

METODOLOGIA PER L'INDAGINE DELL'IMPATTO SULL'AMBIENTE ATMOSFERICO DI COMBUSTIBILI

F. Cotana, C. Buratti, E. Moretti

CIRIAF

Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale

Via G. Duranti, 67 - 06125 Perugia

Tel: 075/5853714; Fax: 075/5853697; e-mail: cotana@unipg.it

1. Introduzione

La maggiore consapevolezza dell'importanza della protezione dell'ambiente e i possibili impatti dovuti all'impiego di combustibili per la produzione di energia termica ed elettrica hanno accresciuto l'interesse verso lo sviluppo di metodi atti a comprendere meglio e a ridurre tali impatti. Il problema dell'inquinamento atmosferico, in particolare, è stato oggetto di molteplici indagini finalizzate alla tutela della salute umana e dell'ambiente.

I tre ambiti unanimemente riconosciuti responsabili dell'alterazione dello stato dell'ambiente atmosferico sono il settore dei trasporti, il settore industriale e quello civile: proprio il contributo di questo ultimo è oggetto del presente studio.

L'inquinamento da riscaldamento, principalmente in ambito urbano, è determinato dall'impiego negli impianti termici di combustibili soprattutto di origine fossile (gasolio, olio combustibile, metano, etc.); questo porta le Amministrazioni Locali ed i Governi Nazionali a prendere adeguate misure per limitare e contenere gli effetti sull'ambiente e sulla salute umana: proprio a tal fine sono stati emanati recentemente differenti provvedimenti [1, 2, 3] che regolamentano l'impiego di ciascun combustibile in ambito civile ed industriale e ne definiscono le caratteristiche merceologiche.

A tal fine il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio ha promosso una sperimentazione, volta alla comparazione tecnico – scientifica di combustibili destinati al riscaldamento civile, alcuni dei quali sono combustibili fossili più diffusi sul mercato italiano, altri sono tipologie innovative il cui impiego è via di diffusione: Gas Naturale, Gasolio, Biodiesel, Olio Combustibile BTZ, Emulsione Gasolio/Acqua, miscela Olio Combustibile BTZ/Biodiesel e Emulsione Olio Combustibile BTZ/Acqua.

Nell'ambito di tale sperimentazione il CIRIAF, unitamente alla Stazione Sperimentale per i Combustibili di Milano, è stato incaricato di valutare le emissioni in atmosfera a parità di potenza termica resa dall'impianto, di diversi apparecchi di combustione, suddivisi in tre categorie, in base alla potenza nominale degli apparecchi stessi. Inoltre, per ogni combustibile oggetto della sperimentazione sono valutati non solo i requisiti energetici e ambientali, ma anche altri parametri sensibili quali la sicurezza, le modalità di stoccaggio, i costi, la facilità di impiego e trasporto, i costi esterni, etc.

Per la comparazione è stata elaborata una metodologia originale che, sulla base anche di dati sperimentali parallelamente acquisiti, consente di attribuire ai diversi sistemi combustibile/impianto un parametro di valutazione delle prestazioni energetiche e dell'impatto sull'ambiente.

2. Finalità e fasi della ricerca

La sperimentazione si propone principalmente tre obiettivi:

- determinazione dell'influenza dei singoli combustibili e dei diversi sistemi di combustione sulle emissioni in atmosfera, mediante valutazione delle sostanze inquinanti prodotte dagli impianti tipicamente impiegati nel settore del riscaldamento domestico, in diverse condizioni di regolazione, sia in laboratorio sia in campo;
- stima, sulla base di dati reperiti in Letteratura, del contributo del settore civile all'inquinamento atmosferico e della sua ripartizione tra i diversi combustibili, con particolare attenzione all'esame dei fattori di emissione;
- analisi di parametri sensibili quali sicurezza, trasporto, stoccaggio, facilità d'impiego e costi, relativi ai combustibili esaminati.

Le attività connesse con il raggiungimento degli obiettivi sopra citati sono sostanzialmente articolate nelle seguenti fasi:

1. *indagine bibliografica*, volta alla valutazione comparativa delle problematiche connesse con l'impiego dei combustibili sia in termini di impatto ambientale che di sicurezza; lo scopo finale è una conoscenza approfondita delle caratteristiche salienti di ciascun combustibile oggetto di studio, così da fornirne un quadro generale sotto l'aspetto energetico, commerciale, fiscale e in termini di rischio;
2. *fase sperimentale*, che prevede una vasta campagna di misure in laboratorio e in campo su diversi apparecchi di combustione, suddivisi in tre categorie in base alla potenza nominale e alimentati con i combustibili esaminati; tale fase operativa è finalizzata alla quantificazione dei livelli di emissione generati dai processi di combustione, in funzione dei diversi combustibili impiegati e dei rendimenti energetici ottenuti;
3. *elaborazione di una metodologia* al fine di quantificare in modo oggettivo e scientifico la qualità di un combustibile impiegato in un determinato contesto territoriale, così da poter eseguire un'analisi comparativa. La metodologia proposta indaga sulle qualità del combustibile lungo tutto il suo ciclo di vita: dall'estrazione o coltivazione della materia prima, fino all'impiego finale in generatori di calore. Ognuna delle fasi del ciclo di vita del combustibile è valutata in modo quantitativo sotto tre diversi punti di vista: costi, intesi anche come costi esterni, sicurezza, emissioni in atmosfera.

I contenuti, le modalità di svolgimento e i primi risultati delle fasi dell'attività di ricerca sono descritti nel seguito.

3. Indagine bibliografica

La prima fase dell'indagine bibliografica è finalizzata alla conoscenza delle principali caratteristiche chimico – fisiche dei combustibili coinvolti nella sperimentazione, dei trattamenti subiti prima dell'impiego finale in caldaia e delle caratteristiche merceologiche.

Successivamente sono stati raccolti i dati disponibili in Letteratura relativi alle emissioni in atmosfera lungo il ciclo di vita di un combustibile [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,11] che saranno utilizzati nell'applicazione della metodologia citata. Inoltre, i dati reperiti in Letteratura inerenti le emissioni in atmosfera connesse con l'ultima fase del ciclo di vita di

un combustibile, cioè l'impiego, possono essere presi in considerazione per un critico confronto con quelli emersi nella fase sperimentale, sia in campo che in laboratorio.

Dei dati raccolti si ritiene significativo riportarne alcuni che mostrano l'incidenza del riscaldamento civile sulla concentrazione dei diversi inquinanti e la ripartizione delle emissioni tra i combustibili esaminati; si focalizza inoltre l'attenzione sui fattori di emissione, la cui valutazione pone le basi per l'applicazione della metodologia proposta.

