di COT per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2004)

	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
UK (Hobson M.)	5,0 - 30	15		10	5,0 - 20	90 - 800

Tab. 6.2.10 Fattori di emissione di PTS per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2003b, EEA 2004)

Fonte	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
Polonia (Czebalski et al., 2003)	0,2 ; 0,1			0,2		
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2003b)	0,5	40	40	40	380	360
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2003b)		40	40	40	140	90
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2003b)	0,5	50	50	50	300	250
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2003b)		50	50	50	200	100
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2003b)		30	30	30	70	50
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2004)	0,5	2,5	2,5	2,5	360	360
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2004)		15	15	15	140	160
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2004)	0,5	2	2	30	300	250
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2004)		2	2	30	200	200
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2004)		30	30	30	80	50
UBA, 1989	0,1			50 ; 1,5		
UBA, 1998	0,1			9 - 30 ; 1,5		
CEPMEIP, 2002	0,2			60 ; 5		
Pfeiffer et al, 2000	0,03			38 ; 1,7 ; 1,6		
Lammi et al., 1993				25 - 150		
Ohlstroem, 1998				1 - 390 ; 3 - 100		
BUWAL, 2001	0,5 ; 0,2			1 ; 0,2		
EPA, 1998a	0,9					

Tab. 6.2.11 Fattori di emissione di PM10 per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2003b, EEA 2004)

	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
Olanda (Hesling, 2002)	0,3			4,5	120	
UK (Hobson, 2003)	0,5 ; 0,3 ; 4,8 ; 0,2 ; 0,15			3,1		
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2003b)	0,5	40	40	40	330	310
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2003b)		40	40	40	110	70
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2003b)	0,5	50	50	50	250	200
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2003b)		50	50	50	150	80
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2003b)		30	30	30	50	40
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2004)	0,5	1,5	1,5	1,5	320	320
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2004)		10	10	10	110	140
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2004)	0,5	1	1	20	260	220
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2004)		1	1	20	170	180
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2004)		20	20	20	60	40
UBA, 1989	0,095			45		
UBA, 1998	0,095			8 - 27		
CEPMEIP, 2002	0,2			50 ; 5		
Berdowsky et al., 1997				50 ; 30		
BUWAL, 2001	0,5 ; 0,2			1 ; 0,2		

Tab. 6.2.12 Fattori di emissione di PM2,5 per la combustione domestica (g/GJ) (EEA, 2003b, EEA 2004)

	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile	carbone	legna
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2003b)	0,5	40	40	40	310	310
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2003b)		40	40	40	110	70
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2003b)	0,5	50	50	50	200	200
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2003b)		50	50	50	150	80
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2003b)		30	30	30	50	40
metodologia semplificata - caldaie residenziali (EEA 2004)	0,5	1,5	1,5	1,5	320	320
metodologia semplificata - caldaie commerciali / istituzionali (EEA 2004)		10	10	10	110	140
default - caldaie <= 50 kW (EEA 2004)	0,5	1	1	20	260	220
default - caldaie > 50 kW <= 1MW (EEA 2004)		1	1	20	170	180
default - caldaie > 1 MW <= 50 MW (EEA 2004)		20	20	20	60	40
CEPMEIP, 2002	0,2			40 ; 5		
Berdowsky et al., 1997				30		

Tab. 6.2.13 Emissioni da impianti di combustione piccoli e medi (UN-ECE TFEIP, 2002)

