

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

DICAM

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO*

TESI DI LAUREA

in

Previsioni di impatto ambientale di impianti produttivi e di trattamento rifiuti M

**METODOLOGIA PER LA STIMA DELL'IMPATTO SULLA
QUALITÀ DELL'ARIA DI SORGENTI CIVILI DIFFUSE**

CANDIDATO
Andrea Angelini

RELATORE
Prof. Ing. Giacomo Antonioni

CORRELATORE
Ing. Eleonora Foschi

Anno Accademico 2016/17

Sessione III

Sommario

| | |
|--|----|
| 1. Introduzione..... | 3 |
| 2. Qualità dell'aria..... | 5 |
| 2.1 Normativa: il D.Lgs 155/2010..... | 5 |
| 2.2 La qualità dell'aria italiana: i principali inquinanti e relativo trend | 6 |
| 2.3 Qualità dell'aria Emilia-Romagna..... | 28 |
| 2.4 Come misurare i contributi dei vari macrosettori alle emissioni..... | 31 |
| 3. Sorgenti civili: Contributo del riscaldamento alla qualità dell'aria | 42 |
| 3.1 Inquinanti emessi dal settore riscaldamento | 42 |
| 3.2 Tipologie di riscaldamento | 44 |
| 3.3 Impianti a gas naturale..... | 50 |
| 3.4 Normativa riscaldamento edifici civili..... | 53 |
| 4. Caso studio: studio emissivo dei fumi da riscaldamento della Facoltà di Ingegneria sita in Via Terracini | 57 |
| 4.1 Metodologia per la stima delle emissioni da impianti di riscaldamento..... | 58 |
| 4.1.1 Calcolo emissioni tramite fattori di emissione..... | 60 |
| 4.2 Simulazione dispersione emissioni tramite CALPUFF | 68 |
| 4.2.1 Risultati simulazione CALPUFF | 72 |
| 4.3 Metodo alternativo: stima delle emissioni tramite sensore per gas..... | 77 |
| 5. Conclusioni | 86 |
| Allegato A | 89 |
| Allegato B | 92 |
| Allegato C | 94 |
| Allegato D..... | 96 |
| Bibliografia | 98 |

1. Introduzione

La qualità dell'aria è un argomento a cui si presta più attenzione ogni anno che passa, essendo sempre più numerosi gli studi che attestano come l'inquinamento atmosferico sia una delle maggiori criticità a livello mondiale, sia dal punto di vista ambientale sia in termini di salute umana. Per queste ragioni, normative via via più stringenti sono state introdotte nel corso degli ultimi decenni per ridurre le emissioni inquinanti. Affinché siano efficaci è però necessario individuare in modo corretto le cause principali di inquinamento, per poter così intervenire in modo specifico e accurato. Le principali sorgenti antropiche di inquinamento sono rappresentate dai settori industriali, del trasporto e del riscaldamento. I primi due settori sono stati oggetto di numerose regolamentazioni in tutti i paesi industrializzati a partire dagli anni '70; gli impianti industriali sono stati i primi ad essere soggetti a limiti alle emissioni ed all'obbligo di adottare tecnologie atte a ridurre la produzione di sostanze inquinanti o ad abatterle prima della loro immissione in atmosfera, ma anche il settore autotrazione ha visto una costante e progressiva riduzione delle sue emissioni specifiche, grazie a legislazioni che hanno incentivato il ricambio del parco di autoveicoli circolanti e indirizzato lo sviluppo di mezzi via via meno inquinanti. Come conseguenza di ciò, in un panorama di progressiva riduzione delle emissioni inquinanti totali, il peso relativo del settore del riscaldamento degli edifici è andato crescendo, divenendo uno dei contributi preponderanti per molti dei principali inquinanti atmosferici. In questo settore, infatti, le politiche sono state meno incisive e meno univoche nel porre l'aspetto ambientale al centro delle scelte di sviluppo. Se da un lato il progresso nella tecnologia ha portato alla produzione di apparecchi e impianti intrinsecamente più efficienti e meno inquinanti, dall'altro si sono prodotte ed in parte favorite o incentivate delle transizioni dagli effetti ambivalenti o globalmente negativi sul piano ambientale. In quest'ottica va considerato il processo di *fuel switching* dai combustibili liquidi (olio combustibile e gasolio) verso quelli gassosi (gas naturale e GPL), ma contestualmente anche verso la biomassa solida e ugualmente va considerata la progressiva transizione da impianti centralizzati a impianti mono-famigliari. Inoltre, anche stimare il contributo alle emissioni di questo settore è meno immediato degli altri due, non perché sia più complesso, ma perché i dati sono in genere meno disponibili. A conferma di ciò, per quanto riguarda le sorgenti industriali ogni impianto che produce emissioni in atmosfera è sottoposto ad autorizzazioni specifiche ed a monitoraggi continui o periodici delle concentrazioni degli inquinanti in tutti i flussi gassosi convogliati prodotti dall'impianto stesso. Mentre è più complessa, ma comunque oggetto di maggior approfondimento è la

stima nel caso delle sorgenti da traffico, in questo caso i fattori di emissione di ciascuna tipologia di veicolo devono essere combinati con informazioni statistiche relative alla flotta circolante ed all'intensità di traffico nell'area di riferimento.

Nel Capitolo 2 della presenti Tesi si è illustrato lo stato della qualità dell'aria a livello italiano e nella Regione Emilia-Romagna, focalizzando l'attenzione sul rispetto dei limiti di legge dei principali inquinanti atmosferici proposti dal D.lgs 155/2010, mostrando la percentuale di popolazione soggetta a valori di inquinanti maggiori di quelli stabiliti per legge, ma anche di quella esposta a valori maggiori di quelli consigliati dall'OMS per la protezione della salute umana. Per ciascun inquinante si sono poi analizzate le emissioni atmosferiche annuali nel periodo 1990-2014, ripartendole per settore di provenienza ed evidenziando in particolar modo il contributo della combustione non industriale, ovvero quella impiegata principalmente per il riscaldamento residenziale e commerciale. Infine si è mostrata la metodologia di riferimento per la realizzazione degli inventari delle emissioni in atmosfera che sono stati consultati.

Nel Capitolo 3 si è analizzato più nel dettaglio il settore del riscaldamento di edifici civili, indicando gli inquinanti emessi, le varie tipologie di riscaldamento disponibili e la normativa che regola il settore. Si è anche illustrata la distribuzione delle classi di efficienza energetica degli edifici dell'Emilia-Romagna, uno degli aspetti su cui è importante intervenire al fine di ridurre l'impatto inquinante degli stessi. Un paragrafo è invece dedicato all'approfondimento degli impianti alimentati a gas naturale, essendo di questo tipo quelli analizzati nel caso studio.

L'ultimo capitolo, il 4, è dedicato ad illustrare i possibili metodi di stima delle emissioni degli impianti civili, applicando poi il metodo tramite fattori di emissione al caso studio degli impianti di riscaldamento degli edifici facenti parte della Scuola di Ingegneria e Architettura situata a Bologna in via Terracini 28. Una volta stimate le emissioni, si è valutata la dispersione delle stesse mediante l'impiego del software Calpuff, considerando come periodo di riferimento il mese di dicembre. Infine, tramite il software Surfer, si è data una visualizzazione grafica dei risultati ottenuti.

2. Qualità dell'aria

2.1 Normativa: il D.Lgs 155/2010

Il Decreto Legislativo del 13 agosto 2010, n.155 - recepimento della direttiva europea 2008/50/CE - introduce importanti novità nell'ambito del complesso e stratificato quadro normativo in materia di qualità dell'aria in ambiente, introducendo nuovi strumenti che si pongono come obiettivo di contrastare più efficacemente l'inquinamento atmosferico. Oltre a fornire una metodologia di riferimento per la caratterizzazione delle zone (zonizzazione), definisce i valori di riferimento che permettono una valutazione della qualità dell'aria, su base annuale, in relazione alle concentrazioni dei diversi inquinanti. In particolare vengono definiti [1]:

Valore Limite (VL): Livello che deve essere raggiunto entro un termine prestabilito e che non deve essere successivamente superato.

Valore Obiettivo: Livello da conseguire, ove possibile, entro una data prestabilita.

Livello Critico: Livello oltre il quale possono sussistere rischi o danni per ecosistemi e vegetazione, non per gli esseri umani.

Margine di Tolleranza: Percentuale del valore limite entro la quale è ammesso il superamento del Valore Limite.

Soglia di Allarme: Livello oltre il quale sussiste pericolo per la salute umana, il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive.

Soglia di Informazione: Livello oltre il quale sussiste pericolo per la salute umana per alcuni gruppi sensibili, il cui raggiungimento impone di assicurare informazioni adeguate e tempestive.

Obiettivo a lungo termine: Livello da raggiungere nel lungo periodo mediante misure proporzionate.

Indicatore di esposizione media: Livello da verificare sulla base di selezionate stazioni di fondo nazionali che riflette l'esposizione media della popolazione.

Obbligo di concentrazione dell'esposizione: Livello da raggiungere entro una data prestabilita.

Obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione: Riduzione percentuale dell'esposizione media rispetto ad un anno di riferimento, da raggiungere entro una data prestabilita.

I valori limite per ogni inquinante sono esplicitati in apposite tabelle, riportate nell'allegato A.

La registrazione del superamento della soglia di informazione o di allarme comporta l'obbligo, per la Regione (art.14 comma 1), di fornire al pubblico informazioni relativamente a:

- superamenti registrati (località, tipo di soglia superata, data, ora di inizio e durata del fenomeno, concentrazione oraria più elevata e concentrazione media più elevata sulle 8 ore);
- previsioni sull'evoluzione del fenomeno con l'indicazione dell'area geografica prevedibilmente interessata dai superamenti;
- informazioni sui settori colpiti della popolazione e sui possibili effetti sulla salute e sulla condotta raccomandata (informazione sui gruppi di popolazione a rischio; descrizione dei sintomi riscontrabili gruppi di popolazione a rischio; precauzioni che i gruppi interessati devono prendere; riferimenti per ottenere ulteriori informazioni);
- informazioni sulle azioni preventive per la riduzione dell'inquinamento e/o per la riduzione dell'esposizione all'inquinamento con l'indicazione dei principali settori cui si riferiscono le fonti e delle azioni raccomandate per la riduzione delle emissioni.

Il D.Lgs 155/2010 introduce importanti novità anche nella metodologia di riferimento per la caratterizzazione delle zone, zonizzazione che rimane comunque presupposto di riferimento e passaggio decisivo per le successive attività di valutazione e pianificazione. Per prima cosa devono essere individuati gli agglomerati e quindi le altre zone omogenee. Il processo di zonizzazione si fonda sull'analisi del carico emissivo e del grado di urbanizzazione del territorio, oltre alle caratteristiche orografiche e meteo-climatiche. Sono previsti tempi di attuazione ed una valutazione sovra-ordinata (Ministero Ambiente) dei progetti regionali.

2.2 La qualità dell'aria italiana: i principali inquinanti e relativo trend

L'inquinamento atmosferico è definito all'articolo 268 del D.Lgs 152/2006 come "Ogni modificazione dell'aria atmosferica dovuta all'introduzione nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da ledere o costituire un pericolo per la salute umana o per la qualità dell'ambiente o ledere i beni materiali o compromettere gli usi legittimi dell'ambiente"[2].

Nel seguente paragrafo si analizzano i principali inquinanti atmosferici, riportando per ciascuno di essi una breve descrizione degli stessi e degli effetti che possono

provocare all'uomo e all'ambiente; l'analisi della situazione italiana; il contributo delle diverse sorgenti alle emissioni di ciascun inquinante e l'andamento delle emissioni nel corso degli anni; infine sono stati riportati i risultati di uno studio che ha analizzato in modo quantitativo il trend delle concentrazioni per il periodo 2003-2012. I risultati dell'analisi statistica dei trend sono coerenti con le stime dell'andamento delle emissioni, ed è possibile individuare una relazione di tipo lineare tra emissioni e concentrazioni in aria per quasi tutti gli inquinanti. Vi è solo il caso della mancata riduzione delle concentrazioni di ozono, spiegabile, almeno in parte, con la sua natura di inquinante secondario per il quale manca una relazione di proporzionalità diretta con la riduzione delle emissioni dei precursori.

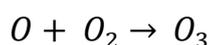
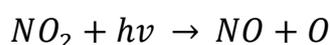
Ossidi di azoto (NO_x)

Durante i processi di combustione, l'azoto presente nell'aria (o nel combustibile stesso) reagisce con l'ossigeno quando le temperature sono molto alte, determinando l'emissione di NO₂, ma soprattutto di NO (monossido di azoto), che tende poi a trasformarsi in atmosfera in NO₂; per questo, quando si stimano le emissioni si parla di NO_x, dove la x sta a indicare una miscela di NO e NO₂, oltre a piccole percentuali di altri ossidi.

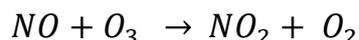
Il biossido di azoto è quattro volte più tossico del monossido. I danni provocati da NO₂ sulla salute dell'uomo si manifestano a livello polmonare: tende a dilatare i vasi sanguigni nei polmoni e, in certe concentrazioni, produce alterazioni gravissime nella circolazione polmonare; sono frequenti anche irritazioni alle mucose e agli occhi e nefriti croniche.

Per quanto concerne gli effetti di tali sostanze sull'ambiente, si sono registrati danni all'accrescimento delle piante e un aumento dell'acidificazione delle precipitazioni piovose (le cosiddette "piogge acide") reagendo con l'acqua e originando acido nitrico.

Il monossido di azoto è parzialmente solubile in acqua e presenta una deposizione quasi nulla, il che significa tempi lunghi di permanenza in atmosfera. Al contrario NO₂ è poco solubile in acqua ed è soggetto a deposizione secca sui vegetali. Sempre il biossido è responsabile dello "smog fotochimico", che si produce in presenza di intensa radiazione solare; con aria immobile si innescano reazioni che lo trasformano in protossido di azoto, con produzione di ozono:



Nella stagione fredda, l'ozono originatesi è consumato quasi interamente nella trasformazione dell'ossido d'azoto in biossido:



Nella stagione calda, invece, l'irraggiamento solare può dare luogo ad altre reazioni fotochimiche, che determinano una maggiore produzione di biossido. La concentrazione di ozono, in ogni caso, ha un andamento inversamente proporzionale alla concentrazione di ossido d'azoto. Per questo motivo il monitoraggio degli NO_x dovrebbe accompagnare anche quello dell'ozono, essendo gli NO_x annoverati tra i precursori dell'ozono troposferico [3].

Per il biossido di azoto, il D. Lgs. 155/2010 stabilisce per la protezione della salute umana un valore limite orario ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di concentrazione media oraria da non superare più di 18 volte in un anno) e un valore limite annuale ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sono disponibili dati per il 2016 relativi a 102 aree urbane, da cui si può notare che il limite orario (non più di 18 superamenti di $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) è stato rispettato in tutte le aree urbane, con il caso limite di proprio 18 superamenti registrati a Trento e Venezia. Il valore limite annuale di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ è stato superato in 21 aree urbane e la concentrazione media più alta ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) è stata raggiunta a Torino [4].

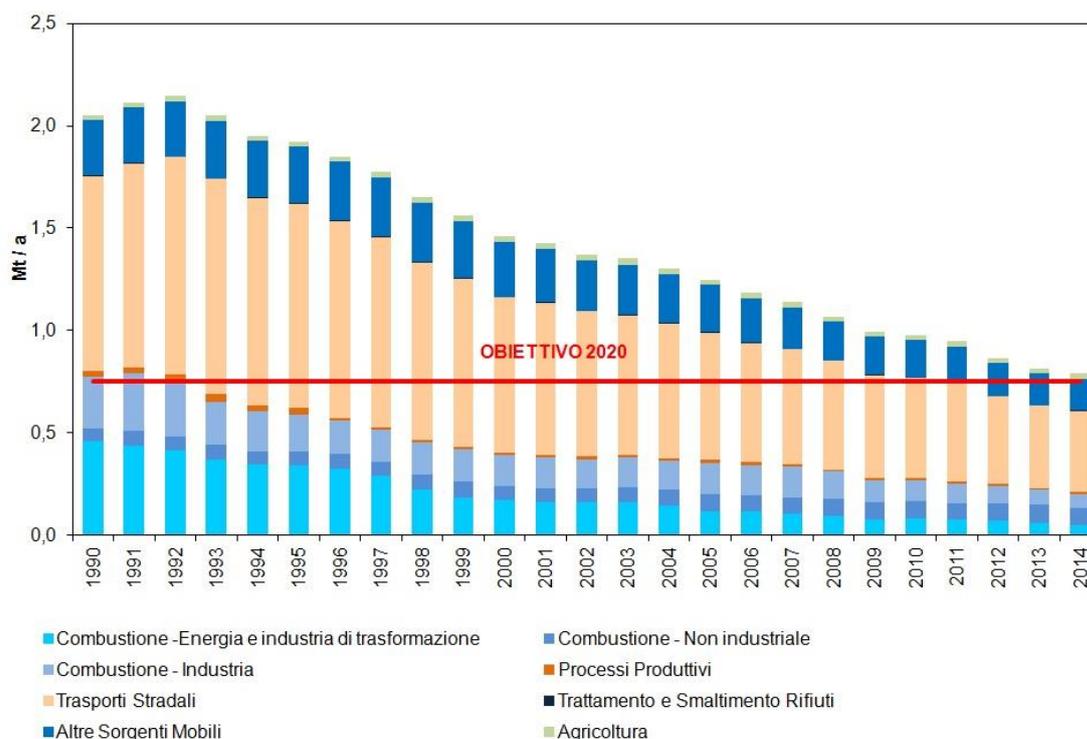


Grafico 2.1: Andamento delle emissioni nazionali per settore di provenienza degli ossidi di azoto (NO_x) dal 1990 al 2014 [5]

Nel periodo 1990-2014 le emissioni di NO_x registrano una marcata riduzione (61,5%, da 2050 Gg a 790 Gg) soprattutto grazie alla forte diminuzione delle emissioni nel settore dei trasporti; ciò permette di essere in linea con gli obiettivi stabiliti dalla normativa europea sin dal 2010. Il settore del trasporto stradale emette in modo costante circa la metà delle emissioni di ossidi di azoto dal 1990; a partire dal 1993 il *trend* crescente di queste emissioni si inverte e si riducono a fine periodo, nel 2014, del 58,6% rispetto al 1990. Le emissioni di NO_x delle modalità di trasporto diverse da quello stradale tendono a crescere fino al 1998 per poi ridursi del 46,7% nel periodo 1998-2014 e mantengono comunque dal 1998 una quota costante, in media, del 18% del totale delle emissioni. L'altro settore chiave per questa sostanza è quello della combustione per la produzione di energia e dell'industria di trasformazione che dal 1990 al 2014 riduce le emissioni dell'88,6% e riduce progressivamente il suo peso sul totale da valori intorno al 20% fino ai primi anni 90, al 7% nel 2014. Per quanto riguarda le emissioni degli altri settori della combustione, industriale e non industriale, solo quelle della combustione industriale decrescono in maniera significativa, mentre quelle della combustione non industriale sono in crescita dal 1994, sebbene vengano rilevate delle flessioni significative negli anni 2000, 2011 e 2014; i due settori della combustione pesano complessivamente per circa il 19,1% del totale nel 2014 [5].

Dall'analisi di 62 stazioni di monitoraggio si è analizzato il trend delle concentrazioni in aria di NO_x nel periodo 2003-2012. È stato individuato un trend decrescente statisticamente significativo nel 74% dei casi (49 stazioni di monitoraggio su 62); un trend crescente statisticamente significativo è stato individuato in un solo caso a Firenze. Nel restante 16,1% dei casi (12 stazioni di monitoraggio su 62) non è stato possibile escludere l'ipotesi nulla (assenza di trend) per il dato livello di confidenza (95%) [6].

Monossido di carbonio (CO)

Il monossido di carbonio è l'inquinante gassoso più abbondante in atmosfera e si forma da tutte le combustioni incomplete. Nelle condizioni ideali della combustione si dovrebbe formare esclusivamente diossido di carbonio (CO_2), ma nella realtà le combustioni non sono mai complete e si forma anche il monossido di carbonio.

Il monossido di carbonio provoca effetti trascurabili sull'ambiente, mentre è da ritenersi estremamente pericoloso per la salute dell'uomo. Infatti la sua presenza riduce la capacità di ossidazione dei tessuti; i sintomi di avvelenamento sono nausea, mal di testa, stordimento, difficoltà respiratorie. Grandi concentrazioni

possono essere letali: esso viene assorbito dagli alveoli polmonari dove, legandosi con l'emoglobina del sangue, forma la carbossiemoglobina che impedisce il trasporto di ossigeno e perciò l'ossigenazione dei tessuti. È stato dimostrato che esposizioni prolungate già a 20 ppm di CO sono sufficienti per innalzare del 3% il contenuto di carbossiemoglobina nel sangue. Aggrava, inoltre, le malattie cardiovascolari e riduce la percezione visiva [3].

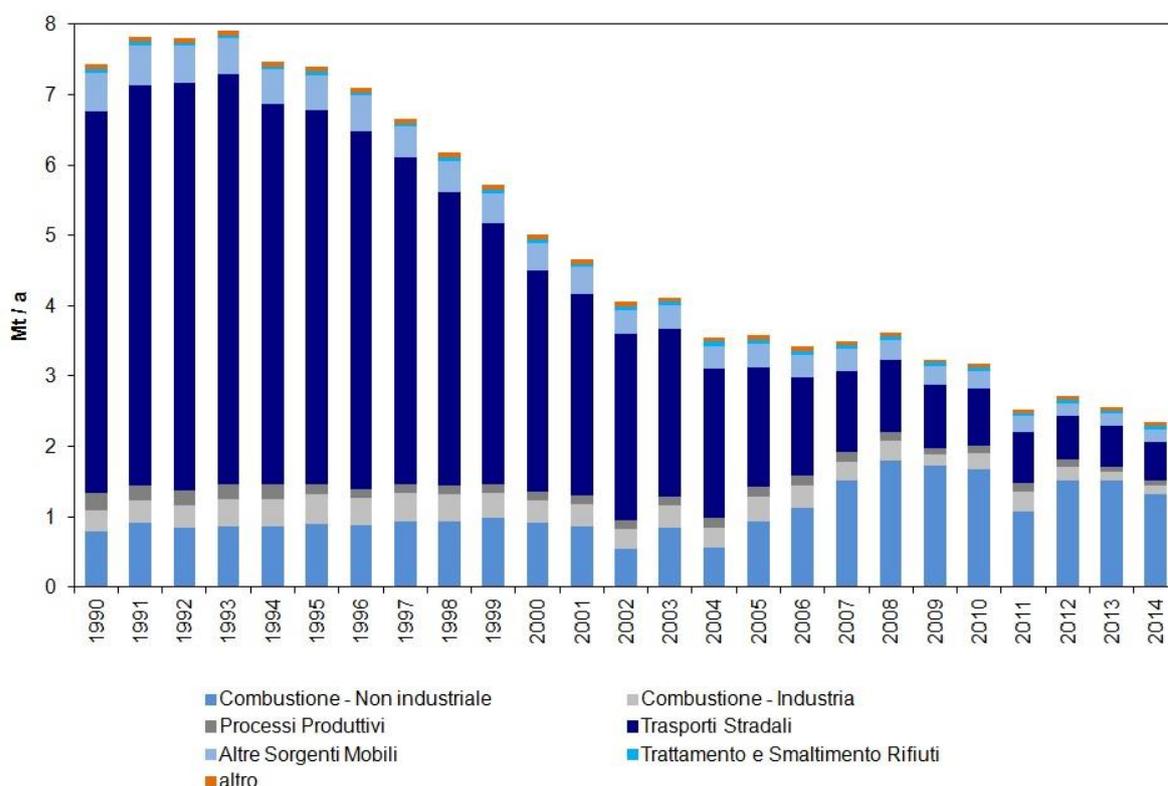


Grafico 2.2: Andamento delle emissioni nazionali per settore di provenienza di monossido di carbonio dal 1990 al 2014 [5]

Complessivamente le emissioni di monossido di carbonio risultano in diminuzione, soprattutto a partire dai primi anni 90 (-68,5% tra il 1990 e il 2014, da 7430 Gg a 2340 Gg). Questo andamento è dovuto in gran parte all'evoluzione delle emissioni del settore del trasporto stradale, che cessano di crescere dal 1994, e si riducono tra il 1990 e il 2014 del 89,9%, grazie soprattutto al rinnovo del parco veicolare; negli anni 80 e 90 questo settore ha contato in media per circa tre quarti del totale delle emissioni di CO, per poi ridursi al 23,4% nel 2014. La riduzione della quota di emissioni attribuibile a questa modalità di trasporto è stata compensata dalla crescita delle emissioni dei processi della combustione non industriale sia per quanto riguarda la quota sul totale di questo settore (mai oltre il 20% fino al 2002, per poi raggiungere la quota del 56,4% nel 2014) sia per l'andamento delle emissioni, notevolmente aumentate dal 1980 al 2014 (circa il 408%); bisogna

notare comunque che la crescita delle emissioni negli anni più recenti, è dovuta alla considerevole crescita del consumo di legna ad uso riscaldamento in conseguenza di una revisione del dato stesso di consumo, revisione non applicata ancora a tutta la serie storica. Nel 2014 gli altri settori rilevanti per il loro peso sul totale sono i trasporti diversi da quello stradale e i processi di combustione in ambito industriale, che contribuiscono sul totale delle emissioni con il 8,2% e il 5,1%, rispettivamente. Per quanto riguarda l'andamento delle emissioni di CO di questi due settori, le emissioni dalle altre sorgenti mobili e quelle che derivano dal settore della combustione industriale si riducono dal 1990 rispettivamente del 66,3% e del 61,3% [5].

Dal punto di vista dell'analisi del trend delle concentrazioni in aria relativa a 42 stazioni di monitoraggio, l'analisi statistica evidenzia che nel periodo 2003-2012 in 35 casi su 42 si osserva una tendenza decrescente. In nessun caso è stato evidenziato un trend crescente, mentre nei restanti 7 casi non è stato evidenziato un trend statisticamente significativo [6].

Particolato aerodisperso - PM10

Per materiale particolato aerodisperso s'intende l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese in aria ambiente. Il termine PM10 identifica le particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 10 μm . Si tratta di un inquinante dalla natura chimico-fisica complessa, alla cui costituzione contribuiscono più sostanze. In parte è emesso in atmosfera come tale direttamente dalle sorgenti (PM10 primario) e in parte si forma in atmosfera attraverso reazioni chimiche fra altre specie inquinanti (PM10 secondario). Il PM10 può avere sia origine naturale sia antropica: tra le sorgenti antropiche un importante ruolo è rappresentato dal traffico veicolare.

Tra gli inquinanti atmosferici il particolato è quello con il maggior impatto sulla salute umana. Vari studi epidemiologici sugli effetti sanitari dell'inquinamento atmosferico da particelle, hanno evidenziato associazioni tra le concentrazioni in massa del PM10 e un incremento sia di mortalità che di ricoveri ospedalieri per malattie cardiache e respiratorie nella popolazione generale. I soggetti ritenuti maggiormente sensibili a tali effetti sono in particolare, gli anziani, i bambini, le persone con malattie cardiopolmonari croniche e affette da influenza o asma; su di essi si concentrano incrementi di mortalità e seri effetti patologici a seguito di esposizioni acute a breve termine. Ulteriori evidenze sono emerse considerando gli effetti sanitari a lungo termine conseguenti all'esposizione a basse concentrazioni di PM10. Tali effetti riguardano la mortalità ed altre patologie croniche come la

bronchite e la riduzione della funzione polmonare. Anche l'incremento di tumore polmonare è stato associato recentemente all'inquinamento ambientale, ed in particolare alla frazione fine dell'aerosol: il materiale particolato aerodisperso è stato inserito dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) tra i cancerogeni di gruppo 1 (agenti sicuramente cancerogeni per l'uomo) [4].

La direttiva 2008/50/CE e il D.Lgs 155/2010 stabiliscono per il PM10, ai fini della protezione della salute umana, un valore limite annuale di 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e un valore limite giornaliero di 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 35 volte in un anno.

Nel 2017 in 39 capoluoghi di provincia italiani è stato superato, almeno in una stazione ufficiale di monitoraggio della qualità dell'aria di tipo urbano, il limite annuale per le polveri sottili di 35 giorni con una media giornaliera superiore a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Di questi, ben 24 hanno superato più del doppio il limite previsto per legge, mentre in 5 capoluoghi si sono superati addirittura i 100 giorni nell'anno. Situazione allarmante e diffusa specialmente nelle zone della pianura padana: 31 dei 36 capoluoghi di provincia totali presenti nelle quattro regioni del nord (Piemonte, Lombardia, Veneto ed Emilia Romagna), hanno sfiorato il limite annuo ad eccezione di Cuneo, Verbania, Sondrio, Belluno e Cesena. Ma la cosa che desta maggior preoccupazione è che dei 31 capoluoghi del nord che hanno superato (abbondantemente) il limite annuo, è l'85% delle centraline presenti in area urbana (65 su 76) ad aver rilevato concentrazioni oltre il consentito. Nelle altre regioni male le stazioni delle città campane di Caserta (De Amicis) Avellino (Alighieri) e Napoli (Ferrovia) che hanno superato il limite giornaliero rispettivamente per 53, 49 e 43 volte e Terni in Umbria con 48 giorni. Pordenone (Centro) e Trieste (Mezzo mobile) in Friuli Venezia Giulia chiudono la speciale classifica delle città fuorilegge con 39 e 37 giornate, insieme a Pesaro nelle Marche con 38 [7].

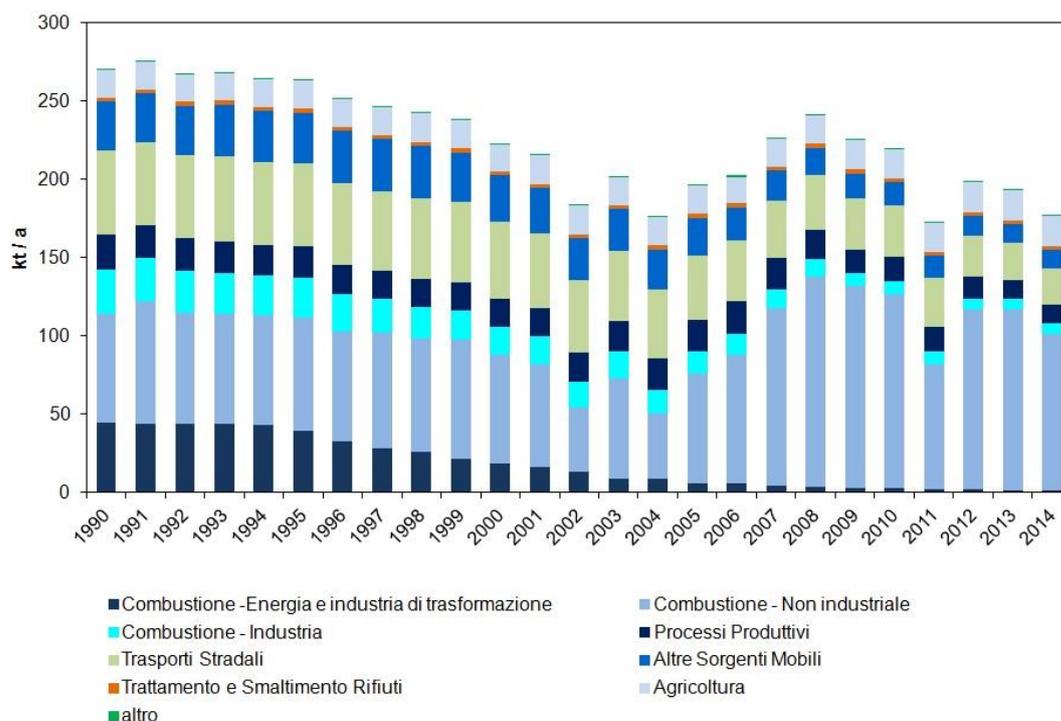


Grafico 2.3: Andamento delle emissioni nazionali per settore di provenienza del particolato (PM10) dal 1990 al 2014 [5]

Le emissioni nazionali di PM10 si riducono nel periodo 1990-2014 del 34,5%, passando da 270 Gg a 177 Gg. Il settore del trasporto stradale presenta una riduzione nel periodo pari al 56,9% e contribuisce alle emissioni totali con una quota emissiva del 13,1% nel 2014. Le emissioni provenienti dalla combustione non industriale (+45,9% dal 1990 al 2014) rappresentano nel 2014 il settore più importante con il 56,7% delle emissioni totali. Gli altri processi di combustione presentano, nel medesimo periodo, rilevanti riduzioni delle emissioni di particolato. In particolare, le emissioni nei processi di combustione per la produzione di energia e nell'industria di trasformazione decrescono del 97,2%; va notato che questo settore pesa sempre meno sul totale negli ultimi anni (0,7% nel 2014), contro una media di circa il 15% fino al 1998. I processi di combustione nell'industria riducono le proprie emissioni del 77,1%, con un peso sul totale delle emissioni pari al 3,7% nel 2014. Nel 2014 le emissioni dalle attività agricole, dai processi produttivi e dalle altre sorgenti mobili pesano rispettivamente il 10,7%, il 6,8% e il 6,6% sul totale; ma solo quelle dai processi produttivi e dalle altre sorgenti mobili hanno una significativa riduzione dal 1990 (-45,5% e - 62,8% rispettivamente), mentre le emissioni dall'agricoltura mostrano un andamento in crescita dal 1990 al 2014 (+6,8%). Le emissioni legate al trattamento e allo smaltimento dei rifiuti hanno mantenuto pressoché stabile a partire dal 1990 sia la quota sul totale delle emissioni di particolato (circa 1%), sia l'andamento [5].

L'analisi sul trend delle concentrazioni in aria condotta su un campione di 57 stazioni di monitoraggio sul territorio nazionale, distribuite in 10 regioni ha evidenziato che si ha un trend decrescente delle concentrazioni nel 73,7% dei casi (42 stazioni di monitoraggio su 57); un trend crescente statisticamente significativo è stato individuato nel 5,3% dei casi (3 stazioni di monitoraggio su 57); nel restante 21% dei casi (12 stazioni di monitoraggio su 57) non è stato possibile escludere l'ipotesi nulla (assenza di trend) per il dato livello di confidenza (95%) [6].

Particolato aerodisperso - PM2,5

Il D.Lgs. 155/2010 ha introdotto un valore limite per la protezione della salute umana anche per la frazione fine o respirabile del materiale particolato (PM2,5), tenuto conto delle evidenze sanitarie che attribuiscono un ruolo determinante alle particelle più piccole: si tratta dell'insieme delle particelle aerodisperse aventi diametro aerodinamico inferiore o uguale a 2,5 µm. Date le ridotte dimensioni esse, una volta inalate, penetrano in profondità nel sistema respiratorio umano e, superando la barriera tracheo-bronchiale, raggiungono la zona alveolare.

