



POLITECNICO DI MILANO



Milano – 23 novembre 2004

ESTRATTO
DI UNA
RICERCA CONDOTTA DAL
POLITECNICO DI MILANO

COMMISSIONATA DA
ASSOELETTRICA

**IMPATTO AMBIENTALE DEI CICLI COMBINATI
ALIMENTATI A GAS NATURALE, CON
PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLE
EMISSIONI DI POLVERI SOTTILI**

Hanno condotto la ricerca
docenti e ricercatori appartenenti ai seguenti Dipartimenti
del Politecnico di Milano:

Dipartimento di Energetica
Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta"
DIAR (Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento)
DEI (Elettronica e Informazione)

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.1 of 46
Data	18/11/2004	



Premessa

Il primo e decisivo spunto alla ricerca qui illustrata è venuto da un contratto di ricerca assegnato da Assoelettrica al Politecnico di Milano volto a fare chiarezza sulla problematica relativa alle emissioni di particolato dei cicli combinati. E' un tema che ha assunto di recente nel nostro Paese una grande rilevanza, soprattutto nelle dinamiche dei meccanismi di negoziazione con la popolazione residente nei siti prospettati per la realizzazione delle nuove centrali a ciclo combinato. Il rapporto con Assoelettrica ha consentito, nel quadro della fattiva collaborazione scientifica che da decenni caratterizza i rapporti fra il Politecnico di Milano e il CESI (Centro Elettrico Sperimentale Italiano), di pianificare e successivamente effettuare accurate campagne di misura sulle emissioni di alcune di alcune centrali termoelettriche rappresentative. Tali campagne hanno fornito un'imponente e significativa messe di dati sperimentali, che verranno nel seguito presentati e discussi.

Una seconda, non meno importante motivazione ad intraprendere quest'opera è la convinzione, sempre più fortemente radicata nel nostro Ateneo, che sia importante per un'Istituzione come il Politecnico di Milano fare sentire la sua voce autorevole e indipendente nel dibattito energetico-ambientale, non solo attraverso contributi originali scientifici presentati nelle tipiche sedi predilette dal mondo accademico (riviste scientifiche, convegni internazionali, ecc.), ma anche con opere di taglio più divulgativo e generale, come quella qui presentata, che possano avere un impatto positivo sull'opinione pubblica, sui media, sulla classe politica. Con il presente rapporto, il Politecnico di Milano, per voce di un consistente gruppo di docenti e ricercatori facenti capo a molteplici settori scientifico disciplinari e a quattro Dipartimenti, intende contribuire al dibattito in merito all'impatto ambientale delle moderne turbine a gas, e in particolar modo al tema delle cosiddette polveri sottili e ultra-sottili.

Gli autori sono convinti che il parco termoelettrico italiano richieda un'urgente e radicale opera di ammodernamento e di potenziamento, che consenta di cogliere, in termini di aumento di capacità produttiva, di efficienza energetica e di riduzione dei costi di generazione e delle emissioni di sostanze inquinanti e di gas serra, i frutti dei formidabili avanzamenti tecnologici che hanno caratterizzato le discipline energetico-ambientali nell'ultimo ventennio. Anche se notevoli passi avanti sono stati realizzati negli ultimi anni, è sempre utile ricordare l'attuale prestazione del parco termoelettrico italiano, quale risulta dall'ultimo rapporto GRTN pubblicato, relativo al 2003, da cui si è stata derivata la seguente tabella riassuntiva.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.2 of 46
Data	18/11/2004	

fonte energetica	consumo energetico	produzione elettrica (netta)	Ripartizione (riferita all'input dei combustibili)	Rendimento elettrico medio annuo (netto)
	TWh/anno	TWh/anno	%	%
carbone	102.411	34.922	24.4	34.10
gas naturale (centrali a vapore)	81.792	33.981	19.5	41.55
gas naturale (cicli combinati)	50.168	26.292	12.0	52.41
prodotti petroliferi	144.321	52.414	34.4	36.32
altri	41.060	12.120	9.8	29.52
totale/media	419.751	159.728	100.0	38.05

Fonte: GRTN (dati riferiti agli impianti con sola produzione di energia elettrica)

Da questi dati si evince che, ancora nello scorso anno:

- o il rendimento medio netto annuo di conversione del parco termoelettrico italiano era pari al 38,05%, un valore di ben poco (meno di un punto percentuale) superiore a quello (intorno al 37,3%) che caratterizzava il parco ENEL alla fine degli anni '70
- o oltre un terzo dell'input energetico complessivo delle centrali termoelettriche aveva origine da prodotti petroliferi (un'anomalia tutta italiana)
- o oltre il 60% del totale del gas naturale utilizzato per la generazione di energia elettrica era destinato in centrali a vapore convenzionale, con rendimenti netti del 41,5%
- o solo il 12% del combustibile utilizzato per generare energia elettrica alimentava cicli combinati
- o i cicli combinati italiani offrono una prestazione energetica di tutto rispetto (rendimento netto medio annuale del 52,4%)

Come noto, i processi di privatizzazione e di liberalizzazione del comparto elettrico in atto nel nostro Paese hanno portato ad un'offerta, certamente eccessiva termini di numero di impianti e di potenzialità complessiva, di nuovi impianti da parte di vecchi e nuovi operatori energetici. La tecnologia prescelta dalla quasi totalità degli operatori è quella dei cicli combinati, basati su turbine a gas dell'ultima generazione, con potenze elettriche unitarie di circa 260 MW_{el}. Tutte le proposte prevedono l'utilizzo esclusivo di gas naturale e l'adozione di combustori a premiscelamento a secco, e sono pertanto in grado di garantire emissioni specifiche molto basse.

Con poche e meritorie eccezioni, ogni progetto di realizzazione di un nuovo ciclo combinato incontra nel nostro Paese una diffusa ostilità da parte dell'opinione pubblica locale, allarmata dai presunti danni ambientali che detta realizzazione potrebbe causare: il fenomeno è comune ad ogni tipologia di sito, sia esso rurale o industrializzato, e ad ogni area geografica (Nord, Centro e Sud) del nostro Paese. Mentre fino a pochi mesi orsono le preoccupazioni dell'opinione pubblica erano soprattutto rivolte all'unica sostanza inquinante emessa in quantità significativa da un ciclo combinato alimentato da gas naturale, vale a dire gli ossidi di azoto, oggi è di grande attualità la tematica delle polveri sottili e ultrasottili. Quest'ostilità, pur se comprensibile in termini emotivi, appare priva dei necessari fondamenti scientifici in termini reali, costituendo uno dei motivi, non l'unico ma certamente fra i più importanti, dei gravi ritardi con cui si evolve il processo di rinnovamento del parco termoelettrico italiano, rinnovamento che porterebbe grandi vantaggi ambientali all'intero Paese.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.3 of 46
Data	18/11/2004	

Una terza, non meno importante, circostanza che ha agevolato la realizzazione di quest'opera è il coordinamento da tempo avviato nel nostro Ateneo fra i numerosi Dipartimenti che svolgono ricerca scientifica nell'ambito dell'Energia e dell'Ambiente, coordinamento che ha dato luogo alla nascita dell'area strategica "Energia". L'esigenza di questo coordinamento è nata dalla consapevolezza della vastità dei temi che coinvolgono le problematiche energetiche e dal desiderio di associare gli sforzi delle tante competenze a largo spettro presenti nell'Ateneo su progetti di ricerca comuni. Al lavoro qui presentato hanno partecipato attivamente gruppi di ricerca appartenenti ai Dipartimenti di Energetica, di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "Giulio Natta", al DIAR (Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento) e al DEI (Elettronica e Informazione).

Le principali conclusioni dello studio

E' utile evidenziare alcune conclusioni che riteniamo particolarmente significative, anche perché smentiscono molti luoghi comuni apparsi recentemente sui media e ripresi nei pubblici dibattiti sul tema "turbine a gas e polveri sottili":

1. L'evidenza sperimentale che emerge dall'indagine condotta sulle emissioni dell'unità turbogas della centrale di Sermide, integrata con i risultati di analoghi rilevamenti effettuati da CESI su quella dell'impianto di Porto Corsini, è che le concentrazioni delle polveri totali sospese (PTS), di PM₁₀ e di PM_{2,5} presenti allo scarico di un moderno turbogas sono sempre collocate su livelli di scarsissima consistenza:
 - per la turbina a gas di Sermide, le concentrazioni di polveri totali sono comprese fra 11.4 e 31.3 µg/Nm³, quelle di PM₁₀ fra 7.4 e 9.0 µg/Nm³ e quelle di PM_{2,5} fra 4.3 e 6.5 µg/Nm³. I rilevamenti e le analisi effettuati contemporaneamente sull'aria aspirata dal compressore della turbina hanno altresì consentito di **evidenziare sperimentalmente concentrazioni di particolato nei gas di scarico significativamente inferiori rispetto a quelle dell'aria ambiente: in altri termini la turbina a gas si comporta come un dispositivo di depurazione dell'aria ambiente dal particolato in essa sospeso.**
 - per la turbina a gas di Porto Corsini, le concentrazioni misurate di polveri totali e PM₁₀ (di fatto coincidenti) sono comprese fra 35.7 e 65.5 µg/Nm³, con quelle di PM_{2,5} collocate fra 17.9 e 30.9 µg/Nm³;

2. Il particolato in emissione è stato sottoposto ad analisi dimensionali, morfologiche e cristallografiche. Da tali analisi risulta che le particelle sono in prevalenza silicati (prevalentemente feldspati e argille) e carbonati, vale a dire elementi caratteristici dei terreni, oltre ad alcune particelle contenenti ferro, titanio e cromo, probabilmente provenienti dall'interno dell'impianto. Nel particolato emesso dalle turbine a gas della centrale di Porto Corsini sono presenti anche particelle contenenti cloro evidentemente originate, data la posizione geografica della centrale, dall'aerosol marino. A tale caratteristica del sito di localizzazione dell'impianto sono anche probabilmente riconducibili i livelli di particolato che, quantunque di analoga e scarsa consistenza, risultano superiori a quelli rilevati a Sermide. In nessun caso sono state rilevate presenze, anche a livello di traccia, di residui di natura carboniosa, a di-

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.4 of 46
Data	18/11/2004	

mostrazione di una combustione che, nelle moderne turbine a gas alimentate a gas naturale, è sempre completa.

3. I risultati ottenuti possono a prima vista (dopo tutto il clamore suscitato da affermazioni di tutt'altro tenore) sembrare sorprendenti. Essi sono in realtà perfettamente spiegabili, in base a tre effetti, tutti facilmente prevedibili:

- (i) il sistema di filtraggio dell'aria delle turbine a gas trattiene una parte significativa delle polveri presenti nell'aria, soprattutto quelle di dimensione più elevata ($> 10 \mu\text{m}$), per cui l'operazione di filtraggio è più efficace (*a Porto Corsini, i dati di PTS e PM_{10} sono risultati coincidenti*)
- (ii) il passaggio dell'aria negli altri componenti della turbina a gas (compressore, combustore, turbina) non contribuisce in alcun modo ad aumentare il contenuto di polveri: anzi, nel compressore si depositano ulteriori frazioni delle polveri totali (generando i noti effetti di fouling)
- (iii) nel combustore, che opera una combustione premiscelata con grandi eccessi di aria, non si verifica alcuna formazione di solidi di natura carboniosa; anzi, si offrono le condizioni ideali per l'ossidazione (e quindi l'eliminazione) delle frazioni carboniose del particolato aspirato (*che, infatti, risultano totalmente assenti nei campioni di particolato prelevati allo scarico*).

4. Risultati coerenti con quelli ottenuti dalla sperimentazione qui descritta – vale a dire la misura di concentrazioni in massa delle polveri nei gas di scarico di una turbina a gas di entità insignificante, inferiori a quelle normalmente presenti nell'aria ambiente – sono stati ottenuti da altri ricercatori, sia in Italia sia all'estero. Va rilevato che, mentre la letteratura internazionale è molto ricca di risultati relativi a misurazioni del particolato e delle polveri sottili generate nelle varie tipologie di combustione, inclusa quella relativa ai combustori di turbina a gas a combustibile liquido, essa è quasi inesistente per quanto attiene la presenza di particolato a valle dei combustori DLN (Dry Low Nox) alimentati a gas naturale, evidentemente ritenuto un aspetto di scarsa rilevanza. Tuttavia, giova citare la recente sperimentazione condotta su turbine a gas di diversa taglia e con diversi tipi di alimentazione (gas naturale e gasolio) da un gruppo di ricercatori anglo-svizzeri. Utilizzando una strumentazione avanzata, capace di “contare” il numero di particelle presenti nei gas analizzati e di campionarle a diversi valori di diametri equivalenti, fino a dimensioni piccolissime - 6 nm (manometri) - hanno misurato, quando le macchine erano alimentate a gas naturale, una rilevante diminuzione del numero di particelle sospese fra monte (aria aspirata) e valle (gas combusti) della turbina a gas, nonché la totale assenza di particelle ultrafini. Lo stesso studio riporta invece dati sperimentali relativi alle medesime turbine a gas ma alimentate a gasolio, che individuano, diversamente da quanto rilevato per l'alimentazione a gas naturale, la presenza nei gas di scarico di una frazione consistente di microparticelle della dimensione di 15-20 nm, dovute alla formazione di fuliggine. Il contributo complessivo alle concentrazioni di particolato di tali particelle è comunque inferiore a $1 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

5. Questo meccanismo di riduzione delle polveri, riscontrato nelle moderne turbine a gas con combustori DLN premiscelati alimentati a gas naturale, non si applica evidentemente ad altri processi di combustione, che prevedano diversi meccanismi di combustione, diversi eccessi d'aria, diversi combustibili o l'eventuale presenza di tipologie di abbattimento degli ossidi di azoto, quali iniezione di vapore o acqua, o a processi che prevedano l'iniezione di ammo-

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.5 of 46
Data	18/11/2004	

niaca o urea in reattori catalitici (SCR). Se si esaminano ad esempio le emissioni misurate nel corso della presente ricerca su un gruppo tradizionale a vapore con combustione mista gas naturale/olio combustibile della centrale di Turbigio, si ottengono risultati molto buoni in assoluto (ampiamente inferiori ai limiti di legge) ma assai diversi da quelli sopra commentati:

- Le concentrazioni di polveri totali (PTS) sono comprese fra 907 e 1294 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$, con quelle di PM_{10} e di $\text{PM}_{2.5}$ variabili rispettivamente fra 770 e 971 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ e fra 374 e 508 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$: se espresse in termini di riferimento comuni, esse risultano superiori di più di un ordine di grandezza rispetto ai corrispondenti valori rilevati sul turbogas di Sermide
- Il divario emissivo si mantiene sostanzialmente analogo anche riferendo i risultati all'input termico dei combustibili od all'energia elettrica prodotta, con differenze superiori di oltre un ordine di grandezza
- L'analisi in microscopia elettronica dei filtri relativi alle emissioni della centrale a vapore evidenzia, a differenza di quanto rilevato su quelli delle turbine a gas, la presenza di particelle costituite da ammassi di cenosfere con elevata concentrazione di Si e di Al, oltre a tracce di V, Ni e S.

6. La sperimentazione condotta ha altresì dimostrato concentrazioni del tutto insignificanti di tutti i microinquinanti organici indagati, quali:

- Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) (*fra cui benzo- e dibenzo-pireni e antraceni, benzofluoranteni, dibenzoacridine, nitroacenaftene, nitronaftalene e indenopirene*)
- BTX (*fra cui: benzene, toluene, etilbenzene, xilene, stirene, 1,2-diclorobenzene e naftalene*)
- Aldeidi (*fra cui: formaldeide, acetaldeide, acroleina, propionaldeide, crotonaldeide, butirraldeide, benzaldeide, isovaleraldeide, valeraldeide, tolualdeidi, esaldeide, dimetilbenzaldeide*)

7. Le misure condotte sulle emissioni di NO_x e di monossido CO dei due turbogas in oggetto (*le uniche emissioni che in questa tipologia impiantistica sono soggette a un continuo monitoraggio e che debbono rispettare limiti autorizzativi*) indicano valori di concentrazione (normalizzati a gas secchi al 15% di O_2 in volume) variabili rispettivamente fra i 20 e i 40 mg/Nm^3 per NO_x e sistematicamente inferiori a 1-2 (con rare punte di 5-6) mg/Nm^3 per i CO.

8. In definitiva, l'affermazione, spesso indicata come non veritiera ed esaustiva, che gli unici inquinanti emessi in misura significativa in una moderna centrale a ciclo combinato ben esercita siano gli ossidi di azoto è in realtà vera e dimostrabile. Va peraltro rilevato che le emissioni specifiche (g/kWh) di NO_x emesse da una moderna centrale a ciclo combinato sono sensibilmente inferiori a quelle di una centrale a vapore convenzionale

9. Un'altra affermazione, altrettanto vera e incontestabile, è che, all'attuale stato dell'arte, la tecnologia dei cicli combinati alimentati a gas naturale con combustori a secco premiscelati rappresenta di gran lunga la soluzione per generare energia elettrica a minor impatto am-

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.6 of 46
Data	18/11/2004	

bientale fra tutte quelle che utilizzano combustibili fossili, sia in termini di emissioni specifiche di composti inquinanti, sia a livello di polveri di ogni tipologia e dimensione.