Inquinante	u.m.	Caldaie domestiche, utenze monofamiliari				Caldaia vecchia di medie dimensioni (50 - 1000 kW)			
		Antracite	Lignite	Gassosi	Liquidi	Antracite	Lignite	Gassosi	Liquidi
SO2	g/GJ	1.000	2.000	0,5	100	1.000	2.000	0,5	100 *
NOx (come NO2)	g/GJ	200	200	70	150	200	200	70	150
CO	g/GJ	500	400	30	2.000	500	400	30	40
NMVOG	g/GJ	100	70	3	200	100	70	3	10
TSP	g/GJ	200	150	0	50	200	150	0	50
PM10	g/GJ	150	100	0	50	150	100	0	50
PM2.5	g/GJ	150	100	0	50	150	100	0	50
Arsenico	mg/GJ	5	4	0	3	5	4	0	3
Cadmio	mg/GJ	1	0,7	0	0,3	1	0,7	0	0,3
Cromo	mg/GJ	15	10	0	5	15	10	0	5
Rame	mg/GJ	10	7	0	3	10	7	0	3
Mercurio	mg/GJ	15	10	0	1	15	10	0	1
Nickel	mg/GJ	10	7	0	300	10	7	0	300
Piombo	mg/GJ	100	70	0	10	100	70	0	10
Selenio	mg/GJ	2	1,5	0	0	2	2	0	n.a.
Zinco	mg/GJ	20	15	0	5	20	15	0	5
Idrocarburi policiclici aromatici	mg/GJ	100	70	0	50	100	70	0	50
Diossine e furani	ng/GJ	100	100	2	10	100	100	0	10

* EF= 1000 g/GJ per olio combustibile denso con S = 2% (non ammesso in Italia)

**Tab 6.2.14 Combustioni commerciali, istituzionali, residenziali ed altre
(CEPMEIP - TNO, 2002)**

Combustibile	PTS	PM10	PM2,5
	g/GJ	g/GJ	g/GJ
Gas naturale	0,2	0,2	0,2
Kerosene	5	5	5
Gasolio	5	5	5
Olio denso	60	50	40
Coke	100	60	30
Lignite	350	140	70
Antracite	150	60	30

**Tab. 6.2.15a Fattori di emissione per il particolato da
combustione residenziale, commerciale, istituzionale ed
altro (progetto RAINS - Lükewille et al, 2001)**

Combustibile	PTS	PM10	PM2,5
	g/GJ	g/GJ	g/GJ
Gas naturale	0,2	0,2	0,2
GPL	0,2	0,2	0,2
Altri gas	0,2	0,2	0,2
Kerosene	5,0	5,0	5,0
Gasolio	5,0	5,0	5,0
Olio denso	60	50	40
Lignite	350	140	70
Antracite	150	60	30
Torba	350	120	60
Coke	100	60	30
Legna	300	290	270

**Tab. 6.2.15b Fattori di emissione del particolato usati nel progetto RAINS per
combustione residenziale di combustibili liquidi e gassosi (Klimont et al., 2002 - in
EEA 2004 - Tab. A1 35, pag. 60)**

Combustibile	PTS	PM10	PM2,5
	g/GJ	g/GJ	g/GJ
Olio combustibile pesante	38	25	9,5
Olio combustibile leggero	1,7	0,9	0,7
Gas naturale	0,03 - 0,2	0,03 - 0,2	0,03 - 0,2

Tab. 6.2.16 Fattori di emissione per la combustione domestica (NAEI, 2003)

	SO ₂	NO _x	COV	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	PM10
	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	kg/GJ	g/GJ	g/GJ
Gas naturale GPL		46	6,3	2,7	8,2	52	0,09	3,1
Kerosene	9,7	51	3,0	6,9	3,7	73	0,46	0,23
Gasolio	62	51	3,1	7,0	5,6	74	0,47	5,9
Olio combustibile	639	172	3,2	7,4	12	77	0,49	25
Carbone	646	46	452	484	1.453	80	3,6	323
Coke	546	45	167	198	1.536	101	3,8	10
Legna	2,31	55	416	278	7.610	n/a	2,3	607

Tab. 6.2.17 Fattori di emissione di impianti termici civili (BUWAL, 1995)