Le percentuali di sostanze emesse in atmosfera per macrosettori, tra il 1990 e il 1999 [5], mostrano che la CO₂ prodotta in impianti di combustione non industriale è dell'ordine del 16%, mentre più modeste risultano SO₂ (2%), CO (3%) e CH₄ (0,44%). Tali percentuali fanno riferimento all'uso finale delle diverse fonti di energia; ad esse vanno aggiunte quelle relative agli altri macrosettori coinvolti nel ciclo di vita dei combustibili, come i processi di produzione e trasporto. Stime effettuate dall'ANPA nel 2001 [7] evidenziano infatti come le perdite di metano e COVNM (composti organici volatili non metanici) lungo i gasdotti non siano trascurabili.

Rilevamenti effettuati dall'ANPA (1990) valutano per ogni inquinante la quota parte prodotta da ciascun combustibile nel settore civile; non sono tuttavia presenti alcuni dei combustibili oggetto di studio del presente lavoro (come le emulsioni), in quanto, ricoprendo un ruolo marginale nel settore civile, non sono stati oggetto di analisi.

Dai dati si evince quanto segue:

- le emissioni di CO₂ nel settore civile sono principalmente dovute alla combustione di gas naturale (oltre il 50%), seguito dal gasolio (circa 33%);
- le emissioni di CO sono principalmente dovute alla combustione di biomasse (oltre il 77%); per il resto sono più o meno equivalentemente distribuite tra i combustibili esaminati in questa sede;
- le emissioni di SO_x sono dovute in massima parte a gasolio (49%) e olio combustibile (46%);
- le emissioni di NO_x sono per oltre la metà (55%) dovute al gas naturale, per circa il 27 % al gasolio;
- le emissioni di COV sono per i $\frac{3}{4}$ (73%) dovute alla combustione di biomasse, per il 15% circa al gas naturale e per il resto sono più o meno equivalentemente distribuite tra gli altri combustibili;
- le emissioni di metano infine sono per il 62% imputabili alle biomasse, per il 20% al gas naturale, per il 13% al gasolio.

Al fine di effettuare una valutazione comparativa tra i diversi combustibili, è necessario far riferimento a grandezze specifiche quali le quantità di inquinante emesso espresso in grammi per chilogrammo di materia combusta e kg di inquinante emesso per Tep prodotto (v. tab. 1), dette anche Fattori di Emissione (FE).

I Fattori di Emissione stimati nel presente lavoro mediante i dati reperiti in Letteratura e relativi al 1990, possono essere messi in relazione con quelli stimati dall'ANPA-CTN-ACE in riferimento al 2001[7]; da tale confronto si evince come le emissioni di ossidi di zolfo si siano particolarmente ridotte, a parità di energia prodotta, grazie all'impiego di prodotti petroliferi a basso contenuto di Zolfo (tab. 2).

Tabella 1 - Stima del Fattore di Emissione (FE) relativo ai principali combustibili impiegati nel settore civile per l'anno 1990.

Combustibile	Inquinante	Tonnellate emesse	Combustibile impiegato (10 ⁶ t o 10 ⁹ m ³)	Energia consumata (10 ³ Tep)	FE (Kg/Tep)	FE (g/Kg o g/m ³)
Gasolio	CO ₂	23254511	7,55	7703	3018,89	3079,2
	CO	6279	7,55	7703	0,82	0,83
	SO _x	44269	7,55	7703	5,75	5,86
	NO _x	15698	7,55	7703	2,04	2,07
	COV	941,4	7,55	7703	0,12	0,12
	CH ₄	2197	7,55	7703	0,29	0,29
Olio combustibile	CO ₂	2133263	0,68	671	3179,23	3115,6
	CO	449,3	0,68	671	0,67	0,66
	SO _x	41315	0,68	671	61,57	60,34
	NO _x	4215	0,68	671	6,28	6,15
	COV	337	0,68	671	0,50	0,49
	CH ₄	84,2	0,68	671	0,13	0,12
Gas Naturale	CO ₂	36509149	19,40	15750	2318,04	1882,2
	CO	16269	19,40	15750	1,03	0,83
	SO _x	0	19,40	15750	0,00	0
	NO _x	32539	19,40	15750	2,07	1,67
	COV	3253	19,40	15750	0,21	0,16
	CH ₄	3253	19,40	15750	0,21	0,16

Tabella 2 - Confronto tra i Fattori di Emissione relativi al 1990 e al 2001 per alcuni dei combustibili esaminati.

Combustibile	Inquinante	FE (Kg/Tep) 1990	FE (Kg/Tep) 2001	Variazione % FE 1990-2001
Gasolio	CO ₂	3018,89	3065,82	1,55
	CO	0,82	0,84	2,44
	SO _x	5,75	3,93	-31,65
	NO _x	2,04	2,09	2,45
	COV	0,12	0,13	8,33
	CH ₄	0,29	0,29	0
Olio combustibile	CO ₂	3179,23	3122,18	-1,79
	CO	0,67	0,67	0
	SO _x	61,57	20,38	-66,90
	NO _x	6,28	6,28	0,00
	COV	0,50	0,50	0,00
	CH ₄	0,13	0,13	0,00
Gas Naturale	CO ₂	2318,04	2320,46	0,10
	CO	1,03	1,05	1,94
	SO _x	0,00	0,00	0,00
	NO _x	2,07	2,09	0,97
	COV	0,21	0,21	0,00
	CH ₄	0,15	0,21	40

Per quanto riguarda i costi, sono stati raccolti, laddove disponibili, dati sui costi connessi con le varie fasi del ciclo di vita dei diversi combustibili: estrazione/coltivazione, trasporto, lavorazione, stoccaggio, impiego; sono stati inoltre analizzati i risultati principali di alcuni studi recenti riguardanti i costi esterni [13, 14, 15, 16].

Un altro parametro sensibile connesso con l'impiego dei combustibili è la sicurezza: sono stati esaminati i classici metodi di valutazione dell'indice di rischio connesso con impianti chimico - industriali a rischio di incidente rilevante, fino al metodo ad indici introdotto dalla legislazione italiana [17,18].

Sono stati reperiti infine dati relativi al censimento delle tipologie di impianto di riscaldamento presenti in Italia e i relativi combustibili impiegati, al fine di comprendere la reale diffusione sul territorio degli impianti scelti per la fase sperimentale.