10. La bassissima concentrazione di ossidi di azoto ottenibile alla bocca del camino e i meccanismi di diluizione dei gas di scarico nell'atmosfera fanno sì che, a qualunque distanza dalla centrale e in qualunque situazione climatica, la presenza di un ciclo combinato non contribuisca in misura significativa a livello di immissioni nell'ambiente, e quindi della qualità dell'aria. A titolo esemplificativo, riferendosi a dati medi annui, il rapporto di diluizione fra l'emissione al camino di una centrale a ciclo combinato da 380 MW e l'immissione al suolo è tipicamente, nei punti di massima ricaduta, almeno pari a 100.000, vale a dire che il contributo alla qualità dell'aria di un camino che scarica prodotti di combustione con concentrazioni di 50 mg/Nm^3 è sensibilmente inferiore a $1 \text{ } \mu\text{g/Nm}^3$. *In merito all'influenza sulla qualità dell'aria degli scarichi da turbogas, si vuole qui citare la recente ricerca (unica nel suo genere, almeno in Italia, vuoi per la particolare modalità di utilizzo intermittente delle turbine a gas adottata nelle centrali di spinta dei gasdotti SNAM, vuoi per le peculiarità del sito un'area semi-remota, soggetta ad un moderato inquinamento derivante dalla limitrofa autostrada e ad episodici fenomeni di trasporto di masse inquinate dall'area urbana di Roma), condotta nell'ambito di una Convenzione stipulata fra Snam Rete Gas – Ambiente Salute e Sicurezza e l'Istituto sull'Inquinamento Atmosferico del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). I risultati di un monitoraggio condotto per oltre due anni dimostrano come la qualità dell'aria in vicinanza della centrale non sia minimamente influenzata dalle emissioni della centrale, né per quanto riguarda gli ossidi di azoto e le specie chimiche da essi derivanti, né per quanto riguarda i fenomeni di acidità atmosferica ed inquinamento fotochimico-ossidativo.*
11. La ricerca ha anche esaminato una tematica di grande attualità: il contributo che i cicli combinati a gas naturale possono fornire al raggiungimento degli impegni assunti nel nostro Paese nell'ambito del protocollo di Kyoto. Se ci riferiamo ai dati di produzione termoelettrica 2003 riportati nella precedente tabella, che comportano un'emissione annua complessiva di CO_2 pari a circa 98 Mton, l'integrale sostituzione con cicli combinati a gas naturale - aventi gli stessi rendimenti medi misurati sugli impianti esistenti nel 2003 - delle centrali a vapore alimentate a olio combustibile e a gas naturale, porterebbe, a pari produzione elettrica, a una riduzione delle emissioni di anidride carbonica dell'ordine di 20 Mton/anno, pari a circa quanto è richiesto al comparto elettrico dal protocollo di Kyoto.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.7 of 46
Data	18/11/2004	

Sintesi della ricerca

La ricerca ha dato luogo a un volume che verrà a breve pubblicato dalla casa editrice dell'Ateneo. Il volume si compone di una serie di capitoli monografici, il cui contenuto viene nel seguito riassunto, soffermandosi sulle più importanti conclusioni. E' fornita una versione più estesa di una parte del capitolo 2 (emissioni dalle centrali termoelettriche e loro effetti sulla salute e sull'ambiente) e del capitolo 4 (relativo alle prove sperimentali). Si rimanda alla lettura del volume per il contenuto di dettaglio delle parti di taglio più universitario (sviluppi tecnologici dei turbogas e dei cicli combinati, dei combustori a basso impatto ambientale, analisi teorica della formazione di particelle ultrafini nei processi di combustione in fase omogenea) o sui temi inerenti le tematiche dell'effetto serra.

Capitolo 2

EMISSIONI DAI PROCESSI DI COMBUSTIONE DELLE CENTRALI TERMOELETTRICHE ALIMENTATE DA COMBUSTIBILI FOSSILI E LORO EFFETTI SULLA SALUTE, SULL'AMBIENTE E SUL CLIMA

a cura di:

- o Ennio Macchi, ordinario di "Conversione dell'energia", Dipartimento di Energetica
- o Stefano Consonni, ordinario di "Macchine a fluido", Dipartimento di Energetica
- o Marino Gatto, ordinario di "Ecologia", Dipartimento di Elettronica e Informazione
- o Giorgio Guariso, ordinario di "Modellistica e simulazione", Dipartimento di Elettronica e Informazione

Il capitolo inquadra in termini generali la tematica delle emissioni dai processi di combustione dei combustibili fossili e dei loro effetti sulla salute, sull'ambiente e sul clima ed è articolato in due parti principali: la prima parte è dedicata a sfatare l'immagine, che spesso emerge dagli organi di informazione o dai gruppi di opinione che si oppongono alla localizzazione di nuovi impianti, per cui le grandi centrali termoelettriche figurano come responsabili prioritarie dell'inquinamento atmosferico. Si dimostra, dati alla mano, come tale immagine non corrisponda minimamente alla realtà, poiché, ad eccezione degli ossidi di zolfo – le cui emissioni sono comunque drasticamente diminuite negli ultimi vent'anni – e degli ossidi di azoto – anch'essi in diminuzione - il contributo alle emissioni in atmosfera di macro-inquinanti delle grandi centrali termoelettriche sia assolutamente minoritario. Si esaminino ad esempio i dati riportati nella seguente tabella, elaborati dai dati reperibili nel sito www.sinanet.anpa.it/aree/atmosfera.

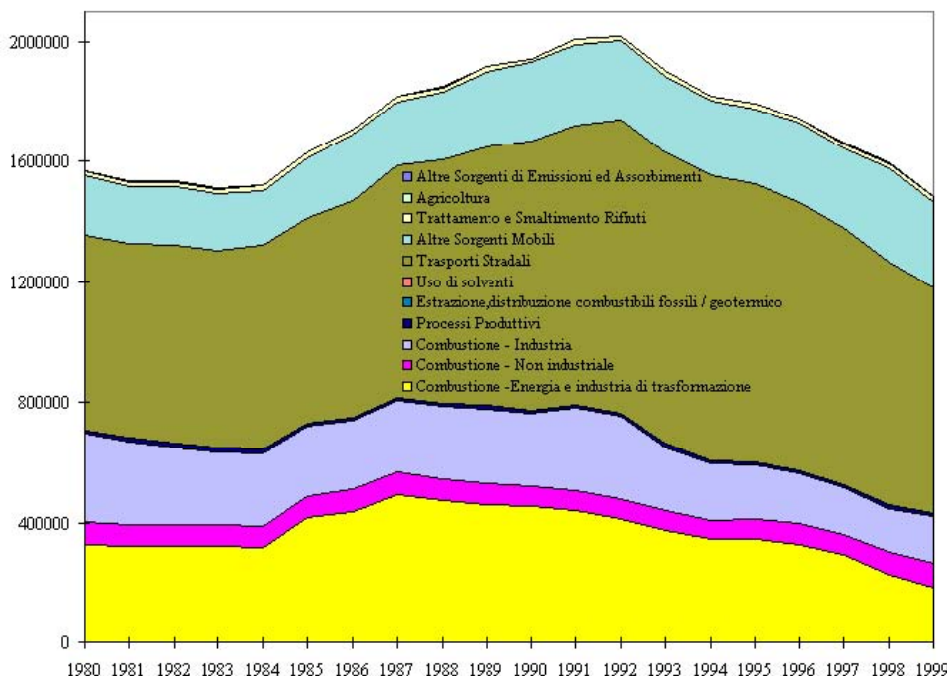
Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.8 of 46
Data	18/11/2004	

	CO		COVNM		NOx		SO ₂		N ₂ O		NH ₃		CH ₄		CO ₂	
	1980	1995	1980	1995	1980	1995	1980	1995	1980	1995	1980	1995	1980	1995	1980	1995
Produzione energia e trasform. combustibili	0,4	0,4	0,4	0,3	20,9	19,6	31,9	25,1	11,1	13,7	0,03	0,02	1,2	1,7	26,9	30,2
Combustione non industriale	3,4	4,5	1,0	1,2	4,8	3,5	10,5	1,3	8,1	5,0	0,00	0,00	0,9	1,0	18,2	14,8
Combustione nell'industria	8,9	6,5	0,5	0,4	18,9	11,6	17,5	7,3	8,1	4,6	0,02	0,01	0,5	0,3	23,1	17,4
Processi produttivi	7,9	3,9	4,3	4,1	0,8	0,6	1,6	2,3	5,8	14,0	6,99	2,60	0,5	0,4	6,8	5,2
Estrazione e distribuzione combustibili	-	-	4,2	5,6	-	-	-	-	-	-	-	-	9,6	10,9	0,3	0,3
Uso di solventi	-	-	26,5	25,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,4
Trasporto su strada	66,6	73,7	46,1	46,5	45,0	51,9	1,9	2,2	1,6	3,5	0,09	0,80	0,9	1,8	15,2	23,0
Altre sorgenti mobili e macchinari	9,1	7,0	7,7	7,3	8,5	11,9	0,4	0,7	2,4	3,4	0,00	0,01	0,2	0,1	2,7	3,4
Trattamento e smaltimento rifiuti	2,6	3,6	0,8	1,0	0,9	0,8	0,0	0,0	0,4	0,3	2,19	3,97	42,5	44,2	0,2	0,2
Agricoltura, foreste e uso del suolo	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	-	-	58,8	52,1	90,5	92,6	41,3	37,5	-	-
Natura e assorbimenti	0,7	0,2	8,4	7,6	0,1	0,0	36,3	61,0	3,7	3,3	0,14	0,04	2,5	2,1	6,2	5,0
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Il confronto tra la situazione del 1980 e quella del 1995 suggerisce le seguenti osservazioni sul contributo della generazione di energia al totale delle emissioni nazionali:

- o Il contributo alle emissioni di CO, COVNM, NH₃ e CH₄ è trascurabile (solo per il metano si supera l'1%) e, per CO, COVNM e NH₃, comunque in diminuzione. Le emissioni di CO e COVNM sono dominate dal traffico stradale, quelle di NH₃ da agricoltura, foreste e uso del suolo, quelle di CH₄ dallo smaltimento rifiuti (in discarica) e dall'agricoltura.
- o Il contributo alle emissioni di NO_x, circa costante in termini assoluti nell'intervallo temporale preso in esame, ma decrescente in termini percentuali, in conseguenza dell'aumento del totale complessivo causato dal trasporto stradale è in netta diminuzione, come indicato nella seguente figura, in cui i dati sono estesi al 1999:

Emissioni di Ossidi di azoto (NO_x) per macrosettore (Mg)



Stime ANPA delle emissioni in atmosfera (tonnellate/anno) di ossidi di azoto dal 1980 al 1999

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.9 of 46
Data	18/11/2004	

- o Le emissioni di SO₂ hanno subito una drastica diminuzione in termini assoluti (da circa 1,9 milioni di tonnellate nel 1980 a poco più di 0,8 milioni di tonnellate nel 1995, a circa 0,3 milioni di tonnellate nel 2003) e una significativa riduzione anche in termini percentuali. Oggi queste emissioni nel nostro Paese sono ormai dominate da fenomeni naturali.

L'unica tipologia di emissioni che ha visto un aumento – sia in termini assoluti sia in termini percentuali – del ruolo della generazione di energia è quella dei gas serra: N₂O e più marcatamente CO₂. E' questa un'inevitabile conseguenza delle modalità con cui nel nostro Paese si è fatto fronte all'espansione della domanda di elettricità, che è stata soddisfatta interamente con espansioni del parco termoelettrico. Peraltro, il massiccio ricorso a impianti di cogenerazione e ad energie assimilate alle energie rinnovabili (grazie agli incentivi messi a disposizione dal provvedimento CIP 6/92), l'espansione dell'utilizzo del gas naturale e l'avvio dell'ammodernamento del parco di generazione elettrica (passaggio dai convenzionali cicli a vapore ai moderni cicli combinati ad elevatissima efficienza) ha consentito di limitare in qualche misura l'aumento di queste emissioni. Come evidenziato nel capitolo seguente, solamente una sostituzione quasi integrale delle centrali a vapore alimentate a gas naturale e olio combustibile con moderni cicli combinati potrebbe consentire al comparto elettrico di contribuire efficacemente agli impegni relativi al protocollo di Kyoto.

I gas serra pongono peraltro problemi di cambiamenti climatici, ma non di qualità dell'aria. Ai fini della qualità dell'aria la rilevanza della generazione termoelettrica è in costante diminuzione. La percezione di larghi strati dell'opinione pubblica che attribuisce alle centrali elettriche la responsabilità del degrado della qualità dell'aria è quindi assolutamente ingiustificata. In realtà, il contributo della generazione termoelettrica al totale delle emissioni che determinano la qualità dell'aria è in continua diminuzione, una tendenza che negli ultimi anni è stata accelerata dall'entrata in servizio di moderni cicli combinati ad altissimo rendimento alimentati a gas naturale. Queste considerazioni basate sul totale nazionale delle emissioni diventano ancora più ineccepibili quando si consideri l'ambito urbano, la cui qualità dell'aria risente molto più delle sorgenti distribuite a bassa quota - traffico stradale e, in secondo luogo, riscaldamento – che non delle sorgenti concentrate in quota come quelle degli impianti termoelettrici.

Le serie storiche ANPA da cui sono ricavati i dati sopra discussi non includono le emissioni di polveri, il cui monitoraggio sistematico è più difficile ed è stato avviato in anni più recenti. Le emissioni di PM10 sono invece incluse nelle stime sviluppate da ARPA Lombardia per il 2003, riportate, sempre in termini percentuali, nella seguente tabella.. Per quanto limitate ad una sola regione e ad un solo anno, le tabelle mostrano che anche per le emissioni di polveri il contributo della grande generazione termoelettrica è minoritario, essendo anche queste emissioni dominate dal trasporto stradale e, in secondo luogo, dalla combustione non industriale (prevalentemente riscaldamento civile). Aggiungendo la considerazione già citata circa la distribuzione e la quota delle sorgenti, si conclude che l'impatto sulla qualità dell'aria rilevante per la popolazione non può essere che estremamente modesto.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.10 of 46
Data	18/11/2004	

	SO ₂	NO _x	COV	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	PM10
Produzione energia e trasform. combustibili	68	12	0	0	0	23	2	0	9
Combustione non industriale	8	8	4	2	23	24	12	0	22
Combustione nell'industria	14	20	2	0	8	19	5	0	5
Processi produttivi	5	1	10	0	3	5	0	0	7
Estrazione e distribuzione combustibili			3	21					
Uso di solventi	0	0	48		0			0	1
Trasporto su strada	4	52	23	1	60	26	11	3	39
Altre sorgenti mobili e macchinari	2	5	1	0	1	1	2	0	7
Trattamento e smaltimento rifiuti	0	1	0	26	0	1	1	0	0
Agricoltura		1	0	49	3	0	68	97	8
Altre sorgenti e assorbimenti	0	0	9	1	1	0	0	0	2
Totale	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Stime ARPA Lombardia delle emissioni in atmosfera nella Regione Lombardia nel 2003 disaggregate per macrosettore. Tutti i dati sono in tonnellate, ad eccezione delle emissioni di CO₂ che sono in migliaia di tonnellate.

La seconda parte del capitolo descrive invece i meccanismi con cui le emissioni degli impianti termoelettrici alterano le concentrazioni di gas e particolato naturalmente presenti in atmosfera, illustrando i diversi effetti che ciò può provocare sulla salute, sull'ambiente naturale e costruito e sul clima. Si concentra l'attenzione in particolare sulle problematiche che hanno maggiormente interessato recentemente l'opinione pubblica e le istituzioni, cioè le emissioni di particolato e quelle di gas serra. Infatti, benché anche gli altri gas emessi dalle centrali termoelettriche rappresentino degli inquinanti potenzialmente dannosi per l'uomo, come abbiamo visto, le loro concentrazioni nell'ambiente, e in particolare nelle zone più densamente popolate, sono in generale diminuite negli ultimi anni e ciò fa sì che essi non vengano più percepiti come un problema che richieda interventi nuovi e urgenti. Viene comunque fornita nel capitolo una sintetica trattazione complessiva delle problematiche, inclusi alcuni effetti degli altri inquinanti cosiddetti "tradizionali"

<i>INQUINANTE</i>	<i>soggetti interessati</i>	<i>conseguenze</i>
<i>Biossido di azoto</i>	adulti sani	aumentata iperattività
	Asmatici	decremento della funzione polmonare
	Bambini	aumento dei sintomi respiratori (aumento delle infezioni respiratorie)
<i>Biossido di zolfo</i>	adulti sani e con broncopneumopatia	aumento dei sintomi respiratori aumento della mortalità respiratoria aumento delle visite ospedaliere per malattie respiratorie
	Asmatici	decremento della funzione polmonare
<i>Monossido di carbonio</i>	adulti sani	riduzione della capacità di esercizio
	pazienti con cardiopatia ischemica	decremento della capacità di esercizio angina pectoris (eccesso di mortalità)

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.11 of 46
Data	18/11/2004	

Naturalmente, l'entità e la durata degli effetti riportati dipendono dalla concentrazione ambientale e dalla durata dell'esposizione. Ad esempio, l'odore dell'NO₂ viene percepito a concentrazioni di circa 3 ppm, mentre a 13 ppm sono state rilevate irritazioni alle mucose degli occhi e del naso. Per l'SO₂, la cui presenza è già avvertita a circa 0,3 ppm a causa del forte odore, una bronco-costrizione è rilevabile dopo pochi minuti di esposizione a 1,6 ppm. Tuttavia è molto spesso problematico distinguere l'azione del singolo inquinante perché frequentemente essi sono inalati congiuntamente e, ad esempio, gli effetti più pericolosi del biossido di zolfo sembrano legati alla possibilità che esso possa raggiungere il tratto più profondo dell'apparato respiratorio combinandosi con il particolato.