Come il PM10, anche il particolato PM2,5 è in parte emesso come tale direttamente dalle sorgenti in atmosfera (PM2,5 primario) ed è in parte formato attraverso reazioni chimiche fra altre specie inquinanti (PM2,5 secondario).

La concentrazione di massa del PM2,5 è dominata dalle particelle del *modo di accumulazione*, ovvero quelle particelle nell'intervallo dimensionale da circa 0,1 µm a circa 1 µm. Il particolato secondario, formato in atmosfera a partire da gas precursori o per fenomeni di aggregazione di particelle più piccole, o per condensazione di gas su particelle che fungono da coagulo, può rappresentare una quota rilevante della concentrazione di massa osservata.

L'emissione diretta di particolato fine è associata a tutti i processi di combustione, in particolare quelli che prevedono l'utilizzo di combustibili solidi (carbone, legna) o distillati petroliferi con numero di atomi di carbonio medio-alto (gasolio, olio combustibile). Particelle fini sono dunque emesse dai gas di scarico dei veicoli a combustione interna, degli impianti per la produzione di energia e dai processi di combustione nell'industria, dagli impianti per il riscaldamento domestico, dagli incendi boschivi.

La normativa attualmente in vigore stabilisce per il PM_{2,5} un valore limite di 25 µg/m³ da raggiungere entro il 1° gennaio 2015. I dati disponibili per il 2016 sono relativi a 80 aree urbane. Il valore limite è superato in 7 aree urbane, tutte localizzate al Nord tranne Terni. Il valore più elevato, 30 µg/m³, è stato registrato a Padova [4].

Il trend delle emissioni di PM_{2,5} è decrescente dal 1990 al 2012 con una variazione da 206 Gg a 126 Gg pari a -39% (-16% dal 2003). Da segnalare che nell'ambito della revisione del "*Multieffect protocol*" della Convenzione UNECE/CLRTAP è stato assegnato un obiettivo di riduzione pari al 17% del valore del 2005 da raggiungere entro il 2020. In particolare, le emissioni dai trasporti su strada, che sono pari al 17% del totale, decrescono del 57% mentre le emissioni dalle altre sorgenti mobili, pari al 10% del totale nel 2012, decrescono del 58%. Come nel caso del PM₁₀ il riscaldamento costituisce la maggiore fonte di emissione crescendo dal 1990 al 2012 del 122% [6].

Per quanto riguarda il trend delle concentrazioni in aria non sono disponibili informazioni di lungo periodo per quanto riguarda il PM_{2,5}.

Ozono troposferico (O₃)

L'ozono troposferico è un inquinante secondario che si forma attraverso processi fotochimici in presenza di inquinanti precursori. I principali precursori coinvolti nella formazione dell'O₃ sono gli ossidi di azoto (NO_x) ed i Composti Organici Volatili non metanici (COVNM) che possono essere di origine antropica (combustioni, evaporazione di solventi organici) o derivare da sorgenti naturali di emissione (incendi, vegetazione, suolo). Le reazioni che portano alla formazione di O₃ sono reazioni fotochimiche e quindi le concentrazioni dell'inquinante aumentano con l'aumentare di radiazione solare e temperatura, determinando un gradiente geografico e periodicità stagionali e giornaliere (aumento nel periodo estivo e nelle ore del giorno immediatamente successive a quelle di massimo irraggiamento solare). Dopo il particolato, l'ozono è l'inquinante atmosferico che, per tossicità e per i livelli di concentrazione che possono essere raggiunti, incide maggiormente sulla salute umana e la sua pericolosità viene spesso sottovalutata, nonostante le stime dell'Agenzia Ambientale Europea (EEA) riportino 13.600 morti premature riconducibili all'ozono in Europa nel 2015, di cui 2.900 solo in Italia [7]. Può causare seri problemi anche all'ecosistema, all'agricoltura e ai beni materiali.

Il D.Lgs. 155/2010 definisce per l'ozono ai fini della protezione della salute umana un obiettivo a lungo termine (OLT, pari a $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, calcolato come valore massimo giornaliero della media della concentrazione di ozono su 8 ore consecutive), una soglia di informazione ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e una soglia di allarme ($240 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entrambe come media oraria.

I dati disponibili per il 2016 sono relativi a 91 aree urbane; i dati relativi al periodo estivo 2017 sono relativi a 96 aree urbane. L'OLT è superato in 80 aree urbane su 91. In 42 aree urbane l'OLT è stato superato per meno di 25 giorni, mentre in 38 aree urbane (per lo più nel Nord Italia) si è registrato un numero di giorni di superamento dell'OLT superiore a 25. Nel 2016 sono stati registrati superamenti della soglia di allarme in 5 aree urbane: Genova, Varese, Lecco, Bergamo e l'agglomerato di Milano [4].

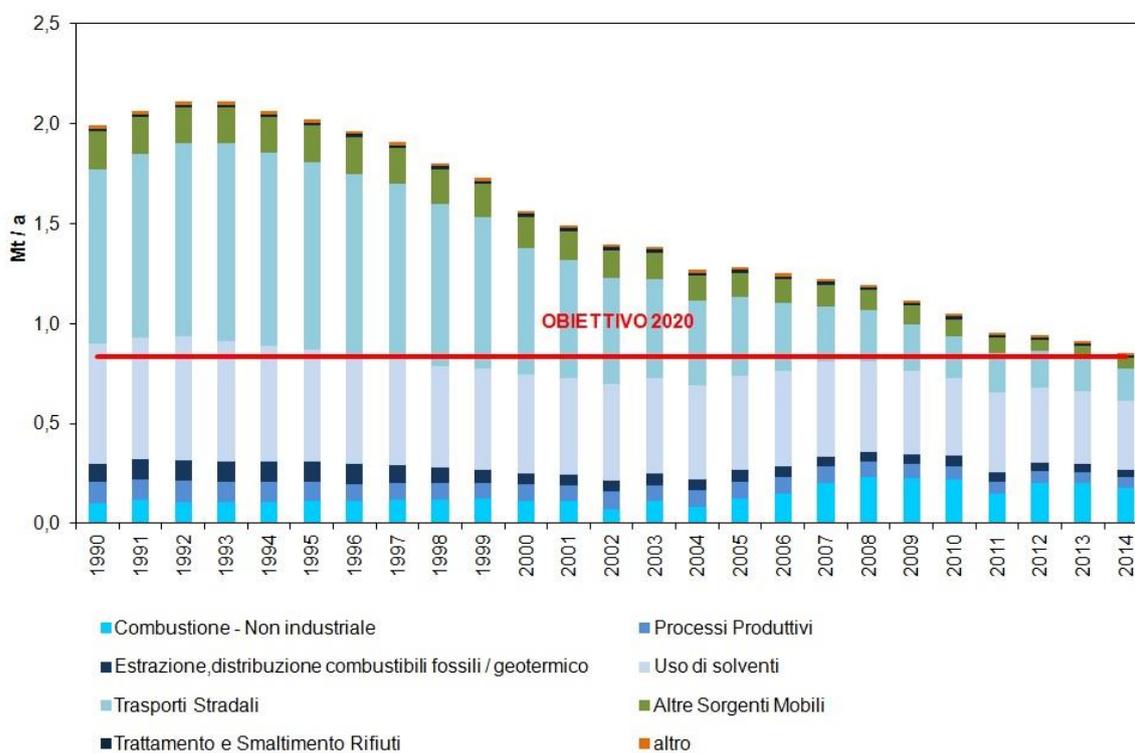


Grafico 2.4: Andamento delle emissioni nazionali per settore di provenienza di Composti organici volatili non metanici (COVNM) dal 1990 al 2014 [5]

Per valutare il trend delle emissioni si fa riferimento ai precursori dell'ozono, in particolare NO_x e COVNM. L'andamento degli NO_x è già stato analizzato precedentemente; per quanto riguarda le emissioni di COVNM nel periodo 1990-2014 registrano una marcata riduzione (57,3%, da 1989 Gg a 849 Gg) soprattutto grazie alla forte diminuzione delle emissioni nel settore dei trasporti; ciò permette

di essere in linea sin dal 2009 con gli obiettivi stabiliti dalla normativa europea. Le emissioni di COVNM mostrano che il settore dei trasporti stradali, che dagli anni ottanta fino al 2000 ha avuto un peso compreso tra il 50% ed il 40% delle emissioni totali prodotte, nel 2014 contribuisce al 18,9% delle emissioni; inoltre, il loro andamento denota una costante decrescita dal 1994 al 2014 (decescono dell' 81,5%). Le emissioni derivanti dall'uso di solventi sono cresciute di peso rispetto a quelle degli altri settori, fino a raggiungere nel 2014 un peso sul totale pari a 40,5%; ma nel periodo considerato anch'esse registrano una decrescita (-43,1%). Il settore delle altre sorgenti mobili conserva stabilmente una quota media di circa il 10% sul totale dal 1990 al 2005 e tale quota si riduce successivamente al 6,2% nel 2014; le emissioni delle altre sorgenti mobili decrescono continuamente al 1996 (-71,9 % dal 1996 al 2014). Nel 2014, inoltre, le emissioni di COVNM che derivano dalla combustione non industriale sono in forte crescita (+74,3 dal 1990) e raggiungono dal 2009 una quota sul totale superiore al 20%, che si attesta nel 2014 al 21,2%. Invece, quelle derivanti dai processi produttivi, nonostante si riducano (la decrescita è pari a -51%), mostrano una quota sul totale costante dal 2002 di circa il 6% [5].

Nella quasi totalità delle stazioni (40 su 46) nel periodo 2003-2012 non è stato possibile individuare un trend delle concentrazioni statisticamente significativo; la tendenza di fondo appare sostanzialmente monotona, e le oscillazioni interannuali sono attribuibili alle naturali fluttuazioni della componente stagionale. Le province di Bolzano, Trento, Pordenone, Venezia, Genova, Roma, Nuoro e Cagliari, tutte con almeno due stazioni, non mostrano trend statisticamente significativo. I casi di trend decrescente sono attribuiti a stazioni singole nelle province di Cuneo, Trieste e Varese. I restanti tre casi sono stati registrati a Torino, Biella e Aosta, e sono sempre accompagnati da altre stazioni dove non si evidenzia un trend decrescente[6].

Benzene (C₆H₆)

Il benzene (C₆H₆) fa parte della classe dei composti organici volatili, per la relativa facilità di passare in fase vapore a temperatura e pressione ambiente. Le principali sorgenti di emissione sono i veicoli a motore (gas di scarico e vapori di automobili e ciclomotori), gli impianti di stoccaggio e distribuzione dei combustibili, i processi di combustione che utilizzano derivati dal petrolio e l'uso di solventi contenenti benzene. Il benzene è uno di quegli inquinanti per i quali le politiche adottate nel corso dei decenni passati hanno avuto successo nell'abbattere fortemente le emissioni ed anche i livelli nell'aria ambiente: le azioni fondamentali realizzate in

particolare per la riduzione del benzene sono state l'introduzione della catalizzazione del parco auto e la riduzione del contenuto di benzene nei carburanti.

La pericolosità del benzene per la salute umana risiede essenzialmente nell'effetto oncogeno. In conseguenza di una esposizione prolungata nel tempo sono stati accertati effetti avversi gravi quali ematossicità, genotossicità e cancerogenicità. In conseguenza della accertata cancerogenicità (gruppo 1 della *International Agency for Research on Cancer - IARC*, carcinogeno di categoria 1 per l'UE), per il benzene non sono definiti livelli di esposizione al di sotto dei quali non c'è rischio di sviluppo degli effetti avversi citati.

La normativa italiana (D.Lgs. 155/2010) definisce per il benzene ai fini della protezione della salute umana un valore limite annuale di $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I dati disponibili per il 2016 sono relativi a 87 aree urbane, per ciascuna di esse il valore limite è rispettato. Valori particolarmente bassi, non superiori a $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ si riscontrano in 44 aree urbane [4].

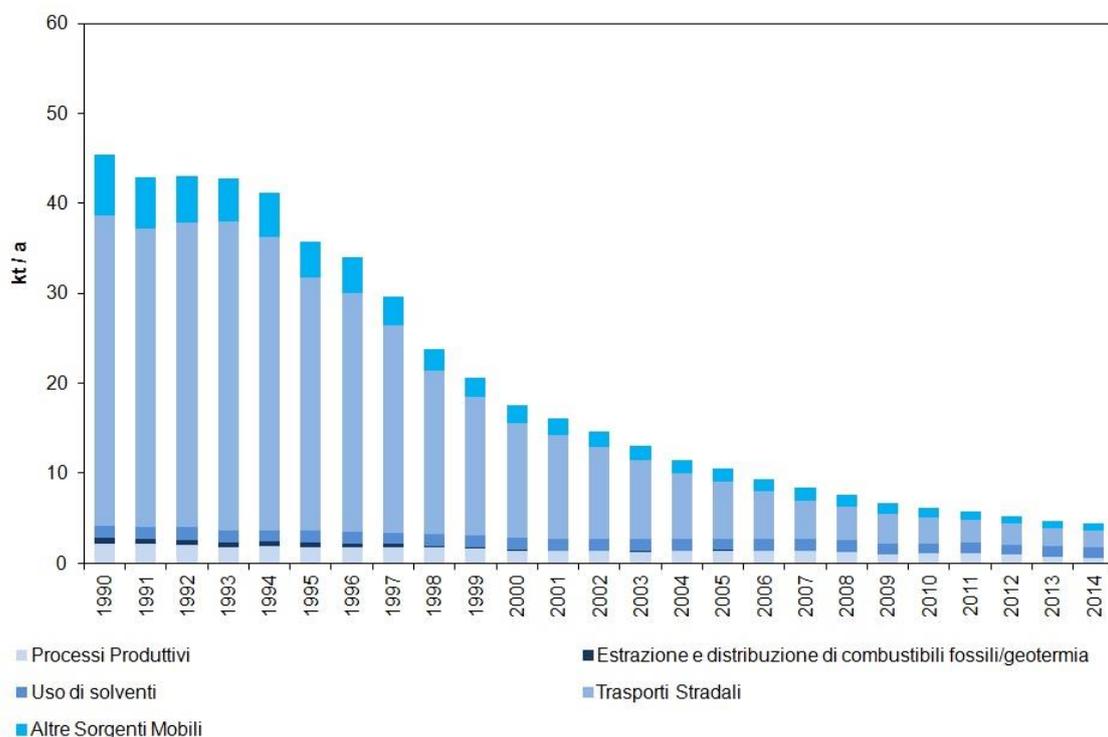


Grafico 2.5: Andamento delle emissioni nazionali per settore di provenienza del Benzene (C_6H_6) dal 1990 al 2014 [5]

Le emissioni di benzene sono diminuite dal 1990 al 2014 del 90,3% (da 45365 Mg a 4419 Mg). A tale andamento hanno contribuito principalmente le due componenti del settore dei trasporti, *road* e *off-road*. In particolare, le emissioni del trasporto stradale, che rappresentano nel 2014 il 44% del totale (76% nel 1990), sono

diminuite di circa il 94,3% nel periodo 1990- 2014; l'altra componente, le emissioni derivanti dal trasporto non stradale, la cui quota sul totale è pari al 17% nel 2014 (15% nel 1990), si riduce dell'88,8% tra il 1990 e il 2014. Va inoltre notato che nel medesimo periodo, le emissioni legate ai processi produttivi si riducono del 73,6%, mentre quelle derivanti dall'uso di solventi registrano una flessione del 18,1%. Questo accade nonostante i settori "Processi produttivi" e "Uso di solventi" incrementino le loro quote sul totale, rispettivamente con un peso nel 2014 pari al 13% e al 25%. Le riduzioni complessive conseguite dal benzene derivano sia dalla diminuzione del benzene nei combustibili nel corso degli anni novanta, sia dal rinnovo del parco autovetture e della conseguente riduzione delle emissioni di COVNM [5].

La disponibilità di serie storiche di dati di benzene aventi i requisiti richiesti per l'analisi statistica dei trend è fortemente limitata. Nel periodo 2003-2012, sono disponibili solo 9 stazioni di monitoraggio con questi requisiti. Una prima valutazione sommaria può essere fatta considerando che nel 2004 32 stazioni di monitoraggio su un campione di 78, non rispettavano il valore limite annuale di 5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nel 2012, partendo da un set di stazioni ben più ampio (158), si osserva un solo superamento. È evidente che siamo di fronte a uno scenario di riduzione delle concentrazioni, trainato dalla diminuzione delle emissioni da trasporto stradale. Tuttavia tale andamento, data la carenza di serie storiche, non può essere valutato quantitativamente per il periodo in studio. Con riferimento alle sole 9 stazioni disponibili si ha un trend decrescente in 6 casi su 9, con un solo caso di trend crescente in una stazione industriale della provincia di Cagliari [6].

BaP, As, Cd e Ni – benzo(a)pirene, arsenico, cadmio e nichel nel PM10

Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono prodotti nei processi di combustione incompleta di materiali organici e sono emessi in atmosfera quasi totalmente adsorbiti sul materiale particolato. Molti composti sono cancerogeni, anche se l'evidenza di cancerogenicità sull'uomo relativa a singoli IPA è estremamente difficile, poiché in condizioni reali si verifica sempre una esposizione simultanea a miscele complesse di molte decine di IPA. La IARC (IARC, 2012) ha classificato in particolare il benzo(a)pirene (BaP), come cancerogeno per l'uomo (categoria 1)[5].

Il BaP è ritenuto un buon indicatore di rischio cancerogeno per la classe degli IPA valutati; è stato stimato un rischio incrementale pari a 9 casi di cancro polmonare ogni 100.000 persone esposte per tutta la vita ad una concentrazione media di 1 ng/m^3 di BaP. L'OMS ha quindi raccomandato un valore guida di 1 ng/m^3 per la

concentrazione media annuale di BaP. Questo valore coincide con il valore obiettivo fissato dal D.Lgs 155/2010.

Oltre agli IPA, assumono particolare rilevanza igienico-sanitaria per l'accertata cancerogenicità il cadmio, il nichel e l'arsenico e i loro composti, che possono essere liberati in atmosfera veicolati dal materiale particolato. Anche per questi inquinanti la normativa vigente fissa un valore obiettivo e l'obbligo di valutazione e gestione della qualità dell'aria su tutto il territorio nazionale.

I dati disponibili per il 2016 sono relativi a 60 aree urbane. La prima informazione che emerge dalla mappa è la minore rappresentazione delle aree urbane del centro e del Sud (nessun dato per le regioni, Marche, Campania e Basilicata). Il valore obiettivo per il BaP è stato superato in 11 aree urbane; la gran parte dei superamenti sono localizzati in aree urbane del Nord, cui si aggiungono Frosinone e Terni. Il valore più elevato ($1,9 \text{ ng/m}^3$) è stato registrato a Frosinone. In generale le principali sorgenti di BaP sono, oltre al trasporto su strada, le combustioni industriali (esempio tipico, le acciaierie) e il riscaldamento domestico, qualora il combustibile usato sia legna o carbone. Ad Aosta e Terni, l'elevato livello di BaP è dovuto prevalentemente alle ricadute industriali. Nelle altre città, è ragionevole ipotizzare che il traffico veicolare e il riscaldamento domestico a biomassa concorrano insieme a determinare livelli elevati di BaP.

Anche ad As, Cd e Ni, il Centro, il Sud e le Isole sono scarsamente rappresentati. Per arsenico e cadmio i livelli sono ovunque inferiori al valore obiettivo (rispettivamente $6,0 \text{ ng/m}^3$, $5,0 \text{ ng/m}^3$), mentre il valore obiettivo del nichel ($20,0 \text{ ng/m}^3$) è stato superato ad Aosta e Terni e, come per il BaP, la causa di questi superamenti è da ricercarsi nelle ricadute industriali [4].

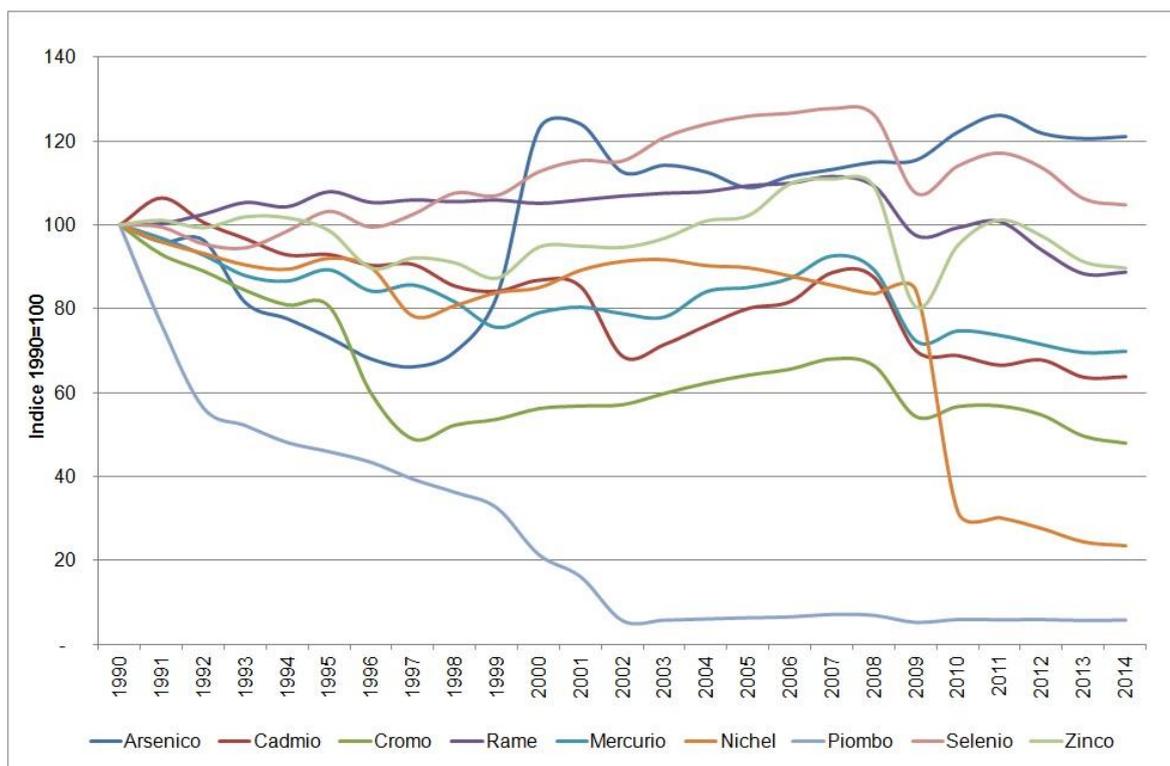


Grafico 2.6: Trend delle emissioni nazionali dei metalli pesanti indicizzato al 1990 [5]

Le emissioni di cadmio, mercurio e piombo sono in linea con gli obiettivi fissati a livello internazionale, essendosi ridotte rispetto ai valori del 1990 già nel periodo 1992-93 per il cadmio e nel 1990-91 per il mercurio e il piombo. Il cadmio presenta una diminuzione lungo l'intero periodo 1990-2014 (-36,2%) dovuta soprattutto alla combustione industriale, che mostra nel 2014 una quota sul totale del 35%. La riduzione complessiva delle emissioni di mercurio (-30,2%) è dovuta principalmente ai processi produttivi e alla combustione industriale. L'abbattimento dei livelli emissivi di piombo è stato notevole (-94,1%), soprattutto grazie all'impiego di benzine verdi; va notato, infatti, che il settore del trasporto stradale, che ha contribuito, tra il 1990 e il 2001, in media per più dell'80% del totale delle emissioni di piombo, nel periodo 2002-2014 vede il suo peso decrescere a un valore medio inferiore al 5%. Per contro, il contributo complessivo proveniente dai settori dei processi produttivi, dalla combustione non industriale e, soprattutto, da quella industriale è cresciuto negli anni 2002-2014 fino a un valore medio di oltre il 90% delle emissioni totali di piombo. Per i metalli pesanti non compresi nel Protocollo di Aarhus, non sono ancora stati stabiliti limiti emissivi nazionali. Nel 2014 le emissioni di cromo sono in diminuzione rispetto ai livelli del 1990 del 52,1%. Le emissioni di rame crescono fino al 2007, per poi diminuire fino al 2014, con una riduzione complessiva nel periodo tra il 1990 e il 2014 dell'11,2%.

Per quanto riguarda il nichel, le emissioni di questa sostanza decrescono del 76,4% a causa della caduta delle emissioni del settore della combustione non industriale nel periodo 2009-2010. Si riscontrano, invece, *trend* crescenti per le emissioni di arsenico (21%) e di selenio (4,7%); quelle di zinco, pur mostrando oscillazioni negli anni, diminuiscono nel periodo 1990-2014 del 10,3% [5].

Gas serra (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆)

Si riportano anche l'analisi delle emissioni dei gas serra, nonostante abbiano un impatto minore degli altri inquinanti considerati per quanto riguarda la qualità dell'aria propriamente detta, essi vanno monitorati per il loro contributo al riscaldamento atmosferico attraverso il cosiddetto effetto serra.

Le emissioni di gas serra sono in gran parte dovute alle emissioni di diossido di carbonio (CO₂), connesse, per quanto riguarda le attività antropiche, principalmente all'utilizzo dei combustibili fossili. Contribuiscono all'effetto serra anche il metano (CH₄) le cui emissioni sono legate principalmente all'attività di allevamento nell'ambito di quelle agricole, allo smaltimento dei rifiuti e alle perdite nel settore energetico e il protossido di azoto (N₂O) derivante principalmente dalle attività agricole e dal settore energetico, inclusi i trasporti. Il contributo generale all'effetto serra degli F-gas o gas fluorurati (HFCs, PFCs, SF₆, NF₃) è minore rispetto ai suddetti inquinanti e la loro presenza deriva essenzialmente da attività industriali e di refrigerazione. Le emissioni dei gas serra sono calcolate attraverso la metodologia dell'IPCC e sono tutte indicate in termini di tonnellate di CO₂ equivalente applicando i coefficienti di *Global Warming Potential* (GWP) di ciascun composto.

L'Italia ha ratificato nel 1994 la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC), nata nell'ambito del "Rio Earth Summit" del 1992. La Convenzione ha come obiettivo la stabilizzazione a livello planetario della concentrazione in atmosfera dei gas ad effetto serra a un livello tale che le attività umane non modifichino il sistema climatico. Il Protocollo di Kyoto sottoscritto nel 1997, in vigore dal 2005 costituisce lo strumento attuativo della Convenzione. L'Italia aveva l'impegno di ridurre le emissioni nazionali complessive di gas serra del 6,5% rispetto al 1990, entro il periodo 2008-2012. Il Protocollo stesso prevedeva complessivamente per i paesi industrializzati l'obiettivo di riduzione del 5,2%, mentre per i paesi dell'Unione Europea una riduzione complessiva delle emissioni pari all'8%. In Italia il monitoraggio delle emissioni dei gas climalteranti è garantito da ISPRA, attraverso il Decreto Legislativo n. 51 del 7 marzo 2008 e il Decreto Legislativo n. 30 del 13 marzo 2013 che prevedono l'istituzione del *National System* relativo all'inventario delle emissioni dei gas serra. La Delibera

CIPE n. 123 del 19 dicembre 2002, relativa alla revisione delle linee guida per le politiche e misure nazionali di riduzione delle emissioni dei gas serra, istituisce un Comitato Tecnico Emissioni Gas Serra al fine di monitorare l'attuazione delle politiche di riduzione delle emissioni [5]. Nell'ambito del secondo periodo di impegno (2013-2020) del protocollo di Kyoto, l'Unione Europea e i suoi Stati membri hanno stabilito di ridurre le loro emissioni collettive del 20% rispetto ai livelli del 1990. Per il periodo post-Kyoto, non è ancora stato raggiunto un nuovo accordo globale, ma le trattative sono ancora in corso per gli anni successivi al 2020.

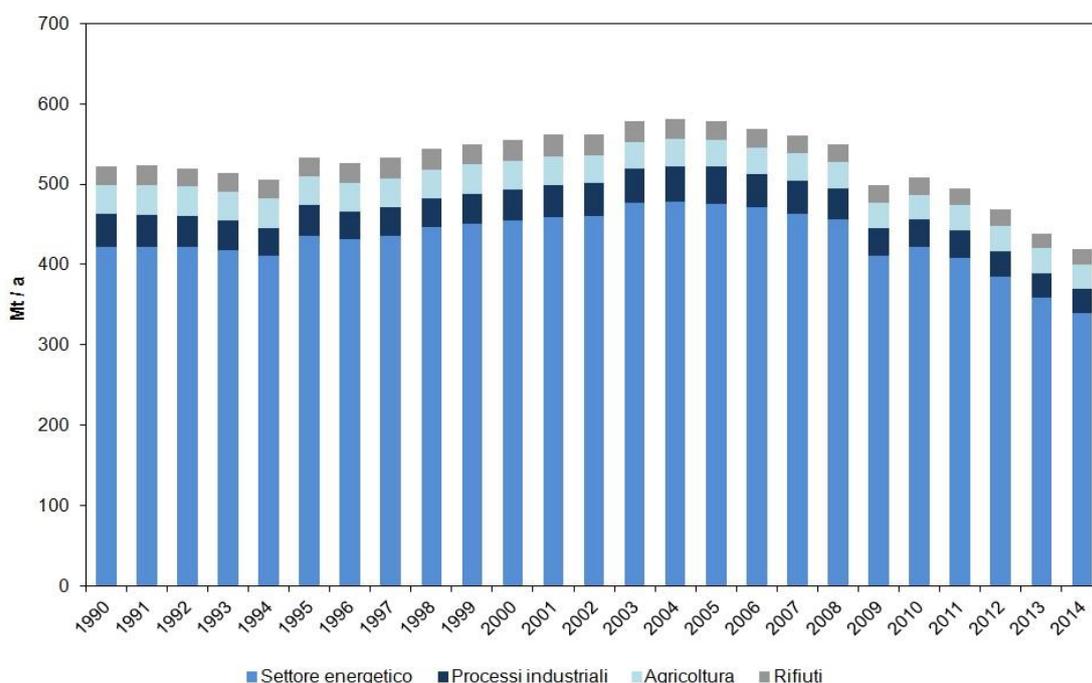


Grafico 2.7: Emissioni nazionali settoriali di gas serra in CO₂ equivalente [5]

Le emissioni totali di gas ad effetto serra si riducono nel periodo 1990-2014 del 19,8%, passando da 521,9 a 418,6 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente. L'andamento complessivo dei gas serra è determinato principalmente dal settore energetico e quindi dalle emissioni di CO₂ che rappresenta poco più dei quattro quinti delle emissioni totali lungo l'intero periodo 1990-2014. Le composizioni percentuali delle sostanze che compongono i gas serra non subiscono profonde variazioni lungo l'intero periodo 1990-2014. Questo vale soprattutto per il diossido di carbonio e il metano, che nel 2014 registrano rispettivamente una quota sul totale di 81,9% e 10,3%; le quote di protossido di azoto e F-gas, che nel 2014 si attestano rispettivamente al 4,4% e 3,3% del totale dei gas serra, mostrano invece una riduzione per N₂O (5,3% nel 1990) e un aumento per gli F-gas (0,7% nel 1990). Le emissioni di diossido di carbonio, che caratterizzano il *trend* complessivo dei gas

serra, hanno un andamento crescente fino al 2004 e di riduzione negli anni successivi con una accentuata riduzione nel 2009. Sia le emissioni di CH₄ che quelle di N₂O presentano un andamento abbastanza costante, il metano fino alla fine degli anni 90, il protossido di azoto fino al 2004, per poi decrescere fino al 2014: lentamente le emissioni di metano e più marcatamente quelle di protossido di azoto. Per quanto riguarda le emissioni degli F-gas, si nota una forte crescita dal 1996; a partire dalla fine degli anni 90, questi composti sono prevalentemente costituiti dagli HFCs. Le emissioni di gas serra sono principalmente imputabili al settore energetico (nel 2014 il peso sul totale è 81,2%); le emissioni provenienti dai processi industriali e dall'agricoltura hanno circa lo stesso peso sul totale nazionale (nel 2014: 7,2% e 7,3% rispettivamente), mentre il settore dei rifiuti nel 2014 contribuisce al totale per il 4,3%. Le industrie energetiche, l'industria manifatturiera ed edilizia, il trasporto ed il settore degli usi energetici nel civile, in agricoltura e nella pesca, contribuiscono in modo preponderante al totale nazionale delle emissioni (complessivamente con un peso pari al 79% sul totale, nel 2014); si rilevano per tutti questi dei *trend* decrescenti nel periodo 1990-2014, tranne che per il trasporto, che registra un aumento pari a +1,6% [5].

Nel Grafico 2.8 si sono riepilogati i contributi percentuali della combustione non industriale alle emissioni totali di quattro importanti inquinanti atmosferici quali CO, NO_x, COVNM e PM10. Come si può immediatamente notare, nel corso degli anni la combustione non industriale, ovvero le attività di riscaldamento e produzione d'acqua calda residenziale, commerciale e istituzionale, ha aumentato notevolmente il suo contributo per ciascuno di essi. In particolar modo per quanto riguarda le emissioni di CO e PM10 essa è attualmente responsabile di più delle metà delle stesse (56% per entrambe). Anche il contributo alle emissioni di NO_x e COVNM è andato costantemente in crescendo dal 1994, arrivando a essere rispettivamente del 10,23% e del 21,2%. Questi dati sono la dimostrazione del fatto che, seppure le emissioni siano in termini assoluti in diminuzione grazie a interventi fatti in altri settori, ai giorni d'oggi sarebbe consigliabile concentrare maggiormente l'attenzione su come mitigare l'impatto della combustione non industriale.