4. Attività sperimentale

La fase operativa della sperimentazione consiste in una serie di rilievi analitici delle emissioni in atmosfera su un campione di impianti termici rappresentativo della realtà nazionale, sia in campo che in laboratorio.

Le tipologie di impianto sulle quali si articola la fase sperimentale sono indicativamente distinte in tre classi, in base alla potenza nominale, riportate nella tabella 3; tale classificazione risulta essere sufficientemente rispondente alla diffusione reale degli impianti sul territorio nazionale, in quanto comprensiva sia del tipico sistema autonomo monofamiliare che dell'unità idonea al riscaldamento di una palazzina da 20 -30 appartamenti.

Il CIRIAF ha partecipato alla fase sperimentale eseguendo, contestualmente alla Stazione Sperimentale per i Combustibili di Milano, alcune delle misure previste, al fine di confrontare i risultati ottenuti con diverse modalità e strumentazioni di misura.

Tabella 3 - Classificazione degli impianti termici in funzione della potenza nominale.

<i>Potenza nominale dell'impianto termico</i>	<i>Classe</i>
$\leq 35 \text{ kW}$	I
$\leq 200 \text{ kW}$	II
$\leq 350 \text{ kW}$	III

Di seguito sono descritte le modalità di svolgimento delle prove, sia in laboratorio che in campo; i risultati, la cui proprietà intellettuale è del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, saranno pubblicati al termine della sperimentazione.

4.1 Sperimentazione in Laboratorio

È stata allestita nei laboratori della Stazione Sperimentale per i Combustibili un'apposita aerea prove, dotata di apparecchi selezionati in base al livello tecnologico e al grado di diffusione sul mercato.

Gli impianti termici, uno per ogni classe di potenza, sono alimentati con i sette combustibili oggetto della sperimentazione (Gas Naturale, Gasolio, Biodiesel, Olio Combustibile BTZ, Emulsione Gasolio/Acqua, miscela Olio Combustibile BTZ/Biodiesel e Emulsione Olio Combustibile BTZ/Acqua); ogni partita di combustibile impiegata nelle prove è inoltre sottoposta ad analisi, per una completa caratterizzazione e verifica delle proprietà chimico - fisiche.

L'attività sperimentale è condotta secondo procedure e modalità di funzionamento della caldaia simulanti il funzionamento di un impianto termico reale, pur avvenendo in condizioni di supervisione e controllo continuo. I parametri termotecnici e analitici monitorati sono riportati in tabella 4; le misure delle emissioni gassose e degli altri parametri sono eseguite secondo metodologie standardizzate, in accordo con la normativa tecnica di riferimento.

Tabella 4 - Parametri termotecnici e analitici monitorati.

<i>Parametri termotecnici</i>	<i>Parametri analitici</i>
Temperatura acqua ingresso caldaia	Anidride carbonica
Temperatura acqua uscita caldaia	Monossido di carbonio
Portata acqua in caldaia	Ossidi di azoto
Portata combustibile	Idrocarburi incombusti
Pressione in camera di combustione	Anidride solforosa
Portata fumi	Particolato solido totale
Temperatura fumi	PM ₁₀
Ossigeno nei fumi	IPA (Idrocarburi Policiclici aromatici)
Calcolo del rendimento termico di combustione	Composti carbonilici
	Numero di Bacharach

Le prove sui ventuno sistemi combustibile/impianto sono effettuate secondo due condizioni operative: regime stazionario e regime transitorio, che simula il funzionamento dell'impianto termico in condizioni reali, con cicli di accensione e spegnimento; le prove a regime stazionario sono inoltre condotte con diverse concentrazioni di ossigeno residuo nei fumi, per verificare la variazione delle emissioni inquinanti in funzione della regolazione dell'aria di combustione: 2% in volume (condizioni di difetto d'aria), 3% in volume (condizioni ottimali di funzionamento) e 4 % in volume (eccesso d'aria).

4.2 Sperimentazione in campo

L'individuazione degli impianti termici in campo da sottoporre a prove è avvenuta in base alla disponibilità effettiva delle utenze private e alla necessità di riprodurre le prove su impianti il più possibile aderenti a quelli selezionati per la sperimentazione di laboratorio.

Durante l'esecuzione delle misure in campo viene compilata dagli operatori una "scheda rilevamento impianto", appositamente predisposta per annotare dati sull'edificio servito dall'impianto, le modalità di funzionamento dell'impianto e il numero delle utenze servite, i parametri ambientali del locale caldaia (temperatura, pressione e umidità), lo stato di manutenzione della caldaia, in base al libretto di esercizio d'impianto, e le misure eseguite; la scheda assume fondamentale importanza in fase di elaborazione dei risultati per poter correlare le misure alla situazione reale di funzionamento dell'impianto.

I parametri monitorati sono gli stessi descritti per le misure in laboratorio; tuttavia esistono eccezioni poiché in alcuni casi non è possibile misurare alcune grandezze (particolato solido totale, PM₁₀ e Idrocarburi Policiclici Aromatici), a causa delle ridotte dimensioni dei fori di ispezione nei condotti di scarico, che non permettono un corretto inserimento delle sonde di misura. I regimi di conduzione dell'impianto sono sempre stazionario e transitorio; quest'ultimo è legato alla variabilità della richiesta energetica.

5. Metodologia di valutazione dei sistemi combustibile/impianto

Le emissioni in atmosfera di per sé non possono costituire l'unico parametro in base al quale stabilire la qualità di un combustibile rispetto ad un altro; infatti esistono situazioni contingenti o contesti particolari in cui, attenendosi ad incontrovertibili dati scientifici, può risultare vantaggioso dal punto di vista ambientale, sanitario ed energetico bruciare negli impianti un combustibile rispetto ad un altro. A tal fine si propone di sviluppare una metodologia in grado di valutare oggettivamente i parametri tecnici e non tecnici connessi con l'impiego, in una determinata realtà territoriale, di diversi combustibili per la generazione di energia termica ad uso civile.

L'ipotesi di partenza è che ognuna delle fasi del ciclo di vita del combustibile sia valutata quantitativamente sotto tre aspetti: emissioni in atmosfera, costi, intesi anche come costi esterni, e sicurezza. Il ciclo di vita di un combustibile è suddiviso in cinque fasi principali:

- estrazione e/o coltivazione;
- trasporto e stoccaggio;
- lavorazione e/o trasformazione;
- distribuzione;
- impiego finale.