Un discorso a parte e decisamente più complesso è quello che riguarda l'ozono, un altro inquinante che, tipicamente nelle aree urbane, ha registrato in generale un aumento negli anni recenti. L'ozono infatti non è direttamente emesso da sorgenti naturali o antropiche, ma è un inquinante "secondario". Si forma cioè in atmosfera a partire dagli ossidi di azoto e dai composti organici volatili (COV), i cosiddetti "precursori", attraverso reazioni chimiche molto complesse, catalizzate dalla componente ultravioletta della luce solare. Di conseguenza, le più alte concentrazioni di ozono possono essere rilevate anche lontano dalle sorgenti dei precursori, in dipendenza dalle condizioni meteorologiche, in particolare velocità del vento, temperatura e, appunto, radiazione solare. Benché gli effetti più rilevanti dell'ozono riguardino soprattutto i materiali (ad esempio produce screpolature nella gomma e alterazione delle fibre tessili) e la vegetazione (causa necrosi delle foglie e dei germogli), esso è dannoso anche per l'uomo. Concentrazioni superiori a 0,05 ppm provocano irritazioni a naso e gola, oltre 0,1 ppm si ha secchezza delle fauci ed esposizioni anche di solo 2 ore a concentrazioni superiori possono causare grande affaticamento, difficoltà di coordinazione fino all'edema polmonare. Si tratta comunque di concentrazioni superiori a quelle normalmente presenti in atmosfera, che raggiungono gli 0,1 ppm solo nelle aree e nei momenti più critici.

Esiste inoltre un'altra importante serie di composti, detti a volte "microinquinanti" (come il benzene, gli idrocarburi policiclici aromatici – IPA o le diossine), che possono avere importanti effetti tossici e cancerogeni, per i quali si rimanda alla letteratura di settore.

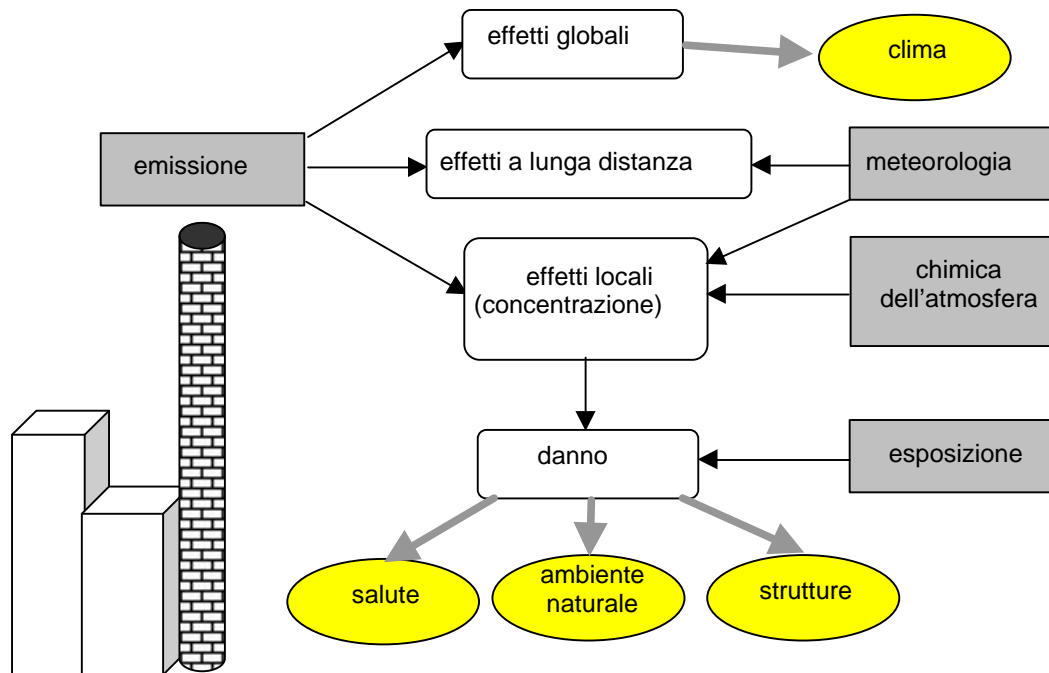
Meccanismi di trasporto e diffusione

Per comprendere come possono essere valutati gli effetti delle emissioni sulla salute e sull'ambiente occorre tenere presente quali sono i meccanismi attraverso i quali esse agiscono e quindi quali modelli possono essere utilizzati per effettuare queste valutazioni (naturalmente nel caso di impianti esistenti è possibile anche svolgere delle raccolte di dati sul campo, ma ciò non è possibile in fase di analisi di un nuovo progetto). I processi che legano le emissioni in atmosfera alle loro conseguenze per l'uomo sono schematicamente illustrati in figura. I parametri fisico-chimici dell'emissione (in particolare, le concentrazioni emesse, l'altezza del camino, la temperatura e la velocità di uscita dei fumi, ecc.) determinano ovviamente la parte dell'emissione che ricade in un raggio di qualche chilometro dall'impianto e quella che viene invece trasportata lontano.

Nelle modalità di suddivisione di queste due componenti gioca tuttavia un ruolo fondamentale anche la meteorologia e, più specificamente, fattori quali la temperatura, la direzione e velocità del vento, la pressione e stabilità dell'atmosfera ecc. Non è quindi possibile in generale determinare le concentrazioni al suolo che saranno determinate da un'emissione di caratteristiche note, se non facendo riferimento a condizioni meteorologiche ben definite (tipicamente quelle dell'area dove si progetta di localizzare l'impianto). Anche la situazione chimica già presente nell'atmosfera gioca un ruolo importante, sia perché consente di distinguere i casi in cui la nuova emissione va a som-

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.12 of 46
Data	18/11/2004	

marsi ad un inquinamento già presente (e quindi determina un aumento di concentrazioni già elevate), sia perché determina il tipo di reazioni chimiche che l'emissione subisce. Queste giocano ad esempio un ruolo fondamentale nella formazione del cosiddetto particolato secondario e dell'ozono, che, producendosi, come si è detto, in atmosfera a causa della presenza di gas precursori, possono essere rilevati anche a distanza notevole dalle sorgenti emissive. In effetti, a seconda dei campi di vento presenti, queste distanze possono essere superiori al centinaio di chilometri e pertanto questo tipo di effetti possono anche essere rilevati in nazioni diverse da quelle che hanno generato le emissioni.



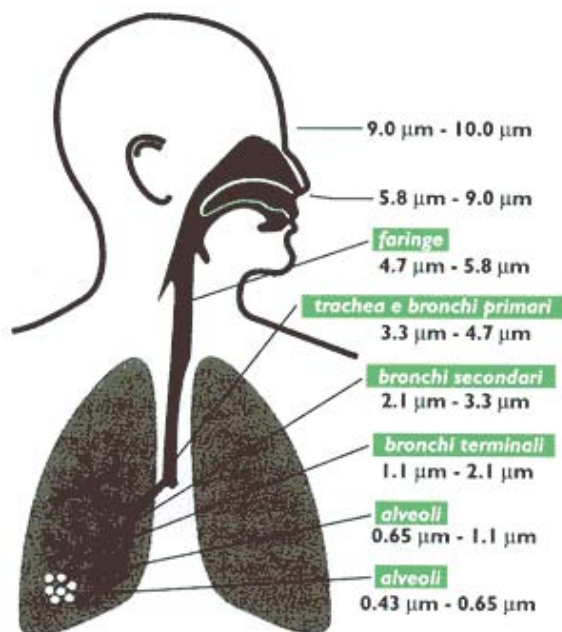
Meccanismi di azione delle emissioni e condizioni che ne determinano gli effetti.

Va rilevato che, almeno per quanto riguarda la salute e l'ambiente, si è soliti distinguere tra gli effetti "acuti" e "cronici" dell'inquinamento. Nel primo caso si fa riferimento ai danni derivanti alla salute e agli ecosistemi da una breve esposizione (al più qualche giorno) ad elevate concentrazioni di inquinante, mentre nel secondo ci si riferisce a ciò che viene determinato da esposizioni più prolungate a concentrazioni mediamente più basse. Quest'ultima situazione è di solito la più interessante per quanto riguarda i danni alla flora e naturalmente è l'unica che conta per quanto riguarda le strutture. E' infine evidente che, dato che per alcuni inquinanti, tra i quali anche il particolato fine ed ultrafine si sono iniziate sistematiche misurazioni solo in anni recenti, non sono ad oggi disponibili molti dati sperimentali e, anche se la sua pericolosità per la salute è ampiamente documentata, è assai difficile giungere a valutazioni precise dei danni che esso comporta. Ancora più difficile è attribuire i danni ad una determinata emissione, perché sarebbe necessario, per le ragioni spiegate poc'anzi, conoscere anche la meteorologia locale e l'esposizione della popolazione, dell'ambiente e delle strutture. Non potendo quindi valutare i danni dovuti ad un impianto tipo senza una precisa localizzazione, ci limiteremo nel seguito a riassumere i risultati di alcuni importanti studi nel settore, sia per quanto riguarda gli effetti sulla salute dell'inalazione di particolato, sia per quanto riguarda la valutazione economica di questi effetti.

Effetti del particolato sull'organismo umano

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.13 of 46
Data	18/11/2004	

Un individuo adulto respira da 6 a 9 litri d'aria al minuto in condizioni di riposo ($9-13 \text{ m}^3$ al giorno), 60 litri al minuto in condizioni di attività fisica moderata e 130 litri al minuto durante l'attività fisica più intensa. L'inquinamento atmosferico, dunque, influisce soprattutto sull'apparato respiratorio, coinvolgendo tutto il canale dal punto di inalazione (naso, bocca) sino agli alveoli polmonari. Il rischio determinato dal particolato deriva dalla sua deposizione lungo le pareti di tale canale: ovviamente, poiché il diametro dell'apparato respiratorio diminuisce dal naso verso gli alveoli, il diametro delle particelle che possono penetrare nell'apparato diminuisce con l'aumentare della profondità.



Profondità di penetrazione delle particelle in funzione del diametro delle componenti dell'apparato respiratorio; fonte: Arpa Emilia Romagna (www.liberiamolara.it/polveri.asp)

Come si può osservare, le particelle di diametro maggiore, tra i $10 \mu\text{m}$ e i $4,7 \mu\text{m}$ si depositano nell'area extra-toracica (sopra la laringe, nelle vie con diametro maggiore); a partire dai $4,7 \mu\text{m}$ le particelle arrivano sino a bronchi ($3,3\div 4,7 \mu\text{m}$ trachea e bronchi primari, $2,1\div 3,3 \mu\text{m}$ bronchi secondari, $1,1\div 2,1 \mu\text{m}$ bronchi terminali); infine, a partire da $1,1 \mu\text{m}$ si ha penetrazione fino agli alveoli. Particelle diverse vengono inalate in maniera e quantità differenti; tra le caratteristiche delle particelle che influenzano la loro inalabilità ci sono la dimensione, la forma, la carica elettrica, la densità, l'igroscopia; purtroppo, è noto che queste caratteristiche sono influenti, ma non si sa bene in quali modi e in quale misura. La proporzione di particelle inalate da un individuo rispetto al totale presente in sospensione nell'aria dipende dalla velocità e dalla direzione dell'aria, dalla frequenza respiratoria e dal tipo di respirazione (nasale o orale). Quando la respirazione orale aumenta (per esempio durante l'esercizio fisico o la conversazione) diminuiscono le deposizioni extratoraciche, mentre aumentano quelle tracheobronchiali e polmonari.

Il particolato inalato non si distribuisce uniformemente lungo tutta la superficie disponibile (in totale si parla di $130\div 150 \text{ m}^2$), ma si concentra nei cosiddetti "hot spots", in corrispondenza di biforcazioni, dove l'aria ha maggiore velocità. Si ha l'impatto quando la velocità delle particelle si an-

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.14 of 46
Data	18/11/2004	

nulla per effetto della resistenza inerziale al trascinarsi dell'aria, il quale diminuisce dal naso fino agli alveoli. Le particelle inalate possono depositarsi in qualche tratto dell'apparato respiratorio o essere espirate. Se le particelle sono solubili possono essere assorbite dai tessuti nel punto dove si depositano, provocando danni intorno a tale punto; le particelle insolubili, invece possono essere trasportate, in base alle loro dimensioni verso altri tratti dell'apparato respiratorio.

Le vie respiratorie sono dotate di meccanismi di difesa: la regione nasale è protetta dalla normale pulizia e dagli starnuti; le vie aeree superiori sono rivestite da una mucosa costituita prevalentemente da cellule cigliate (dotate di minuscoli peluzzi) e da cellule caliciformi, che secernono muco: le ciglia si muovono a onda, in maniera coordinata, trasportando la patina di muco nella quale rimangono imprigionate le sostanze estranee fino alla cavità orale, dove vengono inghiottite. Tra le cellule della mucosa, inoltre ci sono terminazioni nervose che, se irritate, provocano una contrazione della muscolatura bronchiale e, quindi, la tosse. Tali processi possono richiedere uno o più giorni. Anche nella regione tracheobronchiale l'azione ripulente è affidata alle mucose, che riversano il loro secreto nell'apparato gastrointestinale, entro 24 ore dalla deposizione delle particelle. Nei polmoni, le particelle insolubili vengono rimosse per fagocitosi dai macrofagi alveolari, oppure entrano nell'interstizio polmonare attraverso un processo di endocitosi ad opera di cellule dell'epitelio alveolare. Purtroppo, le sostanze nocive possono danneggiare in vario modo proprio questi meccanismi di difesa, rallentandoli o inibendoli.

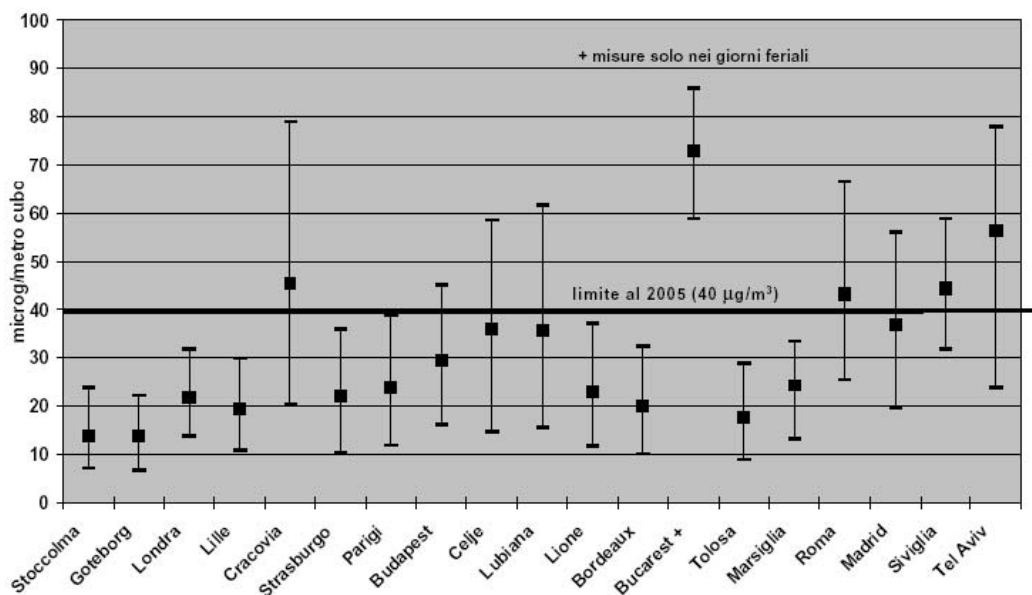
Valutazioni epidemiologiche

Benché, come si è detto, sia difficile generalizzare le conseguenze dell'inalazione del particolato, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha rilevato che in tutti gli studi compiuti l'aumento di concentrazione nell'ambiente corrisponde ad un aumento della mortalità e della morbilità. In particolare, si registrano incrementi dei problemi dell'apparato respiratorio (tipicamente, aggravamento delle situazioni di asma e di bronchite) e all'apparato cardiovascolare (aritmie, aumento della viscosità del sangue) sia in corrispondenza di esposizioni acute (al di sopra di $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), che croniche (al di sopra di $40\text{-}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). I molti studi che sono stati svolti sul tema degli effetti del particolato sulla salute, si sono tuttavia per lo più indirizzati alle frazioni più grossolane, tipicamente il PM_{10} , e solo più di recente si è indirizzata l'attenzione al $\text{PM}_{2,5}$ e al PM_1 . Inoltre, data la sua rilevanza sociale, quasi tutti gli studi considerano gli ambienti urbani, dove vive la gran parte della popolazione e si registrano già concentrazioni di PM_{10} notevolmente elevate, soprattutto causate dalle emissioni del traffico autoveicolare. La figura seguente mostra infatti la concentrazione media annua di diverse città europee, paragonata al limite di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ che dovrebbe essere rispettato a partire dal 2005.