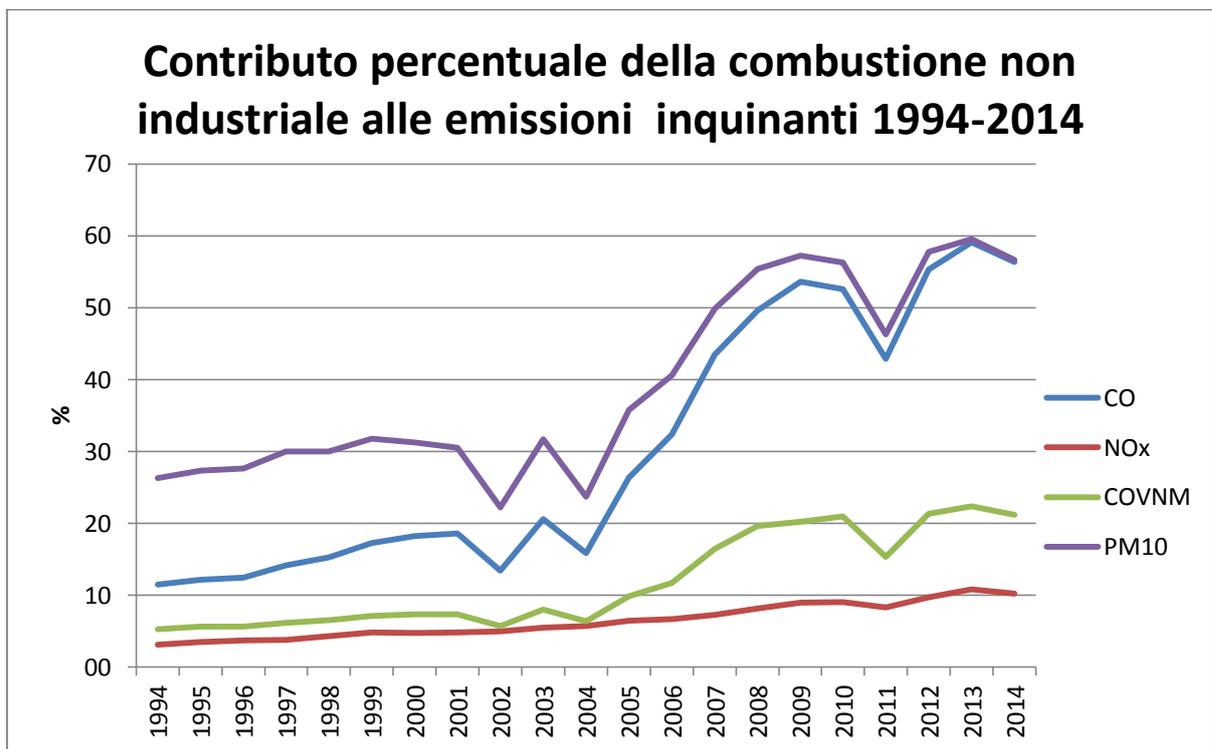


Grafico 2.8: Contributo percentuale della combustione non industriale alle emissioni di CO,NO_x,COVNM,PM10 nel periodo 1994-2014

Interessanti sono anche le percentuali di popolazione soggetta a valori di inquinanti maggiori di quelli consentiti. Questi dati, riportati nella Tabella 2.1, sono ancor più rappresentativi del potenziale impatto dell'inquinamento di quelli precedentemente forniti sulle singole stazioni di monitoraggio, che non specificavano se la zona interessata fosse molto o poco popolata.

| Popolazione esposta agli inquinanti in atmosfera nei centri urbani - Anno 2016 | | | | | |
|---|-----------|---------------------|----------|-----------------------|------------------------------|
| Comuni o agglomerati e relativa popolazione esposta agli inquinanti atmosferici | n° comuni | Tot. di riferimento | % comuni | Popolazione residente | Popolazione percentuale **** |
| Comuni/agglomerati per cui non è presente alcun dato | 12 | 117 | 10% | 599,981 | 3% |
| Comuni/agglomerati per cui sono presenti tutti gli inquinanti considerati (BaP escluso) | 73 | 105 | 70% | 16,969,525 | 83% |
| Comuni/agglomerati per cui sono presenti tutti gli inquinanti considerati (BaP compreso) | 49 | 105 | 47% | 14,035,937 | 69% |
| PM10: comuni e popolazione esposta a $c > 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ * | 0 | 102 | 0% | 0 | 0% |
| PM10: comuni e popolazione esposta a $c > 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ** | 69 | 102 | 68% | 16,756,782 | 82% |
| PM2,5: comuni e popolazione esposta a $c > 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ * | 5 | 79 | 6% | 4,263,811 | 21% |
| PM2,5: comuni e popolazione esposta a $c > 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ** | 71 | 79 | 90% | 16,114,389 | 79% |
| NO ₂ : comuni e popolazione esposta a $c > 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ * | 2 | 102 | 2% | 6,547,427 | 32% |
| O ₃ : comuni e popolazione esposta a $c > 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ più di 10gg/anno*** | 56 | 91 | 62% | 12,202,064 | 60% |
| BaP: comuni e popolazione esposta a $c > 1,0 \text{ ng}/\text{m}^3$ * | 8 | 59 | 14% | 877,718 | 4% |
| BaP: comuni e popolazione esposta a $c > 0,5 \text{ ng}/\text{m}^3$ | 21 | 59 | 36% | 5,838,933 | 29% |
| * concentrazione maggiore del valore limite annuale per la protezione della salute umana (D. Lgsi n.155 del 13 agosto 2010 e s.m.i.) | | | | | |
| **concentrazione maggiore del valore consigliato dall'OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) per la protezione della salute umana | | | | | |
| ***Giorni con superamento della concentrazione di $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media massima giornaliera calcolata su 8 ore nell'arco di un anno civile), obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana (D. Lgsi n.155 del 13 agosto 2010 e s.m.i.) | | | | | |
| **** percentuale sul totale della popolazione delle città coinvolte nell'indagine e con almeno un dato. | | | | | |

Tabella 2.1: Popolazione esposta agli inquinanti in atmosfera nei centri urbani , Anno 2016. Fonte: elaborazione ISPRA su dati ARPA/APPA e ISTAT

Si può notare che le percentuali di popolazione urbana esposta a valori di **PM10** e **PM2,5** superiori ai valori soglia OMS, sono rispettivamente dell'82% e del 79%, del totale di popolazione considerato. Per quanto riguarda i valori di **NO₂** considerati ai fini dell'esposizione media annua nelle aree urbane, per l'anno 2016, ad eccezione delle due grandi aree urbane di Roma e Milano entrambe con 42 µg/m³, (32% della popolazione totale considerata), i valori medi di esposizione si mantengono entro i 40 µg/m³ (valore OMS nonché limite di legge). L'**O₃** ha invece superato i valori soglia per più di 10 giorni nel 62% dei Comuni considerati, pari al 60% della popolazione del totale dei Comuni. Un elevato numero di giorni di esposizione a valori non salutari si riscontra soprattutto al nord, dove la stagnazione degli inquinanti è generalmente superiore rispetto ad esempio a zone che beneficiano di una maggiore ventilazione. Infine ma non per importanza, è valutata l'esposizione media annua nelle aree urbane al **Benzo(a)pirene (BaP)**. Il valore obiettivo annuo da osservare per legge è 1,0 ng/m³, ma in quanto composto cancerogeno sarebbe opportuno raggiungere il valore più basso possibile. Nel 2016 il 4% della popolazione totale considerata è stato mediamente esposto ad un valore superiore al corrispondente limite di legge, mentre il 29% a valori superiori alla metà del limite. Queste percentuali aumentano (si arriverebbe rispettivamente al 6% e al 37%) se si considera come riferimento la sola popolazione dei Comuni per cui sono disponibili dati sul BaP. Il monitoraggio purtroppo non comprende ancora tutti i capoluoghi di provincia, come sarebbe auspicabile vista la rilevanza per la salute della popolazione [5].

Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità, l'inquinamento dell'aria in ambiente esterno è responsabile della morte prematura, ogni anno, di oltre 3 milioni di persone nel mondo, oltre 83 milioni di anni di vita persi ogni anno. Questi valori peraltro crescono notevolmente, fino a 7 milioni di morti premature, se si includono gli effetti dell'inquinamento *indoor*. L'Italia, con oltre 1500 decessi prematuri per milione d'abitante a causa dell'inquinamento dal PM2,5, NO₂ e O₃ [7], paga un conto più salato degli altri grandi paesi europei all'inquinamento atmosferico. Inoltre in aggiunta ai costi sociali in termini di vite umane la Commissione Europea stima che i costi esterni connessi agli impatti sulla salute dell'inquinamento atmosferico nel 2010 erano compresi tra 330 e 940 miliardi di euro: si tratta di valori che vanno da poco meno del 2% fino al 6% del PIL europeo. In Italia i costi collegati alla salute derivanti dall'inquinamento dell'aria si stimano fra i 47 e i 142 miliardi di euro [8].

Per il mancato rispetto di alcuni limiti alle emissioni è necessario ricordare che il nostro Paese è tenuto a rispondere a due procedure di infrazione aperte nei nostri

confronti: la prima procedura di infrazione (n. 2014/2147 notificata l'11 luglio 2014), concernente la cattiva applicazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente, è dovuta al superamento dei valori limite di PM10 in Italia tra il 2008 ed il 2012 in 19 zone e agglomerati.

La seconda procedura di infrazione (n. 2015/2043 notificata il 29 maggio 2015), concernente la qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa, è dovuta al superamento dei valori limite di biossido di azoto (NO₂) tra il 2012 e il 2014 in 15 zone e agglomerati. Da sottolineare che molti dei superamenti oggetto di tali procedure di infrazione interessano la maggior parte delle aree localizzate nelle regioni del Bacino Padano.

Le procedure di infrazione avviate dalla Commissione Europea sono pervenute, nel corso degli anni, ad una fase avanzata del procedimento, definita “parere motivato”, come sancito dall’Art. 258 TFUE: di fatto è l’ultimo avvertimento agli stati membri in virtù del fatto che, come esplicitamente dichiarato dalla Commissione, *"non hanno affrontato le ripetute violazioni dei limiti di inquinamento dell'aria per il biossido di azoto (NO₂) che costituisce un grave rischio per la salute. La maggior parte delle emissioni provengono dal traffico stradale. E in particolare dai motori diesel"*. Se gli Stati membri non agiranno concretamente per mettere in campo "misure idonee" a risolvere il problema, la Commissione potrà decidere di deferirli alla Corte di giustizia dell'Ue.

Da ricordare anche che l'inottemperanza da parte dell'Italia alle norme sulle concentrazioni massime di PM10 (e altri inquinanti gassosi) nell'aria, era stata già oggetto di una procedura di infrazione (n. 2008/2194), archiviata nel 2013 dalla Commissione europea solo a seguito della promessa, da parte italiana, dell'adozione di un “cospicuo pacchetto di misure volto a ripristinare il rispetto dei massimali previsti dalla direttiva 2008/50/CE”[7], promessa che evidentemente è stata disattesa.

2.3 Qualità dell’aria Emilia-Romagna

Nel seguente paragrafo si riportano le emissioni divise per macrosettori, aggiornate al 2013, della regione interessata in questa Tesi, ovvero l’Emilia-Romagna. L’aggiornamento dell’inventario delle emissioni è stato realizzato usando il software INEMAR (Inventario Emissioni ARia), strumento messo a punto e progressivamente aggiornato nell’ambito di una convenzione interregionale che attualmente coinvolge, oltre all’Emilia-Romagna, Lombardia Piemonte, Veneto, Friuli Venezia Giulia, province autonome di Trento e di Bolzano e Puglia.

Nelle Tabelle sono riportati i valori misurati o stimati di CO, CO₂, COVNM, NO_x e PM10, suddivisi per macrosettore. Nella Tabella 2.2 sono riportati i valori assoluti, mentre nella Tabella 2.3 si è evidenziato il contributo percentuale di ciascun macrosettore all'emissione.

| Descrizione macrosettore | CO (t) | CO ₂ (kt) | COVNM(t) | NO _x (t) | PM10 (t) |
|--|---------------|----------------------|---------------|---------------------|--------------|
| Produzione energia e trasformazione combustibili | 1658 | 2825 | 183 | 3706 | 23 |
| Combustione non industriale | 48037 | 8571 | 6535 | 6576 | 5608 |
| Combustione nell'industria | 3646 | 7286 | 503 | 12541 | 482 |
| Processi produttivi | 4472 | 888 | 4585 | 2050 | 645 |
| Estrazione e distribuzione combustibili | 17 | 0 | 3001 | 192 | 0 |
| Uso di solventi | 25 | 0 | 18628 | 232 | 206 |
| Trasporto su strada | 54908 | 10919 | 13817 | 47174 | 2920 |
| Altre sorgenti mobili e macchinari | 3664 | 925 | 1072 | 10170 | 470 |
| Trattamento e smaltimento rifiuti | 224 | 394 | 66 | 606 | 5 |
| Agricoltura | 0 | 0 | 43010 | 565 | 369 |
| Altre sorgenti e assorbimenti | 0 | -3843 | 34911 | 0 | 0 |
| Totale | 116651 | 27966 | 126312 | 83811 | 10727 |

Tabella 2.2: Emissioni (t) inquinanti per macrosettore, 2013 [9]

| Descrizione macrosettore | % CO | % CO ₂ | % COVNM | % NO _x | % PM10 |
|--|------|-------------------|---------|-------------------|--------|
| Produzione energia e trasformazione combustibili | 1.4 | 10.10 | 0.1 | 4.4 | 0.2 |
| Combustione non industriale | 41.2 | 30.65 | 5.2 | 7.8 | 52.3 |
| Combustione nell'industria | 3.1 | 26.05 | 0.4 | 15.0 | 4.5 |
| Processi produttivi | 3.8 | 3.18 | 3.6 | 2.4 | 6.0 |
| Estrazione e distribuzione combustibili | 0.0 | 0.00 | 2.4 | 0.2 | 0.0 |
| Uso di solventi | 0.0 | 0.00 | 14.7 | 0.3 | 1.9 |
| Trasporto su strada | 47.1 | 39.04 | 10.9 | 56.3 | 27.2 |
| Altre sorgenti mobili e macchinari | 3.1 | 3.31 | 0.8 | 12.1 | 4.4 |
| Trattamento e smaltimento rifiuti | 0.2 | 1.41 | 0.1 | 0.7 | 0.0 |
| Agricoltura | 0.0 | 0.00 | 34.1 | 0.7 | 3.4 |
| Altre sorgenti e assorbimenti | 0.0 | -13.74 | 27.6 | 0.0 | 0.0 |

Tabella 2.3: Percentuali di emissioni inquinanti per macrosettore, 2013 [9]

Le stime indicano il riscaldamento domestico a biomassa e il trasporto su strada come le fonti principali di emissioni legate all'inquinamento diretto da polveri, seguiti dalle attività produttive. Alle emissioni di NO_x, che sono importanti precursori della formazione di particolato e di ozono, contribuiscono il trasporto su strada per il 56%, le altre sorgenti mobili, la combustione nell'industria il riscaldamento e la produzione di energia. L'utilizzo di solventi nel settore industriale e civile risulta il principale contributo antropogenico alle emissioni di composti organici volatili (COVNM) precursori, assieme agli ossidi di azoto, di

particolato secondario e ozono. È la produzione di COVNM di origine biogenica, da specie agricole e vegetazione però la fonte che contribuisce maggiormente alle emissioni di questo inquinante. Tale fonte è stata valutata per la prima volta in questa compilazione. Il CO è emesso dai trasporti su strada per il 45% e dalla combustione domestica per il 40%. Per quanto riguarda il principale gas serra, le emissioni di CO₂ sono imputabili per il 50% ai processi di combustione industriali e per il resto ai trasporti stradali e all'uso del gas naturale per il riscaldamento. [9].

Per quanto riguarda la qualità dell'aria della Regione Emilia-Romagna sono disponibili i dati quasi in tempo reale, da cui si può notare che nel 2017 il **valore limite giornaliero di PM10** (50 µg/m³) è stato superato per oltre 35 giorni (numero massimo definito dalla norma) in 27 delle 43 stazioni della rete di monitoraggio regionale che misurano questo inquinante. Il maggior numero di superamenti sono stati registrati nelle stazioni di Piacenza/Giordani Farnese, Reggio Emilia/Timavo e Modena/Giardini (83), seguite da Parma/Montebello (74) e Colorno/Saragat (Pr) e Parma/Cittadella (69). A livello provinciale, la soglia dei 35 superamenti è stata raggiunta a Piacenza in 2 stazioni su 4, Parma (3 su 4), Reggio Emilia (4 su 5), Modena (6 su 6), Bologna (3 su 7), Ferrara (4 su 4), Ravenna (2 su 4), Forlì-Cesena (1 su 5), Rimini (2 su 4). Bene invece i dati riguardanti la **media annua di PM10**: in tutte le stazioni è stata inferiore alla soglia di 40 µg/m³ stabilita dalla norma.

Il valore limite per la **media annuale di PM2.5** (25 µg/m³) è stato superato in due stazioni - Besenzone/Pc (27) e Guastalla/Re (26) - delle 24 che lo misurano. In generale nel 2017 i valori più elevati di PM2.5 sono stati registrati dalle stazioni poste al centro della Pianura Padana, e le differenze tra città e campagna risultano trascurabili.

Quattro superamenti (su 47 stazioni) del valore limite per la media annuale del **biossido d'azoto** (40 µg/m³), registrati a Reggio Emilia/Timavo (42 µg/m³), Modena/Giardini (42 µg/m³), Modena/Fiorano (45 µg/m³) e Bologna/Porta San Felice (46 µg/m³). Nel 2016 risultarono superiori ai limiti quattro stazioni su 47, nel 2015 cinque, nel 2014 quattro.

Tutti entro i limiti di legge, come negli anni precedenti, i valori del **biossido di zolfo, benzene e monossido di carbonio**.

Per l'**ozono** il valore obiettivo per la protezione della salute ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di media massima giornaliera calcolata su 8 ore nell'arco di 1 anno) è stato superato in gran parte delle stazioni, dagli oltre 25 superamenti per la media sui 3 anni sono escluse solo Villa Minozzo/Febbio (Re) e Porretta Terme/Castelluccio (Bo).

Nel 2017 le condizioni meteorologiche sono state particolarmente sfavorevoli alla qualità dell'aria, si sono verificati lunghi periodi con condizioni di alta pressione, assenza di precipitazioni e scarsa ventilazione: questo ha determinato un numero particolarmente elevato di giornate con condizioni favorevoli all'accumulo degli inquinanti, con valori simili a quello registrati nel 2015 e tra i più alti della serie storica. Anche la stagione estiva è stata caratterizzata da temperature particolarmente elevate e precipitazioni molto scarse: il numero di giorni favorevoli alla formazione di ozono è stato tra i più alti dal 2003 e in linea con quello registrato nel 2012.

Le concentrazioni di polveri in Emilia-Romagna sono state superiori a quelle osservate nel 2016 e in linea con quelle misurate nel 2015 con valori tuttavia inferiori rispetto agli anni fino al 2010 [10].

2.4 Come misurare i contributi dei vari macrosettori alle emissioni

Il D.Lgs. n. 155/2010 indica nella versione più aggiornata del manuale EMEP-EEA, pubblicato sul sito dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (e nei documenti elaborati dall'ISPRA già APAT), la metodologia di riferimento per la realizzazione di un inventario delle emissioni in atmosfera. La metodologia, denominata EMEP-CORINAIR fino al 2007, dal 2009 EMEP/EEA, contiene i metodi di stima per quantificare le emissioni associate a ciascuna attività antropica o naturale, catalogata (fino al 2007) secondo la nomenclatura SNAP97 (Selected Nomenclature for Air Pollution 97). Le versioni successive al 2007 del manuale EMEP-EEA classificano le emissioni secondo la nomenclatura NFR (Nomenclature For Reporting), che non è ancora largamente utilizzata, spesso si preferisce mantenere la precedente nomenclatura.

La nomenclatura SNAP97 classifica le sorgenti di emissione secondo tre livelli gerarchici: la classe più generale prevede 11 macrosettori, a loro volta suddivisi in 76 settori e 378 attività.

A titolo esemplificativo si riporta l'elenco degli 11 macrosettori emissivi:

M1: Combustione - Energia e industria di trasformazione;

M2: Combustione - Non industriale;

M3: Combustione - Industria;

M4: Processi Produttivi;

M5: Estrazione, distribuzione combustibili fossili / geotermico;

M6: Uso di solventi;

M7: Trasporti Stradali;

M8: Altre Sorgenti Mobili;

M9: Trattamento e Smaltimento Rifiuti;

M10: Agricoltura;

M11: Altre sorgenti di Emissione ed Assorbimenti.

La metodologia EMEP-EEA prefigura due possibili procedure di stima delle emissioni in atmosfera [11]: *top-down* ("dall'alto verso il basso") e *bottom-up* ("dal basso verso l'alto").

L'**approccio top-down** parte dalla scala spaziale più ampia (es. nazionale) e discende a livelli inferiori (regioni/province/comuni), utilizzando alcune variabili surrogate scelte tra gli indicatori statistici a disposizione per la scala spaziale di interesse, che devono essere quanto più possibile correlate al processo emissivo considerato (ad es. per le attività del macrosettore Combustione - Energia e industria di trasformazione, si utilizza generalmente come variabile surrogato il consumo di combustibili).

L'**approccio bottom-up** parte invece dall'analisi della realtà produttiva locale per passare a quella relativa a livelli di aggregazione maggiori. In questo secondo caso, ad esempio, l'emissione prodotta in un distretto industriale viene ricostruita per tutti i camini e le altre sorgenti diffuse relative a ciascun impianto produttivo.

È subito evidente come il secondo approccio sia potenzialmente più preciso, ma richieda un grosso impegno di risorse ed energie per il recupero di un elevato numero di informazioni utili a descrivere ciascuna sorgente emissiva.

La strategia adottata più frequentemente è quella di utilizzare entrambi gli approcci in parallelo: *bottom-up* per le principali sorgenti puntuali (centrali termoelettriche, inceneritori, grossi cementifici, principali arterie stradali, principali centrali di teleriscaldamento, ecc.) e di considerare la rimanente porzione di rilasci come *top-down*.

I moduli e gli approcci generalmente utilizzati per la stima delle emissioni per la compilazione degli inventari sono sintetizzati nella seguente Tabella 2.4.

| Modulo | Approccio | Fonti emissioni | Emissioni |
|------------------|------------------|------------------------|------------------|
| diffuse | misto | diffuse | stimate |
| puntuali | bottom-up | puntuali | misurate/stimate |
| traffico lineare | bottom-up | lineari | stimate |
| traffico diffuso | misto | diffuse | stimate |
| discariche | bottom-up | puntuali | stimate |
| aeroporti | bottom-up | puntuali/diffuse | stimate |
| porti | bottom-up | puntuali | stimate |
| foreste | misto | diffuse | stimate |
| biogeniche | bottom-up | diffuse | stimate |
| agricoltura | bottom-up | diffuse | stimate |

Tabella 2.4: moduli e approcci generalmente utilizzati per la stima delle emissioni per la compilazione dell'inventario [9]

Il **modulo puntuali** permette di censire le emissioni in atmosfera delle principali fonti di inquinanti puntuali, solitamente è impiegato per i macrosettori 1, 2, 3, 4, 5, 6, 9. La metodologia CORINAIR definisce **sorgenti puntuali** (Large Point Sources, LPS) quelle attività che per la rilevanza delle emissioni, l'elevata potenzialità produttiva o per il carattere intrinseco dell'attività svolta, devono essere specificamente individuate, in modo tale da poter considerare le loro emissioni in modo diretto e non attraverso stime basate su indicatori, come avviene per le sorgenti areali. Nello specifico le attività che hanno l'obbligo del monitoraggio in continuo alle emissioni sono:

I grandi impianti di combustione (D.Lgs 152/06 allegato II alla parte V); gli impianti di incenerimento e co-incenerimento (D.Lgs 133/05); le Raffinerie (D.Lgs. 152/06 All. I parte IV alla parte V); gli impianti che hanno emissioni con flusso di massa di solventi in uscita superiori ai 10 kg/h (D.Lgs. 152/06 parte V); gli Impianti termici industriali sopra i 6 MW, e civili sopra 1,5 MW, relativamente alla verifica della buona conduzione della combustione (parte V del D.Lgs. 152/06); gli impianti per il recupero, anche energetico, dei rifiuti (D.M. 05.08.98, D.M. 20.09.02 - ozono); impianti che trattano rifiuti e combustibili derivati da rifiuti ammessi a beneficiare del regime previsto per le fonti rinnovabili (D.M. 05.06.06)[12].

Queste attività sono soggette al **Sistema Monitoraggio Emissioni (SME)**. Il SME sotto responsabilità del gestore assicura un efficace controllo delle emissioni nell'ambiente nelle fasi produttive attraverso misure dirette o indirette in continuo. La progettazione SME è concordata con l'Autorità competente e contiene informazioni dettagliate rispetto alle caratteristiche dei punti di

emissione; alle modalità di campionamento; alle caratteristiche degli analizzatori (certificazione); alle procedure di calibrazione ordinarie o straordinarie; alla descrizione del sistema di acquisizione ed elaborazione dati; alla dichiarazione del minimo tecnico. I valori limite di queste emissioni sono stabiliti nell'AIA e sono elencati e fissati con particolare attenzione alla natura ed alla potenzialità degli inquinanti in questione. I dati delle emissioni vengono registrati e conservati dal gestore e inviati ad Arpa attraverso mezzi informatici (in alcuni casi attraverso il supporto cartaceo), questi dati inviati tramite web vengono controllati ogni giorno lavorativo e qualora si riscontrino anomalie Arpa attiva delle procedure di avviso. I tecnici incaricati alla sorveglianza degli stabilimenti collaborano con Arpa sia per la comprensione sia per la verifica dei dati delle emissioni attraverso spiegazioni su metodi di elaborazione proposti ed eventuali richieste in merito al ciclo produttivo.

Nel caso non sia disponibile il dato misurato, si effettua la stima dell'emissione E_i sulla base dell'indicatore di attività $A_{att,comb}$ e del corrispondente fattore di emissione $FE_{att,comb,i}$ secondo la seguente relazione:

$$E_i = A_{att,comb} \cdot FE_{att,comb,i}$$

Il **modulo diffuse** tratta le emissioni che per entità o per caratteristiche dell'attività non sono localizzabili in modo puntuale. La stima viene svolta applicando la relazione lineare [9]:

$$E_i = A_{att,comb} * FE_i$$

in cui $A_{att,comb}$ è l'indicatore di attività a livello comunale e FE_i è il fattore di emissione per l'inquinante i -esimo. Secondo questo metodo le sorgenti emmissive vengono caratterizzate mediante un indicatore specifico per ogni attività (consumi di combustibile, produzione di materiali, superficie coltivata, consumo di materie prime, numero di capi, ecc.) e un fattore di emissione riferito all'unità di attività della sorgente. La precisione associata alla stima dipende fortemente dalla qualità dei dati disponibili sia per quanto riguarda gli indicatori di attività sia i fattori di emissione.

Alcune attività quali ad esempio trasporti, coltivazioni, emissioni biogeniche, pur essendo classificabili come emissioni di tipo diffuso, necessitano di metodologie specifiche di stima e non sono trattate dal modulo diffuse ma da moduli specifici.

Moduli traffico lineare e traffico diffuso. Le emissioni da traffico vengono suddivise in tre tipologie. In primo luogo vengono considerate le emissioni a caldo

(hot emissions), ovvero le emissioni dai veicoli i cui motori hanno raggiunto la loro temperatura di esercizio. In secondo luogo le emissioni a freddo (cold emissions), ovvero quelle che si verificano durante il riscaldamento del veicolo (convenzionalmente, sono le emissioni che si verificano quando la temperatura dell'acqua di raffreddamento è inferiore a 70°C). Infine esistono le emissioni evaporative (per i soli COVNM, Composti Organici Volatili Non Metanici) rilevanti per i soli veicoli a benzina.

La stima delle emissioni di inquinanti atmosferici da trasporti stradali si avvale, nell'ambito della metodologia generale, di un modello matematico chiamato COPERT (COmputer Programme to calculate Emissions from Road Traffic) che opera il calcolo delle emissioni come prodotto dell'indicatore di attività, i km percorsi per tipo di strada, con i fattori di emissione per ciascuna classe veicolare, dipendenti dalla velocità, considerando altri parametri quali la numerosità delle flotte e la categoria legislativa. Il modello è completato da un insieme di funzioni correttive che forniscono una quota suppletiva di emissioni per tenere conto dell'età dei veicoli, delle condizioni climatiche, della pendenza della strada (per emissioni lineari), del carico trasportato nel caso di veicoli commerciali, del periodo di funzionamento a freddo del motore.

Utilizzando il software INEMAR 7 è previsto un differente approccio di calcolo per emissioni lineari (modulo traffico lineare) e per le emissioni diffuse (modulo traffico diffuso)[9]. Le **emissioni lineari** sono le emissioni derivanti dal traffico che si verifica su tratti stradali definiti e vengono stimate sulla base del numero di passaggi veicolari sui diversi archi della rete (o grafo) che possono derivare sia da rilievi, sia da simulazioni modellistiche (modelli di assegnazione del traffico). I dati da fornire in ingresso al software sono i seguenti: parco circolante suddiviso per tipologia di veicolo, tipo di combustibile utilizzato, categoria legislativa, classe di cilindrata; consumi dei vari combustibili; percorrenze medie annue e velocità medie per tipologia di percorso effettuato (urbano, extraurbano, autostradale); pendenza stradale; condizioni climatiche; carico trasportato.

La dipendenza dalla pendenza è implementata tramite una funzione continua della pendenza stradale che interpola i valori forniti dalla metodologia COPERT, mentre la percentuale di carico viene specificata per ogni tipo di classe veicolare. Per la stima delle emissioni lineari a caldo è inoltre necessario avere a disposizione i flussi su arco, cioè il numero di passaggi delle differenti classi veicolari sui diversi archi della rete, in quanto la metodologia COPERT stima le emissioni a partire da curve di emissione "speed dependent", cioè i fattori di emissione sono definiti in funzione della velocità che viene stimata sulla base del carico del traffico della

strada in funzione delle caratteristiche della strada stessa (velocità a rete scarica, capacità di carico).

Le emissioni lineari a freddo vengono invece trattate come le **emissioni diffuse** urbane, calcolandole sulla frazione dei veicoli circolanti con motore a freddo della percorrenza lineare regionale ripartita fra tutti i comuni in base ad una opportuna variabile proxy, proporzionale al numero di residenti del comune. Le emissioni diffuse riguardano le emissioni non associabili ad un percorso definito e vengono stimate applicando la relazione lineare già vista per il modulo emissioni diffuse :

$$E_i = A_{att,comb} * FE_i$$

Si effettua quindi una stima delle percorrenze in base ai consumi di combustibile attribuiti ai veicoli a dettaglio comunale, moltiplicando tali percorrenze per i fattori di emissione. Le emissioni diffuse sono stimate a partire dai dati di vendita dei combustibili, dalla composizione del parco immatricolato (dati ACI) e dalle percorrenze medie annue previste dei veicoli.

Il **modulo aeroporti** permette di trattare le emissioni legate al traffico aereo e alle attività ad esso connesse. la stima dell'emissione dei diversi inquinanti derivante dal movimento degli aerei (decollo, atterraggio e spostamenti a terra) è ottenuta utilizzando la relazione seguente [9]:

$$EA_{i,j,k,w} = FE_{AEREOi,j} * NUM_MOVIMENTI_{i,k,w} * (DURATA_FASE_CLASSE / DURATA_RIFERIMENTO) / 1000$$

in cui

$EA_{i,j,k,w}$ sono le emissioni per ogni codice aereo i , per ogni fase di movimento j , per nazionalità w , nell'ora k [t/anno]

$FE_{AEREOi,j}$ è il fattore di emissione per ogni codice aereo i e per ogni fase di movimento j [kg/volo]

$NUM_MOVIMENTI_{i,k,w}$ è il numero di movimenti per ogni codice aereo i e per decollo o atterraggio

(legati alle fasi di movimento), per ogni nazionalità w , nell'ora k [voli/ora]

$DURATA_FASE_CLASSE$ è la durata fase per classe di aereo

$DURATA_RIFERIMENTO$ è la durata di riferimento della fase (rimane fissa)

Oltre alle emissioni derivanti dal decollo e dall'atterraggio degli aerei, vanno considerati anche i movimenti dei mezzi di supporto a terra (Ground Support Equipment) cioè di quei mezzi dedicati:

- al trasporto di passeggeri, equipaggi e bagagli;
- alle attività di assistenza agli aeromobili (rifornimenti, servizi tecnici, deicing, toilette, pulizie cabine, catering);
- alla gestione e manutenzione piste e aree verdi (pulizia piste e piazzale sgombero neve, sfalcio meccanico).

Per ogni inquinante la stima dell'emissione dovuta a questi mezzi viene effettuata impiegando la relazione seguente:

$$Em_{MTz,i,j,k} = FE_{MTz} * TEMPO_SPEC_FUNZ_{z,i,j} / 1000$$

dove:

$Em_{MTz,i,j,k}$ = emissioni per ogni mezzo a terra z associato all'aereo i, per ogni fase di movimento j nell'ora k (t/anno)

FE_{MTz} = fattore di emissione per ogni tipo di mezzo a terra z (kg/min)

$TEMPO_SPEC_FUNZ_{z,i,j}$ = tempo di funzionamento per il tipo di mezzo a terra z associato all'aereo i, per fase movimento j (min)

Il **modulo porti** permette di trattare le emissioni legate alle attività marittime: in particolare il modulo è impiegato per stimare il contributo emissivo riferito alle operazioni di manovra delle navi in porto e in prossimità dello stesso mentre non contempla le emissioni in mare aperto. La stima per PTS, COVNM e NOx è ottenuta sulla base della potenza dei motori dell'imbarcazione mediante la relazione seguente [9]:

$$E_{ijklmn} = t_{jklm} * P_{jkl} * LF_{km} * FE_{ijlm} * N_{jklm} * 10^{-6}$$

in cui :

i = inquinante

j = carburante

k = tipo di imbarcazione

l = tipo di motore

m = fase operativa

n = numero di imbarcazioni

E_{ijklmn} è l'emissione totale dell'inquinante i dall'uso del carburante j, sulle n imbarcazioni di tipo k, con motore l, nella fase m

t_{jklm} sono le ore medie di navigazione dell'imbarcazione k con motore l (e specifica stazza lorda) utilizzando carburante j nella fase m

P_{jkl} è la potenza media dei motori installati [kW] nell'imbarcazione k che utilizza combustibile j e ha motore di tipo l, dipende in modo esponenziale dalla stazza secondo parametri tabulati nella metodologia

LF_{km} è la frazione di potenza dell'imbarcazione k realmente impiegata nella fase m

FE_{ijlm} è il fattore di emissione medio dell'inquinante i, per il carburante j e motore l nella fase m

N_{jklm} è il numero imbarcazioni k, con motore l e carburante j

I restanti inquinanti sono stimati a partire dai consumi calcolati per i diversi tipi di imbarcazione e le relative potenze impiegate secondo la relazione seguente

$$E_i = FE_i * C_i$$

in cui C_i è il consumo di carburante e FE_i il fattore di emissione per l'inquinante considerato.

Il **modulo discariche** consente di stimare sia il contributo emissivo dovuto alla combustione del gas captato e convogliato ad un sistema combustione (direttamente alla torcia o al gruppo elettrogeno), sia le emissioni che sfuggono al sistema di captazione e si disperdono attraverso la superficie della discarica. Il modulo richiede in input le quantità e tipologie di rifiuto conferite in discarica negli anni e per la stima associata alla combustione di biogas richiede la composizione media e la portata annua del biogas captato. Per il calcolo delle emissioni da combustione di biogas, è possibile inserire i dati di emissione ai camini, qualora disponibili, o stimare le emissioni sulla base del biogas inviato a combustione, mediante i relativi fattori di emissione.