	Pci		Densità		SO ₂	NO _x	COV	CH ₄	CO	CO ₂	PTS	PM10
	u.m.	MJ/kg	u.m.	m3/kg	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	g/GJ	kg/GJ	g/GJ	g/GJ
Impianti di riscaldamento monofamiliari												
Camini aperti	MJ/kg	15	m3/kg	10	20	100	200	800	2.500	92	100	100
Stufe a legna	MJ/kg	15	m3/kg	10	20	100	100	400	5.000	92	100	100
Stufe a carbone	MJ/kg	28	m3/kg	12	350	65	100	300	5.000	94	270	110
Stufe ad gasolio	MJ/kg	43	m3/kg	12	25	40	100	2	8	1	1	74
Stufe a gas	MJ/m3	36	m3/m3	10	0,5	40	3	10	100	55	0,5	1
Riscaldamento domestico												
Legna	MJ/kg	15	m3/kg	10	20	100	40	120	2.000	92	50	50
Carbone	MJ/kg	28	m3/kg	12	350	65	100	300	4.400	94	150	90
Gasolio (basso NOx)	MJ/kg	43	m3/kg	12	35	30	3	0,5	6	74	0,2	0,2
Gasolio (valori medi)	MJ/kg	43	m3/kg	12	47	40	6	1	17	74	0,2	0,2
Gas naturale (basso NOx)	MJ/m3	36	m3/m3	10	0,5	9	2	6	1	55	0,1	0,1
Gas naturale (valori medi)	MJ/m3	36	m3/m3	10	0,5	16	2	6	28	55	0,2	0,2

Tab 6.3.1 Sintesi fattori di emissione di macroinquinanti per la combustione domestica (US-EPA, 2003)

Inquinante	u.m.	gas naturale	kerosene	gasolio	olio combustibile
SO ₂ *	g/GJ	0,29	88,5	88,5 ; 97,8	140,1 ; 146,7
NO _x	g/GJ		519	260 - 623	675 - 1.221
COV	g/GJ	2,7	1,06	1,06	1,06 ; 2,37 ; 3,52
COT	g/GJ	5,3	1,73	1,7	1,73 ; 3,24 ; 5
CH ₄	g/GJ	1,1	0,67	0,67	0,67 ; 0,87 ; 1,48
CO	g/GJ		130	130	130
CO ₂	kg/GJ	58,3	72,5	74,1	77,9
N ₂ O	g/GJ	1,1			
PM totale	g/GJ	3,7			
PM condensabile	g/GJ	2,8			
PM filtrabile**	g/GJ	0,92	52	52	155,2 ; 182 ; 260

* per i combustibili liquidi sono stato considerati fattori di emissione dipendenti dal tenore di zolfo S. Per kerosene e gasolio S = 0,2, per olio combustibile S = 0,3

** il valore 155,2 per l'olio combustibile è stato ottenuto con una formula dipendente dal tenore di zolfo S (vedi nota precedente)

Tab. 6.4.1 Fattori di emissione di macroinquinanti per combustioni residenziali ripartiti per combustibile (IPCC, 2003)

Inquinante	u.m.	Gas naturale	Gasolio	Diesel	Nafta	Olio combustibile	Altri oli	Carbone	Coke	Carbone da cokeria
SO ₂	g/GJ	0,42	254	94		873			760	2.252
NO _x	g/GJ	38 - 50	47 - 1.119				47 - 170	55 - 230	50	123
COV	g/GJ	2,5 - 200	1,5 - 233				5	200	225	50
CH ₄	g/GJ	1,0 - 6,1	4,0 - 4,3				0,7 - 10	150 - 300	225	450
CO	g/GJ	10 - 160	43 - 514			13	10 - 20	18 - 3.600	4.800	4.800
CO ₂	kg/GJ	56	74	74	73	78			105	94
N ₂ O	g/GJ	0,1 - 2,4	16 - 29			47	0,2 - 0,6	1,4		0,80
NH ₃	g/GJ		0,17							
PTS	g/GJ		172							