L'idea centrale è considerare una porzione territoriale e osservare come variano i parametri presi in considerazione al variare del combustibile impiegato per soddisfare il fabbisogno energetico di riscaldamento per uso civile in quella zona; si ipotizza inoltre che essa soddisfi il proprio fabbisogno energetico con un solo combustibile. Si calcola quindi la quantità di combustibile necessaria a soddisfare tale fabbisogno e, in base a tale quantità, si effettuano le stime di costo, di emissioni e di rischio connesse con l'impiego di quel combustibile. Ripetendo tale procedimento per ogni combustibile coinvolto nella sperimentazione, è possibile paragonare direttamente tutti i parametri, compilando delle matrici comparative; le fasi fondamentali dell'elaborazione delle matrici suddette sono descritte nel seguito.

5.1 Analisi preliminari

Come primo tentativo la metodologia descritta si applica a porzioni territoriali coincidenti con le regioni italiane; l'analisi territoriale ed energetica del territorio regionale costituiscono la fase preliminare della metodologia.

5.1.1 Analisi territoriale

L'analisi territoriale prevede inizialmente la suddivisione del territorio regionale, di superficie S_r , in sottoclassi, in base alla zona climatica e alla densità di popolazione.

- *Gradi giorno:*

Si suddivide il territorio regionale in funzione dei gradi giorno, come previsto dalla Legge 10/91 [12] (A, B, C, D, E, F), e si valuta la percentuale di territorio che occupa (%A, %B..., tale che: $\sum \%_k=100$).

- *Densità di popolazione:*

Ogni territorio appartenente alla specifica zona climatica si suddivide in sottoclassi, in base alla densità della popolazione (tab. 5) e se ne valuta la percentuale (es: %A_I, %A_{II}..., tale che: $\sum \%_{A_j}=100_{A}$).

Tabella 5 - Suddivisione del territorio regionale in base alla densità abitativa.

Densità di popolazione (abitanti/Km ²)	Sottoclasse corrispondente
0 -100	I
100 -500	II
500 -1000	III
>1000	IV

Si ottiene quindi una suddivisione del territorio regionale in sottoclassi ij , dove i rappresenta la zona climatica e j la classe di densità abitativa (fig. 1).

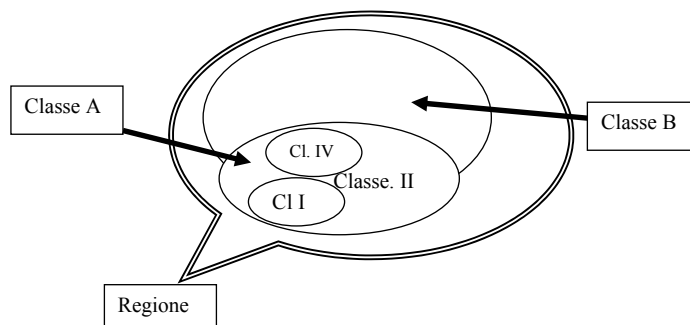


Figura 1 - Suddivisione del territorio regionale in sottoclassi.

5.1.2 Analisi energetica

Si determina l'energia termica (E_{ij}) consumata annualmente, come media degli ultimi 10 anni, per riscaldamento ad uso civile da ciascuna sottoclasse, mediante la consultazione dei piani energetici comunali; ad esempio E_{BII} rappresenta l'energia termica utilizzata nella zona B con densità abitativa corrispondente alla sottoclasse II.

Si effettua quindi un censimento del numero N_{ij} di caldaie installate per ciascuna sottoclasse (dati ISTAT) e si suddividono in classi in base alla potenza termica sviluppata (tab. 6); si valuta poi la percentuale del numero di caldaie che appartiene a ciascuna classe ($\%_{35}$, $\%_{150}$,...). Ad esempio $\%_{35}=30\%$ significa che il 30% delle N_{BII} caldaie installate nella sottoclasse BII hanno potenza inferiore o uguale ai 35 kW.

Tabella 6 – Suddivisione delle caldaie in classi in funzione della potenza termica sviluppata.

Potenza termica caldaia	Classe
< 35 kW	Classe 35
35 kW - 150 kW	Classe 150
150 kW - 350 kW	Classe 350
> 350 kW	Classe 500

Si valuta, mediante dati statistici e i risultati della fase sperimentale, il rendimento medio di combustione delle caldaie appartenenti a ciascuna classe (η_{35} , η_{150} ,...). Si stima, quindi, il rendimento medio (η_{med}) delle caldaie della sottoclasse considerata come:

$$\eta_{med} = \sum_i \frac{\eta_k \cdot \%_k}{100} \quad (1)$$

dove:

k: indica la classe di potenzialità definita in tabella 6 e vale: 35, 150, 350, 500;

η_k : rendimento termico di combustione relativo alla k-esima classe di potenzialità;

$\%_k$: percentuale di generatori di calore, calcolata rispetto al totale, relativa alla k-esima classe di potenzialità.

Noto il potere calorifico inferiore PCI del combustibile, si determina la massa M_{ij} dello specifico combustibile esaminato che mediante combustione produca E_{ij} , attraverso la relazione:

$$M_{ij} \cdot PCI \cdot \eta_{med} = E_{ij} \quad \Rightarrow \quad M_{ij} = \frac{E_{ij}}{PCI \cdot \eta_{med}} \quad (2)$$

Si definisce M_r (massa di combustibile consumata dalla specifica regione) la sommatoria di tutti gli M_{ij} estesa a tutte le sottoclassi della regione.

Il risultato finale di tale fase è la determinazione della massa M_{ij} , il cui valore numerico viene utilizzato per la valutazione dei costi, delle emissioni e del rischio connesso.

Si deve stimare dunque la massa di materia prima da estrarre o coltivare, denominata M_{estr} , affinché sia disponibile all'utenza finale la massa di combustibile M_{ij} ; tale stima può essere fatta a partire dalla conoscenza delle perdite che si hanno durante ciascuna fase di vita del combustibile (estrazione e/o coltivazione, trasporto della materia prima, trattamento, distribuzione, impiego). A tal fine si introducono dei rendimenti relativi a ciascuna fase η_k , definiti come il rapporto tra la quantità di materia resa disponibile alla fase k+1-esima (M_{k+1}) e la quantità di materia resa disponibile alla fase k-esima (M_k) (fig. 2).

$$\eta_k = \frac{M_{k+1}}{M_k} \quad (3)$$

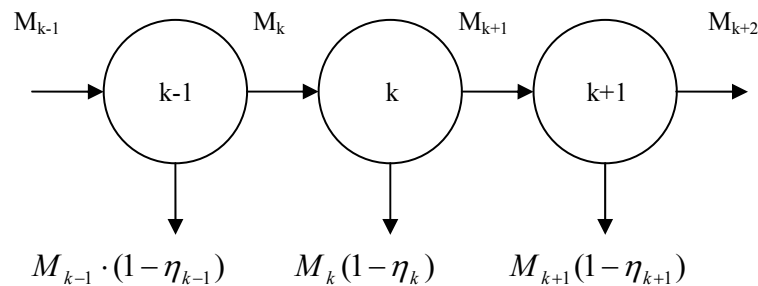


Figura 2 - Bilancio di massa relativo alla k-esima fase del ciclo di vita di un combustibile, caratterizzata da un rendimento η_k .