Anche a causa di questa localizzazione urbana, la maggior parte degli studi si concentra sugli effetti del valore medio annuo dell'inquinamento da PM_{10} . D'altra parte, questa è anche la situazione di maggior interesse per il presente lavoro, in quanto, nell'ambito della pianificazione e delle scelte strutturali, è più significativo concentrarsi sugli effetti di lungo periodo (tipicamente dell'ordine del ciclo di vita degli impianti) rispetto a quelli di breve, che possono essere relativi solo a situazioni meteorologiche del tutto anomale o a rilasci accidentali di inquinante. Nella complessa situazione che abbiamo brevemente delineato, citeremo solo, a titolo di esempio, le valutazioni a cui sono giunti due degli studi più significativi: lo studio dell'American Cancer Society su una coorte di oltre mezzo milione di individui in 151 città statunitensi costituita fin dal 1982 (Pope *et al.* 1995, 2002) e quello dell'OMS (Martuzzi *et al.* 2002) su otto città italiane (riutilizzato poi in numerosi studi successivi come De Leo *et al.* 2002, Cutaia *et al.* 2003).

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.15 of 46
Data	18/11/2004	

Lo studio dell'American Cancer Society, benché centrato ovviamente sul problema dei tumori, è di grande importanza perché ha coinvolto circa 1,2 milioni di adulti di almeno 30 anni d'età, sia fumatori che non e con diverse tipi di attività e quindi di esposizione, da tutti gli USA. Per 50 aree metropolitane corrispondenti a circa 300.000 volontari residenti erano disponibili dati sul particolato fine dalle reti di monitoraggio della qualità dell'aria, e la concentrazione media annua di PM_{2,5} variava da un minimo di 9,0 ad un massimo di 33,5 µg/m³. L'analisi della mortalità è stata oggetto di due pubblicazioni, la prima al 1989 con un periodo di osservazione di sette anni (Pope *et al.* 1995), la seconda aggiornata al 1998 con un periodo di osservazione di 16 anni (Pope *et al.* 2002). I risultati più recenti riportano per il PM_{2,5} un incremento di rischio unitario (per 10 µg/m³) del 6%, in relazione alla mortalità naturale, e dell'8% per quella cardiovascolare.



Concentrazioni medie annue, 10° e 90° percentile di PM₁₀ in alcune città europee (tra il 1996 e il 2000) – rielaborazione APAT su dati APHEIS (Medina *et al.* 2002).

Lo studio dell'OMS (Martuzzi *et al.*, 2002, Galassi *et al.* 2000) relativo a Torino, Milano, Genova, Bologna, Firenze, Roma, Napoli e Palermo (dove risiede complessivamente il 15% della popolazione italiana) ha dato i risultati riportati nella tabella 2.2.1 a partire da concentrazioni medie (stimate al 1999) che andavano dai 44,4 µg/m³ di Palermo ai 53,8 µg/m³ di Torino.

Indicatore	Incremento (%)	Limiti di confidenza al 95%	
Mortalità non accidentale	2.6	0.9	4.3
Ospedalizzazione per problemi respiratori	1.6	1.3	2
Ospedalizzazione per problemi cardiovascolari	0.9	0.6	1.3
Bronchiti croniche (individui > 25 anni)	9.3	0.9	18
Aggravamento asma (individui > 15 anni)	0.4	0	0.8
Giorni di attività ridotta (individui > 20 anni)	9.4	7.9	10.9
Sintomi di problemi respiratori	7	2	11

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.16 of 46
Data	18/11/2004	

Effetti medi di un aumento di 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ della media annua di PM_{10} in 8 città italiane.

Prendendo ad esempio come riferimento il caso di Milano, lo studio stima che una riduzione della concentrazione media annua di PM_{10} ridurrebbe di 441 i decessi annui, corrispondenti al 4,2 % del totale dei decessi dei milanesi di 30 anni o più nel 1998. Allo stesso modo si ridurrebbero di 520 i ricoveri per problemi cardiovascolari, cioè dell' 1,5 % di quelli che si sono effettivamente verificati nel 1998. Va detto inoltre che esistono categorie particolarmente sensibili al problema dell'inquinamento da PM_{10} . Ad esempio, per i ragazzi al di sotto dei 15 anni, l'aggravamento delle bronchiti acute è stimato attorno al 30 % (limiti di confidenza al 95%: tra 18 e 33 %). Volendo riassumere in modo estremamente sintetico i risultati di tutti gli studi compiuti (un'ampia bibliografia si trova in: Brambilla e Porta 2004), si può affermare che, in situazioni nelle quali le concentrazioni medie sono già vicine alle soglie definite dalle normative, un aumento della concentrazione media annua di PM_{10} di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dovrebbe portare ad aumenti della mortalità e della morbilità vicini al 2 %. Effetti di poco superiori sembrano applicarsi anche al $\text{PM}_{2,5}$, pur su una base sperimentale molto più ridotta.

Infine, vogliamo nuovamente sottolineare che tutte le conclusioni sopra riportate si riferiscono a situazioni nelle quali le concentrazioni medie annue sono vicine ai limiti di legge, come avviene soprattutto in ambito urbano. Al di fuori di quest'ambito, le concentrazioni ambientali sono di solito al di sotto dei valori che producono effetti percepibili (la concentrazione di fondo di PM_{10} dovuta ai soli fenomeni naturali si stima intorno ai $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e la popolazione impattata dall'inquinamento è molto più dispersa. Ciò fa sì che le valutazioni economiche dei danni da PM_{10} , effettuate per la prima volta in Europa dal progetto ExterneE (www.externe.info), su cui torneremo più avanti, prevedano in ambito extraurbano danni inferiori di oltre due ordini di grandezza rispetto a quelli in ambito urbano.

Il capitolo prosegue con un'ampia rassegna, qui non riportata, delle problematiche relative ai gas clima-alteranti.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.17 of 46
Data	18/11/2004	

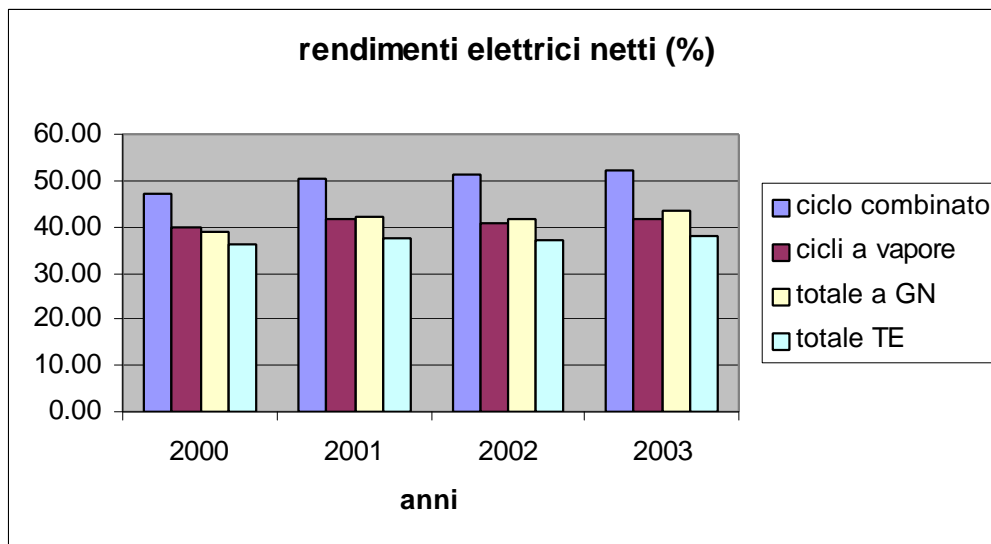
Capitolo 3

STATO DELL'ARTE DEI MODERNI CICLI COMBINATI ALIMENTATI A GAS NATURALE

a cura di:

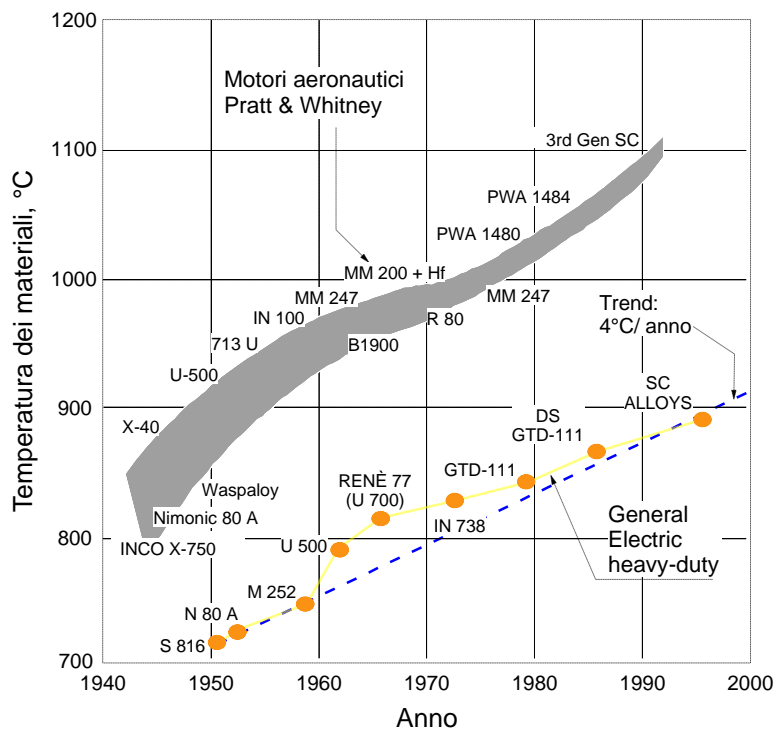
- o Ennio Macchi, ordinario di "Conversione dell'energia", Dipartimento di Energetica
- o Giovanni Lozza, ordinario di "Sistemi energetici", Dipartimento di Energetica
- o Paolo Chiesa, associato di "Sistemi energetici", Dipartimento di Energetica

Il capitolo, di cui qui si riportano solo alcune figure e tabelle significative a titolo esemplificativo, descrive lo "stato dell'arte" delle turbine a gas e dei cicli combinati, evidenziando i formidabili progressi tecnologici ottenuti, sia in termini di prestazioni energetiche (potenze unitarie, rendimenti), sia in termini di abbattimento delle emissioni specifiche. Una parte del capitolo è dedicata ad analizzare il contributo che i cicli combinati possono fornire al comparto elettrico italiano, in termini di miglioramento dei rendimenti di conversione, della qualità dell'aria e del contenimento delle emissioni di gas clima alteranti. In particolare, si evidenzia come il rendimento medio del parco termoelettrico cresca con grande lentezza (nel '70 era circa il 36%, nel 2003 circa 38%) e come solamente l'avvento (recente) dei cicli combinati abbia consentito di elevare il rendimento medio con cui è utilizzato il gas naturale di circa 5 punti percentuali (vedi figura seguente).

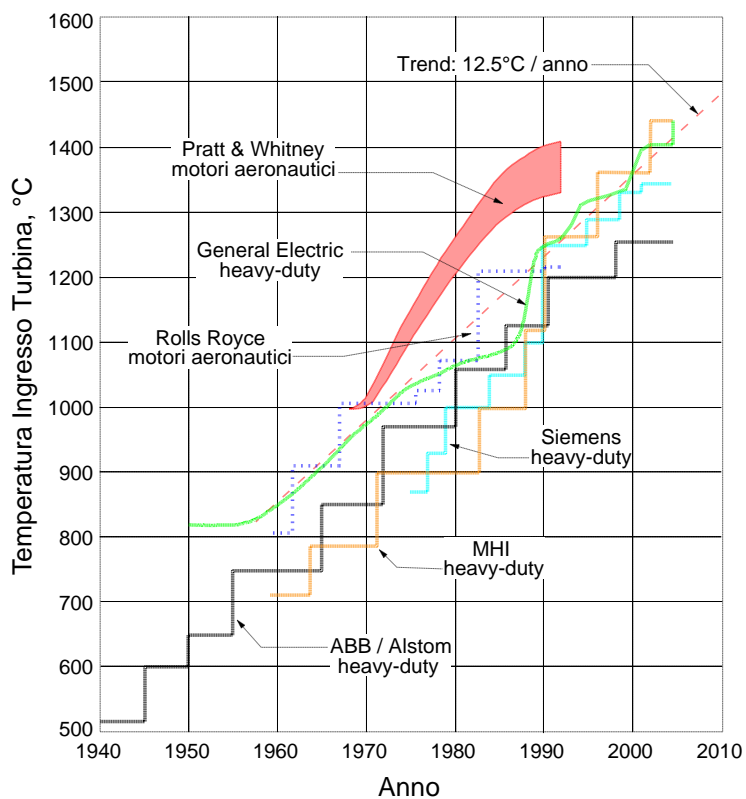


A titolo esemplificativo dei contenuti del capitolo, si presentano le seguenti figure, che mostrano l'evoluzione del rendimento registrato nel campo dei cicli combinati e correlano l'incremento di efficienza all'innalzamento della temperatura di ingresso in turbina (TIT).

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.18 of 46
Data	18/11/2004	

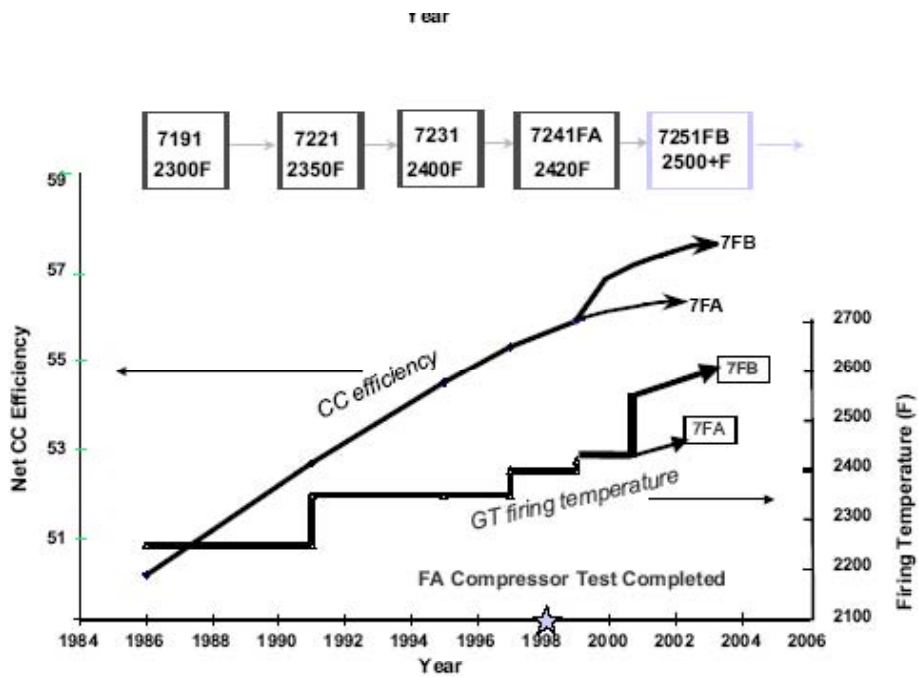


Evoluzione della temperatura operativa dei materiali.