Tab. 7.1 Sintesi dei fattori di emissione di SO₂ per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
ARPA Lombardia	Indagine 2003	Tab. 5.2		27	80	
PMIP Monza/Milano/Parabiago	Indagine 1999	Tab. 5.5	1,5	44 ; 117	74	
PMIP Milano	Indagine 1994	Tab. 5.6		57	251	
IRER	2002	Tab. 5.7		63 - 71		
CTN -ACE	Italia	Tab. 6.1.1		94	487	646
Guidebook EEA 2003b, 2004	Olanda	Tab. 6.2.4	0,22		87	60
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.4			110 ; 112 ; 140 ; 120	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.4			105 ; 69	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UK	Tab. 6.2.4		87		
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.4	0,5	100 ; 150	100 ; 150	1.000
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.4	0,5	100 ; 150	100 ; 150	1.000
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.4	0,5	140	140	880
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.4	0,5	140	140	900
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13	0,5	100	100	1.000 ; 2.000
NAEI	UK	Tab. 6.2.16		9,7 ; 62	639	546 ; 646
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	0,5	35 ; 47		350
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	0,27	89 ; 98	140 ; 147	48 ; 193
IPCC		Tab. 6.4.1	0,42	94 ; 254	873	760 ; 2.252

Valori riassuntivi

	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	0,22 - 0,5	9,7 - 150	69 - 150	60 - 2.252
Migliore stima	0,5	100	150	650

Tab. 7.2 Sintesi dei fattori di emissione di NO_x per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
ARPA Lombardia	Indagine 2003	Tab. 5.2	45	42	138	
Comune di Milano	Indagine 2001	Tab. 5.4		62		
PMIP Monza/Milano/Parabiago	Indagine 1999	Tab. 5.5	47 ; 63 ; 34	51 ; 63	138	
PMIP Milano	Indagine 1994	Tab. 5.6	38	36	249	
IRER	2002	Tab. 5.7		49 - 69		
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.2	46 - 78	65 - 75		
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.3	9,0 - 42			
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.3	7,8 - 63			
CTN -ACE	Italia	Tab. 6.1.1	50	50	150	50
Guidebook EEA 2003	Guidebook 3	Tab. 6.2.1	100 ; 48 - 333	80 ; 100	140 ; 180	70 ; 150 ; 180
Guidebook EEA 2003	CORINAIR 90	Tab. 6.2.1	22 - 350	50 - 269	24 ; 370	545
Guidebook EEA 2003b, 2004	Olanda	Tab. 6.2.5	58		50	75
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.5	142 ; 59 ; 25 ; 38		43 ; 56 ; 60 ; 57	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.5	64 ; 30 ; 29 ; 38 ; 23		66 ; 63	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UK	Tab. 6.2.5		50		
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.5	60 ; 70	60 ; 100	60 ; 100	150 ; 200
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.5	70	70 ; 100	70 ; 100	180 ; 200
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.5	60 ; 70	70 ; 100	70 ; 100	150 ; 190
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.5	70	70 ; 100	70 ; 100	180 ; 200
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13	70	150	150	200
NAEI	UK	Tab. 6.2.16	46	51	172	45 ; 46
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	9 ; 16	30 ; 40		65
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	n.d.	519 ; 260 - 623	675 - 1.221	30 - 298
IPCC		Tab. 6.4.1	38 - 50	47 - 1.119	47 - 170	50 ; 123 ; 55 - 230

Valori riassuntivi

	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	7,8 - 350	30 - 269	24 - 370	45 - 545
Migliore stima	50	50	150	150

Tab. 7.3 Sintesi di fattori di emissione di COV per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
IRER	2002	Tab. 5.7		0,11 - 0,97		
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.2	0,5 - 4,4	0,1 - 1,2		
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.3	0,8 - 5,6			
Guidebook EEA 2003	Guidebook 3	Tab. 6.2.1		15		600
Guidebook EEA 2003	CORINAIR 90	Tab. 6.2.1	2 - 4	1,5 - 9,3	1,5 - 48	3
Guidebook EEA 2003b, 2004	Olanda	Tab. 6.2.6	6,3		15	60
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.6	8,9 ; 7,8 ; 6,2 ; 0,6		5 ; 4,2 ; 10 ; 2,1	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UK	Tab. 6.2.6	3 ; 15	1,5 ; 7,5	10	25 - 583
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.6	10 ; 3	15 ; 10	15 ; 10	450 ; 120
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.6	10 ; 3 ; 2	15 ; 5	15 ; 5	300 ; 200 ; 20
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.6	10 ; 3	15 ; 10	15 ; 10	450 ; 100
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.6	10 ; 3 ; 2	15 ; 5	15 ; 5	300 ; 200 ; 20
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13	3	10 ; 200	10 ; 200	70 ; 100
NAEI	UK	Tab. 6.2.16	6,3	3,0 ; 3,1	3,2	167 ; 452
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	2,0	3 ; 6		100
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	2,5	1,1	1,1 ; 2,4 ; 3,5	
IPCC		Tab. 6.4.1	2,5 - 200	1,5 - 233	5	50 ; 200 ; 225