A partire da tale definizione, si introduce quindi un rendimento per ciascuna fase: η_{tra} , η_{lav} , η_{dist} ; quindi si determina la massa di materia prima da estrarre (M_{estr}) affinché si possa avere a disposizione una massa di combustibile alle utenze pari ad M_{ij} :

$$M_{estr} = \frac{M_{ij}}{\eta_{tra} \cdot \eta_{lav} \cdot \eta_{dist}} \quad (4)$$

I rendimenti considerati possono essere intesi come media ponderata dei rendimenti di ciascuna fonte di approvvigionamento, assumendo come pesi le quantità percentuali di materia prima trasportata con le diverse modalità:

$$\eta_{tra} = \sum_i \frac{\eta_i \cdot \%_i}{100} \quad (5)$$

dove:

η_i : rendimento di trasporto dell'i-esima modalità di trasporto;

$\%_i$: quantità percentuale di materia trasportata con l'i-esima modalità di trasporto sul totale trasportato.

Relazioni analoghe possono essere impiegate per definire i rendimenti di lavorazione e distribuzione.

5.2 Valutazione delle emissioni

Gli inquinanti considerati sono: CO₂, CO, NO_x, SO₂, HC, CH₄ e PTS (particolato solido totale); per ogni sostanza si valuta la quantità immessa in atmosfera per ogni fase del ciclo di vita, secondo la procedura descritta nel seguito.

5.2.1 Emissioni associate all'estrazione e/o coltivazione

Si introducono i fattori di emissione (f_i) per l'i-esimo componente immesso nell'atmosfera, espressi in grammi per tonnellata di materia prima estratta; quindi l'estrazione della massa M_{estr} produce una quantità di emissioni $m_{i,estr}$:

$$m_{i,estr} = f_i \cdot M_{estr} \quad (6)$$

dove:

$m_{i,estr}$ è la quantità di inquinante i-esimo immesso nell'atmosfera durante la fase di estrazione;

f_i è il fattore di emissione relativo al componente i-esimo per la fase di estrazione.

5.2.2 Emissioni associate al trasporto

Si effettua un'analisi approfondita delle modalità di trasporto utilizzate e si reperiscono in Letteratura i fattori di emissione relativi a ciascuna modalità di trasporto; si calcola quindi la massa ($m_{i,tra}$) dell'inquinante i-esimo immesso nell'atmosfera durante il trasporto di una massa di materia prima M_{estr} , tramite la seguente relazione:

$$m_{i,tra} = \sum_j f_{ij} \cdot \%_j \cdot d_j \cdot \frac{M_{estr}}{100} \quad (7)$$

dove:

$\%_j$ è la percentuale di impiego della j-esima modalità di trasporto;

f_{ij} è il fattore di emissione dell'*i*-esimo inquinante considerato, relativo alla *j*-esima modalità di trasporto (g/t·km);

d_j è la distanza percorsa tramite la *j*-esima modalità di trasporto.

5.2.3 Emissioni associate alla lavorazione delle materie prime

Una massa di materia prima pari a $M_{estr} \cdot \eta_{tra}$ subisce il processo di trasformazione in combustibile commerciale; la massa $m_{i,lav}$ dell'*i*-esimo inquinante considerato prodotta da tale processo sarà pari a :

$$m_{i,lav} = f_{i,lav} \cdot M_{estr} \cdot \eta_{tra} \quad (8)$$

dove:

$f_{i,lav}$ è il fattore di emissione (g/t)¹ dell'*i*-esimo inquinante, relativo al processo di lavorazione.

5.2.4 Emissioni associate alla distribuzione

La massa di combustibile pari a $M_{estr} \cdot \eta_{tra} \cdot \eta_{lav}$ viene distribuita alle utenze, tramite varie modalità di trasporto; la massa distribuita dà luogo, per ogni inquinante, ad un'emissione che può essere calcolata con la seguente relazione:

$$m_{i,dist} = \sum_j f_{ij} \cdot \%_j \cdot d_j \cdot \frac{M_{estr} \cdot \eta_{tra} \cdot \eta_{lav}}{100} \quad (9)$$

dove:

f_{ij} e d_j sono quelli definiti nel paragrafo 5.2.2 e $\%_j$ è la percentuale di combustibile, sul totale, che viene distribuito utilizzando la *j*-esima modalità di trasporto.

5.2.5 Emissioni associate all'impiego

La massa totale di combustibile che perviene alle utenze e viene bruciata è pari a:

$$M_{ij} = M_{estr} \cdot \eta_{estr} \cdot \eta_{tra} \cdot \eta_{dist} \quad (10)$$

si calcola quindi la massa dell'*i*-esimo inquinante prodotto durante tale fase ($m_{i,imp}$):

$$m_{i,imp} = \sum_l f_{il} \cdot \%_l \cdot \frac{M_{ij}}{100} \quad (11)$$

dove:

f_{il} è il fattore di emissione dell'*i*-esimo inquinante relativo all'*l*-esima tipologia di generatore di calore;

$\%_l$ è la percentuale di combustibile che viene impiegato sull'*l*-esima tipologia di generatore di calore.

Il calcolo deve essere effettuato per ogni *i*-esima sostanza emessa; alla fine si avrà a disposizione, per ogni fase del ciclo di vita del combustibile considerato, la quantità di emissioni dovuta all'impiego di quel determinato combustibile nella sottoclasse considerata; il computo globale delle emissioni potrà essere stimato come somma delle $m_{i,j}$ su tutte le fasi considerate:

¹ Nel caso in cui siano noti in Letteratura fattori di emissione espressi in g/J, si potranno sempre convertire in g/t tramite la conoscenza del potere calorifico del combustibile.

$$m_{i,tot} = \sum_j m_{i,j} \quad (12)$$

Al termine possono essere ricavati degli indici di emissione per unità di energia termica prodotta, espressi in g/MJ, dividendo la $m_{i,tot}$ per l'energia termica prodotta dalla massa M_{ij} di combustibile.