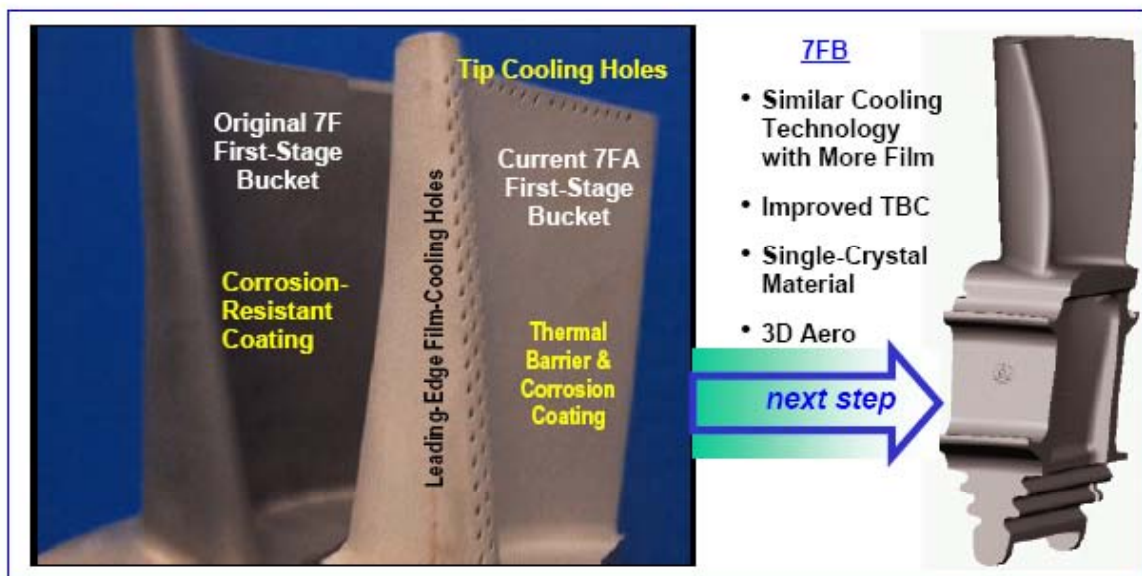


Evoluzione della temperatura di ingresso in turbina.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.19 of 46
Data	18/11/2004	



Evoluzione del rendimento di cicli combinati General Electric (prestazioni analoghe sono ottenute dagli altri Costruttori presenti sul mercato internazionale: Siemens, Alstom e Mitsubishi)



Esempio dell'evoluzione tecnologica dei materiali e delle tecniche di raffreddamento delle palette nelle moderne turbine a gas industriali

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.20 of 46
Data	18/11/2004	

Una sezione del capitolo è dedicata all'evoluzione tecnologica dei sistemi di combustione a bassa emissione adottati nelle moderne turbine a gas alimentate da gas naturale, ed evidenzia i formidabili progressi ottenuti in termini di abbattimento di ossidi di azoto.

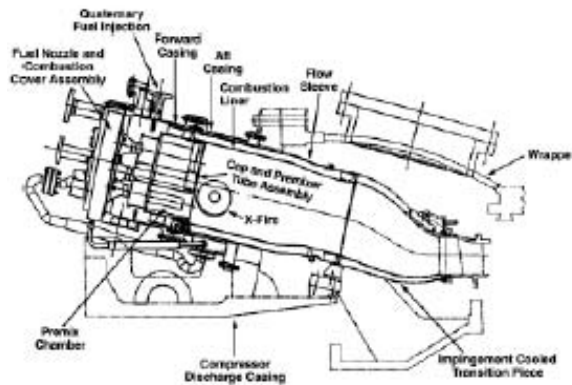


Fig.3.2.6a: Sezione di un combustore DLN-2 per turbine a gas serie FA (fonte: GE)

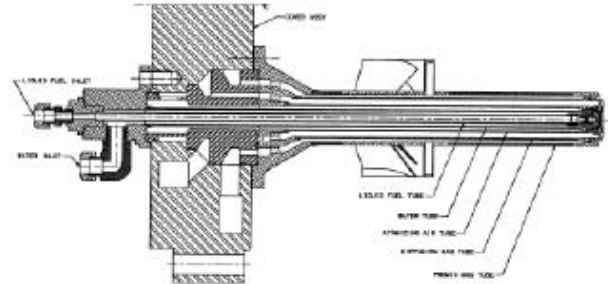


Fig.3.2.6b: Sezione di bruciatore / premiscela-tore del combustore DLN-2 (fonte: GE)

L'attuale "stato dell'arte" in termini di emissioni specifiche di NO_x (i dati si riferiscono a GE, ma valgono anche per gli altri costruttori)

Dry Low NO_x Combustion Systems for GE Heavy-Duty Gas Turbines

Turbine Model	Gas			Distillate		Diluent
	NO _x (ppmvd)	CO (ppmvd)	Diluent	NO _x (ppmvd)	CO (ppmvd)	
MS3002(J)-RC	33	25	Dry	N/A	N/A	N/A
MS3002(J)-SC	42	50	Dry	N/A	N/A	N/A
MS5001P	25	50	Dry	65	20	Water
MS5001R	42	50	Dry	65	20	Water
MS5002C	42	50	Dry	65	20	Water
MS6001B	9	25	Dry	42	30	Water
MS7001B/E Conv.	25	25	Dry	42	30	Water
MS7001EA	9	25	Dry	42	30	Water
MS9001E	15	25	Dry	42	20	Water
	25	25	Dry	90	20	Dry
MS6001FA	25	15	Dry	42/65	20	Water/ Steam
MS7001FA	25	15	Dry	42/65	20	Water/ Steam
	9	9	Dry	42/65	30	Water/ Steam
MS7001FB	25	15	Dry	42	20	Water
MS7001H	9	9	Dry	42/65	30	Water/ Steam
MS9001EC	25	15	Dry	42/65	20	Water/ Steam
MS9001FA	25	15	Dry	42/65	20	Water
MS9001FB	25	15	Dry	42	20	Water
MS9001H	25	15	Dry	42	20	Water

Figure 1. Dry Low NO_x product plan

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.21 of 46
Data	18/11/2004	

Le prestazioni previste nel prossimo avanzamento tecnologico: la serie H

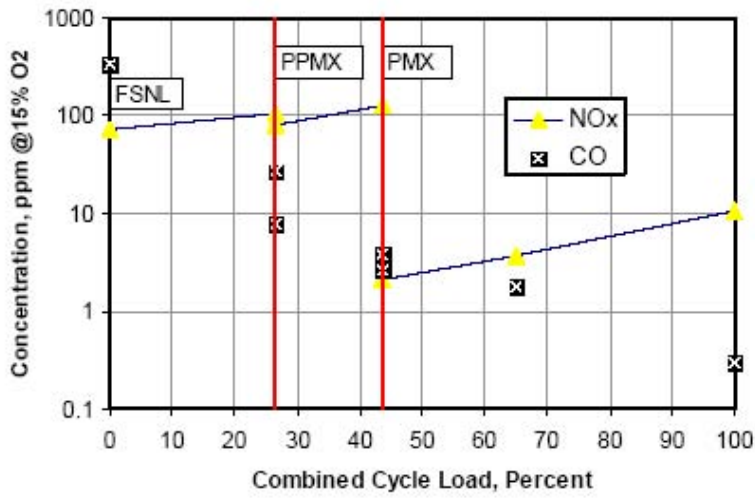


Fig3.2..9: Emissioni di NO_x e CO per la turbina GE 9H nei vari regimi di funzionamento del combustore (fonte: GE) .



Fig.3.2.7: La turbina a gas GE 9H pronta per l'installazione nella centrale di Baglan Bay in Scozia. Si tratta della macchina più "calda" oggi in esercizio (temperatura ingresso in turbina attorno a 1450°C) che ottiene in ciclo combinato un rendimento del 60% (fonte: GE).

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.22 of 46
Data	18/11/2004	

Capitolo 4

INDAGINE SPERIMENTALE SULLE PRESENZE EMISSIVE DI PARTICOLATO FINE DA UNITA' TURBOGAS E CENTRALI CONVENZIONALI A VAPORE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA

A cura di:

- o Stefano Cernuschi, associato di "Ingegneria Sanitaria-Ambientale", Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento (DIAR)
- o Michele Giugliano, ordinario di "Impianti di Trattamento degli Effluenti Gassosi", Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento (DIAR)
- o Ruggero Tardivo, funzionario tecnico del Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, Rilevamento (DIAR)

Il capitolo elabora ed analizza i rilevamenti dell'indagine sperimentale, eseguita nell'ambito dello studio in collaborazione con CESI, per acquisire le presenze emissive di particolato fine da centrali a ciclo combinato e centrali convenzionali a vapore per la produzione di energia elettrica, confrontandoli con i dati di misurazioni analoghe reperibili in letteratura. Lo studio ha così inteso approfondire la caratterizzazione delle emissioni di particolato fine prodotte da centrali termoelettriche a ciclo combinato alimentate con gas naturale ed operanti in Italia, finalizzando l'indagine sperimentale alla valutazione delle concentrazioni e dei fattori di emissione delle frazioni granulometriche delle polveri totali di maggior interesse, costituite dal PM₁₀ e dal PM_{2,5}. Per acquisire ulteriori elementi comparativi applicabili al contesto nazionale, l'indagine è stata estesa effettuando analoghe valutazioni su un'unità convenzionale ad alimentazione mista olio combustibile/gas naturale, rappresentativa di centrali di potenza largamente diffuse in Italia.

Modalità di esecuzione dello studio

L'indagine è stata eseguita sulle emissioni prodotte da due turbogas da circa 250 MW di potenza nominale, operanti in ciclo combinato, e su quelle di un gruppo convenzionale a vapore ad alimentazione mista olio combustibile/gas naturale della stessa potenza. Nella presente sintesi si tratterà in dettaglio la sperimentazione condotta sul turbogas della centrale di Sermide. L'unità turbogas, rappresentativa delle tecnologie di ultima generazione, è dotata di un sistema di controllo a secco delle emissioni di NO_x (DLN, "Dry Low NO_x"), mentre la centrale convenzionale è configurata con una linea di trattamento che comprende un depolveratore elettrostatico per il controllo del particolato ed un'unità di rimozione catalitica degli NO_x. Tutte le determinazioni sono state condotte in corrispondenza di regimi di esercizio variabili fra il pieno carico e il minimo tecnico degli impianti, con la centrale a vapore alimentata con rapporto olio/gas pari al 25%/75% in termini dell'energia totale in ingresso. I principali dati di funzionamento di entrambe le unità rilevati durante i campionamenti sono sintetizzati nella seguente tabella, che riporta anche le caratteristiche dei gas emessi (portate, umidità, ossigeno, concentrazioni degli inquinanti di interesse) acquisite dai sistemi di monitoraggio in continuo.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.23 of 46
Data	18/11/2004	

Tab. 2.1 Dati medi orari di esercizio e caratteristiche di interesse dell'emissione rilevati dai sistemi di monitoraggio in continuo dell'impianto durante i campionamenti (tra parentesi l'intervallo minimo-massimo)

	TURBOGAS ⁽¹⁾	VAPORE ⁽²⁾
DATI DI ESERCIZIO		
Consumo combustibile		
Olio combustibile (t h ⁻¹)	-	11,3 (11,1 - 11,5)
Gas naturale (10 ³ m ³ _n h ⁻¹)	67,7 (48,3 - 74,8)	34,2 (33,7 - 34,8)
Potenza prodotta (MW)	230 (164 - 254)	240 (235,1 - 243,4)
CARATTERISTICHE EMISSIONE		
Portata fumi (10 ³ m ³ _n h ⁻¹)	1570 (1244 - 1702)	589 (582,3 - 596)
Temperatura (°C)	84,5 (76,1 - 86,7)	145,8 (141,5 - 149,9)
O ₂ (% vol)	(13,7 - 13,8)	4,6 (4,5 - 4,7)
Umidità (% vol)	8,7 (8,1 - 9,1)	12,5 (12,5 - 12,6)
SO ₂ (mg m ⁻³ _n , gas secco)	non rilevato	367,5 (361,8 - 378,5)
NO _x (mg m ⁻³ _n di NO ₂ , gas secco)	18,6 (13,0 - 22,4)	177,9 (162,2 - 188,7)
CO (mg m ⁻³ _n , gas secco)	0,04 (0,00005 - 0,5)	0,04 (0 - 0,19)

⁽¹⁾ Concentrazioni all'emissione riferite al 15% di O₂

⁽²⁾ Concentrazioni all'emissione riferite al 3% di O₂

I rilevamenti sono stati finalizzati alla determinazione delle concentrazioni di particolato totale (PM_{tot}) e delle frazioni fini di interesse, costituite da PM₁₀ e PM_{2,5}. Per ogni unità sono state eseguite tre serie di campionamenti, con modalità di prelievo ed analisi definite nelle attuali metodiche di riferimento nazionali o in protocolli standardizzati in materia nel contesto europeo ed internazionale. Il campionamento, prolungato per tempi adeguati alla raccolta di volumi di gas idonei alla determinazione dei livelli di polvere attesi dalle singole sorgenti (min. 48 ore per il turbogas, 3 ore per l'unità a vapore), è stato condotto in condizioni di isocinetismo: per il prelievo delle polveri totali è stato utilizzato un adeguato supporto filtrante, mentre la valutazione del PM₁₀ e del PM_{2,5} è stata condotta frazionando le polveri con un impattore inerziale a tre stadi, in grado di separare il materiale in classi sulla base dei relativi diametri aerodinamici (>10 µ, 2,5-10 µ e <2,5 µ). Per ottenere indicazioni supplementari sulla distribuzione granulometrica e sull'origine del materiale emesso, i filtri derivanti da ogni prelievo sono stati sottoposti ad osservazioni in microscopia elettronica a scansione, integrate ad analisi morfologiche e cristallografiche tramite spettrometria in dispersione di energia (EDS) e diffrazione a raggi X, in grado di fornire informazioni qualitative e semiquantitative sulla composizione di singole particelle.

Durante l'indagine sull'unità turbogas, ai prelievi all'emissione è stato affiancato anche un campionamento dell'aria comburente alimentata all'impianto per la valutazione delle presenze di fondo di polveri. I rilevamenti, condotti contemporaneamente a quelli a camino, hanno utilizzato un dispositivo per la determinazione in continuo della distribuzione granulometrica con tecniche ottiche tramite raggio laser (GRIMM Environmental Check 1.107), posizionando lo strumento a monte ed a valle del filtro coalescente collocato in ingresso al gruppo.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.24 of 46
Data	18/11/2004	

Risultati: concentrazione di polveri

I risultati dei rilevamenti condotti sull'unità turbogas, riportati in Tab. 3.1, mostrano presenze emissive di particolato molto contenute, in linea con la natura del combustibile e con l'elevata efficienza di combustione, evidenziata da livelli di CO nei fumi di scarsissima consistenza (Tab. 2.1). I valori medi di concentrazione sono pari a circa a $14 \mu\text{g m}^{-3}$ per le polveri totali, $8,3 \mu\text{g m}^{-3}$ per il PM_{10} e $5,4 \mu\text{g m}^{-3}$ per il $\text{PM}_{2,5}$, con modeste variazioni nei tre prelievi effettuati (Fig. 3.1). Il particolato fine costituisce una frazione relativamente consistente dell'emissione complessiva, con il PM_{10} pari a circa il 60% delle polveri totali ed il $\text{PM}_{2,5}$ al 39% circa (corrispondente al 64% del PM_{10}). Come evidenziato dal confronto riportato in Tab. 3.2 ed illustrato graficamente in Fig. 3.2, i livelli emissivi appaiono altresì sistematicamente inferiori alle presenze rilevate nell'aria in ingresso, collocate su valori medi compresi tra $13 \mu\text{g m}^{-3}$ e $64 \mu\text{g m}^{-3}$ per il PM_{10} e tra $11,5 \mu\text{g m}^{-3}$ e $36,6 \mu\text{g m}^{-3}$ per il $\text{PM}_{2,5}$. Tale acquisizione è in linea con i risultati di indagini condotte su turbine a gas di potenzialità confrontabile con quella oggetto dello studio (Klippel, 2004; Wood, 2004), che evidenziano analoghe riduzioni tra polveri fini presenti nell'aria comburente ed allo scarico (Fig. 3.3). Per ciò che si riferisce all'aria esterna, è da rilevare che i campionamenti a monte ed a valle del filtro coalescente in ingresso al gruppo sono stati eseguiti in periodi temporali non contemporanei, con le concentrazioni di particolato fine che appaiono così influenzate, più che dalla posizione dello strumento rispetto al filtro, dall'effetto delle condizioni meteorologiche durante i prelievi: l'assenza di apprezzabili riduzioni delle polveri da parte dell'unità di filtrazione (Fig. 3.4) è così riconducibile alla concomitanza delle misurazioni a monte del filtro con eventi piovosi persistenti, in grado di ridurre anche sensibilmente le presenze di particolato atmosferico rispetto a quelle a valle del filtro stesso, rilevate in assenza di precipitazioni.

I risultati dell'indagine sull'unità a vapore sono riportati in Tab. 3.3. I rilevamenti, condotti a valle del depolveratore elettrostatico, evidenziano livelli di concentrazione caratterizzati da valori medi pari a $400 \mu\text{g m}^{-3}$ per il particolato totale, circa $320 \mu\text{g m}^{-3}$ per il PM_{10} e $170 \mu\text{g m}^{-3}$ per il $\text{PM}_{2,5}$, con variazioni nei prelievi inferiori al 5% (Fig. 3.5). La frazione di PM_{10} sul totale, pari al 80% circa, appare leggermente più consistente che nel caso del turbogas, mentre del tutto analoga risulta l'incidenza delle polveri più fini, con una frazione di $\text{PM}_{2,5}$ del 43% circa sul totale (54% in termini di PM_{10}). Nell'ambito dei valori attesi per centrali alimentate con combustibili liquidi, le emissioni complessive di polveri risultano molto contenute, in linea con l'efficienza della combustione (evidenziata dalla bassissime concentrazioni di CO, riportate in Tab. 2.1), con la presenza del depolveratore e con la frazione di olio combustibile utilizzato, mantenuta al minimo tecnicamente consentito dall'impianto: ciò nonostante, i livelli di concentrazione di tutte le frazioni granulometriche appaiono superiori di circa un ordine di grandezza rispetto agli analoghi dati rilevati sul turbogas.