Il quantitativo di biogas prodotto, da cui poi viene sottratta la frazione captata censita dagli impianti, è calcolato sulla base dell'evoluzione temporale modellizzata da una cinetica del primo ordine che descrive i processi di degradazione biologica del carbonio organico biodegradabile presente nelle diverse tipologie di materiale smaltito, rifiuti urbani (RU), rifiuti assimilabili agli urbani (RAU) e fanghi di depurazione civile (FDC). Il dato di partenza è il contenuto di carbonio organico biodegradabile gassificabile $C_{0,w}$ presente nella singola tipologia di rifiuto umido tal quale w. Il carbonio biogassificabile per unità di massa di rifiuto è stato stimato sulla base della relazione [9]:

$$C_0 = (SOST_{org} - secca/100) * (C_{org} - secco / SOST_{org} - secca) * ((100 - U)/100) * (fb/100) * (DOCf/100)$$

Il valore della costante di degradazione del rifiuto smaltito in discarica k , viene stimato a partire dai valori di k delle singole frazioni merceologiche costituenti il rifiuto w , come media pesata utilizzando come pesi i valori delle percentuali delle frazioni nel rifiuto: $k_w = \sum_i k_{i,w} * F_{Mi} / 100$

in cui $k_{i,w}$ sono le costanti di generazione del carbonio per la frazione merceologica F_{Mi} del rifiuto w .

Il carbonio prodotto nel generico anno t dal quantitativo di rifiuto di tipologia w depositato nell'anno è calcolato mediante l'espressione [9]:

$$C_{t,x,w} = k_w * R_{x,w} * C_{0,w} * e^{-k_w(t-x)}$$

in cui

$C_{t,x,w}$ è il carbonio prodotto nel generico anno t dal quantitativo di rifiuto di tipologia w depositato nell'anno $(t-1)$

k_w è la costante cinetica di degradazione del rifiuto di tipologia w

$R_{x,w}$ è l'ammontare di rifiuti di tipologia w smaltiti nell'anno x

$C_{0,w}$ è il carbonio gassificabile per unità di massa di rifiuto di tipo w depositato nell'anno x

t è l'anno generico per cui si stima la produzione di biogas

x è l'anno in cui i rifiuti vengono posti a discarica.

Il **modulo agricoltura** comprende le emissioni dovute a tutte le pratiche agricole ad eccezione dei gruppi termici di riscaldamento (inclusi nel macrosettore 3) e dei mezzi a motore (compresi nel macrosettore 8); sono quindi incluse le emissioni dalle coltivazioni con e senza fertilizzanti e/o antiparassitari, pesticidi, diserbanti, l'incenerimento di residui effettuato in loco, le emissioni dovute alle attività di allevamento (fermentazione enterica, produzione di composti organici) e di produzione vivaistica.

Per quanto riguarda il settore allevamento animali la stima dell'emissione dei vari inquinanti è ottenuta moltiplicando l'indicatore di attività, rappresentato dal numero di capi, suddivisi per tipologia di allevamento (suini, bovini, ovini, ecc.) per il fattore di emissione. I settori compresi nella dicitura di "Allevamenti animali" sono [13]:

- la fermentazione enterica
- la gestione reflui (composti organici e composti azotati)
- le emissioni di particolato

La fonte ufficiale dei dati utilizzati quali indicatori per la stima delle emissioni è l'ISTAT che fornisce il numero di capi, per tipologia di allevamento e con livello di dettaglio comunale. Tale indicatore va poi moltiplicato per i fattori di emissione per calcolare emissioni di inquinanti complessive relative all'allevamento degli animali.

Per i suoli agricoli i dati necessari per effettuare una stima delle emissioni da coltivazioni che utilizzano fertilizzanti sono il quantitativo di fertilizzanti azotati venduti, la superficie agraria utilizzabile ed il fabbisogno di azoto di ogni tipologia di fertilizzante. Per ottenere una stima emissiva con un livello di dettaglio comunale si prende in considerazione il fabbisogno azotato (KgN/ha) per singola coltura, gli ettari di superficie agraria utilizzabile (S.A.U.) comunale dedicati alle diverse tipologie colturali e le unità di azoto dei fertilizzanti azotati venduti per provincia. Il fertilizzante applicato alle coltivazioni viene calcolato utilizzando il quantitativo di venduto e il fabbisogno azotato delle diverse colture (derivato dal codice di buona pratica agricola, approvato con DM 19 aprile 1999, e dalle indicazioni fornite dal Settore Agricoltura delle Province di Mantova e Pavia).

La fonte ufficiale dei dati da utilizzare relativi alle quantità di fertilizzanti per uso agricolo, quali indicatori per la stima delle emissioni è l'ISTAT (dati a livello provinciale). Per disaggregare a livello comunale il dato emissivo calcolato con livello di dettaglio provinciale vengono utilizzati gli ettari di S.A.U. (superficie agricola utilizzata) dedicati alle diverse tipologie colturali, reperibili dal sito dell'ISTAT relativi al Censimento Agricoltura.

Per quanto riguarda le emissioni dovute ad attività agricole senza uso di fertilizzanti, esse si riferiscono alle seguenti attività CORINAIR:

- Foraggiere (pascoli, prati permanenti ed altri prati avvicendati);
- Risaie

Tutte le altre coltivazioni sono state considerate soggette a fertilizzazione e pertanto calcolate come spiegato in precedenza.

Le emissioni complessive derivanti dall'agricoltura sono poi calcolate come somma delle diverse attività.

Il **modulo biogeniche** calcola le emissioni di isoprene, monoterpeni e altri composti organici volatili a livello comunale per effetto dell'attività fitologica e va a popolare parte dei macrosettori 10 e 11. Le stime emissive tengono conto dell'influenza sulle diverse specie agro-forestali di alcuni parametri meteo (valori medi di temperatura, radiazione solare e umidità relativa per ogni ora del giorno e per ogni mese) caratteristici della fascia climatica a cui appartiene il singolo comune. Il dato richiesto in input è costituito dalla superficie comunale occupata

da ogni macrospecie, all'interno della quale sono accorpate più specie vegetali con diverso peso percentuale sul totale della macrospecie. Le emissioni di isoprene dipendono oltre che dalla specie, da temperatura, radiazione solare e umidità relativa; quelle di monoteropeni e altri COV dipendono per ogni specie solo dalla temperatura.

Il **modulo foreste** consente di stimare gli assorbimenti di CO₂ dalla gestione forestale. La metodologia CORINAIR fornisce i fattori di emissione in funzione dell'estensione dei boschi per tipologia di alberi.

3. Sorgenti civili: Contributo del riscaldamento alla qualità dell'aria

3.1 Inquinanti emessi dal settore riscaldamento

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

La natura del combustibile influenza molto i meccanismi di combustione, in quanto questi sono significativamente diversi quando a bruciare è un solido, un liquido oppure un gas. A titolo puramente indicativo e generale si può affermare che i combustibili gassosi (gas naturale e GPL), essendo costituiti da molecole più semplici, possono raggiungere più rapidamente e facilmente un grado di combustione completo. I combustibili liquidi e ancor più quelli solidi, subiscono un processo di combustione più complesso. Benché anche per questi combustibili sia possibile raggiungere una completa combustione, ciò è in pratica più difficile, in special modo per i solidi dove residui della combustione incompleta sono sempre presenti tanto in fase solida, come carbonio residuo nelle ceneri, quanto in fase gassosa, sotto forma di idrocarburi di varia natura. Altro aspetto che differenzia i combustibili in funzione della loro tipologia, ma che dipende anche dalla qualità specifica di ciascun combustibile, è la presenza di elementi diversi dal carbonio e dall'idrogeno che ne sono i componenti principali dal punto di vista energetico. Elementi come ossigeno, azoto e zolfo possono essere originariamente presenti in tutti i combustibili, ma sono riscontrabili nei prodotti finali in misura assai diversa in funzione dei trattamenti che questi subiscono prima della loro distribuzione. Nel caso di combustibili gassosi piccole quantità di specie solforate sono presenti dall'origine, mentre altre sono aggiunte per garantirne l'odorizzazione, mantenendosi comunque a livelli minimi.

Sono altri, invece, i componenti del particolato aerodisperso (PM) a rappresentare un rilevante rischio per la salute dei soggetti esposti, in maniera continuativa, a concentrazioni superiori alle soglie individuate a livello internazionale. Il particolato primario è in parte un prodotto della combustione incompleta, in quanto costituito prevalentemente da carbonio e generato attraverso reazioni successive a partire da composti organici semplici derivanti dal combustibile che non riesce a bruciare completamente. Buona parte di queste specie incombuste vengono liberate come tali all'interno dei fumi e quantificate in termini di Carbonio

Organico Totale (COT); una parte però subisce processi di addizione e agglomerazione portando alla formazione di quella che viene comunemente chiamata fuliggine o più tecnicamente *soot*. Fra queste specie sono spesso presenti, in misura variabile, alcuni composti classificati come tossici e cancerogeni: fra essi in particolare appaiono gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), dei quali il benzo[a]pirene è uno dei componenti più noti e rappresentativi

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

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

Notevole influenza sulla qualità delle emissioni lo hanno le tecnologie di combustione: queste ultime infatti determinano le modalità in cui il combustibile viene alimentato ed entra in contatto con l'aria comburente, i tempi di residenza e le temperature nella camera di combustione ed in ultima analisi governano il processo di combustione stesso. Per queste ragioni un medesimo combustibile può produrre inquinanti in misura assai diversa in funzione del livello tecnologico dell'apparecchio al quale è alimentato. Negli ultimi decenni i progettisti si sono mossi verso la realizzazione di bruciatori e camere di combustione che garantiscano una maggior efficienza di combustione, il che implica una minor emissione di CO e di altri prodotti della combustione incompleta. Mentre la riduzione delle emissioni di NOx è stata perseguita attraverso la realizzazione di bruciatori low-NOX che riducono la temperatura di fiamma [14].

L'ultimo fattore, citato all'inizio, che influenza significativamente le prestazioni ambientali di un impianto anche se spesso sottovalutato, è rappresentato dalle condizioni operative di funzionamento dell'impianto stesso, che a loro volta dipendono dalle condizioni di installazione, manutenzione e gestione quotidiana. In effetti anche un combustibile di buona qualità, alimentato ad un apparecchio di elevate prestazioni può produrre risultati assai peggiori di quanto ci si potrebbe

attendere se gestito in maniera impropria o comunque non ottimale. Analogamente il corretto dimensionamento e il corretto funzionamento degli impianti fumari ha una notevole influenza tanto sui rendimenti quanto sulle emissioni degli impianti a gas. Un tiraggio non adeguato peggiora notevolmente le condizioni di combustione e non consente una completa evacuazione dei prodotti della combustione.

3.2 Tipologie di riscaldamento

Un impianto di riscaldamento è composto da sistemi per la produzione di calore (in genere la caldaia) e dispositivi per la trasmissione del calore (come i radiatori o i bocchettoni in caso di stufe a pellet).

Gli impianti di riscaldamento si classificano per il tipo combustibile (carbone, gasolio, gas, legna, ecc) o la fonte di energia usata (geotermica, solare o elettrica, ecc) per riscaldare l'aria, l'acqua o il vapore che viene convogliato nei punti di destinazione. Solitamente l'impianto di riscaldamento è abbinato all'impianto di produzione di acqua calda sanitaria.

Il generatore di calore più diffuso è la **caldaia**. La caldaia è un'apparecchiatura che trasforma l'energia di combustibili in calore e lo rende disponibile in un circuito contenente acqua o vapore che ha la funzione di distribuire il calore negli ambienti ed eventualmente nell'acqua dell'impianto sanitario. In altri termini, il suo principio è di riscaldare dell'acqua che viene trasmessa successivamente agli emettitori di calore dell'abitazione. Le caldaie si classificano in funzione della potenza termica nominale (caldaie murali, a basamento o a fiamma inversa), del luogo d'installazione (caldaie da interno o da esterno), del tipo di tiraggio dell'aria (a camera stagna, a camera aperta), del combustibile (gas, metano, gpl, gasolio, pellet, legna) e della tecnologia di scambio (a condensazione o tradizionali). In commercio non mancano anche caldaie elettriche ma la loro convenienza è strettamente correlata all'impiego di un piccolo impianto fotovoltaico.

Tra gli altri possibili generatori di calore vi sono le **pompe di calore (PdC)**, le quali sono apparecchiature che prelevano calore da un ambiente e, innalzandone la temperatura, lo rendono disponibile ad un ambiente più caldo. Ad esempio, per il riscaldamento invernale di un edificio, una pompa di calore opera sottraendo calore all'ambiente esterno, per fornirlo agli spazi interni, mantenendoli al caldo. Per far avvenire questo processo, opposto a quello spontaneo in cui il calore si trasferisce da un corpo più caldo a uno più freddo, le pompe di calore consumano una certa quantità di energia che può essere fornita, a seconda della tecnologia

impiegata, sotto forma di energia elettrica oppure di gas. Esistono pompe di calore che prelevino calore dall'aria, dall'acqua o dal terreno. Tali soluzioni sono particolarmente indicate in abbinamento ad impianti radianti. Lo scaldacqua a pompa di calore è un'ulteriore applicazione della pompa di calore elettrica, che consente di produrre ed accumulare l'acqua calda sanitaria in sostituzione dei comuni boiler elettrici. Alcune pompe di calore possono anche funzionare per il raffrescamento estivo degli ambienti e in questo caso vengono dette reversibili.

Il **termocamino** è invece un sistema di riscaldamento domestico che prevede l'utilizzo di legna o pellet come combustibile, al quale possono essere affiancati anche quelli tradizionali (gpl, metano o gasolio). Si tratta di un camino a camera chiusa, con uno sportello di vetro termico richiudibile, che consente maggiore efficienza rispetto a quello a camera aperta, grazie al recupero di buona parte del calore prodotto che altrimenti si disperderebbe nella canna fumaria.

L'acqua del circuito dei termosifoni si riscalda circolando nello scambiatore di calore all'interno dell'intercapedine del termocamino e rientra in circolo nell'impianto di riscaldamento. Questo sistema di riscaldamento permette infatti la diffusione del calore in casa ottimizzando i costi e offrendo numerosi vantaggi in termini di efficienza.

In un impianto di riscaldamento, dopo aver prodotto il calore è necessario diffonderlo nei vari ambienti e per farlo si utilizzano degli **scambiatori di calore acqua-aria**. Generalmente questi terminali sono di tre tipi: i termosifoni (o radiatori), in cui lo scambio di calore avviene soprattutto per convezione; i ventilconvettori, con scambio essenzialmente convettivo in regime di convezione forzata e i pannelli radianti (sistema più invasivo dei primi due), con trasmissione del calore soprattutto per via radiativa e in parte convettiva.

La più recente indagine statistica che include il settore del riscaldamento domestico è stata condotta dall'ISTAT e pubblicata nel dicembre 2014, dalla quale emerge che circa il 98% delle famiglie che risiedono in Italia dichiara di possedere un impianto per il riscaldamento dell'abitazione. La Tabella 3.1 mostra la distribuzione delle diverse tipologie di impianti e di combustibili. Vi è una predominanza nell'uso del gas naturale, tranne che nel caso degli apparecchi singoli che sono alimentati principalmente a biomassa.

| Riscaldamento domestico | | | | | |
|--------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|------------------------------|------------|
| | Impianto centralizzato | Impianto autonomo | Apparecchi singoli fissi | Apparecchi singoli portatili | Totale |
| | % famiglie | % famiglie | % famiglie | % famiglie | % famiglie |
| Metano | 83.8 | 86.5 | 6.1 | - | 70.9 |
| Energia elettrica | 1.4 | 0.4 | 17.7 | 54.2 | 5.1 |
| Biomasse | 0.7 | 4.8 | 73.9 | - | 14.5 |
| GPL | 2.5 | 5.3 | 2.3 | 45.8 | 5.8 |
| Gasolio | 11.6 | 3.0 | - | - | 3.7 |

Tabella 3.1 : Distribuzione degli impianti e dei combustibili in Italia [15]

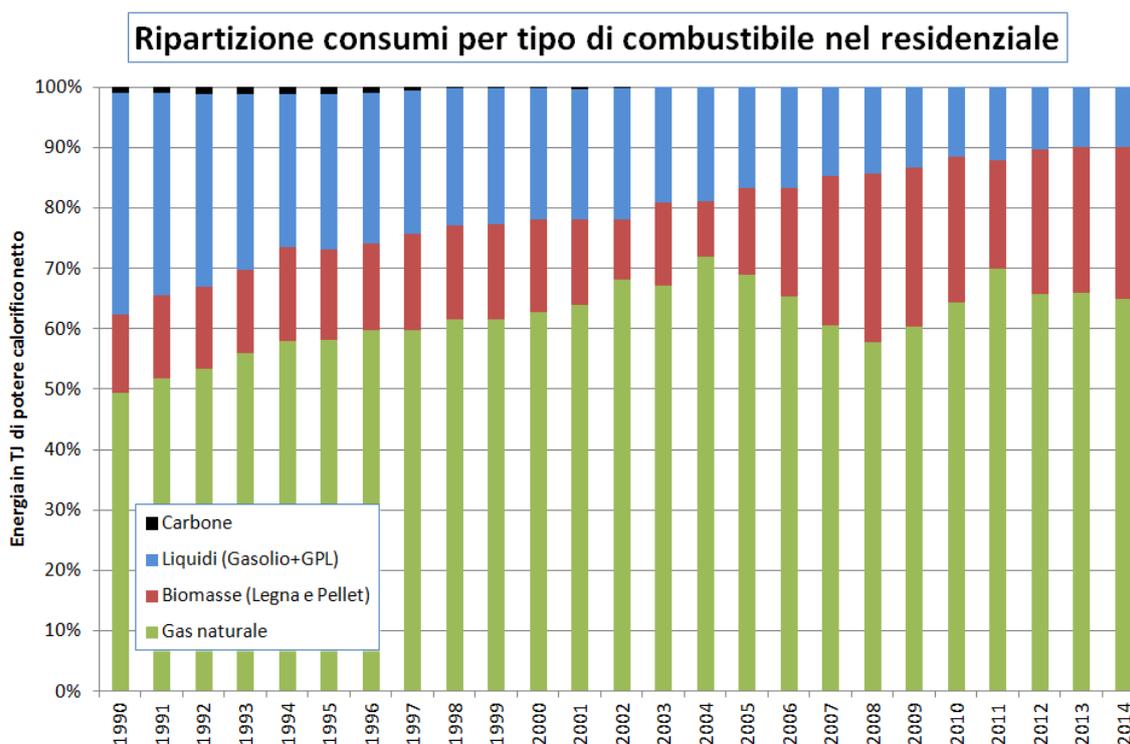


Grafico 3.1: Storico dei consumi in proporzione sul totale, di ogni classe di combustibile nel settore residenziale [16]

Nonostante la bassa percentuale di impiego, gli impianti a biomasse sono tra i più problematici dal punto di vista delle emissioni e relativo peggioramento della qualità dell'aria, soprattutto per quanto riguarda le emissioni di particolato. Questo problema è accentuato dal fatto che la tipologia di dotazioni utilizzata per le biomasse è soprattutto il camino o la stufa tradizionale (77,6%), apparecchi che scaldano solo il locale dove sono collocati (inclusi i camini ventilati), mentre solo il 13,6% delle famiglie utilizza tecnologie innovative (camini o stufe) collegate ai termosifoni ed in grado di scaldare più stanze dell'abitazione. Il restante 7,8% utilizza altre apparecchiature quali ad esempio scaldabagni/scaldacqua singoli, apparecchi per cucinare, eccetera.

| | 1999 | 2006 | 2012 |
|--------------------------|------|------|------|
| | % | % | % |
| Camineti a legna | 51.3 | 44.7 | 51.2 |
| Stufe a legna | 28.4 | 27.6 | 22.9 |
| Camineti avanzati | 15.4 | 20.2 | 15.8 |
| Stufe a pellet | 0 | 3.1 | 4 |
| Stufe avanzate | 4.8 | 4.4 | 6 |

Tabella 3.2: Diffusione delle tipologie degli apparecchi a biomassa [15]

Ogni unità di energia che viene bruciata in più sotto forma di biomassa, emette molte più polveri sottili di quelle avrebbe emesso la stessa unità di energia in forma di combustibili liquidi (e infinitamente di più rispetto al metano, che ha una combustione molto pulita). I fattori di emissione medi considerando le varie tecnologie che impiegano biomassa sono di 350 g/GJ per PM10 e di 5351 g/GJ per il CO [17]. Questo vuol dire che legna e pellet emettono centinaia di volte di più PM10 e CO rispetto al gas naturale, che ha un fattore di emissione pari a 0,20 g/GJ per il PM10 e di 25 g/GJ per il CO. I primi risultati dello studio Supersito avviato dalla Regione Emilia-Romagna confermano il maggiore impatto degli impianti a biomasse anche in termini assoluti, infatti l'apporto stimato alla massa totale di PM2.5 da tale fonte sembra variare da circa il 25% al 40% durante la stagione fredda e da circa il 10% al 20% durante la stagione calda [18].

Nonostante il maggior impatto ambientale la percentuale di cittadini che continuano ad utilizzare biomasse come combustibili non è in diminuzione, ma anzi in aumento come si può notare dal Grafico 3.1. Questo principalmente per motivazioni economiche (costa meno o addirittura non si compera), ma secondo un'indagine statistica anche per motivazioni estetiche, ovvero "perché è bello vederla ardere", risposta data dal 42,3% degli intervistati, mentre un 16% la impiega perché la considera più ecologica [17]. Purtroppo si confonde spesso il concetto di combustibile "rinnovabile" con quello di "pulito".

Per abbassare i livelli di emissioni nocive, oltre a scegliere la modalità di riscaldamento meno impattante, si dovrebbe porre attenzione anche al miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. A tal proposito, il Decreto Legislativo numero 192 del 2005 stabilisce l'obbligo della certificazione energetica degli edifici attraverso il rilascio di un attestato che fa riferimento alle **Classi Energetiche**. Il decreto Legislativo fa riferimento a una Direttiva Europea ancor più datata, la direttiva 2002/91/CE.

Le classi Energetiche degli edifici possono essere diverse in base alle disposizioni, ma in genere si prende ad esempio il modello della Regione Lombardia che vede 8 classi di riferimento (la classe più performante è la A+ seguita dalle classi A, B, C, D, E, F e G) assegnate in base al fabbisogno di energia primaria (EP) che occorre per riscaldare ogni metro quadro di superficie.

Gli attestati riportati nel grafico si riferiscono ai 680.000 Attestati di Prestazione Energetica (APE) registrati dalla Regione Emilia-Romagna dal 1° gennaio 2009 al 31 dicembre 2014. Si può notare che buona parte (33.95%) degli APE riportati la Classe Energetica G, la meno performante, questo è spiegabile dal fatto che la maggior parte degli stessi sono relativi a compravendita e locazione. Considerando invece solo gli attestati emessi per edifici di nuova costruzione (70.000), si ha che la maggior parte ricadono in Classe B (27,94 % pari a 19.533 attestati) ed in Classe C (27,82 % pari a 19.446 attestati). Gli attestati nelle classi energetiche migliori sono pari a 9.137 in Classe A (13,07 %) e 1.930 in Classe A+ (2,76 %) [19].

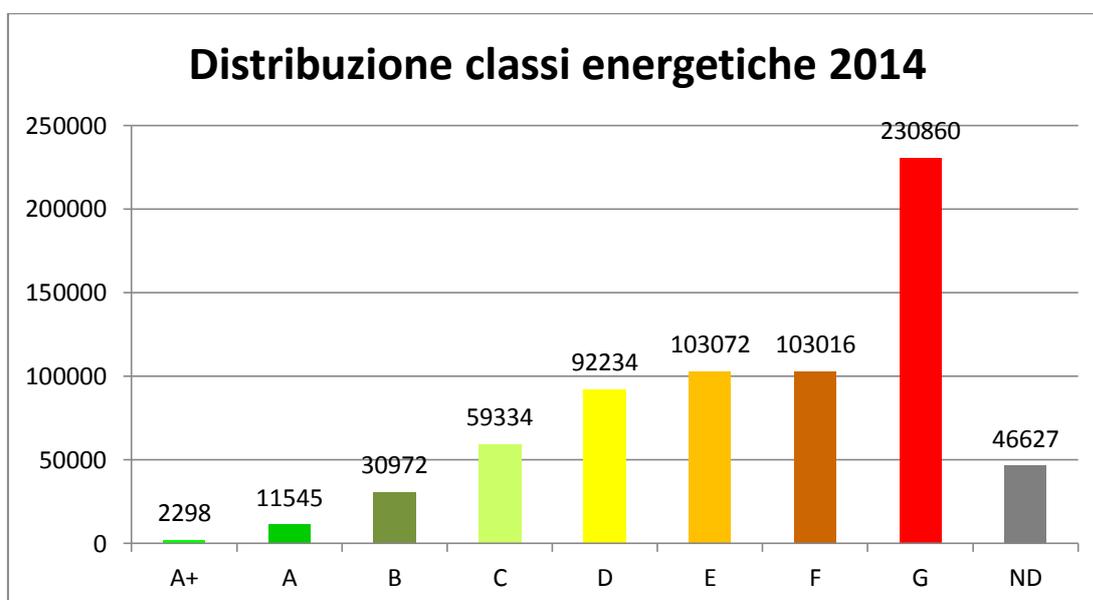


Grafico 3.2: Distribuzione per Classe Energetica – Totale Attestati Emessi dalla regione Emilia-Romagna al 2014

Va segnalato che in Emilia-Romagna dal 1 ottobre 2015 è in vigore un nuovo sistema di classificazione basato su classi “scorrevoli” (10 classi: A4, A3, A2, A1, B, C, D, E, F, G), determinate in base ad un range di variazione proporzionale del valore dell’indice EP di un edificio di riferimento “virtuale”: per edificio di riferimento si intende un edificio identico in termini di geometria (sagoma, volumi, superficie calpestabile, superfici degli elementi costruttivi e dei componenti), orientamento, ubicazione territoriale, destinazione d’uso e situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati.

In pratica, nel nuovo sistema, il valore dell’indice di prestazione energetica globale non rinnovabile calcolato sull’edificio di riferimento, determina il limite tra la classe A1 e B, mentre gli intervalli di prestazione che identificano le altre classi sono ricavati attraverso coefficienti moltiplicativi di riduzione/maggiorazione del valore di energia primaria non rinnovabile $EP_{gl,nr,Lst}$ [20].

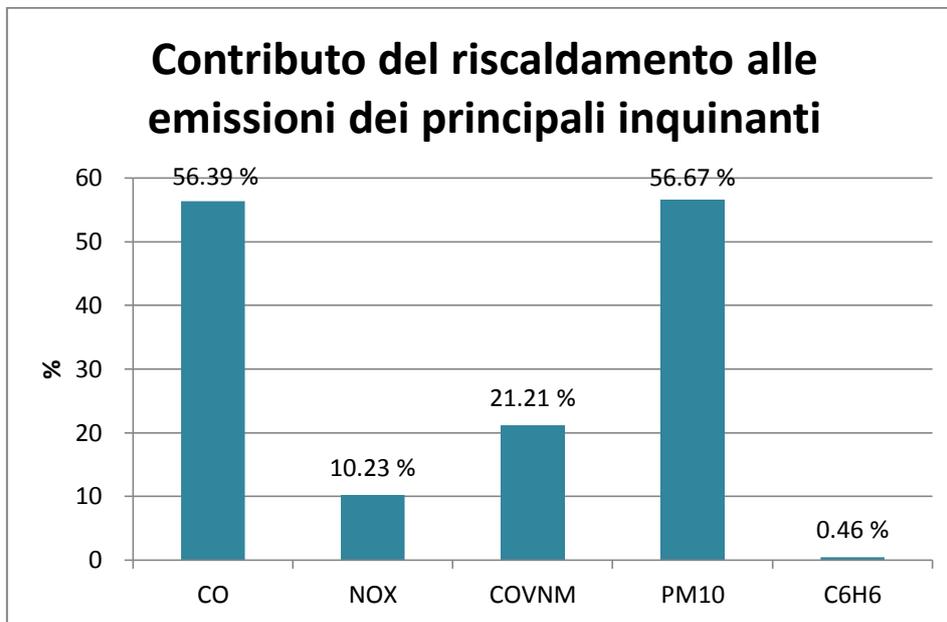


Grafico 3.3: Contributo percentuale delle emissioni non-industriali per classe di inquinante. Anno di riferimento 2014 [5]

Analizzando le emissioni totali aggiornate all’anno 2014, si può estrapolare il contributo delle emissioni non industriali per ciascun inquinante. Per emissioni non industriali si intendono i processi di combustione finalizzati per la produzione di calore (riscaldamento) per le attività di tipo non industriale: sono compresi, quindi, gli impianti commerciali ed istituzionali, quelli residenziali (riscaldamento e processi di combustione domestici quali camini, stufe, ecc.) e quelli agricoli.

Si evince che il riscaldamento è responsabile per più della metà delle emissioni di CO e PM10, mentre ha contributi minori ma comunque significativi per quanto riguarda NO_x e COVNM. Non ha quasi influenza sulle emissioni totali di benzene.

3.3 Impianti a gas naturale

Come visto gli impianti di riscaldamento che impiegano gas naturale come combustibile sono di gran lunga i più utilizzati. Nell'anno 2014 a livello nazionale si sono consumati 25660 MSmc di gas naturale [21], valore che si attesta leggermente minore ma sostanzialmente in linea alla media degli ultimi anni, come si può vedere dal grafico sottostante.

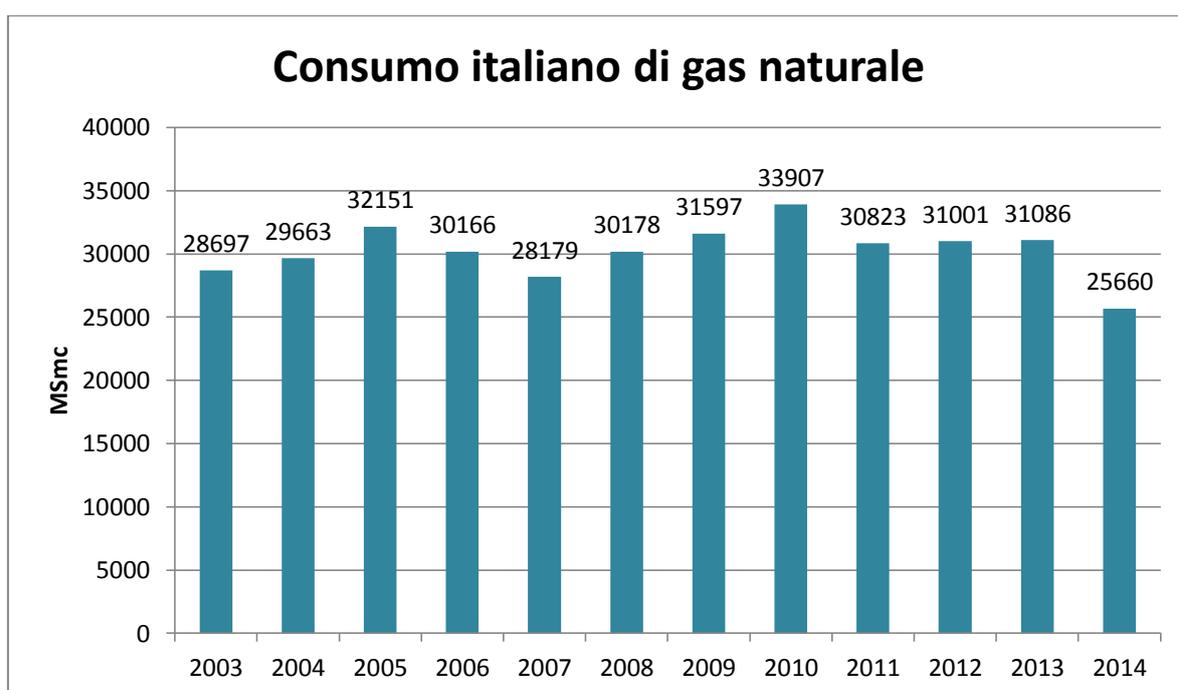


Grafico 3.4: Consumo nazionale di gas naturale (Milioni di Standard metri cubi da 38,1 MJ/m³)

Prendono il nome di gas naturale le miscele gassose combustibili reperibili in natura per emanazione spontanea o per trivellazione. La composizione chimica è assai variabile, passando da miscele costituite prevalentemente da prodotti inerti (CO₂), ad altre formate quasi esclusivamente da gas combustibili, in genere idrocarburi leggeri. Il potere calorifero varia con la composizione: per i gas poveri di inerti è assai elevato e prossimo a quello del metano. Secondo una definizione più ristretta, il termine gas naturale andrebbe limitato alle miscele costituite prevalentemente da metano ed etano.

Il metano è un gas senza colore né odore, più leggero dell'aria, insolubile in acqua. Brucia con fiamma non luminosa ma altamente calorifica, non è velenoso. Si forma in natura per decomposizione della cellulosa contenuta nelle piante palustri: mescolato con CO₂ e N₂ forma il gas delle paludi. Si trova anche nei gas che si sviluppano nelle miniere di carbon fossile (gas delle miniere), la cui miscela con l'ossigeno dell'aria, grisou, può provocare violente esplosioni, formando CO₂ e H₂O.

In Italia si producono pochi milioni di Standard metri cubi di gas naturale rispetto a quelli poi consumati, in particolare all'anno 2016 la produzione annuale ammontava a 5785 MSmc, mentre le importazioni sono state pari a 65284 MSmc. Di queste ultime il 41,1% (26787 MSmc) provenivano dalla Russia, il 29,8 % (19286 MSmc) dall'Algeria, l'8,5% (5521 MSmc) dal Qatar, il 7,4% (4840 MSmc) dalla Libia e il 4,2% (2,742 MSmc) dall'Olanda. Frazioni minori da Germania (2,9%, 1893 MSmc) e da tutti gli altri paesi UE (2,1%, 1388 MSmc)[21]. Il gas naturale ha composizione differente a seconda della provenienza, nella Tabella 3.3 sono espresse le composizioni dei principali gas naturali importati dall'Italia.

| Composizione (% vol) | Gas nazionale | Gas libico | Gas russo | Gas olandese | Gas algerino |
|----------------------|---------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| Metano | 99.20 | 81.40 | 92.00 | 88.85 | 83.00 |
| Etano | 0.40 | 9.40 | 3.20 | 4.30 | 7.50 |
| Propano | 0.14 | 2.00 | 0.85 | 0.90 | 2.00 |
| Butano | - | 0.30 | 0.20 | 0.30 | 0.80 |
| Pentano | - | - | 0.10 | 0.10 | 0.30 |
| Esano | - | - | 0.05 | 0.05 | 0.20 |
| Diossido di carbonio | 0.01 | 1.20 | 0.30 | 1.30 | 0.20 |
| Azoto | 0.25 | 0.50 | 3.30 | 4.20 | 6.00 |
| Ossido di carbonio | - | 0.20 | - | - | - |
| Idrogeno | - | 5.00 | - | - | - |

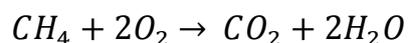
Tabella 3.3: Composizione media di alcuni gas naturali [14]

Il gas naturale si trova in strutture geologiche presenti solo in determinati territori ed a certe profondità. Attraverso un lento processo, durato migliaia di anni, la fase gassosa degli idrocarburi si è separata dalla fase liquida (il petrolio, più pesante) tendendo a salire verso la superficie della crosta terrestre; qui si è trovata imprigionata in strati di rocce porose ricoperti da rocce impermeabili, tali da impedirne ulteriore migrazione.