Al fine di effettuare una comparazione fra più combustibili, il procedimento può essere applicato ad ogni combustibile, al fine di ottenere una matrice del tipo riportato in tabella 7. In essa, per ciascun combustibile (righe) sono riportate le emissioni relative all'intero ciclo di vita suddivise per inquinanti (colonne), espresse in grammi e rapportate all'unità di energia termica prodotta (g/MJ), riferite ad una specifica porzione territoriale.

Tabella 7 - Matrice comparativa delle emissioni connesse all'impiego di un particolare combustibile in una fissata sottoclasse territoriale.

Combustibile	Emissioni						
	CO ₂ (kg/MJ)	CO (g/MJ)	NO _x (g/MJ)	SO ₂ (g/MJ)	HC (g/MJ)	CH ₄ (g/MJ)	PTS (g/MJ)
Gasolio							
Olio combustibile							
Gas naturale							
Biodiesel							
Emulsione gasolio-acqua							
Emulsione olio combustibile-acqua							

5.3 Valutazione dei costi

Si determinano i costi sostenuti dalla Regione e dal privato per avere a disposizione la quantità di combustibile M_{ij} , definita nel paragrafo 5.1.2. Le fasi del ciclo di vita considerate in questo ambito sono: estrazione e/o coltivazione, trasporto, lavorazione, distribuzione, stoccaggio e impiego; la valutazione dei costi per ciascuna fase è riportata nel seguito.

5.3.1 Costi di estrazione e/o coltivazione C_{Eij}

Si definisce c_{Ek} il costo di estrazione/coltivazione di una tonnellata di materia prima ed a_{Ek} le accise di estrazione/coltivazione di una tonnellata di materia prima riferite al bacino di estrazione/coltivazione k-esimo; sulla base di essi si calcola il costo di estrazione/coltivazione imputabile alla M_{ij} :

$$C_{Eij} = M_{estr} \cdot \sum (c_{Ek} + a_{Ek}) \cdot \frac{\%_k}{100} \quad (13)$$

dove:

$\%_k$ è la percentuale di materia prima, sul totale estratto/coltivato, proveniente dal k-esimo bacino.

5.3.2 Costi di trasporto C_{Tij}

La massa totale di materia prima trasportata fino agli stabilimenti di trasformazione in prodotti finiti è M_{estr} ; si definisce inoltre c_{Tk} il costo di importazione di una tonnellata di grezzo ed a_{Tk} le accise di importazione di una tonnellata di grezzo riferite al k-esimo mezzo di trasporto (nave, oleodotto, gasdotto, strada) e per km percorso. Il costo di trasporto può essere quindi espresso come:

$$C_{Tij} = M_{estr} \sum_k \frac{(c_{Tk} + a_{Tk}) \cdot \%_k}{100} \cdot d_k \quad (14)$$

dove:

$\%_k$: è la percentuale di materia trasportata mediante il k-esimo mezzo di trasporto, sul totale trasportato;

d_k : distanza percorsa mediante il k-esimo mezzo di trasporto.

5.3.3 Costi di lavorazione C_{Lij}

La quantità di materia lavorata M_{Lij} è data da:

$$M_{Lij} = M_{estr} \cdot \eta_{tra} \quad (15)$$

Si definisce c_{Lk} il costo di lavorazione di una tonnellata di materia prima ed a_{Lk} le accise di lavorazione di una tonnellata di grezzo riferite al k-esimo stabilimento di lavorazione; il costo totale di lavorazione è dato da:

$$C_{Lij} = M_{Lij} \cdot \sum_k \frac{(c_{Lk} + a_{Lk}) \cdot \%_k}{100} \quad (16)$$

dove:

$\%_k$ è la percentuale di materia lavorata nel k-esimo stabilimento, sul totale lavorato.

5.3.4 Costi di stoccaggio C_{Sij}

Si definisce c_{Sk} il costo di stoccaggio di una tonnellata di combustibile ed a_{Sk} le accise di stoccaggio di una tonnellata di combustibile riferite alla k-esima tecnica di stoccaggio. Si fa l'ipotesi che la massa stoccata sia la stessa che viene poi distribuita (M_{Dij}); il costo totale di stoccaggio è dato dalla:

$$C_{Sij} = M_{Dij} \cdot \sum_k \frac{(c_{Sk} + a_{Sk}) \cdot \%_{Sk}}{100} \quad (17)$$

dove:

$\%_{Sk}$ è il valore percentuale di combustibile M_{Dij} che è stoccato con la k-esima tecnologia di stoccaggio.

5.3.5 Costi distribuzione C_{Dij}

Si fa riferimento alla specifica sottoclasse regionale ij e se ne determina il baricentro geografico. Si definisce c_{Dk} il costo di trasporto di una tonnellata di combustibile ed a_{Dk} le accise di trasporto di una tonnellata di combustibile riferite al k-esimo mezzo di tra-

sporto (su gomma, rotaia, gasdotto) per unità di lunghezza (km). Si calcola il costo totale di distribuzione mediante la seguente:

$$C_{Dij} = M_{Dij} \cdot \sum_k \frac{(c_{Dk} + a_{Dk}) \cdot \%_k}{100} \cdot d_k \quad (18)$$

dove:

M_{Dij} è la massa di combustibile che viene distribuita, pari a M_{ij} / η_{dist} ;

$\%_k$ è la percentuale di combustibile trasportata con il k-esimo mezzo, rispetto al totale da distribuire, dai centri di produzione al baricentro della sottoclasse considerata;

d_k : è un termine che tiene conto della distanza percorsa dal combustibile mediante il k-esimo mezzo di trasporto, pesata sulla quantità di combustibile che è distribuita mediante lo stesso; il valore di d_k è calcolato tramite la seguente relazione:

$$d_k = h_k \cdot \%_k + D \cdot \%_k' \cdot e \quad (19)$$

dove:

h_k è la sommatoria della distanza tra i punti di produzione e il baricentro della sottoclasse considerata;

D è il diametro del cerchio equivalente, con area pari a quella della sottoclasse;

e l'eccentricità, fattore che tiene conto dello scostamento tra la superficie reale e il cerchio equivalente (se la sottoclasse fosse un cerchio allora $e=1$);

$\%_k'$ percentuale di combustibile distribuita alle utenze, a partire dal baricentro della sottoclasse con il k-esimo mezzo di trasporto.