Tabella 3.1 - Concentrazioni di polveri rilevate all'emissione dall'unità turbogas (valori riferiti al gas secco, in condizioni normali ed al 15% O_2).

	CONCENTRAZIONE ($\mu\text{g m}^{-3}$)		
	Media	Min	Max
PM_{tot}	13,8	13,7	13,9
PM_{10}	8,3	7,4	9,0
$\text{PM}_{2,5}$	5,4	4,3	6,5
	FRAZIONI IN PESO (%)		
	Media	Min	Max
$\text{PM}_{10}/\text{PM}_{\text{tot}}$	60,1	54,0	64,7
$\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{\text{tot}}$	39,1	31,4	46,7
$\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$	64,2	58,1	72,2

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.25 of 46
Data	18/11/2004	

Tabella 3.2 - Confronto tra le concentrazioni medie rilevate all'emissione e quelle nell'aria comburente.

Concentrazione	CAMPIONAMENTO 1		CAMPIONAMENTO 2		CAMPIONAMENTO 3	
	Emissione	Aria esterna valle filtro ^(*)	Emissione	Aria esterna monte filtro ^(*)	Emissione	Aria esterna monte filtro ^(*)
PM ₁₀ (µg m ⁻³ _n)	9	38,6 (18,7 - 64,3)	8,4	23 (4,6 - 43,2)	7,4	12,8 (5,2 - 23,5)
PM _{2,5} (µg m ⁻³ _n)	6,5	36,6 (16,9 - 63,7)	5,3	18,9 (4 - 42,4)	4,3	11,5 (5 - 23,1)

^(*) Tra parentesi l'intervallo minimo-massimo

Tabella 3.3 - Concentrazioni di polveri rilevate all'emissione dall'unità a vapore (valori riferiti al gas secco, in condizioni normali ed al 15% O₂).

	CONCENTRAZIONE (µg m ⁻³ _n)		
	Media	Min	Max
PM _{tot}	402,3	373,1	431,5
PM ₁₀	317,3	310,9	323,6
PM _{2,5}	170,3	169,5	171,0
	FRAZIONI IN PESO (%)		
	Media	Min	Max
PM ₁₀ /PM _{tot}	79,2	75,0	83,3
PM _{2,5} /PM _{tot}	42,5	39,3	45,8
PM _{2,5} /PM ₁₀	53,7	52,4	55,0

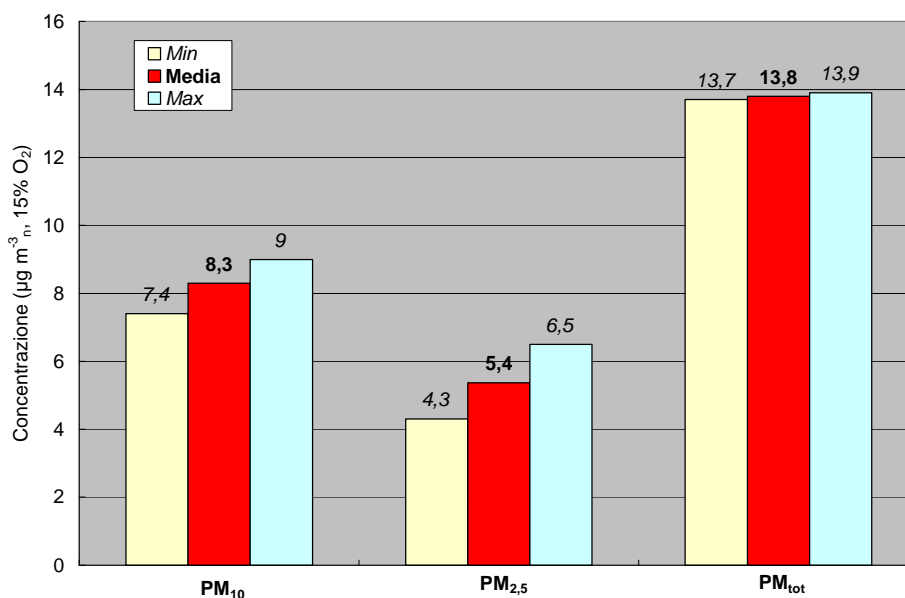
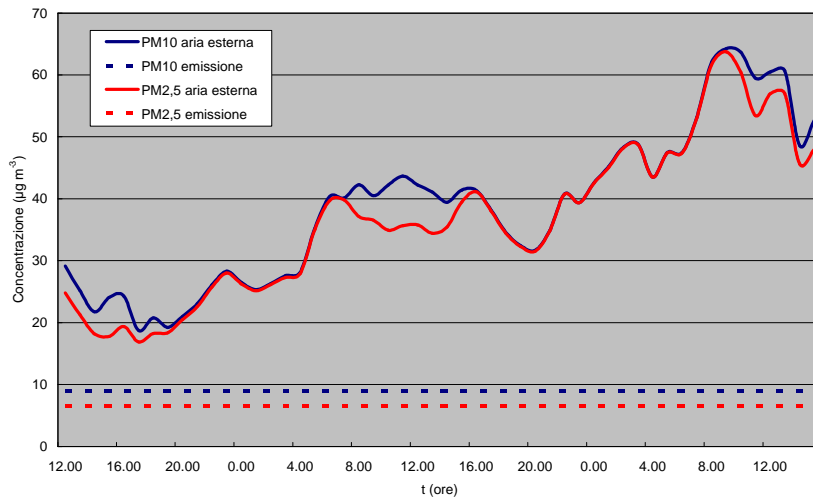
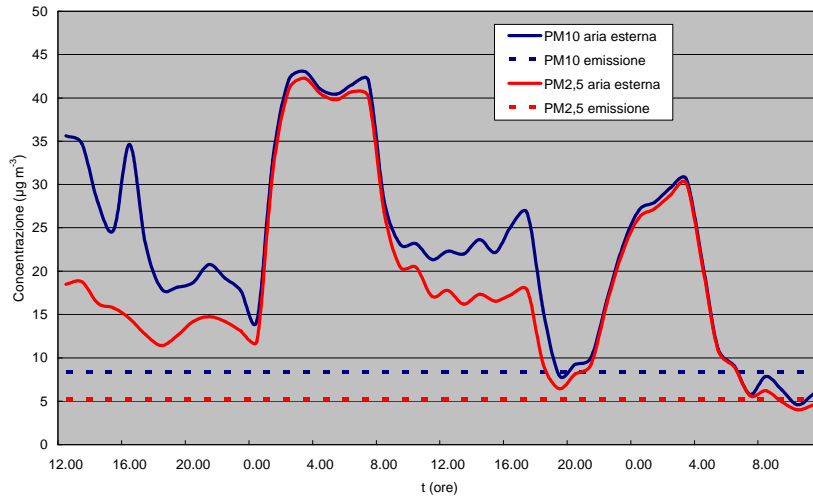


Figura 3.1 - Concentrazioni di particolato rilevate all'emissione dell'unità turbogas.

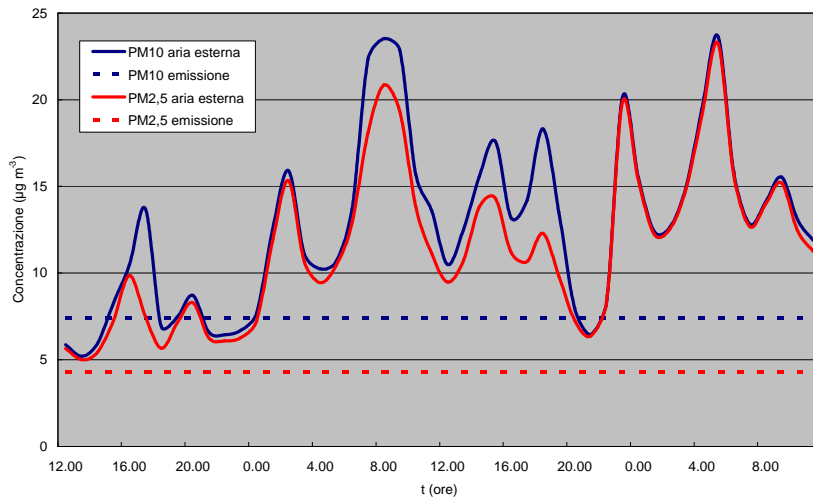
Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.26 of 46
Data	18/11/2004	



Campionamento 1 (aria esterna a valle filtro)



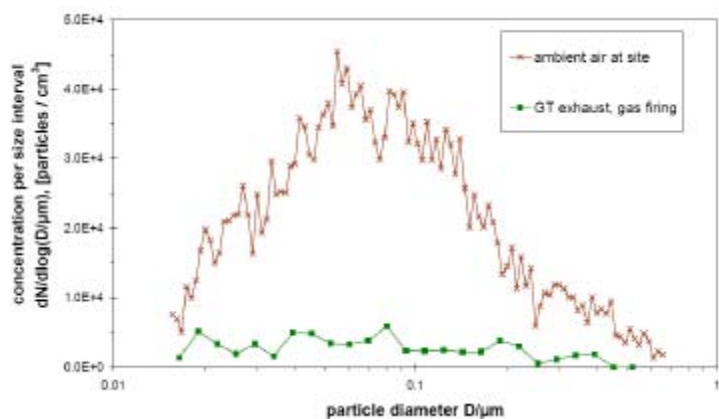
Campionamento 2 (aria esterna a monte del filtro)



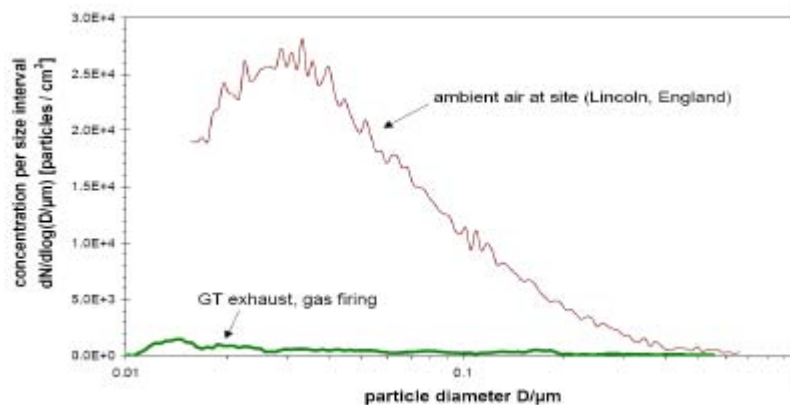
Campionamento 3 (aria esterna a monte del filtro)

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.27 of 46
Data	18/11/2004	

Figura 3.2 - Confronto tra le concentrazioni di particolato fine all'emissione e quelle presenti nell'aria esterna nei diversi campionamenti effettuati.



Potenza elettrica = 260 MW



Potenza elettrica = 8 MW

Figura 3.3 - Confronto tra le concentrazioni di particolato rilevate all'emissione e nell'aria in ingresso per unità turbogas di diversa potenzialità (Klippel, 2004).

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.28 of 46
Data	18/11/2004	

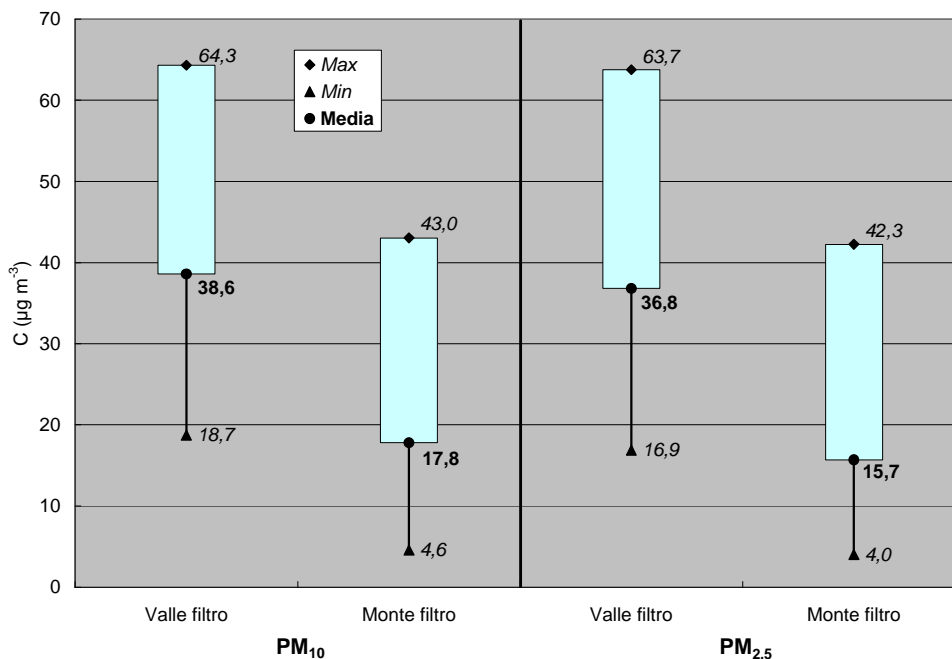


Figura 3.4 - Concentrazioni di PM₁₀ e PM_{2,5} nell'aria esterna rilevate a monte ed a valle del filtro coalescente in ingresso all'unità turbogas.

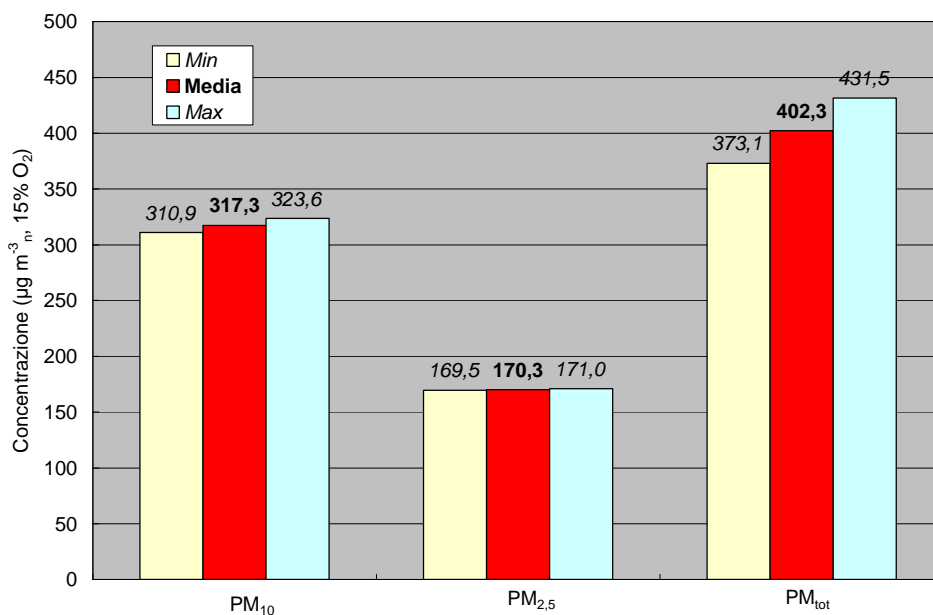


Figura 3.5 - Concentrazioni di particolato rilevate all'emissione dell'unità a vapore olio/gas.

Fattori di emissione

I fattori di emissione, definiti in termini della produzione degli inquinanti di interesse riferita all'energia termica sviluppata in camera di combustione (g GJ^{-1}) o all'elettricità generata dall'impianto (g MWh^{-1}), costituiscono il parametro di base per valutare in termini comparativi le

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.29 of 46
Data	18/11/2004	

prestazioni ambientali delle attività emissive. I valori ricavati nell'indagine sono sintetizzati nelle Tab. 3.4 e 3.5, rispettivamente per l'unità turbogas e per quella convenzionale a vapore. I livelli emissivi del turbogas, in linea con le corrispondenti concentrazioni, risultano molto modesti, con valori mediamente pari a $0,004 \text{ g GJ}^{-1}$ per il $\text{PM}_{2,5}$, $0,006 \text{ g GJ}^{-1}$ per il PM_{10} e circa $0,01 \text{ g GJ}^{-1}$ per le polveri totali che, tradotti in termini dell'energia elettrica prodotta, si collocano intorno a $0,03 \text{ g MWh}^{-1}$, $0,05 \text{ g MWh}^{-1}$ e $0,08 \text{ g MWh}^{-1}$, rispettivamente: i dati sono più contenuti rispetto ai risultati dell'indagine condotti sulla centrale di Porto Corsini, le cui emissioni appaiono tuttavia influenzate dalla presenza nell'aria comburente di particolato fine di origine naturale derivante dalla localizzazione dell'impianto in zona costiera. Rispetto ai valori reperibili nelle banche dati di riferimento per analoghe tipologie di sorgenti, limitati al solo PM_{10} e sintetizzati in Tab. 3.6, il confronto evidenzia altresì livelli emissivi largamente inferiori (Fig. 3.6), con differenze riconducibili, oltre che alle attuali carenze informative delle basi di dati sul complesso dei fattori di emissione del particolato fine, anche alle tecnologie delle macchine indagate ed alle modalità di campionamento ed analisi. A tale ultimo proposito, va segnalata la distinzione recentemente introdotta dall'EPA statunitense nella quantificazione delle emissioni di PM_{10} tra materiale filtrabile e condensabile: il primo costituisce le polveri primarie, presenti in quanto tali all'emissione e quantificate direttamente per frazionamento dimensionale e gravimetria (US-EPA, 2000b) con un protocollo analogo a quello utilizzato nell'indagine, mentre il secondo, determinato sulla condensa formata durante il prelievo del gas a valle della filtrazione (US-EPA, 2000c), è costituito dalle sostanze solide che si formano in tali condizioni e che vengono ritenute indicative del particolato secondario atmosferico.