I trattamenti a cui deve essere sottoposto il gas naturale prima di essere immesso al consumo sono variabili a seconda della composizione. Nel caso di un gas

costituito prevalentemente da metano, con poche unità percentuali di inerti, è sufficiente una decompressione per passarlo ai metanodotti. In altri casi si procede all'allontanamento del vapor d'acqua, della CO₂, del solfuro di idrogeno, degli idrocarburi superiori liquidi o facilmente liquefacibili. L'eliminazione del vapor d'acqua è necessaria perché con il raffreddamento o la compressione il vapore potrebbe portarsi in fase liquida o solida o dare origine ad idrati solidi degli idrocarburi. La presenza di acqua liquida accelera i fenomeni di corrosione, mentre i prodotti solidi possono otturare o ridurre la sezione delle tubazioni e ostacolare il funzionamento delle valvole. Per ragioni analoghe, è possibile la formazione di fasi liquide nella parti più fredde delle tubazioni; vanno pertanto eliminati gli idrocarburi condensabili (degasolinaggio), senza contare che essi costituiscono anche un prodotto di notevole valore economico. Il diossido di carbonio costituisce un diluente e può favorire i processi di corrosione, pertanto deve essere allontanata. Delle operazioni di purificazione, la più importante è quella che porta all'allontanamento dell'idrogeno solforato, un'esigenza comune a molti altri gas combustibili anche artificiali. Per la desolforazione sono stati proposti ed attuati diversi processi tra cui poter scegliere, a seconda della quantità di gas da trattare, della concentrazione originale dell'idrogeno solforato, del grado di purificazione che si vuole raggiungere. L'idrogeno solforato può essere recuperato e impiegato come fonte di zolfo.

Per quanto riguarda le emissioni in atmosfera, si deve considerare che la reazione di combustione teorica del metano è la seguente:



E, come noto, dà origine a diossido di carbonio e vapor d'acqua (l'azoto è quello presente nell'aria di combustione). Pertanto, come combustibile impiegato in caldaie per usi civili, esso se ben bruciato non origina né ceneri né fuliggine e sporca meno degli altri combustibili le superfici interne dei generatori e dei camini. Inoltre, la produzione di CO₂ a seguito della combustione del metano è minore di quella degli altri combustibili, a parità di calore reso. Mentre come già ricordato, le elevate temperature che si raggiungono durante la combustione con aria atmosferica favoriscono la produzione di ossidi di azoto.

Inoltre, in alternativa alle caldaie tradizionali sono sempre più impiegate le **caldaie a condensazione**, le quali permettono minori consumi (anche del 15%) e basse emissioni di sostanze inquinanti, mentre il loro costo è superiore del 30-40% rispetto alle caldaie tradizionali. In questo nuovo tipo di caldaia il calore dei gas combusti viene recuperato, a differenza dei modelli tradizionali in cui viene

espulso con i fumi di scarico, e condensato e riutilizzato nel processo di riscaldamento. Essendo totalmente a tenuta stagna, possono essere inserite in qualsiasi ambiente domestico, previa installazione di un tubo di scarico dell'acqua di condensa, che può essere convogliata nella rete delle acque nere o bianche.

3.4 Normativa riscaldamento edifici civili

Gli impianti per il riscaldamento civile in Italia sono regolamentati sul piano legislativo dal Titolo II della Parte V del **D.Lgs 152 del 2006** e s.m.i. che definisce inoltre, nel suo Allegato X, le tipologie e le caratteristiche di combustibili impiegabili in questi impianti; rimangono comunque esclusi dal campo di applicazione del decreto tutti gli impianti e gli apparecchi di potenza nominale inferiore a 35 kW.

Esistono poi svariate norme tecniche, molte delle quali armonizzate, che si applicano a tutte le differenti tipologie di caldaie e apparecchi per il riscaldamento degli ambienti (*space heaters*): in particolare, gli apparecchi alimentati con combustibili gassosi (2° famiglia, gas naturale e 3° famiglia, GPL) rientrano nel campo di applicazione del recente **Regolamento (UE) 2016/426** del Parlamento Europeo e del Consiglio del 9 marzo 2016, che ha abrogato la DIRETTIVA APPARECCHI A GAS 2009/142/EC. Il passaggio da una Direttiva a un Regolamento è una variazione significativa e fondamentale; infatti un Regolamento è immediatamente applicabile in tutti gli Stati Membri, mentre una direttiva ha bisogno di un decreto attuativo. Disporre di un regolamento garantisce che non vi siano differenti legislazioni nazionali, ma bensì una sola legislazione disponibile in tutte le lingue della Comunità Europea. L'introduzione del Regolamento non cambia lo scopo della ormai abrogata Direttiva 2009/142/EC, piuttosto modifica e chiarisce taluni provvedimenti imponendo specifici obblighi ai costruttori, importatori e distributori, definendo maggior chiarezza e responsabilità. Il regolamento 2016/426 riprende sostanzialmente la precedente direttiva, inquadrando dettagliatamente il campo di applicazione richiamando i requisiti essenziali affinché apparecchi e accessori possano essere messi a disposizione sul mercato, ribadendo che essendo elemento normativo europeo, le disposizioni ivi contenute garantiscono la libera circolazione tra gli Stati membri. Il Capo II è dedicato agli obblighi a cui devono sottostare gli operatori economici, i fabbricanti devono garantire che i prodotti sono stati progettati e fabbricati conformemente ai requisiti del regolamento redigendo una dichiarazione UE di conformità e apponendo il marchio CE, gli importatori vengono richiamati come ente controllore sull'operato del fabbricante, imponendo la verifica dell'appropriata

procedura di valutazione della conformità che il fabbricante deve avere ottemperato. A sua volta i distributori si devono accertare che l'apparecchio sia conforme ai requisiti del regolamento e si devono accertare che, quando un apparecchio o un accessorio è sotto la loro responsabilità, le condizioni di immagazzinamento o di trasporto non mettano a rischio la sua conformità ai requisiti essenziali richiamati dal regolamento. I distributori che ritengano, o abbiano motivo di ritenere, non conforme al regolamento un apparecchio o un accessorio da essi reso disponibile sul mercato, si accertano che siano presi provvedimenti correttivi necessari per rendere l'apparecchio o l'accessorio conforme, ritirarlo o eventualmente richiamarlo. Inoltre, se l'apparecchio o l'accessorio presenta un rischio, i distributori ne informano immediatamente le competenti autorità nazionali degli Stati membri sul cui mercato lo hanno reso disponibile, indicando in particolare i dettagli relativi alla non conformità e i provvedimenti correttivi adottati. I Capi successivi riguardano la conformità degli apparecchi e degli accessori e le procedure di nomina per la designazione delle autorità di notifica degli organismi di valutazione della conformità. Il regolamento è entrato in vigore il 21 aprile 2016; alcuni articoli si applicano a decorrere dal 21 ottobre 2016, ma la parte più corposa comprensiva degli obblighi e responsabilità dei distributori si applicherà dal 2018 [14].

Ai fini del presente regolamento, un apparecchio si considera «usato normalmente» quando sono soddisfatte le seguenti condizioni [22]:

- a) è installato correttamente e sottoposto a una regolare manutenzione conforme alle istruzioni del fabbricante;
- b) è usato nell'ambito della normale gamma di variazioni della qualità del gas e della pressione di alimentazione come stabilito dagli Stati membri nella loro comunicazione a norma dell'articolo 4, paragrafo 1;
- c) è usato per gli scopi ai quali è stato destinato o in modi ragionevolmente prevedibili.

Dal suddetto regolamento si evince che le emissioni degli impianti di riscaldamento civile non hanno l'obbligo di essere monitorate in continuo o a intervalli regolari, ma vi è unicamente l'imposizione di utilizzare normalmente l'apparecchio e quindi di sottoporlo a regolare manutenzione. Questa è regolata dal **D.Lgs 311/06** che ha integrato e corretto il precedente D.Lgs 192/05.

In alcuni casi è già stata approvata una Direttiva, la **2009/125/CE** denominata Ecodesign, che prevede maggiori e più stringenti limiti in termini di efficienza ed emissioni; tale direttiva è già entrata in vigore per alcuni settori, dal 2015 per le

caldaie a gas, mentre per altri entrerà in vigore successivamente, nel caso di stufe e caminetti nel 2022.

Inoltre, nella Regione di nostro interesse, al fine di ridurre le emissioni degli inquinanti più critici (PM10, biossido di azoto e ozono) l'Assemblea legislativa della Regione Emilia-Romagna ha approvato in data 11 aprile 2017 il **“Piano aria integrato regionale” (PAIR 2020)**. Il Piano, che ha quale orizzonte temporale strategico di riferimento il 2020, prevede 94 misure per il risanamento della qualità dell'aria al fine di ridurre i livelli degli inquinanti sul territorio regionale e rientrare nei valori limite fissati dalla Direttiva 2008/50/CE e dal D.Lgs. 155/2010.

In particolare nell'ambito del riscaldamento introduce azioni quali [23]: finanziamento fino al 2020 con 67 milioni del POR FESR (Programma operativo regionale-Fondo Europeo di Sviluppo Regionale) della riqualificazione energetica degli edifici pubblici e delle attività produttive; chiusura delle porte degli esercizi commerciali e degli immobili aperti al pubblico per evitare dispersioni di calore o raffrescamento; limitazioni all'uso di olio combustibile negli impianti termici per l'industria; il divieto di installazione e utilizzo di impianti per la climatizzazione in spazi non abitati (come cantine, vani, box, garage, depositi o androni); dal 1 ottobre al 31 marzo di ogni anno, si introduce il divieto di utilizzo dei camini “aperti” alimentati a legna e con efficienza energetica inferiore al 75% nelle unità immobiliari dotate di sistemi di riscaldamento multicomustibile nei Comuni i cui territori sono interamente ubicati a quota altimetrica inferiore a 300 metri. Nei Comuni con aree ad altitudini anche in parte superiori a 300 m, i Sindaci dovranno indicare con un proprio atto le zone situate al di sotto della suddetta quota in cui si applicherà il divieto .

Sono previste anche delle misure emergenziali che scattano nei casi in cui il limite giornaliero di PM10 venga superato per più giorni consecutivi, rimangono in vigore fino al giorno di controllo successivo compreso. Tra le limitazioni previste vi sono: abbassamento delle temperature medie nelle abitazioni fino a un massimo di 19°C e negli spazi commerciali e ricreativi fino a un massimo di 17°C; divieto di uso di biomasse per il riscaldamento domestico (in presenza di impianto alternativo) con classe di prestazione energetica ed emissiva inferiore a 3 stelle. Da segnalare che secondo l'ultimo rapporto di Legambiente [7] nonostante tutti i Sindaci abbiano recepito nelle loro ordinanze i limiti alla circolazione previsti dal PAIR non si può dire lo stesso per le limitazioni alle temperature degli edifici. Dei 31 Comuni che hanno aderito al PAIR, solo 24 hanno adottato nelle delibere le norme che prevedono il controllo delle temperature degli edifici. Mentre per quanto riguarda la norma che prevede l'obbligo di tenere le porte chiuse degli esercizi pubblici per

evitare sprechi energetici, solo i Comuni di Reggio Emilia, Bologna e Modena hanno recepito l'indicazione, definendo anche sanzioni pecuniarie per il mancato rispetto dell'ordinanza. Caso opposto quello del Comune di Sasso Marconi, che ad oggi non risulta aver recepito nessuna misura del Piano Aria.

4. Caso studio: studio emissivo dei fumi da riscaldamento della Facoltà di Ingegneria sita in Via Terracini

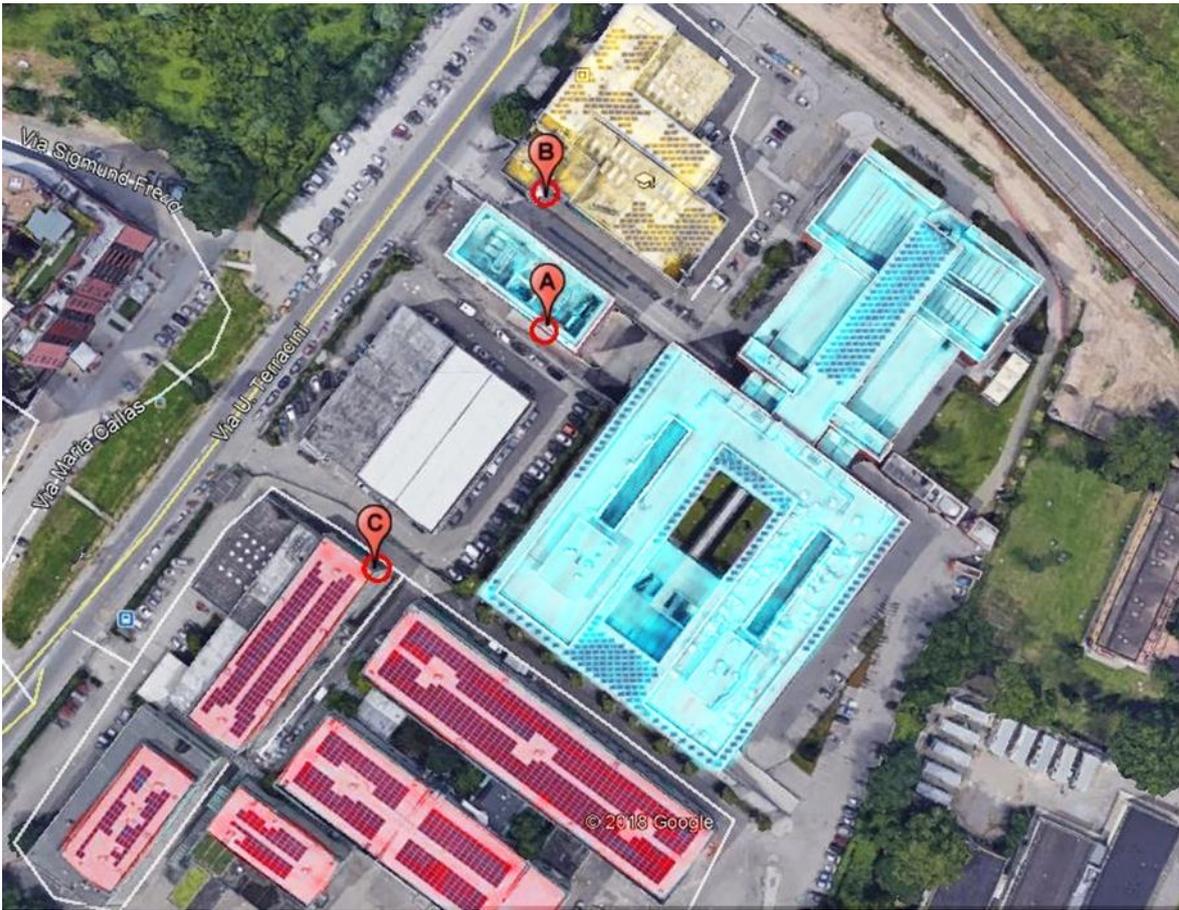


Immagine 4.1 : Plesso di via Terracini con evidenziati gli edifici riscaldati da ciascun impianto di riscaldamento e i rispettivi camini

Nel caso di studio di questa Tesi considereremo le emissioni dovute agli impianti di riscaldamento degli edifici facenti parte della Scuola di Ingegneria e Architettura situata in via Umberto Terracini 28, Bologna. In particolare faremo riferimento ai consumi di gas relativi solo al riscaldamento, escludendo quelli associati ad attività di ricerca, che sono invece molto contenuti. Gli impianti di riscaldamento presenti nella scuola sono tre:

- Uno la cui caldaia UNICAL ELLPREX 1570 riscalda la scuola
- Uno la cui caldaia ICI TRA 25 riscalda i laboratori del DIN corrispondenti all'edificio 346 , posto in via Terracini 24 , a sinistra dell'ingresso principale
- Uno la cui caldaia RHOSS KX 775 riscalda tutti gli edifici dei laboratori LISG, LIDR, LABIC, LAGIRN e FISICA TECNICA

Chiameremo camino A quello associato alle emissioni della caldaia UNICAL ELLPREX 1570 adibita al riscaldamento della facoltà vera e propria con relative aule e uffici; camino B quello che convoglia le emissioni delle caldaie ICI TRA 25 impiegata per il riscaldamento dell'edificio utilizzato dal Dipartimento di Ingegneria Industriale; camino C quello relativo all'utilizzo di due caldaie RHOSS KX 775 adoperate per i consumi dei laboratori di Fisica tecnica, LISG, LIDR, LABIC e LAGIRN.

Tutte le caldaie elencate sono alimentate a gas naturale, per cui si è ritenuto opportuno concentrare l'attenzione unicamente sulla dispersione delle emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e di monossido di carbonio (CO). Difatti come vedremo in seguito, i valori alle emissioni di ossidi di zolfo (SO_x) e di particolato aerodisperso (PM) possono essere considerati trascurabili. Inoltre sono state stimate le emissioni unicamente dei camini A e B, in quanto non è stato possibile reperire i valori di gas naturale consumato dalla caldaia associata al camino C.

4.1 Metodologia per la stima delle emissioni da impianti di riscaldamento

Le fonti di inquinanti nell'aria sono tante, per cui non è possibile misurarle tutte perché ci sarebbero dei costi e dei tempi altissimi, per non considerare l'impossibilità di stimare emissioni da sorgenti non fisse (es. traffico) o non diffuse (es. cantieri); bisogna trovare metodi che permettono di avere buone stime. Come visto nel secondo capitolo, alcune emissioni sono stimate con molta precisione, ad esempio con misurazioni "in continuo" sui fumi in uscita da un camino. È il caso delle emissioni degli impianti con obbligo di SME, già visti ed elencati nel capitolo 3: si installano sonde nei condotti di scarico e sui computer della sala controllo appaiono i dati delle misure che permettono di capire cosa sta entrando nell'atmosfera. Altre emissioni possono essere stimate effettuando alcune misure periodiche durante il normale funzionamento della sorgente, e considerando i valori misurati come rappresentativi di periodi più lunghi: questo procedimento si applica per tante piccole sorgenti industriali.

Nel caso di impianti di riscaldamento ad uso civile in genere le emissioni non vengono misurate direttamente, ma stimate a partire da un parametro detto **fattore di emissione (FE)**, che indica la quantità di un certo inquinante, espressa in g o mg, a seconda dei casi, in rapporto ad una unità di riferimento, che varia con la tipologia di sorgente. Nel settore del riscaldamento domestico il FE si esprime in genere come g/GJ [14], facendo quindi riferimento all'energia termica totale prodotta dall'impianto e quindi indirettamente alla massa di combustibile bruciato, essendo questi due valori direttamente legati tramite il potere calorifico

del combustibile stesso. Un fattore di emissione è generalmente ottenuto mediante una misura sperimentale condotta per lo più in laboratorio, in condizioni controllate e ripetibili utilizzando strumenti di misura sufficientemente sensibili ed accurati da garantire l'accuratezza del dato misurato. Per tale misura si ricorre, ove possibile, a metodiche standardizzate per garantirne la ripetibilità, anche se talvolta si preferisce sviluppare procedure specifiche che garantiscano una maggior aderenza dei risultati ottenuti in laboratorio alle condizioni reali. Le procedure di gestione degli apparecchi previste dalle pertinenti norme tecniche, tendono a ottimizzare le condizioni di combustione, minimizzando le emissioni, ma queste condizioni si discostano molto da quelle, assai meno ottimali, che l'utente medio adotta nella gestione quotidiana. Ciò comporta una estrema variabilità nei fattori di emissioni reperibili in letteratura, perché oltre ad essere differenti i combustibili impiegati dai diversi autori, sono anche diversi gli apparecchi e le modalità di esecuzione delle prove. Molti sono gli articoli scientifici o i rapporti ufficiali che riportano fattori di emissione per diverse tipologie di combustibile e di impianti di riscaldamento, anche se la maggior parte degli studi recenti si focalizza sulle biomasse, mentre assai poco è stato recentemente pubblicato sui combustibili fossili convenzionali [14]. Ciò è una diretta conseguenza della crescente attenzione verso l'effetto dell'inquinamento prodotto dall'utilizzo di combustibili legnosi, anche a fronte dell'incrementato utilizzo di questi ultimi in tutta Europa, come conseguenza delle politiche di decarbonizzazione attuate. Al contrario, per gli altri combustibili si riscontra un basso interesse in quanto si ritengono ormai consolidati i dati relativi ai fattori di emissione di questi ultimi e non necessari ulteriori approfondimenti. Ciò è vero in generale, anche se in relazione all'Italia la penetrazione nel mercato delle caldaie a condensazione è relativamente recente e, a differenza di altri paesi, solo adesso si sta cominciando ad averne una percentuale significativa nell'installato, con effetti positivi sul piano dell'efficienza e delle emissioni [14].

Alternativamente alla stima tramite fattori di emissione si potrebbe utilizzare un sensore per gas portatile per una misura diretta e quindi più affidabile. Sarebbe comunque una misura imprecisa, a meno di riuscire a posizionare lo strumento all'interno del camino.

4.1.1 Calcolo emissioni tramite fattori di emissione

Le emissioni dei camini oggetto dello studio di questa Tesi sono state stimate utilizzando la seguente formula [24]:

$$E_i = A * FE_i$$

dove:

E_i = portata d'inquinante i emessa (g/s);

A = indicatore di attività (GJ/s);

FE_i = fattore di emissione per inquinante i (g/GJ)

Al fine del calcolo delle emissioni, i dati di partenza sono stati i consumi mensili riportati in Standard metro cubo (Smc) di gas naturale dei due impianti di riscaldamento di cui erano disponibili le rispettive bollette, ovvero quello associato al camino A e quello con emissioni convogliate nel camino B. Successivamente i Smc sono stati convertiti in MJ consumati e equivalentemente in GJ, al fine di rispettare le unità di misura dei fattori di emissione che vengono forniti in g/GJ. La conversione è immediata considerando un PCS pari a 39,6880 MJ/Smc, valore riportato nelle bollette dal fornitore di gas naturale. A questo punto per ottenere un'attività nei richiesti GJ/s non resta che dividere il valore dei GJ consumati mensilmente per il tempo di impiego mensile dell'impianto di riscaldamento. A tal fine si è utilizzato un realistico dato di utilizzo pari a 26 giorni al mese per 12 ore ciascuno.

Per quanto riguarda i fattori di emissione impiegati, si è deciso di utilizzare quelli forniti da *INEMAR* (INventario EMISSIONi ARia), il quale è un database realizzato per la costruzione dell'inventario delle emissioni in atmosfera, ovvero per stimare le emissioni di diversi inquinanti, a livello comunale, per diversi tipi di attività e per tipo di combustibile, secondo la classificazione internazionale adottata nell'ambito degli inventari EMEP-Corinair. Inemar è stato inizialmente realizzato nel periodo 1999-2000 dalla Regione Lombardia con la collaborazione della Regione Piemonte e dal 2006 è sviluppato nell'ambito di una collaborazione interregionale, che tutt'ora vede fra i partecipanti le Regioni Lombardia, Piemonte, Veneto, Friuli Venezia Giulia, Emilia-Romagna, Puglia e le province autonome di Trento e di Bolzano. I fattori di emissione sono riportati nel "Wiki Fonti Inventari Emissioni", creato per favorire la condivisione e lo scambio delle informazioni necessarie per la redazione degli inventari delle emissioni in atmosfera, quali ad esempio le metodologie utilizzate, le modalità di reperimento degli indicatori di attività, le

fonti e l'affidabilità dei fattori di emissioni utilizzati per le stime ed è attualmente gestito da ARPA Lombardia.

I valori così trovati [25] sono riportati nella Tabella 4.1. In particolare indicano un valore plausibile di 34,82 g/GJ per quanto riguarda il fattore di emissione di NO_x e un valore di 25 g/GJ per quanto riguarda il fattore di emissione associato al CO. Come preventivato i fattori di emissione associati a PM e SO₂ sono di ordini di grandezza inferiori, rispettivamente 0,20 g/GJ e 0,5 g/GJ. Lo stesso può dirsi per tutti gli altri inquinanti riportati.

| Categoria | Riscaldamento commerciale e istituzionale | | |
|---------------------|---|------------------------|-----------------------------|
| Combustibile | Gas naturale | | |
| Inquinante | Valore | Unità di misura | Fonte |
| NO _x | 34.82 | g/GJ | ISPRA (2011) |
| CO | 25.00 | g/GJ | ISPRA (2011) |
| NMVOG | 5.00 | g/GJ | ISPRA (2011) |
| SO ₂ | 0.5 | g/GJ | ANPA (1999) - Inemar (2002) |
| TSP | 0.2 | g/GJ | ISPRA (2011) |
| PM10 | 0.2 | g/GJ | ISPRA (2011) |
| PM2.5 | 0.2 | g/GJ | ISPRA (2011) |
| Pb | 0.0015 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Cd | 0.0003 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Hg | 0.1 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| As | 0.12 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Cr | 0.0008 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Cu | 8E-05 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Ni | 0.0005 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Se | 0.0112 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| Zn | 0.0015 | mg/GJ | EMEP-CORINAIR (2013) |
| benzo[a]pirene | 0.56 | µg/GJ | EMEP-CORINAIR (2010) |

Tabella 4.1 : Fattori di emissione medi relativi alla combustione di gas naturale per uso commerciale e istituzionale (INEMAR)

Alternativamente all'impiego dei valori forniti dal progetto Inemar, si potrebbero utilizzare i fattori di emissioni proposti dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA) nella sua ultima guida tecnica per preparare gli inventari nazionali delle emissioni [26] e riportati nella tabella sottostante. Nonostante il recente anno di pubblicazione della guida (2016), i fattori di emissione per gli inquinanti principali fanno riferimento a stime invariate dal 2005, per cui si è ritenuto maggiormente

conforme alla realtà considerare nei calcoli successivi i valori forniti dal progetto Inemar. Inoltre va anche considerato che quest'ultimo è specificamente impiegato nella Regione di nostro interesse, mentre i dati EEA fanno riferimento a tutta la zona europea.

| Categoria | Riscaldamento commerciale e istituzionale | | |
|------------------------|--|------------------------|---|
| Combustibile | Gas naturale | | |
| Inquinante | Valore | Unità di misura | Fonte |
| NO _x | 73 | g/GJ | Italian Ministry for the Environment (2005) |
| CO | 24 | g/GJ | Italian Ministry for the Environment (2005) |
| NM VOC | 0.36 | g/GJ | UBA (2008) |
| SO _x | 1.4 | g/GJ | Italian Ministry for the Environment (2005) |
| TSP | 0.45 | g/GJ | Italian Ministry for the Environment (2005) |
| PM10 | 0.45 | g/GJ | Italian Ministry for the Environment (2005) |
| PM2.5 | 0.45 | g/GJ | Italian Ministry for the Environment (2005) |
| Pb | 0.0015 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| Cd | 0.00025 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| Hg | 0.1 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| As | 0.12 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| Cr | 0.00076 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| Cu | 7.6E-05 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| Ni | 0.00051 | mg/GJ | Nielsen et al. (2013) |
| Se | 0.0112 | mg/GJ | US EPA (1998) |
| Zn | 0.0015 | mg/GJ | Nielsen et al., 2013 |
| PCDD/F | 0.5 | mg TEQ/GJ | UNEP (2005) |
| benzo[a]pirene | 0.56 | µg/GJ | US EPA (1998) |
| benzo[b]fluoranthene | 0.84 | µg/GJ | US EPA (1998) |
| Benzo(k)fluoranthene | 0.84 | µg/GJ | US EPA (1998) |
| Indeno(1,2,3-cd)pyrene | 0.84 | µg/GJ | US EPA (1998) |

Tabella 4.2 : Fattori di emissione medi relativi alla combustione di gas naturale per uso commerciale e istituzionale (EMEP/EEA, 2016)

I valori riportati nelle Tabelle 4.1 e 4.2 fanno riferimento alla combustione di gas naturale per il riscaldamento di edifici ad uso commerciale e istituzionale di medie dimensioni e trattando la Tesi il caso di un complesso scolastico si è deciso di impiegare questi, ma in verità sono pressoché identici a quelli forniti per il riscaldamento di abitazioni civili.

Altri fattori di emissione che si possono consultare sono quelli forniti da ISPRA tramite la banca dati disponibile alla pagina del SINAnet, la rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale [27]. Questi valori non vengono qui riportati in quanto per in principali inquinanti sono gli stessi adottati da Inemar, come si può dedurre dalle fonti impiegate da quest'ultimo che fanno spesso riferimento a dati ISPRA.

Infine si segnala che sono disponibili anche i fattori di emissione forniti dalla prestigiosa United States Environmental Protection Agency (EPA), tramite il *Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42)* pubblicato per la prima volta nel 1972 e da allora aggiornato periodicamente. Questi dati però presentano la scomodità di non essere espressi mediante il sistema internazionale di unità di misura, come si evince dall'immagine sottostante in cui i valori sono in lb/Scf. Ma soprattutto anch'essi, come quelli forniti dall'EEA, non sono stati calcolati per un impiego specifico in territorio italiano.

Table 1.4-1. EMISSION FACTORS FOR NITROGEN OXIDES (NO_x) AND CARBON MONOXIDE (CO) FROM NATURAL GAS COMBUSTION^a

| Combustor Type (MMBtu/hr Heat Input) [SCC] | NO _x ^b | | CO | |
|---|---|---------------------------|---|---------------------------|
| | Emission Factor (lb/10 ⁶ scf) | Emission Factor Rating | Emission Factor (lb/10 ⁶ scf) | Emission Factor Rating |
| Large Wall-Fired Boilers (>100) [1-01-006-01, 1-02-006-01, 1-03-006-01] | | | | |
| Uncontrolled (Pre-NSPS) ^c | 280 | A | 84 | B |
| Uncontrolled (Post-NSPS) ^c | 190 | A | 84 | B |
| Controlled - Low NO _x burners | 140 | A | 84 | B |
| Controlled - Flue gas recirculation | 100 | D | 84 | B |
| Small Boilers (<100) [1-01-006-02, 1-02-006-02, 1-03-006-02, 1-03-006-03] | | | | |
| Uncontrolled | 100 | B | 84 | B |
| Controlled - Low NO _x burners | 50 | D | 84 | B |
| Controlled - Low NO _x burners/Flue gas recirculation | 32 | C | 84 | B |
| Tangential-Fired Boilers (All Sizes) [1-01-006-04] | | | | |
| Uncontrolled | 170 | A | 24 | C |
| Controlled - Flue gas recirculation | 76 | D | 98 | D |
| Residential Furnaces (<0.3) [No SCC] | | | | |
| Uncontrolled | 94 | B | 40 | B |

^a Reference 11. Units are in pounds of pollutant per million standard cubic feet of natural gas fired. To convert from lb/10⁶ scf to kg/10⁶ m³, multiply by 16. Emission factors are based on an average natural gas higher heating value of 1,020 Btu/scf. To convert from lb/10⁶ scf to lb/MMBtu, divide by 1,020. The emission factors in this table may be converted to other natural gas heating values by multiplying the given emission factor by the ratio of the specified heating value to this average heating value. SCC = Source Classification Code. ND = no data. NA = not applicable.

^b Expressed as NO_x. For large and small wall fired boilers with SNCR control, apply a 24 percent reduction to the appropriate NO_x emission factor. For tangential-fired boilers with SNCR control, apply a 13 percent reduction to the appropriate NO_x emission factor.

^c NSPS=New Source Performance Standard as defined in 40 CFR 60 Subparts D and Db. Post-NSPS units are boilers with greater than 250 MMBtu/hr of heat input that commenced construction modification, or reconstruction after August 17, 1971, and units with heat input capacities between 100 and 250 MMBtu/hr that commenced construction modification, or reconstruction after June 19, 1984.

TABLE 1.4-2. EMISSION FACTORS FOR CRITERIA POLLUTANTS AND GREENHOUSE GASES FROM NATURAL GAS COMBUSTION^a

| Pollutant | Emission Factor (lb/10 ⁶ scf) | Emission Factor Rating |
|--|--|------------------------|
| CO ₂ ^b | 120,000 | A |
| Lead | 0.0005 | D |
| N ₂ O (Uncontrolled) | 2.2 | E |
| N ₂ O (Controlled-low-NO _x burner) | 0.64 | E |
| PM (Total) ^c | 7.6 | D |
| PM (Condensable) ^c | 5.7 | D |
| PM (Filterable) ^c | 1.9 | B |
| SO ₂ ^d | 0.6 | A |
| TOC | 11 | B |
| Methane | 2.3 | B |
| VOC | 5.5 | C |

^a Reference 11. Units are in pounds of pollutant per million standard cubic feet of natural gas fired. Data are for all natural gas combustion sources. To convert from lb/10⁶ scf to kg/10⁶ m³, multiply by 16. To convert from lb/10⁶ scf to lb/MMBtu, divide by 1,020. The emission factors in this table may be converted to other natural gas heating values by multiplying the given emission factor by the ratio of the specified heating value to this average heating value. TOC = Total Organic Compounds. VOC = Volatile Organic Compounds.

^b Based on approximately 100% conversion of fuel carbon to CO₂. CO₂[lb/10⁶ scf] = (3.67) (CON) (C)(D), where CON = fractional conversion of fuel carbon to CO₂, C = carbon content of fuel by weight (0.76), and D = density of fuel, 4.2x10⁴ lb/10⁶ scf.

^c All PM (total, condensable, and filterable) is assumed to be less than 1.0 micrometer in diameter. Therefore, the PM emission factors presented here may be used to estimate PM₁₀, PM_{2.5} or PM₁ emissions. Total PM is the sum of the filterable PM and condensable PM. Condensable PM is the particulate matter collected using EPA Method 202 (or equivalent). Filterable PM is the particulate matter collected on, or prior to, the filter of an EPA Method 5 (or equivalent) sampling train.

^d Based on 100% conversion of fuel sulfur to SO₂. Assumes sulfur content is natural gas of 2,000 grains/10⁶ scf. The SO₂ emission factor in this table can be converted to other natural gas sulfur contents by multiplying the SO₂ emission factor by the ratio of the site-specific sulfur content (grains/10⁶ scf) to 2,000 grains/10⁶ scf.