5.3.6 Costi di impiego C_{ij}

Si definiscono c_{35i} , c_{150i} , c_{350i} e c_{500i} (c_{ki}) rispettivamente i costi medi di installazione di caldaie appartenenti rispettivamente alle classi 35, 150, 350 e 500; si calcola il costo di impianto imputato all'impiego del combustibile $C_{I,imp}$

$$C_{I,imp} = N_{ij} \sum_k \frac{c_{ki} \cdot \%_k}{100} \quad (20)$$

dove:

$\%_k$ è il valore percentuale di caldaie appartenenti alla classe k, rispetto al totale N_{ij} censito nella sottoclasse;

Si definiscono c_{35m} , c_{150m} , c_{350m} e c_{500m} (c_{km}) rispettivamente i costi medi di manutenzione per singolo impianto appartenente alla k-esima classe, per un periodo annuale, durante il quale viene generata un'energia termica pari ad E_{ij} .

Si definisce costo medio di manutenzione imputato all'impiego del combustibile $C_{I,man}$:

$$C_{I,man} = N_{ij} \cdot \sum_k c_{km} \cdot \%_k \quad (21)$$

Quindi il costo di impiego imputato alla quantità di combustibile M_{ij} , necessario a soddisfare il fabbisogno energetico della sottoclasse M_{ij} è:

$$C_{Iij} = C_{I,imp} + C_{I,man} \quad (22)$$

5.3.7 Costo totale C_{TOTij}

Il costo totale associato al soddisfacimento del fabbisogno energetico annuale della sottoclasse con il combustibile considerato è:

$$C_{TOTij} = C_{Eij} + C_{Tij} + C_{Lij} + C_{Sij} + C_{Dij} + C_{Iij} \quad (23)$$

Per ottenere un valore di costo riferito all'unità di energia termica prodotta si possono riportare tutti i termini al valore numerico E_{ij} .

5.3.8 Costi esterni

Per la valutazione dei costi esterni si fa riferimento a studi o ricerche sviluppati in ambito nazionale e internazionale [13, 14, 15, 16] ; da tali studi è possibile trarre alcuni spunti metodologici per la quantificazione dei costi esterni, la cui valutazione rimane però assai difficoltosa.

La matrice comparativa ottenuta tramite le relazioni e le considerazioni suddette è riportata in tabella 8.

Tabella 8 - Matrice comparativa dei costi connessi all'impiego di un particolare combustibile in una fissata sottoclasse territoriale.

Combustibile	Costi (€/MJ)						
	estrazione/coltivazione	trasporto/stoccaggio	lavorazione	distribuzione	impiego	esterni	totale
Gasolio							
Olio combustibile							
Gas naturale							
Biodiesel							
Emulsione gasolio-acqua							
Emulsione olio combustibile-acqua							

5.4 Determinazione dell'indice di rischio

Si può osservare come il metodo ad indici introdotto dalla legislazione italiana [18] per la valutazione del rischio risulti del tutto generale e quindi elastico. Lo scopo del presente lavoro è associare a ciascuna fase del ciclo di vita del particolare combustibile considerato un indice di rischio che dovrà confluire in un unico indice di rischio associato a quel particolare combustibile.

Come già sottolineato, il metodo si presta bene a valutare l'indice di rischio connesso ad attività chimico-industriali, quindi nell'ambito della metodologia proposta può essere direttamente impiegato per le fasi di estrazione e lavorazione della materia prima, stoccaggio ed impiego. Anche per le fasi di distribuzione mediante oleodotti o gasdotti è possibile applicare il metodo ad indici, poiché questi sono considerati come veri e propri impianti fissi.

Per valutare la fase di trasporto per via marittima, su strada e su ferrovia si applicano metodi semplificati: si considera inizialmente il mezzo di trasporto come un impianto fisso di stoccaggio e si calcola, seguendo la procedura proposta dal metodo ad indici, la categoria di rischio alla quale appartiene tale impianto; si stima poi un fattore caratteri-

stico della via di trasporto utilizzata (mare, strada, ferrovia), chiamato “fattore trasporto”, TR_i . Esso dovrà essere maggiore dell’unità e andrà ad aumentare il grado di rischio dell’impianto valutato come fisso: il grado di rischio G , determinato secondo il DPCM 13/03/1989 [18], moltiplicato per il fattore TR_i fornisce un grado di rischio G' (equazione 24) che tiene conto di rischi aggiuntivi derivati dal movimento del mezzo (collisioni, ribaltamenti, affondamenti, incagli, deragliamenti, etc.)

$$G' = G \cdot TR_i \quad (24)$$

Alla fine si valutano le classi di rischio associate ad ogni fase del ciclo di vita del combustibile esaminato.

Per effettuare un’analisi comparativa occorre far confluire tutte le classi di rischio in un unico indice di rischio associato all’impiego di un combustibile in una data zona territoriale, al fine di poter effettuare. A tal fine si stima la massa di combustibile necessaria a soddisfare il fabbisogno energetico della zona territoriale considerata M_{ij} , come descritto precedentemente; la determinazione di tale massa è di fondamentale importanza perché tutte le stime di rischio sono riportate, mediante relazioni lineari, alla massa di combustibile teorica calcolata; quindi si esegue un’analisi delle fasi alle quali è sottoposto il combustibile impiegato nella zona territoriale considerata e nella quantità valutata. Infine si stimano le classi di rischio associate a ciascuna fase del combustibile in esame secondo il D.P.C.M. 13/03/1989[18]; per considerare un unico indice di rischio si associa ad ogni classe di rischio della matrice del grado di rischio introdotta dal D.P.C.M. 13/03/1989 [18](tab. 9) un valore numerico (tab. 10) e si calcola l’indice di rischio globale R come la sommatoria dei rischi connessi ad ogni fase; così facendo si tiene conto anche del fatto che un combustibile con meno fasi nel suo ciclo di vita è più probabilmente soggetto ad un indice di rischio globale minore. Ogni categoria di rischio è quantificata con valori numerici crescenti con il crescere della categoria di rischio; si ipotizza che la matrice sia simmetrica ($a_{ij}=a_{ji}$), considerando equivalenti le classi di rischio posizionate lungo la diagonale secondaria e parallele.

Tabella 9 - Matrice del grado di rischio².

G1-T1	G1-T2	G1-T3	G1-T4	G1-T5
G2-T1	G2-T2	G2-T3	G2-T4	G2-T5
G3-T1	G3-T2	G3-T3	G3-T4	G3-T5
G4-T1	G4-T2	G4-T3	G4-T4	G4-T5
G5-T1	G5-T2	G5-T3	G5-T4	G5-T5

Tabella 10 - Valori dell’indice di rischio associati alla matrice del grado di rischio.