Estendendo ai risultati ottenuti nell'indagine i rapporti tra le due frazioni ricavabili dai dati EPA, si ottengono in ogni caso fattori di emissione di PM_{10} totale (filtrabile + condensabile) collocati su livelli ancora decisamente inferiori rispetto a quelli indicati dall'EPA stessa (Tab. 3.6).

Per l'unità convenzionale a vapore i livelli rilevati, seppur molto contenuti, risultano superiori di circa un ordine di grandezza rispetto a quelli del turbogas, con valori medi pari a circa $0,1 \text{ g GJ}^{-1}$ per il $\text{PM}_{2,5}$, $0,25 \text{ g GJ}^{-1}$ per il PM_{10} e $0,3 \text{ g GJ}^{-1}$ per il complesso del particolato; il minor rendimento di conversione in elettricità rende la differenza ancor più significativa in termini dell'energia prodotta, con emissioni collocate intorno a $1,4 \text{ g MWh}^{-1}$, $2,6 \text{ g MWh}^{-1}$ e $3,3 \text{ g MWh}^{-1}$, rispettivamente. Il confronto con i valori calcolati dai riferimenti reperibili per sorgenti analoghe (centrali convenzionali a vapore ad alimentazione olio/gas in rapporto 25%/75%), sintetizzato in Tab. 3.7, evidenzia anche in questo caso emissioni sistematicamente inferiori, con differenze leggermente meno consistenti rispetto a quelle dell'unità turbogas (Fig. 3.6) e sostanzialmente attribuibili alla presenza dell'unità di depolverazione: i valori di riferimento si riferiscono infatti ad emissioni non trattate. Considerazioni comparative del tutto analoghe valgono per la frazione condensabile e per quella totale, ricavate sulla base dei dati EPA.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag. 30 of 46
Data	18/11/2004	

Tabella 3.4 - Fattori di emissione del particolato rilevati per l'unità turbogas.

	FATTORE DI EMISSIONE (g GJ ⁻¹)		
	Media	Min	Max
PM _{tot}	0,011	0,010	0,011
PM ₁₀	0,006	0,006	0,007
PM _{2,5}	0,004	0,003	0,005
	FATTORE DI EMISSIONE (g MWh ⁻¹)		
	Media	Min	Max
PM _{tot}	0,076	0,075	0,077
PM ₁₀	0,046	0,041	0,050
PM _{2,5}	0,030	0,024	0,036

Tabella 3.5 - Fattori di emissione del particolato rilevati per l'unità a vapore.

	FATTORE DI EMISSIONE (g GJ ⁻¹)		
	Media	Min	Max
PM _{tot}	0,32	0,29	0,34
PM ₁₀	0,25	0,25	0,26
PM _{2,5}	0,13	0,13	0,13
	FATTORE DI EMISSIONE (g MWh ⁻¹)		
	Media	Min	Max
PM _{tot}	3,3	3,0	3,5
PM ₁₀	2,6	2,5	2,6
PM _{2,5}	1,4	1,4	1,4

Tabella 3.6 - Fattori di emissione di PM₁₀ per unità turbogas reperibili nel contesto informativo di riferimento e valori rilevati nell'indagine.

RIFERIMENTO	FATTORE DI EMISSIONE (g GJ ⁻¹)
Centrale italiana	0,04 - 0,08
NAEI (Gran Bretagna, 2004)	1,5
TNO-CEPMEIP (UE, 2004)	0,1 - 0,2
AP-42 (US EPA, 2000)	
filtrabile	0,8
condensabile	2,4
Totale	3,2
Presente indagine	0,006 - 0,007
Presente indagine	
filtrabile (rilevato)	0,006 - 0,007
condensabile (da EPA)	0,018 - 0,021
totale (filtr. + condens.)	0,024 - 0,028

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.31 of 46
Data	18/11/2004	

Tabella 3.7 - Fattori di emissione di particolato per unità convenzionali a vapore reperibili nel contesto informativo di riferimento e valori rilevati nell'indagine.

RIFERIMENTO	FATTORE DI EMISSIONE (g GJ ⁻¹)		
	Gas	Olio combustibile	Olio combustibile/gas = 25/75
NAEI (Gran Bretagna, 2004)	1,5	7,9	6,3
TNO-CEPMEIP (UE, 2004)	0,1 - 0,2	3 - 200	2,3 - 150
AP-42 (US EPA, 2000)			
Filtrabile	0,8	5,7 - 28,7	4,5 - 21,7
Condensabile	2,4	3,7 - 4,3	3,4 - 3,8
Totale	3,2	9,4 - 33	7,9 - 25,5
Presente indagine	-	-	0,25 - 0,26
Presente indagine			
filtrabile (rilevato)	-	-	0,25 - 0,26
condensabile (da EPA)	-	-	0,05 - 0,20
totale (filtr. + condens.)	-	-	0,30 - 0,46

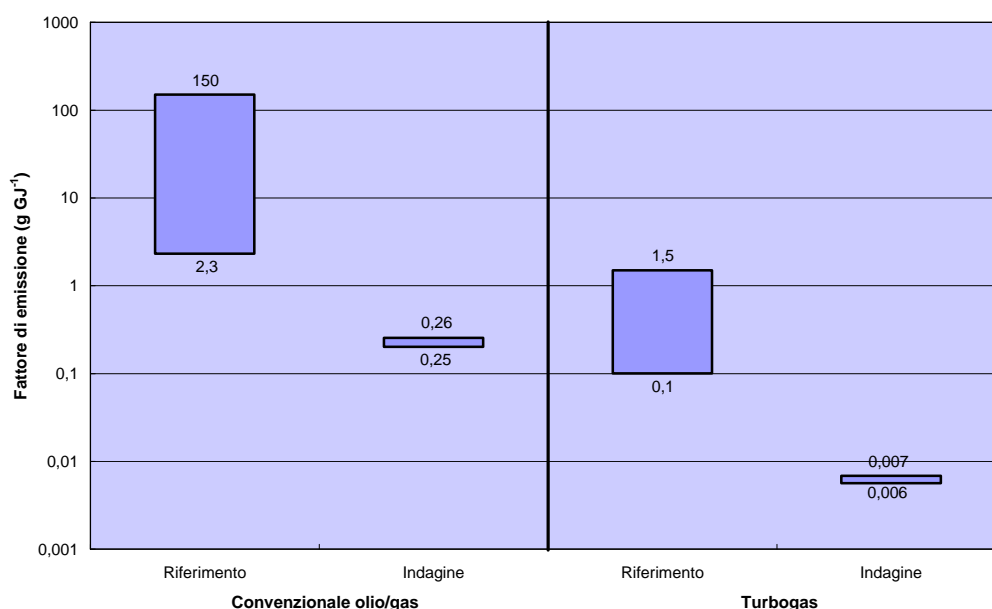


Figura 3.6 - Confronto tra fattori di emissione rilevati nell'indagine ed intervallo dei valori di riferimento reperibili nel contesto informativo internazionale.

Distribuzioni granulometriche e morfologia delle polveri

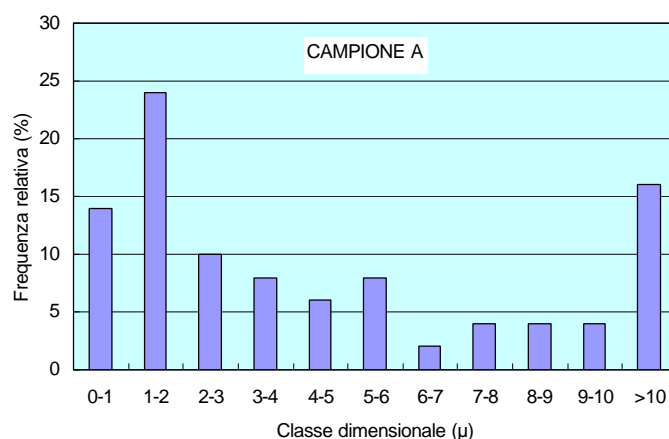
L'integrazione delle misure di concentrazione con l'indagine in microscopia elettronica ha consentito l'acquisizione di informazioni supplementari sulle caratteristiche dimensionali e morfologiche delle polveri emesse. L'analisi della granulometria è stata condotta sulle distribuzioni ricavate dall'esame di alcuni campioni significativi prelevati da entrambe le unità, espresse in termini delle frequenze relative del numero di particelle per classi dimensionali rappresentative, identificate tramite l'osservazione ed il conteggio al microscopio di una frazione del filtro utilizzato nel campionamento del particolato totale. Le distribuzioni corrispondenti all'unità turbogas, sintetizzate graficamente negli istogrammi di Fig. 3.7, mostrano un andamento generale con le presenze di maggior

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag. 32 of 46
Data	18/11/2004	

consistenza costituite dalle granulometrie più fini (diametro $< 3 \mu$) che, nel campione B, risultano caratterizzate da una frazione piuttosto rilevante (66% sul complesso delle particelle individuate dal conteggio). L'analisi conferma le acquisizioni di analoghe indagini condotte con tecniche di misurazione in continuo, in grado di rilevare particelle con dimensioni sino a $0,01 \mu$ e già introdotte in precedenza (Fig. 3.3), che evidenziano emissioni largamente dominate da materiale inferiore a $0,1 \mu$. Oltre alla frazione prevalente delle particelle più fini, le distribuzioni appaiono altresì caratterizzate dalla presenza di due ulteriori mode, collocate nell'intervallo delle frazioni intermedie ($5 \mu - 6 \mu$) e grossolane ($>7 \mu$). Per ottenere un'indicazione più precisa dell'effettiva natura plurimodale che caratterizza tipicamente le distribuzioni granulometriche in numero del materiale particolato (Friedlander S., 1977), è prassi comune analizzare le distribuzioni dimensionali in termini dell'andamento, in scala doppio logaritmica, del parametro $dN/d\log D$ ricavato dalle acquisizioni sperimentali in funzione del diametro D rappresentativo di ogni classe. Tali andamenti, riportati graficamente in Fig. 3.8, confermano effettivamente la presenza di tre distinte mode, più chiaramente evidenziate nel campione B, e collocate rispettivamente negli intervalli compresi fra $<3,5 \mu$ (moda fine), $3,5 \mu - 6,5 \mu$ (moda intermedia) e $>6,5 \mu$ (moda grossolana). In termini percentuali (Tab. 3.8) la moda fine costituisce la frazione più rilevante all'interno del campione (48% del campione A e 66% del campione B) con quelle intermedia e grossolana sostanzialmente equivalenti (16%-24% e 18%-28%, rispettivamente).

Tabella 3.8 - Parametri descrittivi delle distribuzioni lognormali ricavate dai dati per l'unità turbogas e frazioni in peso delle singole mode individuate sul totale delle distribuzioni.

DISTRIBUZIONI	CAMPIONE A			CAMPIONE B		
	$M_g (\mu)$	S_g	Fraz. peso (%)	$M_g (\mu)$	S_g	Fraz. peso (%)
Complessiva	3,4	2,8	-	2,6	2,5	-
Moda fine	1,4	1,5	48	1,6	1,4	66
Moda intermedia	3,8	1,4	16	5,1	1,2	18
Moda grossolana	11,7	1,5	24	8,1	1,2	28



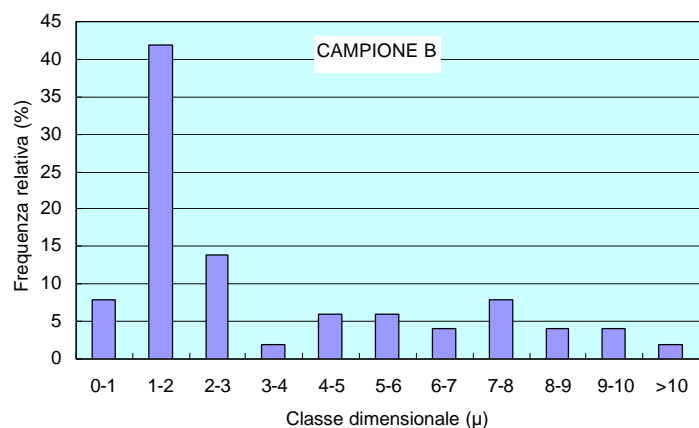


Figura 3.7 - Distribuzione delle frequenze relative del numero di particelle per l'unità turbogas.

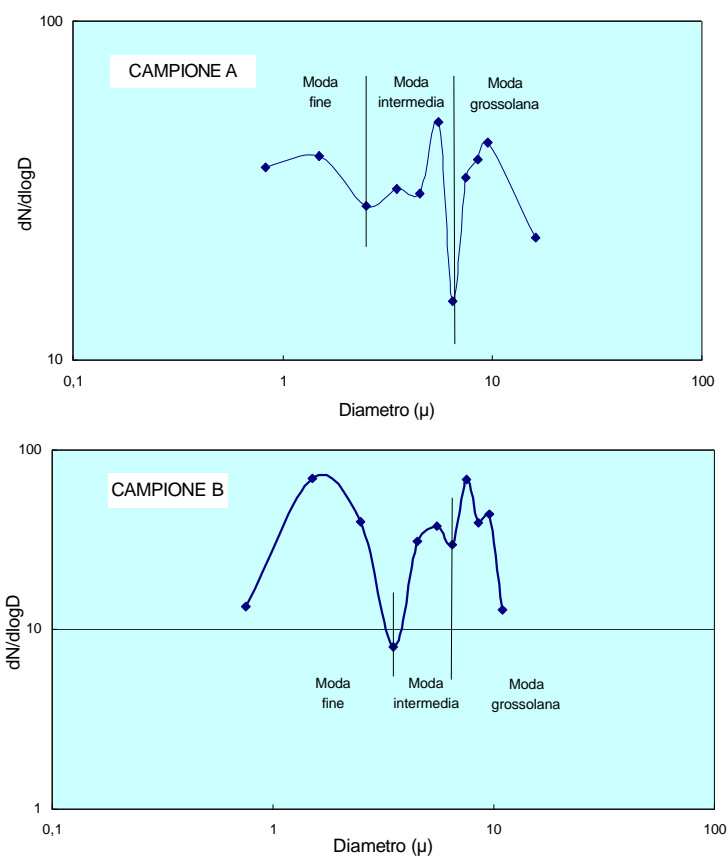


Figura 3.8 - Distribuzione dimensionale del numero di particelle per l'unità turbogas.

L'analisi della granulometria è stata completata con una verifica sulla possibilità di descrivere i dati sperimentali con una distribuzione statistica lognormale, usualmente utilizzata a tale scopo (Friedlander S., 1977). La descrizione è stata esplorata tanto sulle distribuzioni complessive che sulle singole mode individuate in precedenza: i parametri caratteristici di ognuna delle distribuzioni individuate, riassunti in Tabella 3.8, indicano media geometrica compresa tra 1,4 e 1,6 μ per la moda più fine, fra 3,8 e 5,1 μ per quella intermedia, tra 8,1 e 11,7 μ per le particelle più grossolane, in linea con le mode caratteristiche dei due campioni già individuate in precedenza. I risultati ottenuti

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.34 of 46
Data	18/11/2004	

sono illustrati nelle Figg. 3.9 e 3.10, rispettivamente per il campione A e B che riportano, su carta di probabilità lognormale, i dati sperimentali e la distribuzione che li descrive, ricavata dai dati stessi. A conferma della natura plurimodale dell'emissione, l'analisi evidenzia migliori capacità descrittive delle distribuzioni ipotizzate nei confronti dei dati disaggregati piuttosto che sulla distribuzione dimensionale complessiva, con un'ottima approssimazione nel caso del campione B.