Immagine 4.2: Fattori di emissione per combustione di gas naturale forniti dall'EPA [28]

Indipendentemente dalla fonte, tutti i fattori di emissione appena visti, confermano che il gas naturale può considerarsi un combustibile più pulito rispetto agli altri normalmente impiegati quali gasolio, biodiesel o olio combustibile BTZ (basso tenore di zolfo). Questo perché è costituito principalmente da metano e in modo minore da altri idrocarburi leggeri. Pertanto esso se ben bruciato non origina né ceneri né fuliggine e sporca meno degli altri combustibili le superfici interne dei generatori dei camini. Inoltre anche la produzione di diossido di carbonio a seguito della combustione del metano è minore di quella di altri combustibili, a parità di calore reso [3].

I valori di gas naturale consumato presso la sede nell'anno 2017 sono riportati nei due grafici sottostanti, associando a ogni camino i consumi delle rispettive caldaie. Questi dati sono stati ricavati dalla lettura dei consumi mensili di gas naturale riportati nelle rispettive bollette, gentilmente fornite dall'allora Responsabile del plesso Ingegneria-Architettura Lazzaretto Maurizio Capra.

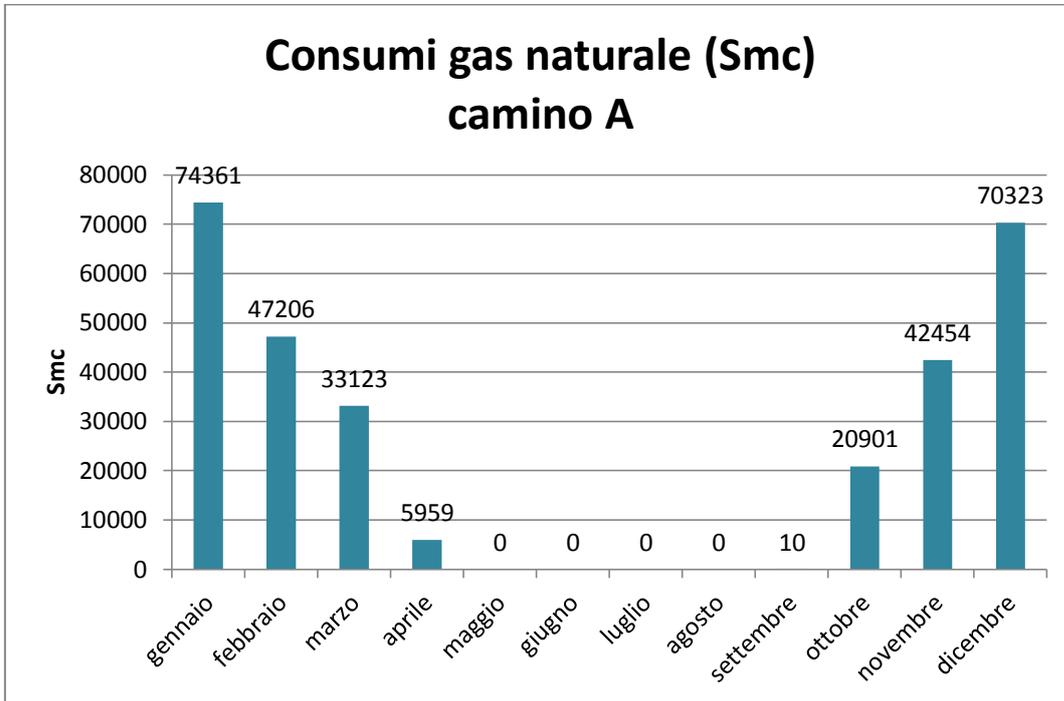


Grafico 4.1: Consumi di gas naturale (Smc) per l'anno 2017 della caldaia associata al camino A

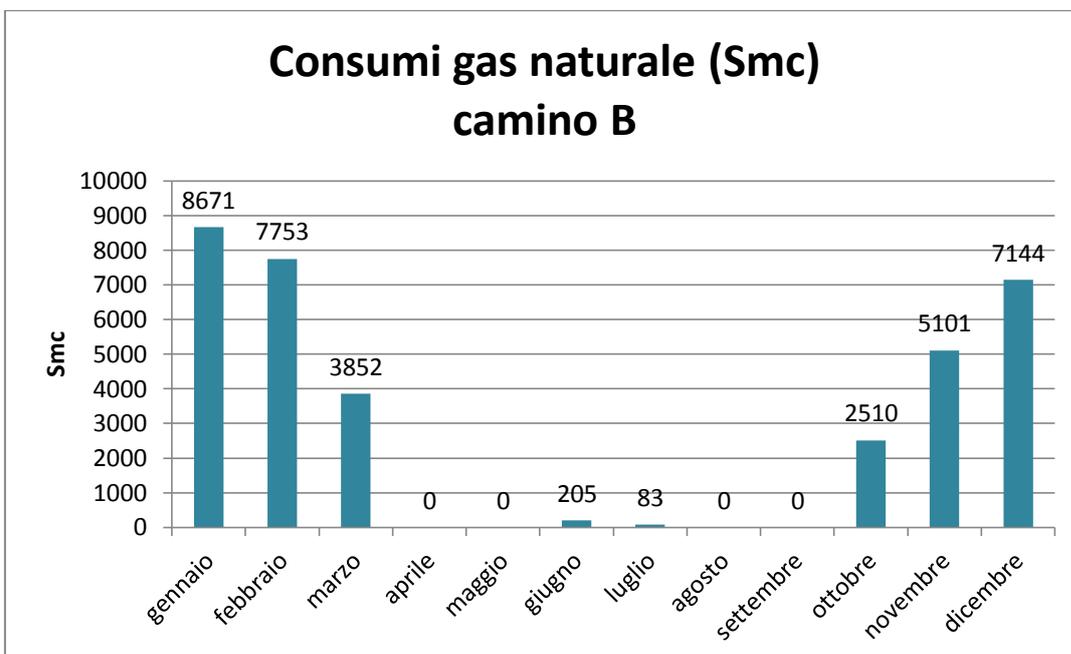


Grafico 4.2 : Consumi di gas naturale (Smc) per l'anno 2017 della caldaia associata al camino B

Gli indicatori di attività ricavati da questi consumi sono riportati nelle seguenti tabelle. Si ricorda che la trasformazione da Smc a MJ è stata effettuata utilizzando un PCS pari 39,6880 MJ/Smc riportato nelle bollette dei consumi, mentre il valore in GJ/s è stato poi ottenuto considerando un utilizzo delle caldaie pari a 26 giorni al mese per 12 ore ciascuno.

| Attività camino A | | | | |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|-------------|
| Periodo | Smc | MJ | GJ | GJ/s |
| gennaio | 74361 | 2951239.4 | 2951.2 | 2.63E-03 |
| febbraio | 47206 | 1873511.7 | 1873.5 | 1.67E-03 |
| marzo | 33123 | 1314585.6 | 1314.6 | 1.17E-03 |
| aprile | 5959 | 236500.8 | 236.5 | 2.11E-04 |
| maggio | 0 | 0 | 0 | 0 |
| giugno | 0 | 0 | 0 | 0 |
| luglio | 0 | 0 | 0 | 0 |
| agosto | 0 | 0 | 0 | 0 |
| settembre | 10 | 396.9 | 0.4 | 3.53E-07 |
| ottobre | 20901 | 829518.9 | 829.5 | 7.39E-04 |
| novembre | 42454 | 1684914.4 | 1684.9 | 1.50E-03 |
| dicembre | 70323 | 2790979.2 | 2791.0 | 2.48E-03 |

Tabella 4.3: Indice di attività (GJ/s) camino A

| Attività camino B | | | | |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|-------------|
| Periodo | Smc | MJ | GJ | GJ/s |
| gennaio | 8671 | 344134.6 | 344.1 | 3.06E-04 |
| febbraio | 7753 | 307701.1 | 307.7 | 2.74E-04 |
| marzo | 3852 | 152878.2 | 152.9 | 1.36E-04 |
| aprile | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.00E+00 |
| maggio | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.00E+00 |
| giugno | 205 | 8136.0 | 8.1 | 7.24E-06 |
| luglio | 83 | 3294.1 | 3.3 | 2.93E-06 |
| agosto | 0 | 0 | 0 | 0 |
| settembre | 0 | 0.0 | 0.0 | 0.00E+00 |
| ottobre | 2510 | 99616.9 | 99.6 | 8.87E-05 |
| novembre | 5101 | 202448.5 | 202.4 | 1.80E-04 |
| dicembre | 7144 | 283531.1 | 283.5 | 2.52E-04 |

Tabella 4.4: Indice di attività (GJ/s) camino B

Applicando la formula riportata a inizio paragrafo $E_i = A * FE_i$ e utilizzando i rispettivi fattori di emissione, si ottengono i risultati riportati nelle tabelle sottostanti :

| Camino A | | | |
|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Periodo | NOx (g/s) | CO (g/s) | PM10 (g/s) |
| gennaio | 9.15E-02 | 6.57E-02 | 5.26E-04 |
| febbraio | 5.81E-02 | 4.17E-02 | 3.34E-04 |
| marzo | 4.08E-02 | 2.93E-02 | 2.34E-04 |
| aprile | 7.33E-03 | 5.26E-03 | 4.21E-05 |
| maggio | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| giugno | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| luglio | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| agosto | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| settembre | 1.23E-05 | 8.83E-06 | 7.07E-08 |
| ottobre | 2.57E-02 | 1.85E-02 | 1.48E-04 |
| novembre | 5.22E-02 | 3.75E-02 | 3.00E-04 |
| dicembre | 8.65E-02 | 6.21E-02 | 4.97E-04 |

Tabella 4.5: Emissioni inquinanti divise per mese del camino A

| Camino B | | | |
|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Periodo | NOx (g/s) | CO (g/s) | PM10 (g/s) |
| gennaio | 1.07E-02 | 7.66E-03 | 6.13E-05 |
| febbraio | 9.54E-03 | 6.85E-03 | 5.48E-05 |
| marzo | 4.74E-03 | 3.40E-03 | 2.72E-05 |
| aprile | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| maggio | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| giugno | 2.52E-04 | 1.81E-04 | 1.45E-06 |
| luglio | 1.02E-04 | 7.33E-05 | 5.87E-07 |
| agosto | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| settembre | 0.00E+00 | 0.00E+00 | 0.00E+00 |
| ottobre | 3.09E-03 | 2.22E-03 | 1.77E-05 |
| novembre | 6.28E-03 | 4.51E-03 | 3.60E-05 |
| dicembre | 8.79E-03 | 6.31E-03 | 5.05E-05 |

Tabella 4.6: Emissioni inquinanti divise per mese del camino B

Dall'analisi delle emissioni si evince che il camino A addetto al riscaldamento della scuola di Ingegneria vera e propria è quello che ha le emissioni più elevate, circa un ordine di grandezza superiori a quelle del camino B.

4.2 Simulazione dispersione emissioni tramite CALPUFF

Una volta calcolate nel modo appena visto le emissioni ai due camini, si è proceduto ad una simulazione della dispersione delle stesse. In particolare, come già accennato precedentemente, concentreremo l'attenzione unicamente sulle emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e di monossido di carbonio (CO) avendo ritenute trascurabili le emissioni degli altri inquinanti. Per fare ciò è stato utilizzato il software CALPUFF, il quale è un modello gaussiano non stazionario di tipo Puff. I modelli "a puff" sono codici di calcolo che permettono di riprodurre l'evoluzione spazio temporale di un inquinante emesso in atmosfera in condizioni non omogenee e non stazionarie. Il pennacchio continuo di emissione viene considerato come un numero discreto di puffs o "nubi" di materiale inquinante; ad ogni step temporale, viene calcolata la concentrazione dovuta a ciascun puff (i puffs si evolvono poi nel tempo e nello spazio fino al successivo step) in modo che la concentrazione totale in un determinato recettore sia data dalla somma dei contributi di tutti i puffs nelle immediate vicinanze; cioè, il contributo di ogni puff in un recettore viene valutato mediante un metodo "a foto": ad intervalli di tempo regolari, ogni puff viene "congelato" e viene calcolato il suo contributo alla concentrazione [29].

Il puff può quindi muoversi, evolversi in forma e dimensioni fino all'intervallo successivo, e la concentrazione complessiva in un recettore, è quindi calcolata come sommatoria del contributo di tutti gli elementi vicini, considerando la media di tutti gli intervalli temporali contenuti nel periodo di base, in genere equivalente ad un'ora.

Il sistema di modellazione è ideato in tre componenti principali che costituiscono il preprocessore dei dati meteo, il calcolo vero e proprio e il post-precessore. Nello specifico i componenti principali del sistema di modellazione sono [29]:

- CALMET – modello meteorologico di tipo diagnostico in grado di ricostruire con cadenza oraria campi tridimensionali di vento e temperatura, bidimensionali di altre variabili come la turbolenza, l'altezza di mescolamento, ecc;
- CALPUFF – modello di dispersione non stazionario degli inquinanti in atmosfera che simula il rilascio di inquinanti dalla sorgente come una serie di pacchetti discreti di materiale ("*puff*"), emessi ad intervalli di tempo prestabiliti, avvalendosi dei campi tridimensionali generati da CALMET o altri formati di dati meteorologici;

- CALPOST – software di post-processamento che consente di ottenere i formati richiesti dall'utente, *.dat o *.grd, ed è in grado di interfacciarsi col software SURFER per l'elaborazione grafica dei risultati.

Principalmente ci si è soffermati sull'impiego del processore CALPUFF, il quale è il modello di dispersione vero e proprio. È uno dei modelli puff più noti e impiegati e nel tempo si è arricchito di un alto numero di opzioni che, pur complicandone l'uso, ne fanno uno strumento estremamente versatile. Consente di valutare i livelli di concentrazione ed i flussi di deposizione di tutti gli inquinanti inerti o debolmente reattivi (CO, SO₂, NO, NO₂, PM10, aerosol organico secondario, etc.), simulando gli effetti di condizioni meteorologiche, variabili nello spazio e nel tempo, sul trasporto, la trasformazione e la rimozione degli inquinanti in atmosfera.

Per poter eseguire una simulazione con CALPUFF sono necessari:

- Il file meteo CALMET.DAT (quello ottenuto in output al preprocessore Calmet) o, in alternativa, dati provenienti da singole stazioni di monitoraggio dei parametri atmosferici in un formato compatibile con altri modelli gaussiani stazionari quali ISC;
- Il file CALPUFF.INP, vale a dire il file di controllo che riporta tutte le informazioni necessarie per la corsa del processore CALPUFF.

Per quanto riguarda il file meteo impiegato in questa Tesi, esso è stato costruito a partire dai dati forniti da un anemometro posizionato sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Industriale. I dati in nostro possesso erano i valori ogni 15 minuti per tutto l'arco dell'anno 2013 di velocità del vento, temperatura dell'aria, direzione del vento e radiazione solare. Questi per poter essere impiegati sono stati elaborati in modo da avere per ciascuna voce delle medie orarie. Infine si è scelto di procedere alla simulazione nel solo periodo del mese di dicembre, la cui rosa dei venti è riportata nell'immagine sottostante.

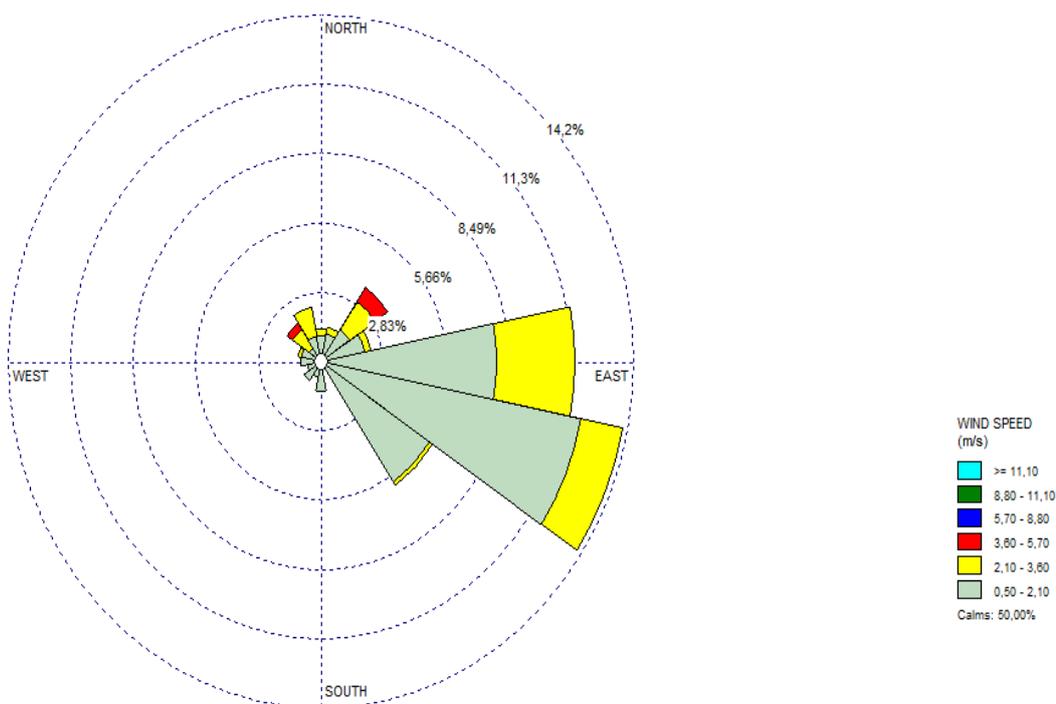


Immagine 4.3: Rosa dei venti del mese di dicembre

Il file CALPUFF.INP invece si genera automaticamente a mano a mano che l'utente inserisce valori e parametri che sono ripartiti in 17 gruppi. Tra i primi parametri da inserire vi sono quelli relativi alla griglia dei ricettori e riportati nella Tabella 4.7.

| Parametro | Descrizione | Valore | Unità di misura |
|---------------|---|----------|-----------------|
| NX | n° celle in direzione X | 20 | - |
| NY | n° celle in direzione Y | 20 | - |
| NZ | n° celle in direzione Z | 2 | - |
| Grid Spacing | Lato di ciascuna cella | 0.1 | km |
| Grid origin X | Coordinata X del punto SO della griglia | 683.445 | km |
| Grid origin Y | Coordinata Y del punto SO della griglia | 4930.605 | km |

Tabella 4.7: informazioni griglia

Tra i restanti parametri da inserire, i principali sono quelli riportati nella tabella sottostante.

| Camino | Coordinate UTM | T fumi (K) | Diametro (m) | H (m) | v fumi (m/s) |
|----------|----------------------|------------|--------------|-------|--------------|
| A | 684378, 4931615, 32T | 443.15 | 0.45 | 11.5 | 4.6 |
| B | 684377, 4931648, 32T | 463.15 | 0.25 | 12.8 | 3.7 |

Tabella 4.8: Informazioni camini necessarie per la simulazione tramite Calpuff

In particolare le coordinate geografiche dei camini sono state individuate tramite Google Maps, il quale fornisce le coordinate in GPS decimali, rendendo così necessaria la trasformazione in coordinate UTM per poterle poi impiegare. La temperatura in uscita dei fumi e il diametro dei camini sono stati invece letti direttamente dalle relative schede tecniche delle caldaie, mentre l'altezza dei camini si è potuta facilmente stimare mediante l'utilizzo di Google Earth.

Per quanto riguarda la velocità dei fumi è stato invece necessario applicare la seguente formula:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Dove Q è la portata dei fumi (m³/h) e A l'area di uscita degli stessi (m²). Quest'ultima è stata immediatamente calcolabile per tutti e due i camini, in quanto si disponeva del diametro degli stessi ed essa è esprimibile come $A = \pi d^2/4$.

Mentre per la stima della portata sono stati necessari alcuni passaggi che andremo ora a esporre.

Per quanto riguarda il **camino A** la scheda tecnica (Allegato B) riporta un valore di portata massica dei fumi pari a 2001 kg/h, che dividendola per una densità del gas naturale stimata pari a 0,76 kg/m³, fornisce il valore di 2633 m³/h poi impiegato.

La scheda tecnica (Allegato C) del **camino B** invece segnala unicamente il valore di potenza al focolare, pari a 273700 kcal/h. Dividendolo per il potere calorifero inferiore del gas naturale (8570 kcal/Nm³)[30] si ottiene una porta di gas di combustione di 32,10 m³/h.

| Sostanza | Formula | Stechiometria di reazione | Nm ³ |
|---|---------------------------------|---|-------------------------|
| Metano | CH ₄ | CH ₄ + 2 O ₂ --> CO ₂ + 2 H ₂ O | 32.1 |
| Aria teorica | | Nm³ | |
| O ₂ | | 64.20 | |
| N ₂ | | 241.51 | |
| Eccesso d'aria | | 0.16 | |
| Composti | Combustibili (Nm ³) | Aria (Nm ³) | Fumi (Nm ³) |
| CH ₄ | 32.10 | 0.00 | 0.00 |
| O ₂ | 0.00 | 74.15 | 9.95 |
| N ₂ | 0.00 | 278.95 | 278.95 |
| CO ₂ | 0.00 | 0.00 | 32.10 |
| H ₂ O | 0.00 | 0.00 | 64.20 |
| Somma | 32.10 | 353.11 | 385.21 |
| Portata fumi a 463. 15 K (m³/h) | | | 653.15 |

Tabella 4.10: Bilancio di materia combustione metano, caso camino B

Considerando la reazione di combustione del metano: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ e facendo il bilancio di materia riportato nella Tabella 4.10, si ottiene a partire da questo valore una teorica portata dei fumi di 385,21 Nm³/h, che considerando la temperatura di uscita di 463,15 K danno la portata dei fumi di nostro interesse pari a 653,15 m³/h.

Dividendo infine i valori di portata dei fumi così ricavati per le rispettive aree si ottengono i valori di velocità dei fumi riportati nella Tabella 4.8:

$$v_A = \frac{2633}{\frac{0.45^2 \pi}{4}} = 4,6 \text{ m/s} \qquad v_B = \frac{653.15}{\frac{0.25^2 \pi}{4}} = 3,7 \text{ m/s}$$

È importante sottolineare come queste misure siano delle stime, infatti risentono sicuramente del fatto di aver considerato nei calcoli precedenti il gas naturale come composto unicamente da metano, mentre nella realtà, per quanto preponderate rispetto agli altri, non è l'unico gas presente. Inoltre anche i dati forniti dalle schede tecniche sono quelli di normale funzionamento delle caldaie, la quali nel corso dell'anno non hanno sempre le stesse prestazioni.

4.2.1 Risultati simulazione CALPUFF

La simulazione della dispersione delle emissioni è stata fatta prendendo come periodo di simulazione il mese di dicembre, mese dell'anno con le maggiori emissioni insieme a gennaio, mentre la griglia entro cui è effettuata è quella vista alla Tabella 4.7, con lati di 2 km. Nel caso di studio non si è considerata alcuna trasformazione chimica, né deposizione secca o umida da parte delle sostanze emesse e anche l'effetto della precipitazione è stato trascurato. Le sorgenti considerate con i relativi dati da inserire per creare il file CALPUFF.INP sono quelle riportate nella Tabella 4.8, a cui sono state associate le relative emissioni di NO_x e CO del mese di dicembre, stimate in precedenza. In output al processore CALPUFF si è ottenuto il file CONC.DAT, nel quale compaiono le concentrazioni espresse in microgrammi al metro cubo, in corrispondenza di ogni ricettore, con frequenza oraria e per ogni specie caratterizzante l'emissione. La quantità di dati e il loro formato testuale rendono difficile l'analisi delle concentrazioni, si è quindi utilizzato il software di post-processamento CALPOST da cui si possono ottenere delle informazioni sintetiche, come massimi di concentrazione, superamenti di valori soglia, medie di concentrazione per durate variabili impostabili dall'utente, che possono essere poi graficate tramite software appositi. Nel caso in questione si è utilizzato il software Surfer per dare rappresentazione grafica ai nostri risultati, in

particolare sono riportate le isoplete generate dal file contenente le concentrazioni medie giornaliere per ogni recettore e quelle dei valori massimi orari. I valori riportati sono espressi in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in modo da essere immediatamente confrontabili con i valori limite imposti dal D.Lgs 155/2010.

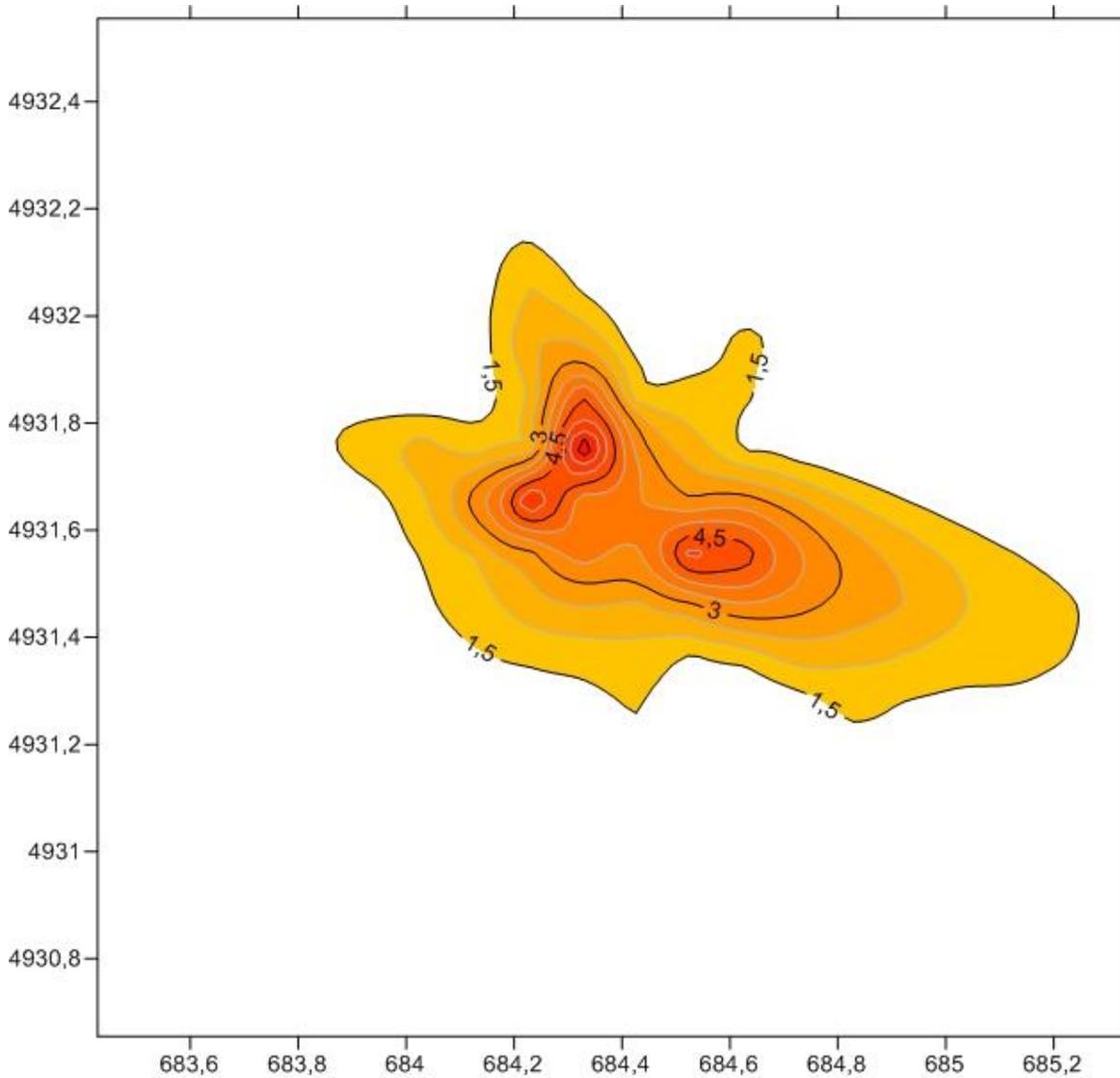


Immagine 4.4: Isoplete delle massime medie giornaliere di NO_x

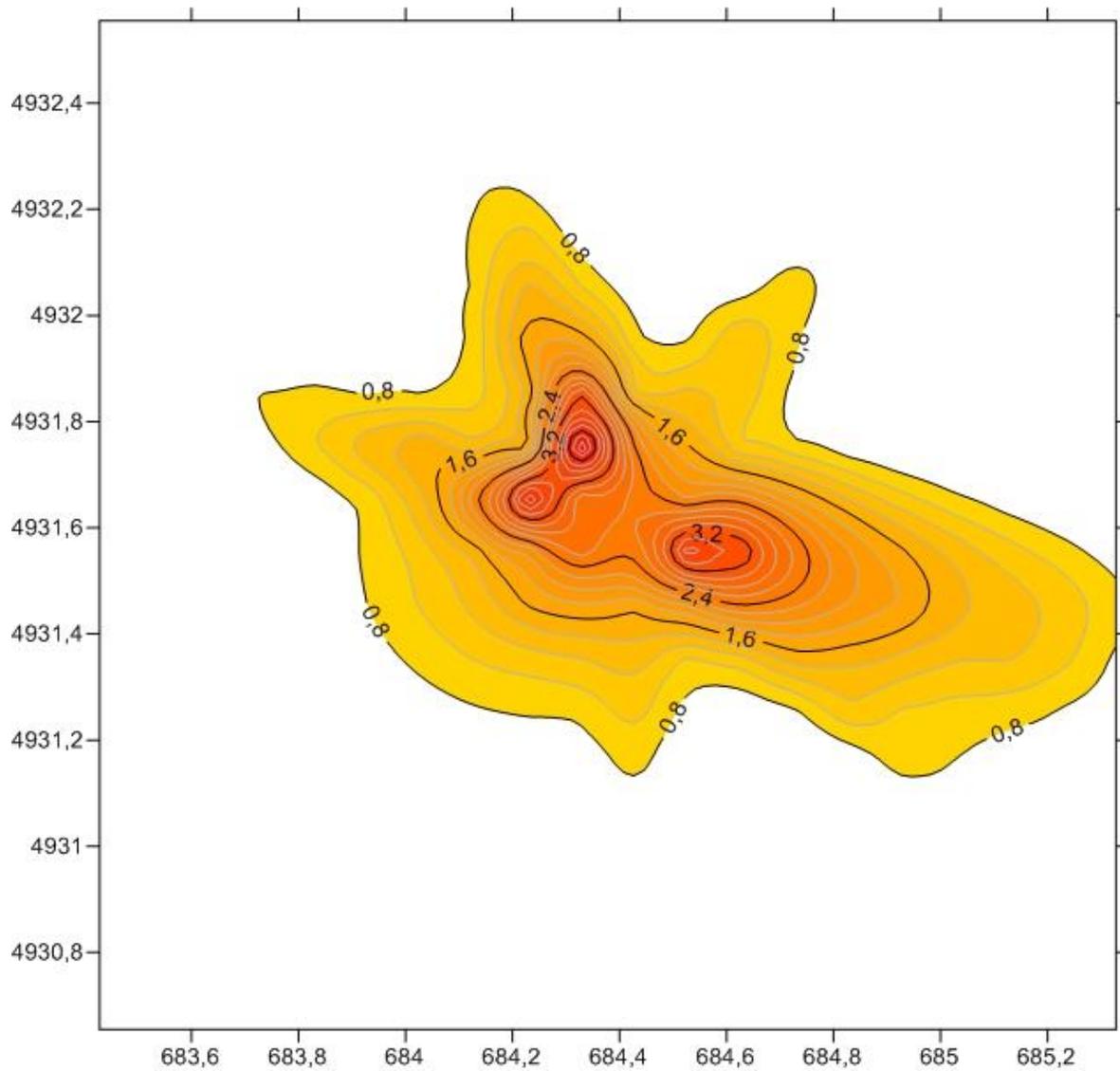


Immagine 4.5: Isoplete delle massime medie giornaliere di CO

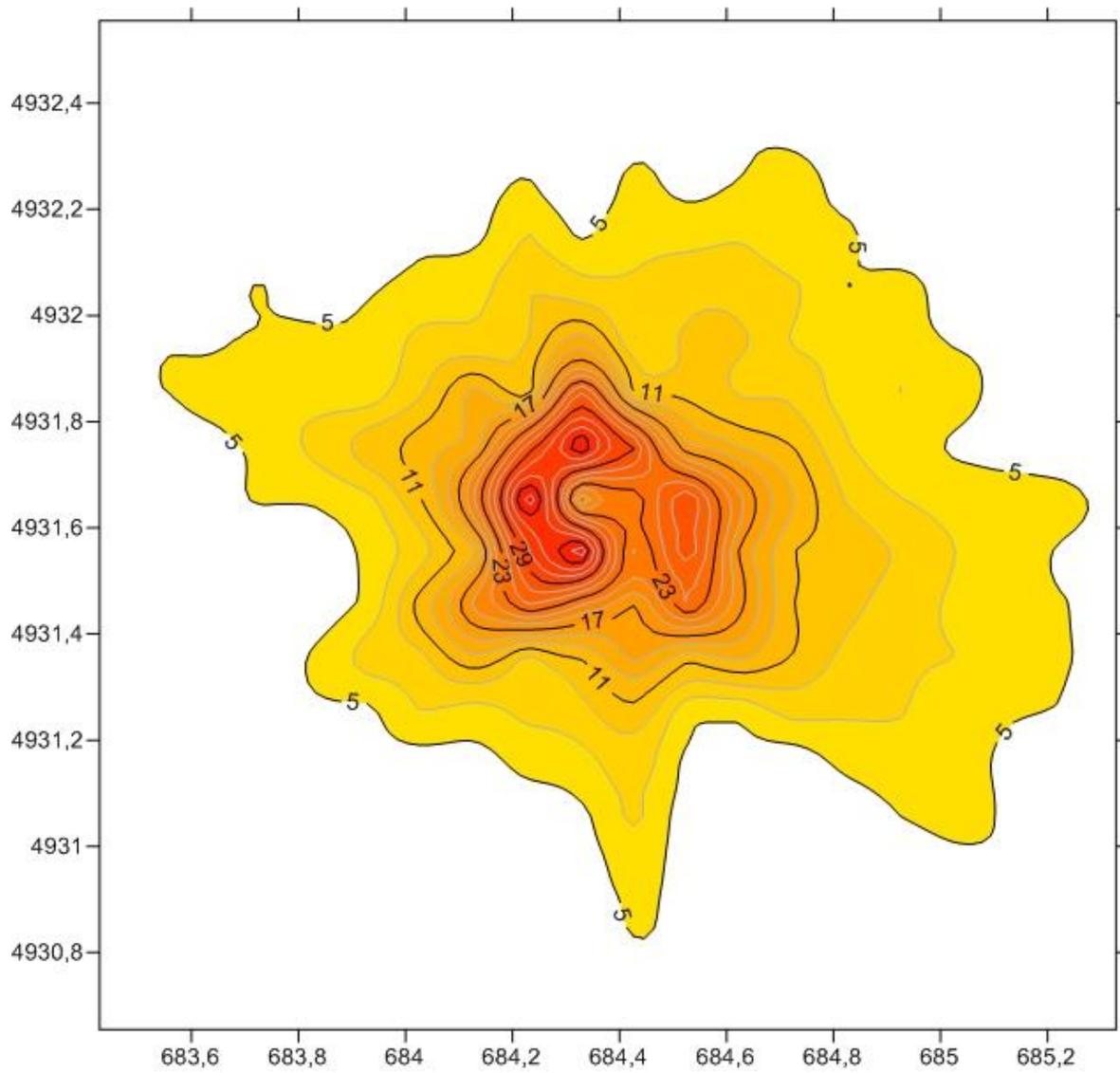


Immagine 4.6: Isoplete dei massimi orari di NO_x

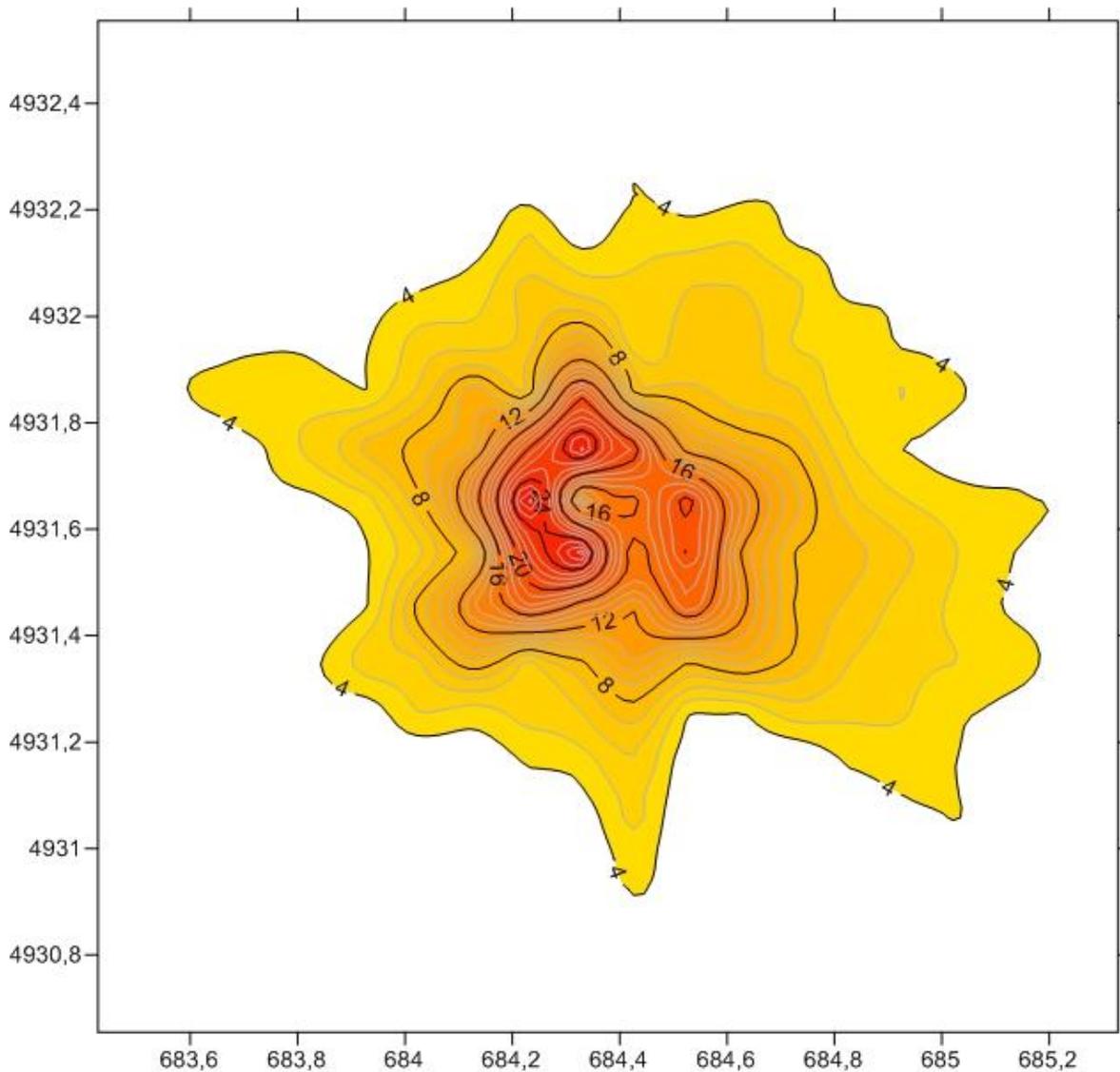


Immagine 4.7: Isoplete dei massimi orari di CO

Come prevedibile, l'andamento delle emissioni giornaliere è conforme alle direzioni principali del vento riportata nella rosa dei venti del mese di dicembre.