Valori riassuntivi

	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	0,5 - 10	0,1 - 15	1,1 - 48	3 - 600
Migliore stima	5	3	10	200

Tab. 7.4 Sintesi di fattori di emissione di COT per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte		gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Guidebook EEA	UK	Tab. 6.2.8	5,0 - 30	15	10	5,0 - 20
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	5	1,7	1,7	

Tab. 7.5 Sintesi di fattori di emissione di CO per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
ARPA Lombardia	Indagine 2003	Tab. 5.2	8	7	2	
Comune di Milano	Indagine 2001	Tab. 5.4		4	56	
PMIP Monza/Milano/Parabiago	Indagine 1999	Tab. 5.5	182 ; 39 ; 3,9	1,2 ; 2,5	45	
PMIP Milano	Indagine 1994	Tab. 5.6	129	12	36	
IRER	2002	Tab. 5.7		1,5 - 29		
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.2	5,5 - 35	7,6 - 14		
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.3	5,6 - 110			
DIAR (Politecnico di Milano)	Italia	Tab. 6.1.3	15 - 39			
CTN -ACE	Italia	Tab. 6.1.1	25	20	16	5.000
Guidebook EEA 2003b, 2004	Olanda	Tab. 6.2.8	0,63		60	1.500
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.8	10 ; 31 ; 21 ; 15		46 ; 44 ; 45 ; 34	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.8	3,1 ; 3,6 ; 0,4		1,4	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UK	Tab. 6.2.8		60		
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.8	30	60 ; 40	60 ; 40	5.000 ; 1.200
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.8	30	5 ; 40	5 ; 40	4.000 ; 2.000 ; 100
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.8	30 ; 3	50 ; 10	50 ; 10	5.000 ; 1.100
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.8	30 ; 20	40	40	4.000 ; 2.000 ; 200
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13	30	40 ; 2.000	40 ; 2.000	400 ; 400
NAEI	UK	Tab. 6.2.16	8,2	3,7 ; 5,6	12	1.453 ; 1.536
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	28	6 ; 17		4.400
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1		130	130	10
IPCC		Tab. 6.4.1	10 - 160	43 - 514	13 ; 10 - 20	18 - 3.600 ; 4.800

Valori riassuntivi

		gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	Range	20 - 50	20 - 40	5 - 40	100 - 5.000
Migliore stima	Migliore stima	25	20	16	2.000

Tab. 7.6 Sintesi di fattori di emissione di CO₂ per la combustione domestica (kg/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
CTN -ACE		Tab. 6.1.1	55	73	75	94
Guidebook EEA 2003	Guidebook 3	Tab. 6.2.1	55 - 56 ; 44 - 57	73 - 74 ; 57 - 75	15 - 93	92 - 93 ; 90 - 94
Guidebook EEA 2003b, 2004	Olanda	Tab. 6.2.9	56		73	103
NAEI	UK	Tab. 6.2.16	52	73 ; 74	77	80 ; 101
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	55	74		94
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	55	73 ; 74	78	94
IPCC		Tab. 6.4.1	56	74	78	94 ; 105

Valori riassuntivi

		gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range		52 - 58	73 - 75	73 - 78	90 - 105
Migliore stima		55	74	76	98