1	2	3	4	5
2	3	4	5	6
3	4	5	6	7
4	5	6	7	8
5	6	7	8	9

² G_i e T_i , $i=1, \dots, 5$ sono le categorie dell’indice di rischio generale (G) e dell’indice intrinseco di tossicità (IIT), determinate in conformità con il D.P.C.M. 13/03/1989[18].

Formalizzando il procedimento si ottiene:

$$R_j = \sum_i R_{ji} \quad (25)$$

dove:

R_j : valore dell'indice di rischio globale relativo all'impiego del j-esimo combustibile nella zona territoriale considerata;

R_{ji} : valore dell'indice di rischio relativo all'i-esima fase del ciclo di vita del j-esimo combustibile nella zona considerata.

Il valore determinato tramite la relazione (25) può essere preso come riferimento per l'analisi comparativa di combustibili in una stessa zona territoriale (ultima colonna di tab. 11).

Tabella 11- Matrice comparativa degli indici di rischio connessi all'impiego di un particolare combustibile in una fissata sottoclasse territoriale.

Combustibile	Indice di rischio					
	estrazione/coltivazione	trasporto/stoccaggio	lavorazione	distribuzione	impiego	totale
Gasolio						
Olio combustibile						
Gas naturale						
Biodiesel						
Emulsione gasolio-acqua						
Emulsione olio combustibile-acqua						

6. Conclusioni

Obiettivo del presente lavoro è un'analisi comparativa dei combustibili comunemente impiegati per il riscaldamento nel settore civile, nell'ambito di una sperimentazione promossa dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.

Tale sperimentazione consta di due parti:

- una ricerca bibliografica finalizzata ad individuare per i combustibili esaminati tutti i parametri tecnici (caratteristiche chimico-fisiche, impatto ambientale, ecc.) e non tecnici (sicurezza, costi, aspetti fiscali, etc.), al fine di costruire una metodologia che consenta, a partire da tali dati, di effettuare una comparazione, il più possibile oggettiva e quantitativa, fra i combustibili coinvolti nell'indagine;
- una campagna di misure, sia in campo che in laboratorio, su un campione di caldaie rappresentativo della realtà nazionale, suddivise in tre classi in base alla potenzialità termica.

Per quanto riguarda la prima parte, la proposta di metodologia è sviluppata a partire dalla conoscenza di alcuni dati reperiti nella Letteratura specializzata. Nello sviluppo della metodologia, si sceglie di non prescindere dal contesto territoriale nel quale avviene l'impiego del combustibile, al fine di sottolineare il fatto che, in assoluto, nessun combustibile può essere giudicato migliore di un altro, senza prima essere calato in una specifica realtà territoriale; si prevede pertanto un'indagine preliminare, nella quale viene effettuata l'analisi territoriale ed energetica. Sono presi in considerazione tre parametri sensibili: emissioni in atmosfera, sicurezza e costi; tali parametri sono valutati lungo tutto l'arco del ciclo di vita del combustibile considerato.

Applicando il procedimento proposto a diversi combustibili in una stessa sottoclasse territoriale, si perviene ad un confronto quantitativo dei diversi parametri, al fine di giudicare la bontà di impiego di un combustibile in uno specifico contesto territoriale; il confronto risulta rapido, grazie ad una visualizzazione sintetica dei risultati tramite tre matrici comparative che riguardano le emissioni, i costi e gli indici di rischio connessi con ciascuna combinazione combustibile/impianto/contexto territoriale considerata.

La vasta campagna sperimentale avviata, in laboratorio e in campo, permette infine di valutare le prestazioni energetiche ed emissive delle tipologie di impianti termici maggiormente diffuse sul territorio nazionale e i risultati ottenuti potranno essere confrontati con quelli emersi dall'indagine bibliografica, relativamente all'ultima fase del ciclo di vita dei combustibili, cioè l'impiego.

Ulteriori sviluppi della ricerca prevedono l'applicazione della metodologia proposta ad un caso di studio reale, al fine di validarne l'efficacia e l'applicabilità; inoltre si dovrà verificare se tutti i dati necessari alla sua applicazione siano disponibili in Letteratura oppure sia possibile stimarli per mezzo di elaborazioni di dati comunque reperibili in Letteratura.

7. Bibliografia

- [1] DM 20 marzo 2000: *“Caratteristiche tecniche delle emulsioni di olio da gas ed olio combustibile denso con acqua destinate alla trazione ed alla combustione”*.
- [2] DPCM 8 marzo 2002: *“Disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione”*.
- [3] DPCM 20 giugno 2002: *“Modifica dell'Allegato I del Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 marzo 2002, concernente disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione”*.
- [4] OCSE, *Rapporto sulle Performance Ambientali*, Italia, 2002.
- [5] Comunità Europea, *Progetto Corinair: Coordination Information Air*, 1999.
- [6] APAT, *Annuario dei Dati Ambientali*, Edizione 2002.
- [7] ANPA, CTN-ACE, *Manuale dei Fattori di Emissione Nazionale*, 2002.
- [8] G. Nicoletti, *L'impatto ambientale dei combustibili generalmente impiegati per il riscaldamento urbano degli edifici*, Atti del 56° Congresso ATI, Napoli, 10-14 settembre 1995.
- [9] ETSU, *Alternative road transport fuels, a preliminary life-cycle study for the UK*, 1996.
- [10] Unione Petrolifera, *Statistiche economiche, energetiche e petrolifere*, 2002.
- [11] ENI, *Salute Sicurezza Ambiente Rapporto 2002*, 2002.
- [12] Legge 9 gennaio 1991, n. 10: *“Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia”*.
- [13] P. Lombard, A. Malocchi, *I costi ambientali e sociali della mobilità in Italia*, 1998.
- [14] Regione Lombardia, *Quantificazione economica dei costi esterni ambientali, comparazione ed individuazione delle soluzioni con minori costi esterni, relativi alla implementazione di impianti di cogenerazione e teleriscaldamento*.
- [15] Romeo Danielis, *La teoria economica e la stima dei costi esterni dei trasporti*”, Università di Trieste e ISTIEE.
- [16] European Commission, *External Costs – Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport*, 1999.
- [17] S. Simonetti, *Rischio Ambientale*, 2002.
- [18] DPCM 31/3/1989: *“Applicazione dell'art. 12 del D.P.R. n. 175 del 17/5/88, concernente rischi rilevanti connessi a determinate attività industriali”*.