Altro risultato preventivabile è la conferma che le emissioni provenienti unicamente dalle nostre sorgenti non sono sufficienti per superare i valori limite di concentrazione, sia per quanto riguarda gli NO_x (40 µg/m³ di media annuale da non superare e 200 µg/m³ di valore orario da non superare per più di 18 volte all'anno) che a maggior ragione per i CO che per essere dannosi devono raggiungere valori ben più alti (10 mg/m³ di media massima giornaliera calcolata su 8 ore). Per quanto riguarda gli ossidi di azoto, il contributo non è comunque del tutto trascurabile. Infatti nelle vicinanze dei due camini abbiamo valori giornalieri da un massimo di 4,5 µg/m³ a scalare e valori massimi orari fino a 33 µg/m³, quindi

da soli valgono circa un decimo dei valori limite da rispettare e non sono stati considerati il contributo del traffico e delle altre sorgenti civili presenti.

4.3 Metodo alternativo: stima delle emissioni tramite sensore per gas

Nel caso di studio è stato impossibile utilizzare un sensore per gas portatile, poiché quello a nostra disposizione aveva necessità di essere collegato ad una presa elettrica, purtroppo non presente sul tetto degli edifici in cui si sarebbe dovuto ubicare. Si è comunque ritenuto utile riportare in seguito il procedimento che si sarebbe dovuto adottare per individuare il punto migliore di collocamento dello stesso. In particolare si è ipotizzato di individuare la collocazione ideale nel caso si fossero volute misurare le emissioni provenienti dal camino A associato come già detto alla caldaia UNICAL ELLPREX 1570 e quelle provenienti dal camino B, corrispondenti alla caldaia ICI TRA 25. Il posizionamento ideale è influenzato sia dalla differenza di temperatura tra i fumi e l'aria, sia dalla direzione e velocità del vento. Per questo motivo si è scelto di mostrare dove sarebbe stato da collocare lo strumento nel mese di novembre 2017, preso ad esempio di un mese invernale, utilizzando per ogni classe di stabilità due possibili velocità del vento (1 m/s e 3 m/s), in modo da considerare sia il caso di vento moderato che quello più sostenuto. Dall'analisi dei dati a nostra disposizione non si è ritenuto di considerare velocità del vento superiori in quanto non vengono praticamente mai raggiunte.

Infine è stato riportata la vista aerea degli ipotetici punti ideali di posizionamento dello strumento per le sole classi B e F, essendole ritenute le più rappresentative e comuni.

Dati input:

- Temperatura ambiente: 10°C, media della temperatura aria del mese di novembre 2017
- Temperatura fumi camino A: 170°C, media dei valori riportati nella scheda tecnica della caldaia UNICAL ELLPREX 1570
- Temperatura fumi camino B: 190°C, valore riportati nella scheda tecnica della caldaia ICI TRA 25
- Portata fumi camino A: 2633 m³/h
- Portata fumi camino B: 653,15 m³/h
- Altezza camino A, Hs: 11,50 m
- Altezza camino B, Hs: 12,80 m
- Velocità vento: 1 m/s e 3 m/s

Procedimento per calcolo plume rise

Per stimare a che distanza si ha la massima concentrazione degli inquinanti di un'emissione gassosa lungo l'asse sottovento x , useremo un modello analitico gaussiano. Questo richiede tra i valori di input H , dato dalla somma di H_s (altezza del camino) e di Δh (plume rise). Il plume rise è l'innalzamento del pennacchio e rappresenta la porzione di atmosfera interessata dall'interazione tra i fumi emessi dal camino e l'aria circostante. Il comportamento del plume durante la fase di innalzamento è estremamente complessa: all'emissione i fumi caldi salgono verticalmente con aumento progressivo della sezione trasversale a causa dell'inglobamento progressivo di aria esterna; successivamente il *plume* si piega in direzione sottovento, perdendo progressivamente la propria spinta in termini di quantità di moto e galleggiamento e infine il *plume* presenta un baricentro che procede orizzontale sottovento (altezza efficace del *plume*). In pratica, ad una distanza sottovento x l'altezza del baricentro del *plume* risulta pari a:

$$H(x) = H_s + \Delta h(x)$$

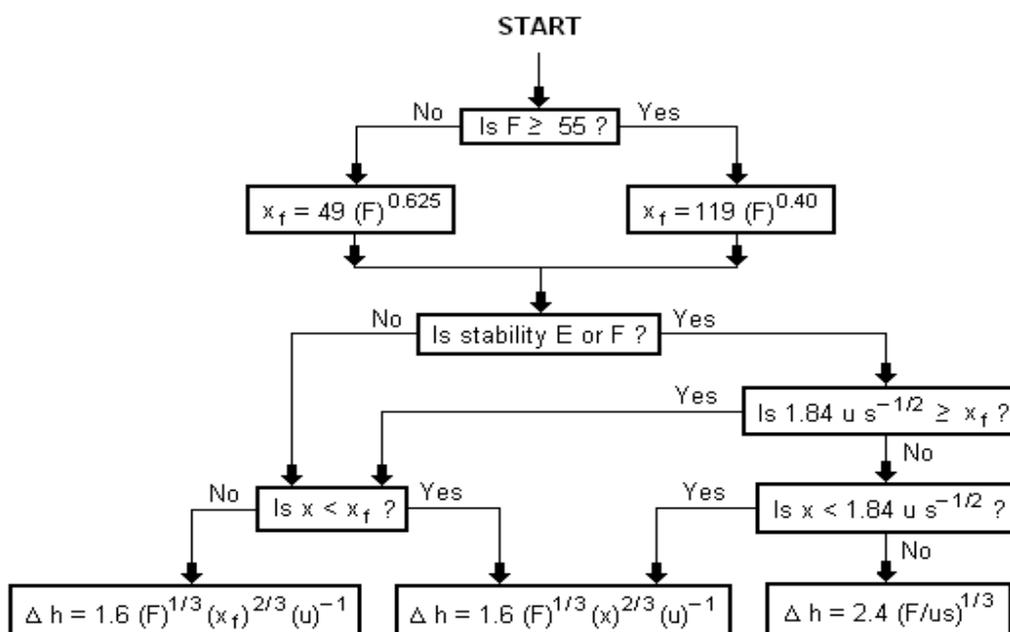
Dove:

H_s = altezza del camino

Δh = innalzamento del plume o *plume rise*

Per determinare il Δh si utilizzano le cosiddette "equazioni di Briggs". Per un corretto utilizzo delle stesse si segue il seguente diagramma logico [31]:

LOGIC DIAGRAM FOR BRIGGS' EQUATIONS TO CALCULATE THE RISE OF A BUOYANT PLUME



Dove:

Δh = plume rise (m)

F = fattore di galleggiamento (m^4s^{-3})

xf = distanza alla quale si verifica il sovrizzo finale dei fumi (m)

u = velocità del vento (m/s)

s = parametro di stabilità (s^{-2})

F è dato dalla seguente formula:

$$F = \frac{gV_s d^2 \Delta T}{T_a}$$

In cui:

g = accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$)

V_s = velocità di efflusso dei fumi (m/s)

d = diametro interno del camino (m)

T_s = Temperatura dei fumi (K)

T_a = Temperatura ambiente (K)

Poiché la V_s può essere scritta come $Q/(\pi*d^2/4)$, F può essere visto anche nella forma :

$$F = \frac{gQ\Delta T}{\pi T_s}$$

S è invece esprimibile come:

$$S = \frac{g \frac{\partial \theta}{\partial z}}{T_a}$$

In cui il gradiente verticale della temperatura potenziale ($\partial \theta / \partial z$) è 0,02 per classe stabilità E; 0,035 per classe stabilità F [32].

Portata utilizzata

Per il camino A si è utilizzata una portata volumetrica $Q=2632,89 \text{ m}^3/\text{h}$, ovvero corrispondente a $Q=0,731 \text{ m}^3/\text{s}$. Mentre al camino B si ha una portata volumetrica $Q=652.15 \text{ m}^3/\text{h}$ o equivalentemente $Q=0.181 \text{ m}^3/\text{s}$.

Questi valori saranno quelli impiegati per ottenere il fattore di galleggiamento F .

Risultati calcolo plume rise

A partire dai dati precedentemente esposti e seguendo pedissequamente il diagramma logico per il calcolo delle equazioni di Briggs, si giunge ad avere per il camino A un innalzamento del pennacchio per le le classi di stabilità A,B,C,D pari a $\Delta h=18,54$ m quando la velocità del vento u è pari a 1 m/s e un $\Delta h=6,18$ m nel caso di u pari a 3 m/s. Mentre per la classi E ed F si hanno valori di plume rise rispettivamente di 25,43 m e 21,10 m per u pari a 1m/s e di 17,63 m e 14,63 m nel caso di u uguale a 3 m/s. Per il camino B si hanno valori minori di plume rise, questo è dovuto al fatto che, nonostante una temperatura maggiore, ha una velocità d'uscita dei fumi decisamente inferiore. In particolare, a velocità del vento 1 m/s si ha un $\Delta h=6.89$ m per le classi A,B,C,D; $\Delta h=16.38$ m per la classe E e $\Delta h=13.59$ m per la classe F. Considerando il vento pari a 3 m/s si hanno valori di $\Delta h=2.30$ per le classi A,B,C,D; $\Delta h=11.36$ per la classe E; $\Delta h=9.42$ per la classe F.

| u (m/s) | Δh (m) per A,B,C,D | Δh (m) per E | Δh (m) per F |
|---------|----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 18.54 | 25.43 | 21.10 |
| 3 | 6.18 | 17.63 | 14.63 |

Tabella 4.9 : Valori di plume rise per classe di stabilità e velocità del vento, camino A

| u (m/s) | Δh (m) per A,B,C,D | Δh (m) per E | Δh (m) per F |
|---------|----------------------------|----------------------|----------------------|
| 1 | 6.89 | 16.38 | 13.59 |
| 3 | 2.30 | 11.36 | 9.42 |

Tabella 4.10 : Valori di plume rise per classe di stabilità e velocità del vento, camino B

Determinazione della distanza in cui si ha massima concentrazione degli inquinanti

Una volta determinato il plume rise, è possibile procedere alla determinazione della distanza dal punto di emissione in cui avremo massima concentrazione degli inquinanti. Per fare ciò utilizzeremo un modello analitico gaussiano. I modelli analitici gaussiani sono in grado di descrivere l'andamento al suolo della concentrazione sottovento dovuta ad una sorgente continua puntiforme, ipotizzando per la dispersione una legge di tipo gaussiano. Sono modelli di facile utilizzo, perché adottano una serie di semplificazioni restrittive: stazionarietà e omogeneità delle condizioni meteorologiche, velocità orizzontale del vento non nulla nella direzione del vento e mediamente nulla sul piano ortogonale ad essa, terreni piani, assenza di trasformazioni chimiche.

La formula gaussiana che descrive l'andamento della concentrazione è la seguente:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Si considera poi unicamente la distanza lungo l'asse sottovento x, per cui y=0. La z è stata invece posta uguale a 10 m per il camino A e 11.50 m per il camino B, ovvero l'altezza degli edifici in cui sono posizionati. La Q in questo specifico caso può assumere valori casuali, in quanto non ci interessa trovare il valore esatto di C ma unicamente a che distanza si abbia il valore maggiore.

σ_y e σ_z sono invece i coefficienti di dispersione orizzontale e verticale il cui valore è dipendente dalla classe di stabilità atmosferica. In particolare si procede calcolando per prima cosa il valore di σ_y e σ_z a 100 m, dato dalle seguenti equazioni:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= a100^b \\ \sigma_z &= c100^d\end{aligned}$$

In cui a, b, c, d sono coefficienti che variano a seconda della classe di stabilità atmosferica, assumendo i valori riportati nella seguente tabella:

| | | a | b | c | d |
|-----------------------|----------|-------|-------|------|------|
| Molto instabile | A | 0,527 | 0,865 | 0,28 | 0,90 |
| Instabile | B | 0,371 | 0,866 | 0,23 | 0,85 |
| Leggermente instabile | C | 0,209 | 0,897 | 0,22 | 0,80 |
| Neutrale | D | 0,128 | 0,905 | 0,20 | 0,76 |
| Stabile | E | 0,098 | 0,902 | 0,15 | 0,73 |
| Molto stabile | F | 0,065 | 0,902 | 0,12 | 0,67 |

Tabella 4.11 : valore dei coefficienti a,b,c,d in funzione della classe di stabilità

Mentre a una certa distanza x essi sono esprimibili nelle seguenti forme se la x è maggiore di 100 m:

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \left(\frac{av_time}{10}\right)^{0,2} * ax^b \\ \sigma_z &= (10z_0)^{(0,45x^{-0,22})} * cx^d\end{aligned}$$

In cui av_time = 30 min e z₀ = 1 m

Se invece la x è minore di 100 m sono esprimibili tramite le seguenti:

$$\sigma_y = \left(\frac{av_time}{10} \right)^{0,2} * \frac{\sigma_y x}{100}$$

$$\sigma_z = (10z_0)^{(0,45x^{-0,22})} * \frac{\sigma_z x}{100}$$

Inserendo infine nell'equazione gaussiana i valori di H dipendenti dal plume rise precedentemente misurato si è proceduto per tentativi a individuare il valore di x per cui la C fosse massima.

I risultati così trovati variano a seconda della velocità del vento e della classe di stabilità atmosferica e sono riportati nelle Tabelle 4.12 e 4.13. Come preventivabile, all'aumentare della stabilità aumenta anche la distanza x a cui si ha la massima concentrazione.

| Distanza x (m) per classi di stabilità e velocità vento | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F |
| 1 m/s | 51 | 82 | 106 | 156 | 520 | 940 |
| 3 m/s | 14 | 25 | 34 | 47 | 275 | 480 |

Tabella 4.12 : Riepilogo distanze x(m) per classi di stabilità e velocità del vento, camino A

| Distanza x (m) per classi di stabilità e velocità vento | | | | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E | F |
| 1 m/s | 16 | 27 | 37 | 51 | 233 | 414 |
| 3 m/s | 6 | 10 | 14 | 20 | 135 | 236 |

Tabella 4.13 : Riepilogo distanze x(m) per classi di stabilità e velocità del vento, camino B

Al fine di capire dove si trovino questi punti nel caso pratico considerato del complesso di via Terracini si è proceduto utilizzando una vista dall'alto fornita da Google Earth. A partire dal camino si è quindi indicato dove ricadrebbe il punto di massima concentrazione considerando due probabili direzioni, quelle che sembrano essere le prevalenti considerando i dati della centralina dell'aeroporto (250°N)[33] e quelli forniti dalla centralina dell'Arpa più vicina alla zona in questione (225°N). Per ogni classe di stabilità sono state fatte due rappresentazioni a seconda della velocità del vento (1m/s oppure 3 m/s).

Nelle foto seguenti le linee gialle rappresentano la classe di stabilità B e quelle verdi la F. Le linee rappresentate terminano nel punto in cui teoricamente sarebbe opportuno posizionare lo strumento.

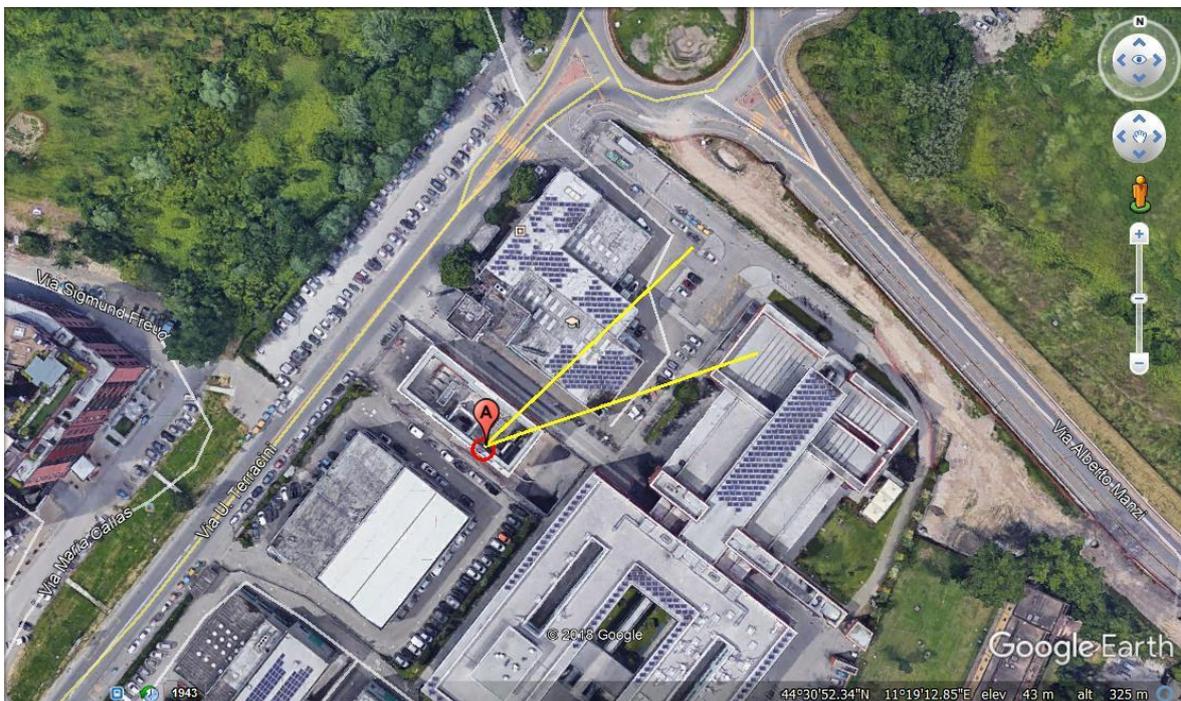


Immagine 4.3 : Camino A, classe di stabilità B, velocità del vento 1 m/s

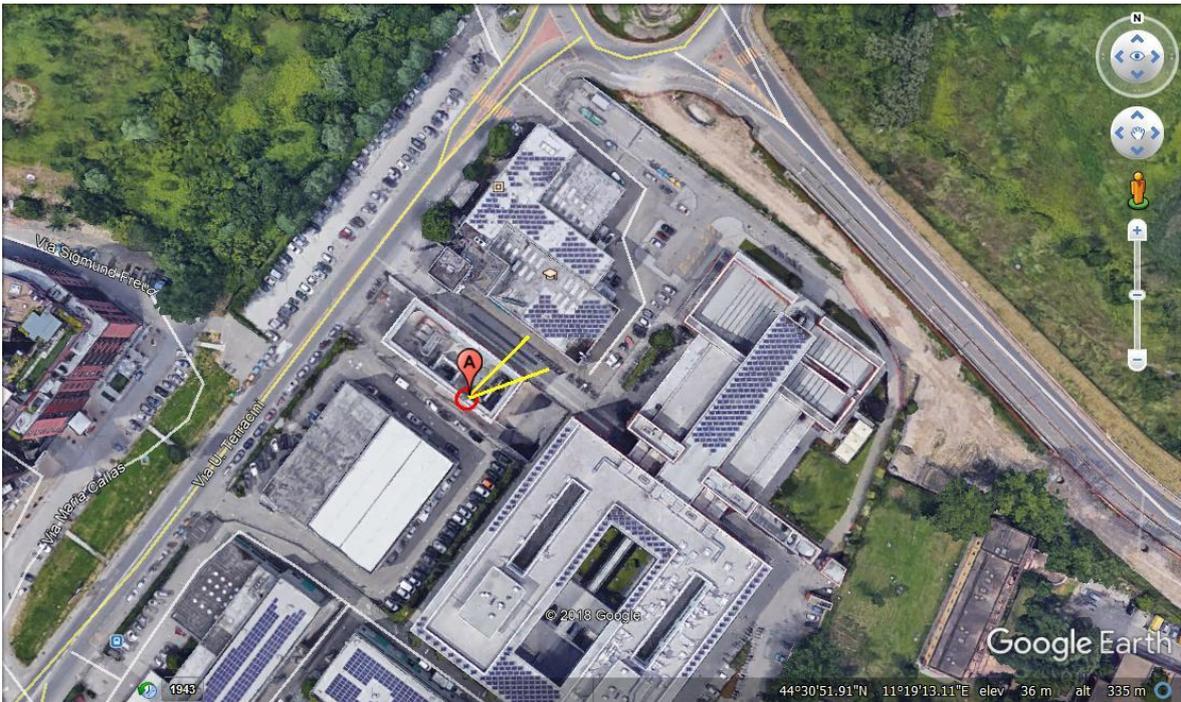


Immagine 4.4 : Camino A, classe di stabilità B, velocità del vento 3 m/s

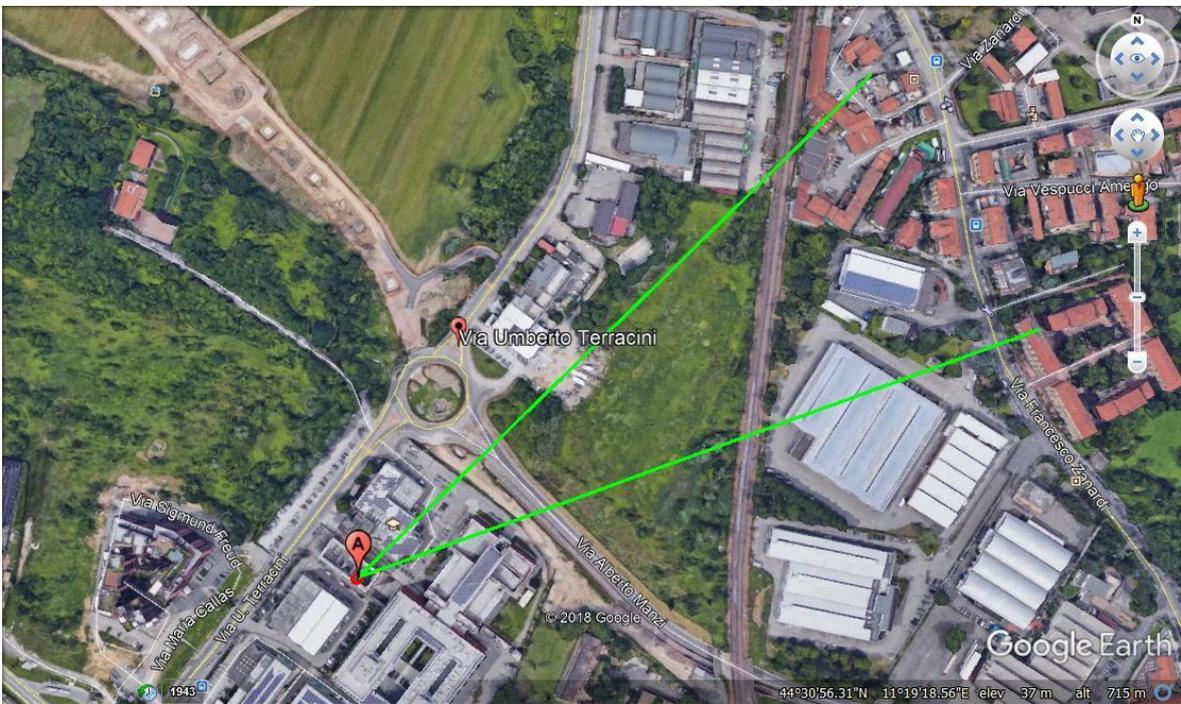


Immagine 4.5 : Camino A, classe di stabilità F, velocità del vento 1 m/s

5. Conclusioni

Dall'analisi delle emissioni dei principali inquinanti atmosferici, si evince che queste sono in generale diminuzione nel periodo 1990-2014. Questo però non è ancora sufficiente per garantire una qualità dell'aria soddisfacente, infatti l'Italia è attualmente soggetta a due procedure di infrazione avviate dalla Commissione Europea per il mancato rispetto di alcuni limiti alle emissioni. La prima procedura di infrazione è dovuta al superamento dei valori limite di PM10 in Italia tra il 2008 ed il 2012 in 19 zone e agglomerati; la seconda procedura di infrazione è invece riferita al superamento dei valori limite di biossido di azoto (NO₂) tra il 2012 e il 2014 in 15 zone e agglomerati. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità, l'Italia, con oltre 1500 decessi prematuri per milione d'abitante a causa dell'inquinamento dal PM2,5, NO₂ e O₃, paga un conto più salato degli altri grandi paesi europei all'inquinamento atmosferico e i costi esterni connessi agli impatti sulla salute dell'inquinamento atmosferico sono stimati tra i 47 e i 142 miliardi di euro. A conferma di ciò, si è visto come le percentuali di popolazione urbana esposta a valori di PM10 e PM2,5 superiori ai valori soglia OMS, siano rispettivamente dell'82% e del 79%, del totale di popolazione considerato, mentre l'O₃ ha superato i valori soglia per più di 10 giorni nel 62% dei Comuni considerati, pari al 60% della popolazione del totale dei Comuni. Invece per quanto riguarda i valori di NO₂ considerati ai fini dell'esposizione media annua nelle aree urbane, per l'anno 2016, ad eccezione delle due grandi aree urbane di Roma e Milano entrambe con 42 µg/m³, (32% della popolazione totale considerata), i valori medi di esposizione si mantengono entro i 40 µg/m³ (valore OMS nonché limite di legge).

Da sottolineare che molti dei superamenti dei limiti oggetto delle procedure di infrazione precedentemente menzionate, interessano la maggior parte delle aree localizzate nelle regioni del Bacino Padano. Per cui risulta significativa l'analisi delle stazioni di monitoraggio presenti nella regione Emilia-Romagna nell'anno 2017, da cui si evince che: il valore limite giornaliero di PM10 (50 µg/m³) è stato superato per più di 35 giorni in 27 stazioni su 43, mentre la media annua è stata ovunque inferiore a quella della norma (40 µg/m³); 4 su 47 stazioni di monitoraggio hanno superato la media annua di NO₂ (40 µg/m³); il valore obiettivo per la protezione della salute di ozono (120 µg/m³ di media massima giornaliera calcolata su 8 ore nell'arco di 1 anno) è stato superato in gran parte delle stazioni. Tutti entro i limiti i valori di biossido di zolfo, benzene e monossido di carbonio.

Per quanto riguarda il settore riscaldamento civile si è notato che esso, al 2014, incide per circa il 56% delle emissioni totali sia di PM10 che di CO e responsabili di questi due dati sono per la quasi totalità le emissioni dovute alla combustione di legna e pellet. Anche la percentuale di contributo del riscaldamento rispetto a NO_x e COVNM è in costante crescita, gli ultimi valori disponibili sono rispettivamente del 10,23% e del 21,1%. Per diminuire le emissioni da questo settore andrebbero incentivati l'impiego di camini e stufe a tecnologia avanzata in sostituzione di quelli tradizionali. Oltre a questo, in un'ottica di diminuzione dei consumi, grande importanza la riveste la classe energetica degli edifici, ma purtroppo, almeno dall'analisi della situazione in Emilia-Romagna, non sembra esserci una forte spinta verso un efficientamento energetico degli stessi. Infatti, non solo la maggior parte degli edifici esistenti (39%) è di classe G, ovvero la peggiore possibile, ma anche tra quelli di nuova costruzione le classi A e A+ sono una minoranza (13% e 2,76%), con prevalenza di edifici di classe B e C (28% entrambi).

Il caso studio, ovvero la stima delle emissioni dovute al riscaldamento della Facoltà di Ingegneria e la simulazione della dispersione delle stesse nel mese di dicembre, ha confermato che un impianto a gas naturale non ha emissioni tali da poter superare da solo i valori limite in atmosfera, neanche nelle immediate vicinanze dei camini ma comunque, soprattutto per quanto riguarda gli ossidi di azoto, può avere un contributo non trascurabile. Considerando le medie giornaliere del mese di dicembre si hanno valori massimi giornalieri di 4,5 µg/m³ nelle immediate vicinanze dei camini, mentre i valori massimi orari raggiungono anche il valore di 33 µg/m³, per cui da soli valgono circa un decimo dei valori limite da rispettare. I valori di CO invece sono ordini di grandezza inferiori al limite di legge di 10 mg/m³. Per stimare la reale situazione in un dato punto, andrebbero prese in considerazione tutte le sorgenti emissive presenti, tra le quali è probabile che il traffico sia quella più significativa in termini di NO_x e in parte di particolato, insieme alle emissioni di camini alimentati a biomasse soprattutto per il contributo alla qualità dell'aria in termini di PM.

La Tesi ha fornito un metodo per associare il contributo delle sorgenti civili alla qualità dell'aria, poiché queste non sono praticamente mai soggette a un sistema di monitoraggio in continuo delle emissioni, se non per impianti molto grandi quali per esempio gli ospedali. In alternativa al calcolo delle emissioni tramite fattori di emissione, si è voluto anche illustrare dove sarebbe stato opportuno ubicare un rilevatore di gas portatile in modo da effettuare una misura il più corretta possibile. Questa sarebbe utile anche per validare o smentire la stima mediante fattori di emissione. Purtroppo, mentre la via teorica è sempre percorribile, non

sempre è possibile impiegare uno strumento di rilevazione, sia per problemi di disponibilità dello stesso, sia per problemi di posizionamento dovuti alla mancanza di spazio o di alimentazione.

Riuscire a valutare nel modo più preciso possibile le tante emissioni dovute al riscaldamento di impianti residenziali o istituzionali sarebbe molto utile e importante. Infatti, anche se singolarmente hanno emissioni trascurabili rispetto a quelle dei grandi impianti soggetti a controlli delle emissioni in continuo, per il principio di sovrapposizione degli effetti anch'esse contribuiscono in maniera significativa alla qualità dell'aria.

Allegato A

Si riportano gli allegati XI e XII del D.Lgs 155/10 in cui sono elencati i valori limite e critici di concentrazione in aria per i diversi inquinanti (Allegato XI) e le soglie di informazione a allarme (Allegato XII).