Tab. 7.7 Sintesi di fattori di emissione di PTS per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
PMIP Monza/Milano/Parabiago	Indagine 1999	Tab. 5.5		7,4	6,0	
IRER	2002	Tab. 5.7		<0,03 - 0,75		
DIAR (Politecnico di Milano)		All. 6.1.2	0,05 - 0,8	1,3 - 4		
Guidebook EEA 2003b, 2004	Polonia	Tab. 6.2.10	0,2 ; 0,1		0,2	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UBA, 1989	Tab. 6.2.10	0,1		50 ; 1,5	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UBA, 1998	Tab. 6.2.10	0,1		9 - 30 ; 1,5	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Pfeiffer et al, 2000	Tab. 6.2.10	0,03		38 ; 1,7 ; 1,6	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Lammi et al., 1993	Tab. 6.2.10			25 - 150	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Ohlstrom, 1998	Tab. 6.2.10			1 - 390 ; 3 - 100	
Guidebook EEA 2003b, 2004	BUWAL, 2001	Tab. 6.2.10	0,5 ; 0,2	1 ; 0,2		
Guidebook EEA 2003b, 2004	EPA, 1998a	Tab. 6.2.10	0,9			
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.10	0,5	40	40	380 ; 140
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.10	0,5	50 ; 30	50 ; 30	300 ; 200 ; 70
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.10	0,5	2,5 ; 15	2,5 ; 15	360 ; 140
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.10	0,5	2	30	300 ; 200 ; 80
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13		50	50	150 ; 200
CEPMEIP		Tab. 6.2.14	0,2	5	60	100 ; 150 ; 350
RAINS	Lükewille, 2001	Tab. 6.2.15a	0,2	5	60	100 ; 150 ; 350
RAINS	Klimont, 2002	Tab. 6.2.15b	0,03 - 0,2		1,7 - 38	
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	0,1 ; 0,2	0,2		150
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	3,5 ; 5,1			
IPCC		Tab. 6.4.1		172		

Valori riassuntivi

	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	0,03 - 3	0,2 - 50	1,5 - 60	70 - 350
Migliore stima	0,2	5	40	150

Tab. 7.8 Sintesi di fattori di emissione di PM10 per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
IRER	2002	Tab. 5.7		< 0,03 - 0,75		
CTN -ACE	Italia	Tab. 6.1.1	6,7	3,6	59	439
Guidebook EEA 2003b, 2004	Olanda	Tab. 6.2.11	0,3		4,5	120
Guidebook EEA 2003b, 2004	UK	Tab. 6.2.11	0,5 ; 0,3 ; 4,8 ; 0,2 ; 0,15		3,1	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UBA, 1989	Tab. 6.2.11	0,095		45	
Guidebook EEA 2003b, 2004	UBA, 1998	Tab. 6.2.11	0,095		8 - 27	
Guidebook EEA 2003b, 2004	CEPMEIP, 2002	Tab. 6.2.11	0,2		50 ; 5	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Berdowsky et al., 1997	Tab. 6.2.11			50 ; 30	
Guidebook EEA 2003b, 2004	BUWAL, 2001	Tab. 6.2.11	0,5 ; 0,2	1 ; 0,2		
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.11	0,5	40	40	330 ; 110
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.11	0,5	50 ; 30	50 ; 30	250 ; 150 ; 50
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.11	0,5	1,5 ; 10	1,5 ; 10	320 ; 110
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.11	0,5	1	20	260 ; 170 ; 60
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13		50	50	100 ; 150
CEPMEIP		Tab. 6.2.14	0,2	5	50	60 ; 140
RAINS	Lükewille, 2001	Tab. 6.2.15a	0,2	5	50	60 ; 140
RAINS	Klimont, 2002	Tab. 6.2.15b	0,03 - 0,2		0,9 - 24,7	
NAEI	UK	Tab. 6.2.16	3,1	0,23 ; 5,9	25	9,6 ; 323
BUWAL	Svizzera	Tab. 6.2.17	0,1 ; 0,2	0		90
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	3,5			

Valori riassuntivi

	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	0,03 - 3	0,2 - 50	1,5 - 60	10 - 400
Migliore stima	0,2	5	40	140