Allegato XI

(art. 7, comma 4, art. 9, commi 1, 4 e 10,
art. 10, comma 2 e art. 16, comma 2)

Valori limite e livelli critici

1. Valori limite

| Periodo di mediazione | Valore limite | Margine di tolleranza | Data entro la quale il valore limite deve essere raggiunto |
|--|--|---|--|
| Biossido di zolfo | | | |
| 1 ora | 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, da non superare più di 24 volte per anno civile | | — (1) |
| 1 giorno | 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, da non superare più di 3 volte per anno civile | | — (1) |
| Biossido di azoto * | | | |
| 1 ora | 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, da non superare più di 18 volte per anno civile | 50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 |
| Anno civile | 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 |
| Benzene * | | | |
| Anno civile | 5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (100 %) il 13 dicembre 2000, con una riduzione il 1° gennaio 2006 e successivamente ogni 12 mesi di 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ fino a raggiungere lo 0% entro il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 |
| Monossido di carbonio | | | |
| Media massima giornaliera calcolata su 8 ore (2) | 10 mg/m^3 | | — (1) |
| Piombo | | | |
| Anno civile | 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3) | | — (1) (3) |
| PM10 ** | | | |
| 1 giorno | 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, da non superare più di 35 volte per anno civile | 50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante | — (1) |

| | | | |
|--|----------------------|---|-----------------|
| | | fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2005 | |
| Anno civile | 40 µg/m ³ | 20 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2005 | — (1) |
| PM2,5 | | | |
| FASE 1 | | | |
| Anno civile | 25 µg/m ³ | 20% l'11 giugno 2008, con riduzione il 1° gennaio successivo e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2015 | 1° gennaio 2015 |
| FASE 2 (4) | | | |
| Anno civile | (4) | | 1° gennaio 2020 |
| <p>(1) Già in vigore dal 1° gennaio 2005.</p> <p>(2) La massima concentrazione media giornaliera su 8 ore si determina con riferimento alle medie consecutive su 8 ore, calcolate sulla base di dati orari ed aggiornate ogni ora. Ogni media su 8 ore in tal modo calcolata è riferita al giorno nel quale la serie di 8 ore si conclude: la prima fascia di calcolo per un giorno è quella compresa tra le ore 17:00 del giorno precedente e le ore 01:00 del giorno stesso; l'ultima fascia di calcolo per un giorno è quella compresa tra le ore 16:00 e le ore 24:00 del giorno stesso.</p> <p>(3) Tale valore limite deve essere raggiunto entro il 1° gennaio 2010 in caso di aree poste nelle immediate vicinanze delle fonti industriali localizzate presso siti contaminati da decenni di attività industriali. In tali casi il valore limite da rispettare fino al 1° gennaio 2010 è pari a 1,0 µg/m³. Le aree in cui si applica questo valore limite non devono comunque estendersi per una distanza superiore a 1.000 m rispetto a tali fonti industriali.</p> <p>(4) Valore limite da stabilire con successivo decreto ai sensi dell'articolo 22, comma 6, tenuto conto del valore indicativo di 20 µg/m³ e delle verifiche effettuate dalla Commissione europea alla luce di ulteriori informazioni circa le conseguenze sulla salute e sull'ambiente, la fattibilità tecnica e l'esperienza circa il perseguimento del valore obiettivo negli Stati membri.</p> <p>* Per le zone e gli agglomerati per cui è concessa la deroga prevista dall'articolo 9, comma 10, i valori limite devono essere rispettati entro la data prevista dalla decisione di deroga, fermo restando, fino a tale data, l'obbligo di rispettare tali valori aumentati del margine di tolleranza massimo.</p> <p>** Per le zone e gli agglomerati per cui è concessa la deroga prevista dall'articolo 9, comma 10, i valori limite devono essere rispettati entro l'11 giugno 2011, fermo restando, fino a tale data, l'obbligo di rispettare tali valori aumentati del margine di tolleranza massimo.</p> | | | |

2. Criteri per la verifica dei valori limite

Fermo restando quanto previsto all'allegato I, si devono utilizzare i criteri indicati nella seguente tabella per verificare la validità dell'aggregazione dei dati e del calcolo dei parametri statistici.

| Parametro | Percentuale richiesta di dati validi |
|---|---|
| Valori su 1 ora | 75 % (ossia 45 minuti) |
| Valori su 8 ore | 75 % dei valori (ovvero 6 ore) |
| Valore medio massimo giornaliero su 8 ore | 75 % delle concentrazioni medie consecutive su 8 ore calcolate in base a dati orari (ossia 18 medie su 8 ore al giorno) |
| Valori su 24 ore | 75 % delle medie orarie (ossia almeno 18 valori orari) |
| MEDIA annuale | 90 % ⁽¹⁾ dei valori di 1 ora o (se non disponibile) dei valori di 24 ore nel corso dell'anno |

⁽¹⁾ La prescrizione per il calcolo della media annuale non comprende le perdite di dati dovute alla calibrazione periodica o alla manutenzione ordinaria della strumentazione.

3. Livelli critici per la protezione della vegetazione

| Periodo di mediazione | Livello critico annuale (anno civile) | Livello critico invernale (1° ottobre-31 marzo) | Margine di tolleranza |
|--------------------------|--|--|-----------------------|
| Biossido di zolfo | | | |
| | 20 µg/m ³ | 20 µg/m ³ | Nessuno |
| Ossidi di azoto | | | |
| | 30 µg/m ³ NOx | | Nessuno |

Allegato XII

(art. 10, comma 1, art. 14, comma 1 e art. 16, comma 2)

Soglie di informazione e di allarme

1. Soglie di allarme per inquinanti diversi dall'ozono

| Inquinante | Soglia di allarme (1) |
|-------------------|-----------------------|
| Biossido di zolfo | 500 µg/m ³ |
| Biossido di azoto | 400 µg/m ³ |

(1) Le soglie devono essere misurate su tre ore consecutive, presso siti fissi di campionamento aventi un'area di rappresentatività di almeno 100 km² oppure pari all'estensione dell'intera zona o dell'intero agglomerato se tale zona o agglomerato sono meno estesi.

2. Soglie di informazione e di allarme per l'ozono

| Finalità | Periodo di mediazione | Soglia |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| Informazione | 1 ora | 180 µg/m ³ |
| Allarme | 1 ora ⁽¹⁾ | 240 µg/m ³ |

⁽¹⁾ Per l'applicazione dell'articolo 10, comma 1, deve essere misurato o previsto un superamento per tre ore consecutive.

Allegato B

Scheda tecnica caldaia UNICAL ELLPREX 1570

Caratteristiche tecniche e dimensioni

ELLPREX 1100÷2650

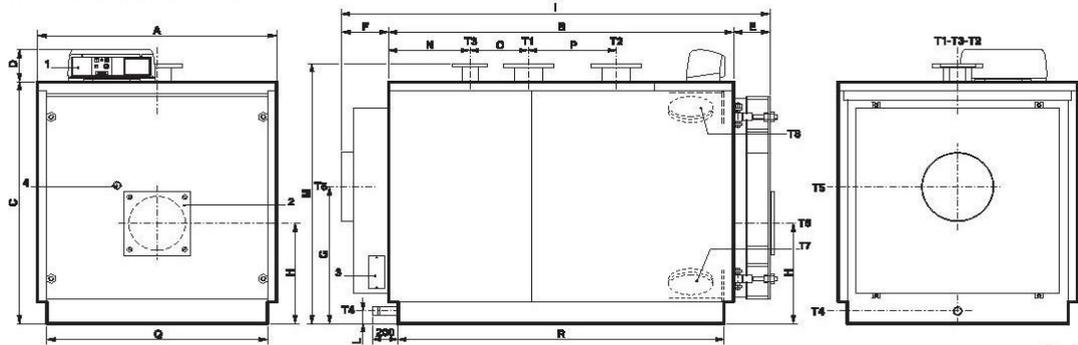


fig. 8

- 1 Quadro comandi
- 2 Flangia attacco bruciatore
- 3 Portina di pulizia camera fumo
- 4 Spia controllo fiamma

- T1 Mandata riscaldamento
- T2 Ritorno riscaldamento
- T3 Attacco vaso espansione
- T4 Scarico caldaia

- T5 Attacco camino
- T6 Attacco bruciatore
- T7 Spurgo caldaia
- T8 Portina ispezione

| ELLPREX | Potenza utile KW | Potenza locale KW | Capacità caldaia l | Perdite di carico lato acqua(**) m c.a. | Perdite di carico lato fumi mm c.a. | Pressione massima esercizio caldaia bar | Peso kg | ATTACCHI | | | | | |
|----------|---------------------|----------------------|-----------------------|--|--|--|------------|--------------|--------------|---------|---------|---------|--|
| | | | | | | | | T1 T2 | T3 | T4 | T5 Ø | T6 Ø | |
| Modello | | | | | | | | UN 2278 PN16 | UN 2278 PN16 | ISO 7/1 | | | |
| ELL 1100 | 860÷1100 | 935÷1200 | 1040 | 0,18÷0,30 | 32÷52 | 6 | 1821 | DN 150 | DN 80 | Rp 1½ | 400 | 320 | |
| ELL 1320 | 1000÷1320 | 1087÷1442 | 1242 | 0,20÷0,35 | 38÷67 | 6 | 2030 | DN 150 | DN 80 | Rp 1½ | 400 | 320 | |
| ELL 1570 | 1200÷1570 | 1304÷1715 | 1418 | 0,19÷0,33 | 35÷60 | 6 | 2780 | DN 175 | DN 100 | Rp 1½ | 450 | 320 | |
| ELL 1850 | 1400÷1850 | 1520÷2020 | 1617 | 0,26÷0,45 | 42÷73 | 6 | 3280 | DN 175 | DN 100 | Rp 1½ | 450 | 320 | |
| ELL 2200 | 1700÷2200 | 1845÷2400 | 2086 | 0,21÷0,34 | 39÷65 | 6 | 4145 | DN 200 | DN 125 | Rp 1½ | 520 | 380 | |
| ELL 2650 | 2000÷2650 | 2170÷2890 | 2324 | 0,28÷0,48 | 43÷76 | 6 | 4465 | DN 200 | DN 125 | Rp 1½ | 520 | 380 | |

| ELLPREX | DIMENSIONI | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|
| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | L | M* | N | O | P | Q* | R* |
| Modello | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m | m.m |
| ELL 1100 | 1352 | 1952 | 1432 | 190 | 207 | 187 | 810 | 595 | 2346 | 180 | 1540 | 461 | 330 | 500 | 1250 | 1846 |
| ELL 1320 | 1352 | 2292 | 1432 | 190 | 207 | 187 | 810 | 595 | 2686 | 180 | 1540 | 461 | 670 | 500 | 1250 | 2186 |
| ELL 1570 | 1462 | 2282 | 1542 | 190 | 227 | 272 | 880 | 640 | 2781 | 75 | 1650 | 561 | 510 | 550 | 1360 | 2176 |
| ELL 1850 | 1462 | 2652 | 1542 | 190 | 227 | 272 | 880 | 640 | 3151 | 75 | 1650 | 561 | 880 | 550 | 1360 | 2546 |
| ELL 2200 | 1622 | 2692 | 1702 | 190 | 259 | 274 | 950 | 690 | 3225 | 75 | 1810 | 661 | 670 | 700 | 1520 | 2590 |
| ELL 2650 | 1622 | 3014 | 1702 | 190 | 258 | 273 | 950 | 690 | 3545 | 75 | 1810 | 662 | 990 | 700 | 1520 | 2910 |

(*) Dimensioni minime di passaggio attraverso la porta della centrale termica.
 (**) Perdite di carico corrispondenti ad un salto termico di 15K.

DETTAGLIO DI FORATURA PORTA ELL 1100÷1320

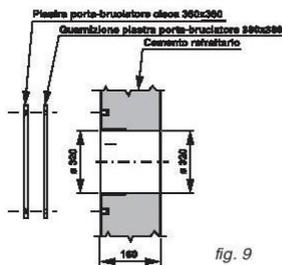


fig. 9

DETTAGLIO DI FORATURA PORTA ELL 1570÷1850

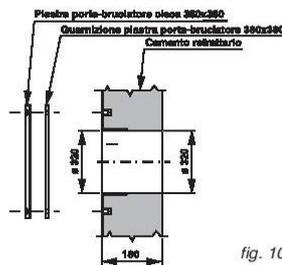


fig. 10

DETTAGLIO DI FORATURA PORTA ELL 2200÷2650

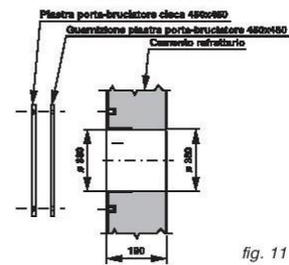


fig. 11

DATI DI FUNZIONAMENTO SECONDO UNI 10348

| FUNZIONAMENTO A GAS | | ELL 170 | ELL 240 | ELL 290 | ELL 340 | ELL 420 | ELL 510 | ELL 630 | ELL 760 | ELL 870 | ELL 970 |
|---|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Potenza termica utile nominale | kW | 130÷170 | 180÷240 | 220÷290 | 255÷340 | 315÷420 | 385÷510 | 480÷630 | 580÷760 | 660÷870 | 750÷970 |
| Potenza termica del focolare | kW | 140÷186 | 195÷262 | 239÷317 | 277÷371 | 342÷459 | 418÷557 | 520÷688 | 630÷830 | 715÷950 | 815÷1060 |
| Rendimento termico utile a carico nominale (100%) | % | 93,4÷91,8 | 92,7÷91,9 | 92,4÷91,7 | 92,3÷91,9 | 92,3÷91,7 | 92,3÷91,7 | 92,5÷91,7 | 92,2÷91,7 | 92,4÷91,7 | 92,1÷91,6 |
| Rendimento termico utile richiesto (100%) | % | 88,2÷88,5 | 88,5÷88,8 | 88,7÷88,9 | 88,8÷89,1 | 89,0÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 |
| Rendimento termico utile al 30% del carico | % | 93,0÷92,7 | 93,0÷92,6 | 93,1÷92,8 | 92,9÷92,8 | 93,0÷92,8 | 93,2÷92,9 | 93,2÷92,3 | 92,8÷92,4 | 93,1÷92,5 | 92,9÷92,5 |
| Rendimento termico utile richiesto (30%) | % | 86,3÷86,7 | 86,8÷87,1 | 87,0÷87,4 | 87,2÷87,6 | 87,5÷87,9 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 |
| Numero di stelle (secondo 92/42 CEE) | n. | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | -- | -- | -- | -- | -- |
| Rendimento di combustione a carico nominale (100%) | % | 94,0÷92,4 | 93,3÷92,4 | 92,9÷92,2 | 92,8÷92,3 | 92,8÷92,0 | 92,7÷92,0 | 92,8÷91,9 | 92,5÷91,9 | 92,7÷91,9 | 92,3÷91,8 |
| Perdite al mantello (min.-max.) | % | 0,6÷0,6 | 0,6÷0,5 | 0,5÷0,4 | 0,5÷0,4 | 0,4÷0,4 | 0,4÷0,3 | 0,3÷0,3 | 0,3÷0,2 | 0,3÷0,2 | 0,2÷0,2 |
| Perdite al camino con bruciatore acceso (min.-max.) | % | 6,0÷7,6 | 6,7÷7,6 | 7,1÷7,8 | 7,2÷7,7 | 7,2÷8,0 | 7,3÷8,0 | 7,2÷8,1 | 7,5÷8,1 | 7,3÷8,1 | 7,7÷8,2 |
| Perdite al camino con bruciatore spento (min.-max.) | % | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 |
| Temperatura dei fumi ff-ta (min.-max.) | °C | 158÷168 | 157÷164 | 161÷169 | 155÷165 | 155÷163 | 145÷165 | 152÷172 | 162÷167 | 145÷170 | 159÷173 |
| Tenore di CO ₂ | % | 10,0÷10,0 | 10,1÷10,1 | 10,5÷10,0 | 10,2÷10,2 | 9,9÷9,9 | 10,0÷9,9 | 10,0÷10,2 | 9,9÷9,9 | 9,9÷9,8 | 9,9÷10,0 |
| Portata massica fumi (min.-max.) | kg/h | 214÷285 | 296÷398 | 350÷486 | 417÷558 | 529÷711 | 641÷863 | 798÷1036 | 976÷1286 | 1107÷1486 | 1262÷1627 |

| FUNZIONAMENTO A GAS | | ELL 1100 | ELL 1320 | ELL 1570 | ELL 1850 | ELL 2200 | ELL 2650 | ELL 3000 | ELL 3500 | ELL 4000 |
|---|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Potenza termica utile nominale | kW | 860÷1100 | 1000÷1320 | 1200÷1570 | 1400÷1850 | 1700÷2200 | 2000÷2650 | 2300÷3000 | 2700÷3500 | 3040÷4000 |
| Potenza termica del focolare | kW | 935÷1200 | 1087÷1442 | 1304÷1715 | 1520÷2020 | 1845÷2400 | 2170÷2890 | 2492÷3280 | 2930÷3825 | 3297÷4371 |
| Rendimento termico utile a carico nominale (100%) | % | 92,1÷91,7 | 92,1÷91,6 | 92,1÷91,6 | 92,2÷91,6 | 92,2÷91,7 | 92,2÷91,7 | 92,3÷91,5 | 92,2÷91,5 | 92,2÷91,5 |
| Rendimento termico utile richiesto (100%) | % | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 | 89,2÷89,2 |
| Rendimento termico utile al 30% del carico | % | 92,9÷92,7 | 92,9÷92,5 | 92,9÷93,2 | 93,0÷92,5 | 93,0÷92,6 | 93,0÷92,6 | 93,1÷93,1 | 93,0÷93,0 | 93÷93 |
| Rendimento termico utile richiesto (30%) | % | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 | 87,8÷87,8 |
| Numero di stelle (secondo 92/42 CEE) | n. | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| Rendimento di combustione a carico nominale (100%) | % | 92,3÷91,9 | 92,3÷91,7 | 92,3÷91,7 | 92,4÷91,8 | 92,4÷91,9 | 92,4÷91,9 | 92,5÷91,7 | 92,4÷91,7 | 92,4÷91,7 |
| Perdite al mantello (min.-max.) | % | 0,2÷0,1 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 | 0,2÷0,2 |
| Perdite al camino con bruciatore acceso (min.-max.) | % | 7,7÷8,1 | 7,7÷8,3 | 7,7÷8,3 | 7,6÷8,2 | 7,6÷8,1 | 7,6÷8,1 | 7,5÷8,3 | 7,6÷8,3 | 7,6÷8,3 |
| Perdite al camino con bruciatore spento (min.-max.) | % | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 | 0,1÷0,1 |
| Temperatura dei fumi ff-ta (min.-max.) | °C | 162÷171 | 152÷175 | 165÷174 | 153÷174 | 157÷166 | 152÷163 | 155÷176 | 156÷175 | 160÷175 |
| Tenore di CO ₂ | % | 9,9÷10,0 | 10,0÷10,0 | 10,0÷10,0 | 10,1÷10,1 | 10,2÷10,2 | 10,2÷10,2 | 10,2÷10,2 | 10,2÷10,2 | 10,2÷10,2 |
| Portata massica fumi (min.-max.) | kg/h | 1448÷1841 | 1668÷2213 | 2001÷2632 | 2311÷3071 | 2779÷3615 | 3268÷4353 | 3753÷4940 | 4413÷5761 | 4787÷6345 |

Allegato C

Scheda tecnica caldaia ICI TRA 25

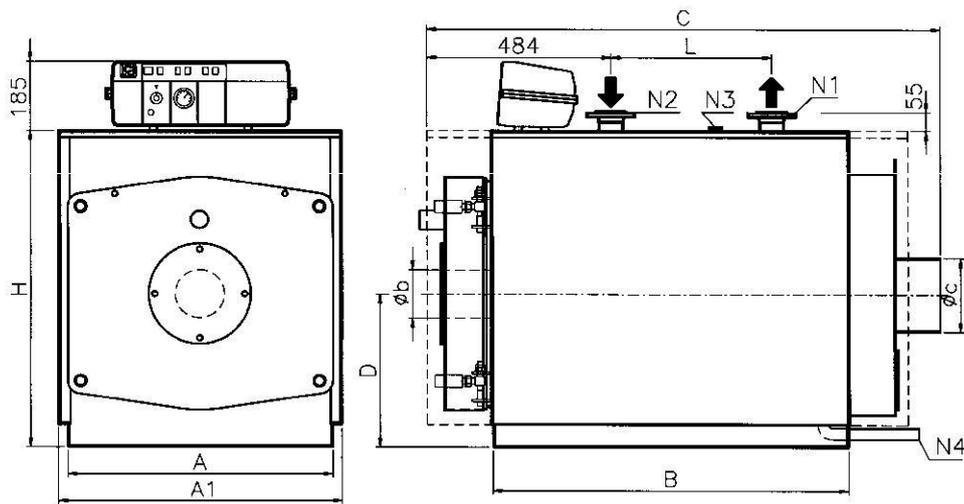
DATI TECNICI

2. DATI TECNICI

2.1. CALDAIA TRA/TRK

N1 - Mandata
N2 - Ritorno

N3 - Attacco per strumentazione
N4 - Attacco inferiore



| CALDAIA TIPO | POTENZA UTILE | | POTENZA FOCOLARE | | CAPACITA' litri | PERDITE DI CARICO LATO ACQUA • mm.c.a. | CONTROPRESSIONE CAMERA DI COMBUST. mm.c.a. | PESO kg |
|--------------|---------------|-----|------------------|-----|-----------------|--|--|---------|
| | kcal/h | kW | kcal/h | kW | | | | |
| TRA 8* | 80.000 | 93 | 87.900 | 102 | 123 | 100 | 8 | 217 |
| TRA 9* | 90.000 | 105 | 99.000 | 115 | 123 | 120 | 10 | 228 |
| TRA 10 | 100.000 | 116 | 110.400 | 128 | 123 | 130 | 11 | 240 |
| TRA 13 | 130.000 | 151 | 143.200 | 167 | 172 | 140 | 12 | 335 |
| TRA 16 | 160.000 | 186 | 176.600 | 205 | 172 | 150 | 16 | 350 |
| TRA/TRK 20 | 200.000 | 232 | 220.000 | 256 | 300 | 160 | 18 | 420 |
| TRA/TRK 25 | 250.000 | 290 | 274.700 | 319 | 356 | 180 | 20 | 543 |

| CALDAIA TIPO | DIMENSIONI mm | | | | | | | | | ATTACCHI DN | |
|--------------|---------------|-----|------|------|-----|------|-----|-----|-----|-------------|-------|
| | A | A1 | B | C | D | H | L | Øb | Øc | N1/N2 | N3/N4 |
| TRA 8* | 700 | 750 | 755 | 1140 | 415 | 855 | 265 | 130 | 200 | 50 | 1" |
| TRA 9* | 700 | 750 | 755 | 1140 | 415 | 855 | 265 | 130 | 200 | 50 | 1" |
| TRA 10 | 700 | 750 | 755 | 1140 | 415 | 855 | 265 | 130 | 200 | 50 | 1" |
| TRA 13 | 750 | 800 | 1000 | 1385 | 440 | 905 | 475 | 160 | 250 | 50 | 1" |
| TRA 16 | 750 | 800 | 1000 | 1385 | 440 | 905 | 475 | 160 | 250 | 50 | 1" |
| TRA/TRK 20 | 850 | 900 | 1250 | 1640 | 490 | 1005 | 700 | 180 | 250 | 65 | 1" |
| TRA/TRK 25 | 850 | 900 | 1500 | 1890 | 490 | 1005 | 980 | 180 | 250 | 65 | 1" |

• Perdite di carico riferite ad un salto termico di 12°C
Pressione massima di esercizio caldaia 5 ate

* Caldaia esente da controllo prevenzione incendi.

ESERCIZIO

6. ESERCIZIO

6.1. VERIFICHE DI FUNZIONAMENTO

L'impianto di riscaldamento deve essere condotto in modo idoneo, tale da assicurare da un lato una ottima combustione con ridotte emissioni in atmosfera di ossido di carbonio, idrocarburi incombusti e fuliggine e dall'altro evitare danni alle persone ed alle cose.

Valori guida di combustione:

| COMBUSTIBILE | %CO ₂ | Temperatura fumi | % CO |
|--------------|------------------|------------------|--------------|
| Gas | 10 | 190°C | 0 – 20 ppm |
| Gasolio | 13 | 195°C | 10 – 80 ppm |
| Nafta | 13,5 | 200°C | 50 – 150 ppm |

Viene riportato un diagramma che in funzione della temperatura dei fumi, dell'aria e della percentuale di anidride carbonica (%CO₂) restituisce il rendimento della caldaia senza però considerare le dispersioni attraverso il rivestimento della caldaia.

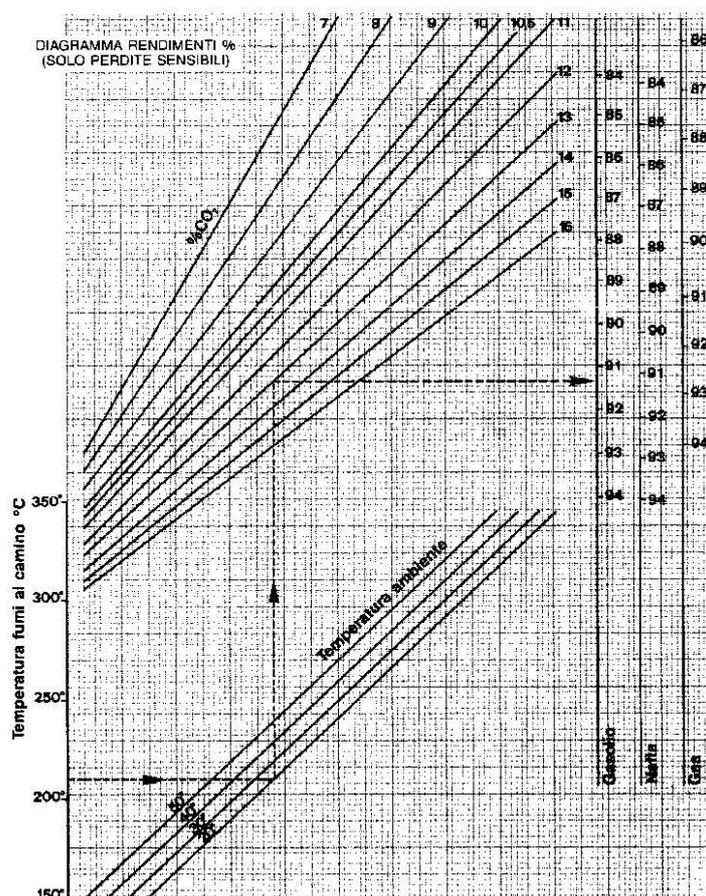
Esempio:

CombustibileGASOLIO

%CO₂.....3 %

Temperatura ambiente.....20 °C

Rendimento.....91,4 %



La pressurizzazione deve rientrare nei valori espressi nella tabella dei dati tecnici.

Il salto termico tra mandata e ritorno non deve superare i 15°C, onde evitare shock termici alle strutture della caldaia. La temperatura di ritorno dall'impianto deve essere superiore a 55°C al fine di salvaguardare la caldaia dalla corrosione dovuta alla condensazione dei fumi su superfici troppo fredde; a tale riguardo è utile mitigare la temperatura di ritorno installando una valvola miscelatrice a 3 o 4 vie.

Allegato D

Si riporta il file in formato “.cmn” contenente la griglia dei recettori.

```
                                GRID FILE
                                -----
!  IMAP = UTM                    !
!  IUTMZN = 32                   !
!  LSOHEM = N                    !
*  LCCRLAT0 =                    *
*  LCCRLON0 =                    *
*  LCCRLAT1 =                    *
*  LCCRLAT2 =                    *
*  LCCFEAST =                    *
*  LCCFNORTH =                   *
*  TTMRLAT0 =                    *
*  TTMRLON0 =                    *
*  TTMFEAST =                    *
*  TTMFNORTH =                   *
*  PSRLAT0 =                     *
*  PSRLON0 =                     *
*  PSRLAT1 =                     *
*  EMRLAT0 =                     *
*  EMRLON0 =                     *
*  LZRLAT0 =                     *
*  LZRLON0 =                     *
*  LAZAFEAST =                   *
*  LAZAFNORTH =                  *
!  DATUM = WGS-84                !
!  XREFKM = 683.378              !
!  YREFKM = 4930.605            !
!  DGRIDKM = .1                 !
!  NX = 20                      !
!  NY = 20                      !
!  NZ = 2                        !
!  XBTZ = -1                    !
!  ZFACE = 0                    !
!  ZFACE = 20                   !
!  ZFACE = 1000                 !
```

Si riportano le prime 24 ore del file meteo utilizzato, formattato secondo lo standard ISC .

| 94728 | 13 | 14735 | 13 | | | | | | | | | | |
|-------|-----|----------|----------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|------|------|
| 1312 | 1 | 1 | 113.0000 | 2.4000 | 277.4 | 6 | 347.0 | 347.0 | 0.4410 | 174.5 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 2 | 101.0000 | 2.1000 | 277.4 | 6 | 272.0 | 272.0 | 0.3750 | 125.9 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 3 | 116.0000 | 2.1000 | 277.5 | 6 | 285.0 | 285.0 | 0.3870 | 134.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 4 | 131.0000 | 1.9000 | 277.5 | 6 | 246.0 | 246.0 | 0.3500 | 110.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 5 | 131.0000 | 1.8000 | 277.5 | 6 | 215.0 | 215.0 | 0.3200 | 92.0 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 6 | 131.0000 | 1.6000 | 277.3 | 6 | 194.0 | 194.0 | 0.2810 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 7 | 113.0000 | 1.7000 | 277.4 | 6 | 206.0 | 206.0 | 0.3110 | 86.9 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 8 | 120.0000 | 1.7000 | 277.0 | 4 | 500.0 | 500.0 | 0.3110 | 78.0 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 1 | 9 | 120.0000 | 1.5000 | 276.3 | 4 | 500.0 | 500.0 | 0.2660 | 90.9 | 1.1000 | 0 | 0.00 |
| 1312 | 110 | 105.0000 | 2.0000 | 276.3 | 4 | 500.0 | 500.0 | 0.3620 | -1436.1 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 111 | 113.0000 | 2.1000 | 277.8 | 3 | 1000.0 | 1000.0 | 0.3780 | -51.6 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 112 | 124.0000 | 1.5000 | 278.9 | 3 | 1000.0 | 1000.0 | 0.2660 | -26.4 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 113 | 101.0000 | 1.9000 | 280.5 | 2 | 1500.0 | 1500.0 | 0.3470 | -22.1 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 114 | 116.0000 | 1.3000 | 281.6 | 4 | 473.0 | 473.0 | 0.2420 | -35.8 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 115 | 236.0000 | 1.1000 | 283.0 | 4 | 390.0 | 390.0 | 0.1990 | -22.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 116 | 218.0000 | 0.9000 | 282.7 | 4 | 307.0 | 307.0 | 0.1570 | -57.6 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 117 | 68.0000 | 0.7000 | 281.3 | 4 | 230.0 | 230.0 | 0.1180 | 5.3 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 118 | 124.0000 | 0.6000 | 280.2 | 6 | 117.0 | 117.0 | 0.1030 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 119 | 131.0000 | 0.9000 | 279.3 | 6 | 146.0 | 146.0 | 0.1600 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 120 | 113.0000 | 1.0000 | 279.1 | 6 | 151.0 | 151.0 | 0.1720 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 121 | 131.0000 | 1.1000 | 278.8 | 6 | 163.0 | 163.0 | 0.1990 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 122 | 113.0000 | 1.2000 | 278.7 | 6 | 169.0 | 169.0 | 0.2140 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 123 | 113.0000 | 1.3000 | 278.8 | 6 | 177.0 | 177.0 | 0.2360 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |
| 1312 | 124 | 105.0000 | 1.3000 | 278.6 | 6 | 178.0 | 178.0 | 0.2390 | 85.2 | 1.1000 | 0 | 0.00 | |

Bibliografia

- [1] D.Lgs. 155/2010 Attuazione della direttiva 2008/50/CE
- [2] D.Lgs. 152/2006 Norme in materia ambientale
- [3] Stazioni Sperimentali per l'Industria, 2005. *Analisi comparativa dei combustibili a uso civile*
- [4] ISPRA, 2017. *Qualità dell'ambiente urbano – XIII Rapporto (2017)*
- [5] ISPRA, 2016. *Annuario dei dati ambientali*
- [6] ISPRA, 2014. *Analisi dei trend dei principali inquinanti atmosferici in Italia 2003-2012*
- [7] Legambiente, 2018. *Mal'aria. Rapporto di Legambiente sull'inquinamento atmosferico nelle città italiane*
- [8] Report sulla qualità dell'aria realizzato dalla Fondazione per lo sviluppo sostenibile in collaborazione con ENEA, 2017. *“La sfida della qualità dell'aria nelle città italiane”*
- [9] ARPAE, 2017. *Inventario regionale delle emissioni in atmosfera dell'Emilia-Romagna relativo all'anno 2013 (INEMAR-ER 2013)*
- [10] ARPAE, 2018. *La qualità dell'aria in Emilia-Romagna 2017*
- [11] <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/emissioni-di-inquinanti/metodologia-EMEP-CORINAIR>
- [12] Sandro Garro, intervento al convegno MED-IPPC-NET 19 ottobre 2010, Torino. *I sistemi di monitoraggio in continuo delle emissioni (SMCE)*
- [13] ARPALAZIO, 2015. *Inventario regionale delle emissioni in atmosfera*
- [14] Innovhub - Stazioni Sperimentali per l'Industria, 2016. *Studio comparativo sulle emissioni da apparecchi a gas, GPL, gasolio e pellet*
- [15] ISTAT, 2014. *Indagine ISTAT sui consumi energetici delle famiglie*
- [16] <https://aspoitalia.wordpress.com/2017/02/11/quant-chilometri-fai-con-una-stufa-o-una-mucca/>
- [17] Progetto APAT - ARPA Lombardia, 2008. *Stima dei consumi di legna da ardere per riscaldamento ed uso domestico in Italia*

- [18] https://www.arpae.it/dettaglio_notizia.asp?id=9234&idlivello=1459
- [19] ERVET, 2016. *Lo stato dell'arte nella certificazione energetica degli edifici in Emilia-Romagna*
- [20] <http://energia.regione.emilia-romagna.it/servizi-on-line/certificazione-energetica-degli-edifici>
- [21] Ministero dello Sviluppo Economico – DGSAIE
- [22] Regolamento (UE) 2016/426 “ Apparecchi a gas” , che abroga la direttiva 2009/142/CE
- [23] <http://www.arpa.emr.it/liberiamo/>
- [24] ANPA , 2001. *Linee guida Inventari Emissioni Atmosfera*
- [25] <http://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/FontiEmissioni/>
- [26] EMEP/EEA, 2016. *Air pollutant emission inventory guidebook*
- [27] <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-le-sorgenti-di-combustione-stazionarie-in-italia/view>
- [28] <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emission-factors>
- [29] G.Sacco. *La modellistica ambientale per valutazioni di rischio sanitario*
- [30] https://it.wikipedia.org/wiki/Gas_naturale
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_dispersion_modeling
- [32] <https://www.maind.it/document/MMS.WinDimulaEquations.pdf>
- [33] ARPAE, 2013. *Monitoraggio della qualità dell'aria Aeroporto G. Marconi*