Tab. 7.9 Sintesi di fattori di emissione di PM2,5 per la combustione domestica (g/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Riferimento	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Guidebook EEA 2003b, 2004	CEPMEIP, 2002	Tab. 6.2.12	0,2		40 ; 5	
Guidebook EEA 2003b, 2004	Berdowsky et al., 1997	Tab. 6.2.12			30	
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	Tab. 6.2.12	0,5	40	40	310 ; 110
Guidebook EEA 2003b	default	Tab. 6.2.12	0,5	50 ; 30	50 ; 30	200 ; 150 ; 50
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	Tab. 6.2.12	0,5	1,5 ; 10	1,5 ; 10	320 ; 110
Guidebook EEA 2004	default	Tab. 6.2.12	0,5	1	20	260 ; 170 ; 60
UNECE-TFEIP	dati europei	Tab. 6.2.13		50	50	100 ; 150
CEPMEIP		Tab. 6.2.14	0,2	5	40	30 ; 70
RAINS	Lükewille, 2001	Tab. 6.2.15a	0,2	5	40	30 ; 70
RAINS	Klimont, 2002	Tab. 6.2.15b	0,03 - 0,2		0,7 - 9,5	
US-EPA	USA	Tab. 6.3.1	3,5			

Valori riassuntivi

	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Range	0,03 - 0,5	0,2 - 50	1,5 - 50	30 - 200
Migliore stima	0,2	5	30	70

Tabella 7.10 Sintesi di fattori di emissione di metalli pesanti per la combustione domestica (mg/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	Combustibile	Arsenico	Cadmio	Cromo	Cromo VI	Rame	Mercurio	Nickel	Piombo	Selenio	Zinco
US-EPA	USA	gas naturale	0,09	0,5	0,64		0,39	0,12	0,96	0,23	< 0,011	13
Guidebook EEA 2003b, 2004	AP-42, 1996 (distillate fuel oil)	gasolio	1,7	4,5	24		n.d.	1,2	7,4	3,8		n.d.
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	gasolio	1	1,5 ; 0,5	16 ; 13		8 ; 7	1	240 ; 260	16	0	9 ; 8
Guidebook EEA 2003b	default	gasolio	1	2 ; 0,3	20 ; 2		10 ; 3	1	300 ; 200	20 ; 10	0	10 ; 5
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	gasolio	1	1,8 ; 0,5	18 ; 11		9 ; 6,5	1	280 ; 250	18 ; 15	0	9 ; 7
Guidebook EEA 2004	default	gasolio	1	2 ; 0,3	20 ; 2		10 ; 3	1	300 ; 200	20 ; 10	0	10 ; 5
UNECE-TFEIP	dati europei	gasolio	3	0,3	5		3	1	300	10	0	5
NAEI	UK	gasolio						0,0023		1,62 ; 4,69		
Guidebook EEA 2003b, 2004	Pacyna 2001	olio	0,4	1,2	24		12	1,4	476	48		24
Guidebook EEA 2003b, 2004	Berdowsky 1997	olio	24	7,1	60		13	n.d.	833	24		24
Guidebook EEA 2003b, 2004	AP-42, 1996 (No6 fuel oil)	olio	3,6	0,9	0,2		4,8	0,2	229	4,0		79
Guidebook EEA 2003b, 2004	TNO, 1993 (PARCOPM-ATMOS)	olio	14	12	33		12	3,6	714	26		14
Guidebook EEA 2003b, 2004	authors estimate	olio	0,5	1,2	11		8,6	1,2	1.047	30		39
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	olio	1	1,5 ; 0,5	16 ; 13		8 ; 7	1	240 ; 260	16	0	9 ; 8
Guidebook EEA 2003b	default	olio	1	2 ; 0,3	20 ; 2		10 ; 3	1	300 ; 200	20 ; 10	0	10 ; 5
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	olio	1	1,8 ; 0,5	18 ; 11		9 ; 6,5	1	280 ; 250	18 ; 15	0	9 ; 7
Guidebook EEA 2004	default	olio	1	2 ; 0,3	20 ; 2		10 ; 3	1	300 ; 200	20 ; 10	0	10 ; 5
UNECE-TFEIP	dati europei	olio	3	0,3	5		3	1	300	10	0	5
NAEI	UK	olio						0,39		20		
US-EPA	USA	olio	4,1	1,2	2,6	0,77	5,5	0,35	263	4,7	2,1	91
Guidebook EEA 2003b, 2004	Pacyna 2001	carbone	8,3	4,2	71		58	21	83	42		63
Guidebook EEA 2003b, 2004	Berdowsky 1997	carbone	10	4,2	29		42	9,2	52	208		417
Guidebook EEA 2003b, 2004	AP-42, 1996 (High level of abatement)	carbone	8,3	1,2	5,4		n.d.	1,7	5,8	8,8		n.d.
Guidebook EEA 2003b, 2004	Domestic furnaces, 1996	carbone	6,7	6,7	n.d.		n.d.	n.d.	n.d.	28		n.d.
Guidebook EEA 2003b, 2004	IVD 1996 (Small consumers)	carbone	7,9	4,2	2,5		3,3	n.d.	n.d.	238		13
Guidebook EEA 2003b, 2004	authors estimate	carbone	125	1,7	52		58	8,3	22	54		225
Guidebook EEA 2003b, 2004	authors estimate	carbone	38	0,4	15		18	8,3	6,3	17		68
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	carbone	3	2	13		25	8	15	150	1,5	250
Guidebook EEA 2003b	default	carbone	5	3 ; 1	15		30 ; 10	10	20 ; 10	200 ; 100	2	300 ; 20
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	carbone	3 ; 4	2	12 ; 15		24 ; 19	8 ; 10	15 ; 14	150 ; 140	1,5 ; 2	240
Guidebook EEA 2004	default	carbone										
UNECE-TFEIP	dati europei	carbone	4 ; 5	0,7 ; 1	10 ; 15		7 ; 10	10 ; 15	7 ; 10	70 ; 100	1,5 ; 2	15 ; 20
NAEI	UK	carbone						3,6 ; 8,6		93 ; 213		
US-EPA	USA	carbone	3,1	1,2	463			2,1	430	147	21	

Tabella 7.11 Sintesi di fattori di emissione di diossine per la combustione domestica (ng/GJ)

Fonte	Dettaglio fonte	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
Guidebook EEA 2003b	metodologia sempl.	2	10	10	340
Guidebook EEA 2003b	default	2	10	10	400 ; 200
Guidebook EEA 2004	metodologia sempl.	2	10	10	800 ; 300
Guidebook EEA 2004	default	2	10	10	500 ; 400 ; 100
UNECE-TFEIP		2	10	10	100
US-EPA	USA, 1998			3,9	

Tab. 8.1 Sintesi dei range dei fattori di emissione

Inquinante	u.m.	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
SO ₂	g/GJ	0,22 - 0,5	9,7 - 150	69 - 150	60 - 2.252
NO _x	g/GJ	7,8 - 350	30 - 269	24 - 370	45 - 545
COV	g/GJ	0,5 - 10	0,1 - 15	1,1 - 48	3 - 600
CO	g/GJ	20 - 50	20 - 40	5 - 40	100 - 5.000
CO ₂	kg/GJ	52 - 58	73 - 75	73 - 78	90 - 105
PTS	g/GJ	0,03 - 3	0,2 - 50	1,5 - 60	70 - 350
PM10	g/GJ	0,03 - 3	0,2 - 50	1,5 - 60	10 - 400
PM2,5	g/GJ	0,03 - 0,5	0,2 - 50	1,5 - 50	30 - 200

Tab. 8.2 Sintesi delle migliori stime dei fattori di emissione

Inquinante	u.m.	gas naturale	gasolio	olio combustibile	carbone
SO ₂	g/GJ	0,5	100	150	650
NO _x	g/GJ	50	50	150	150
COV	g/GJ	5	3	10	200
CO	g/GJ	25	20	16	2000
CO ₂	kg/GJ	55	74	76	98
PTS	g/GJ	0,2	5	40	150
PM10	g/GJ	0,2	5	40	140
PM2,5	g/GJ	0,2	5	30	70