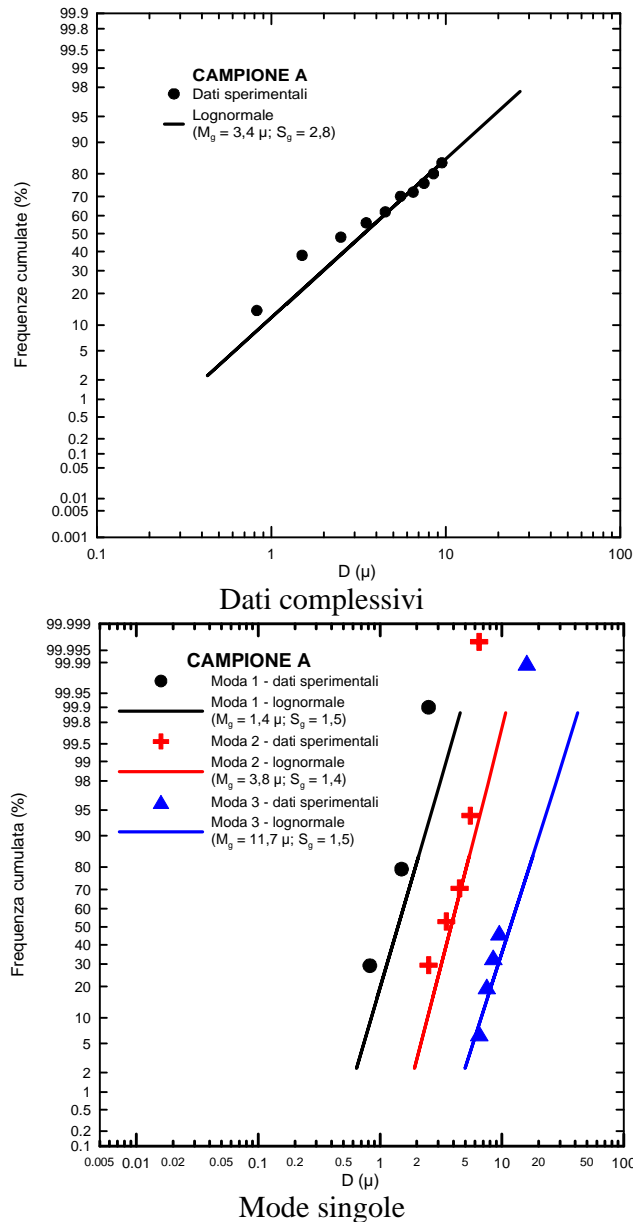


Figura 3.9 - Distribuzione dimensionale su carta di probabilità lognormale dell'emissione dall'unità turbogas - campione A.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.35 of 46
Data	18/11/2004	

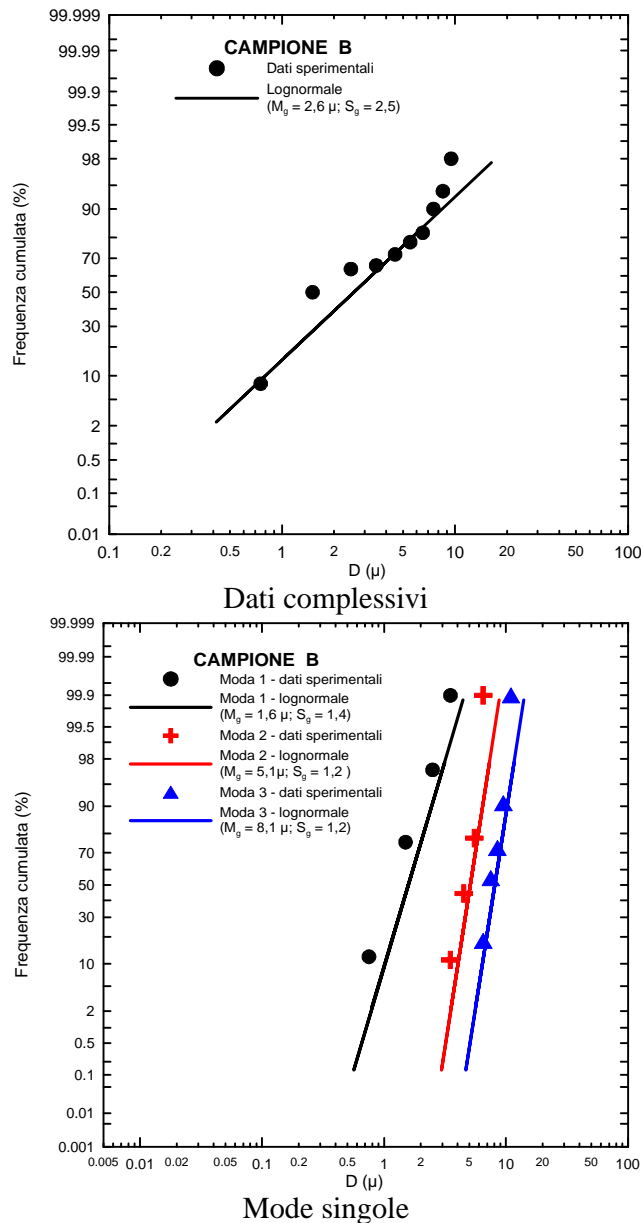


Figura 3.10 - Distribuzione dimensionale su carta di probabilità lognormale dell'emissione dall'unità turbogas - campione B.

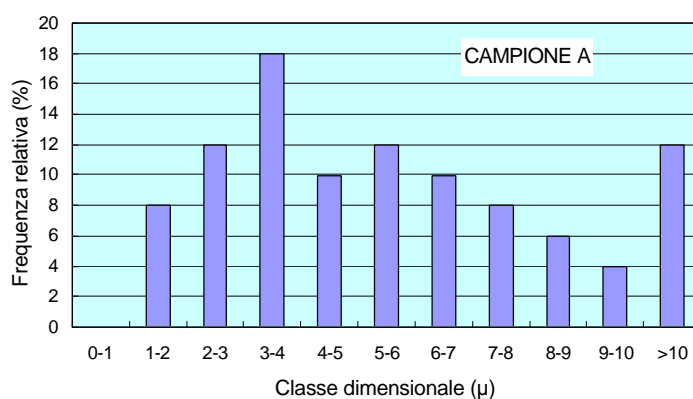
L'analoga analisi per la centrale convenzionale a vapore ha utilizzato due campioni, la cui distribuzione in termini delle frequenze relative di ogni classe dimensionale ricavate dall'analisi in microscopia è riportata in Fig. 3.11. Rispetto all'unità turbogas le distribuzioni risultano relativamente più uniformi: entrambi i campioni appaiono di natura bimodale, con le mode più chiaramente identificabili nel campione B e collocate in corrispondenza di particelle fini ($1\ \mu - 2\ \mu$) e grossolane ($8\ \mu - 9\ \mu$), e con un'incidenza di polveri grossolane ($>10\ \mu$) abbastanza consistente (30% circa). Il campione A risulta viceversa più omogeneo, con una moda ben definita nell'intervallo $3\ \mu - 4\ \mu$ ed una seconda, non altrettanto evidente, tra $5\ \mu - 6\ \mu$. L'usuale rappresentazione delle distribuzioni in termini dell'andamento, in scala doppio logaritmica, del parametro $dN/d\log D$ in funzione del diametro

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.36 of 46
Data	18/11/2004	

D rappresentativo di ogni classe (Fig. 3.12) conferma in linea di massima tali osservazioni: la bimodalità della distribuzione risulta così più chiaramente evidenziata nel campione B, con il limite tra la moda fine e quella più grossolana collocato intorno ai 6-7 μm e con i corrispondenti valori compresi tra 1 μ - 3,5 μ e 8 μ - 9 μ : la moda fine appare leggermente preponderante, con una frazione in peso pari al 54% circa della distribuzione totale (Tab. 3.19). Per il campione A il limite tra le due mode è meno evidente, compreso tra 4 μ - 5 μ , con la moda fine collocata nell'intervallo 3 μ - 4 μ e quella più grossolana tra 5 μ - 7 μ e con una corrispondente frazione ponderale pressoché equivalente a quella del campione B (48% fine, 52 % grossolana). Le possibilità di descrizione dei dati sperimentali con una distribuzione lognormale, analizzata in modo analogo rispetto al turbogas tanto sulle distribuzioni complessive che sulle singole mode individuate, è sintetizzata nelle usuali carte di probabilità riportate in Figg. 3.13 - 3.14. I parametri caratteristici delle distribuzioni individuate (Tab. 3.9) indicano, per le distribuzioni complessive, medie geometriche collocate intorno ai 5 μ , mentre per le singole mode valori compresi negli intervalli 2 μ - 3 μ e 8 μ - 12 μ , rispettivamente per quella fine e quella più grossolana. In linea con le precedenti osservazioni, per il campione A l'analisi dell'adattabilità della lognormale mostra buone possibilità descrittive anche per la distribuzione complessiva (Fig. 3.13), mentre per il campione B evidenzia una miglior descrizione nei confronti delle singole mode (fig. 3.14), con un'approssimazione che appare leggermente inferiore rispetto a quella ottenuta per il turbogas.

Tabella 3.9 - Parametri descrittivi delle distribuzioni lognormali ricavate dai dati per la centrale a vapore e frazioni in peso delle singole mode individuate sul totale delle distribuzioni.

DISTRIBUZIONI	CAMPIONE A			CAMPIONE B		
	M_g (μ)	S_g	Fraz. peso (%)	M_g (μ)	S_g	Fraz. peso (%)
Complessiva	5,31	2,10	-	4,6	2,8	-
Moda fine	2,94	1,44	52	2,0	2,1	54
Moda grossolana	8,16	1,76	48	11,9	1,5	46



Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag. 37 of 46
Data	18/11/2004	

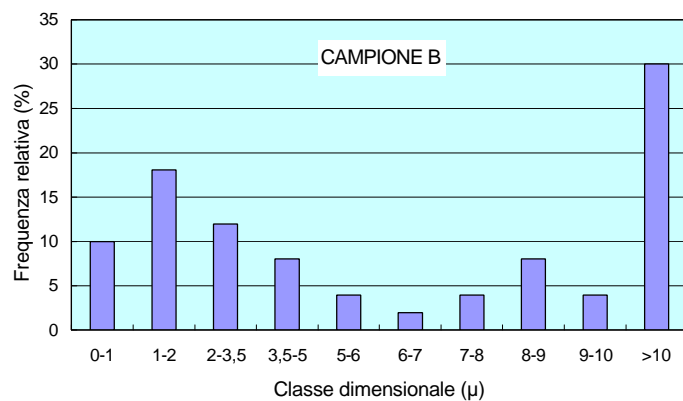


Figura 3.11 - Distribuzione delle frequenze relative del numero di particelle - centrale a vapore.

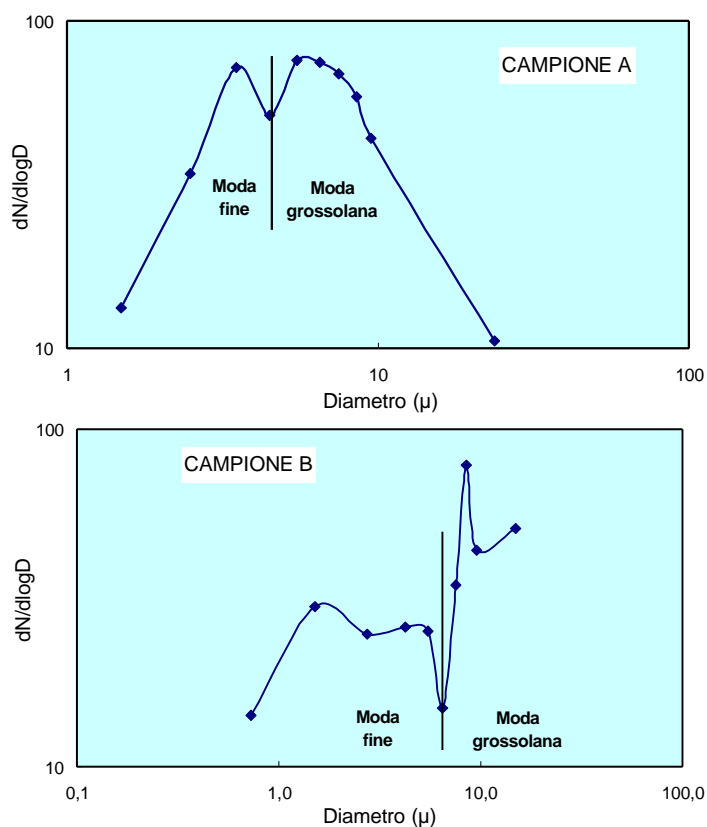
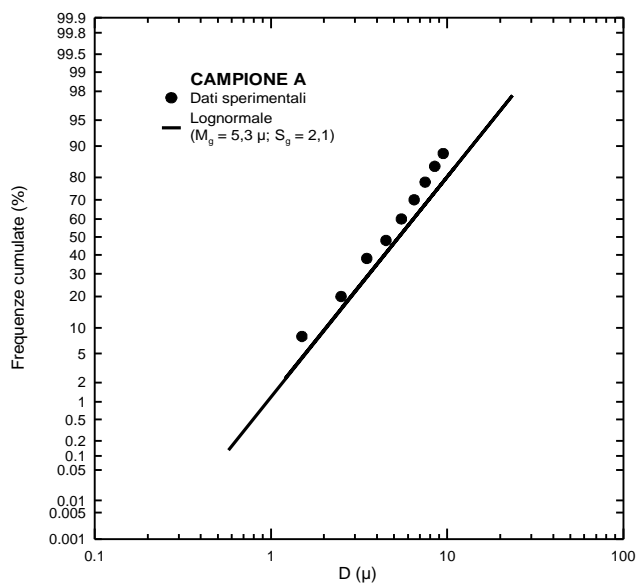
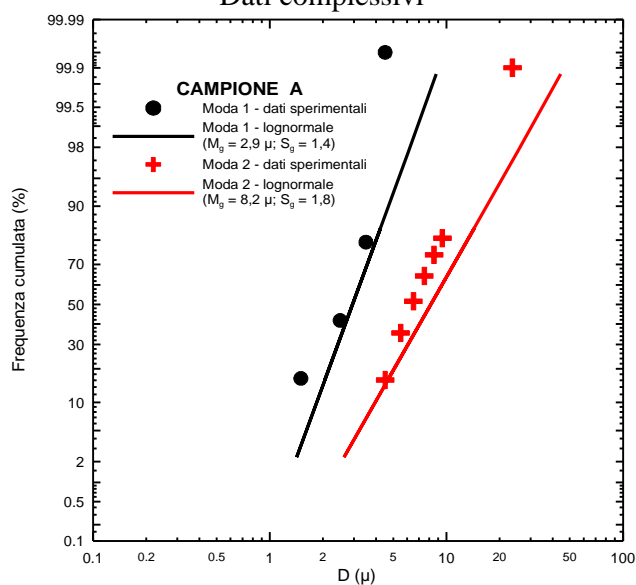


Figura 3.12 - Distribuzione dimensionale del numero di particelle per la centrale a vapore.



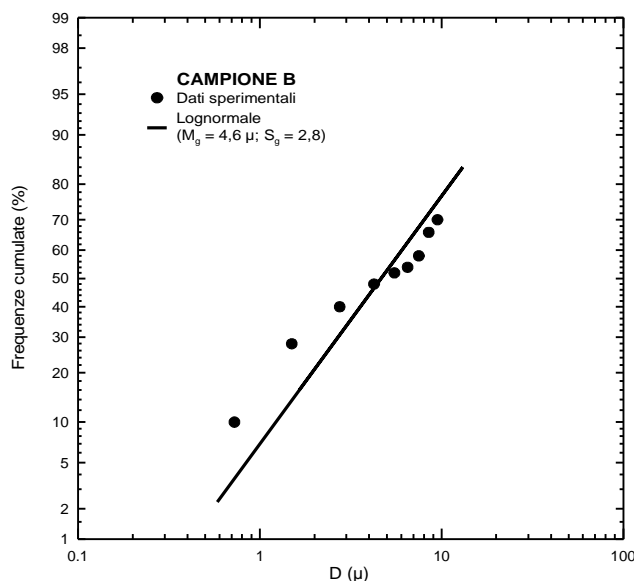
Dati complessivi



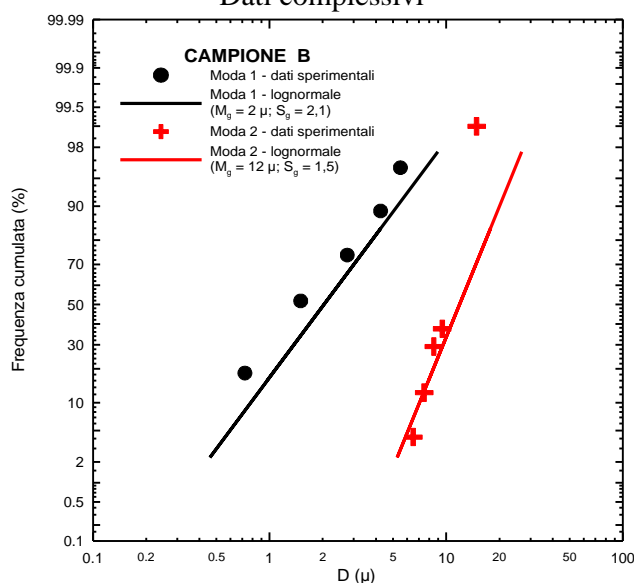
Mode singole

Figura 3.13 - Distribuzione dimensionale su carta di probabilità lognormale dell'emissione dalla centrale a vapore - campione A.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag. 39 of 46
Data	18/11/2004	



Dati complessivi



Mode singole

Figura 3.14 - Distribuzione dimensionale su carta di probabilità lognormale dell'emissione dalla centrale a vapore - campione B.

Le caratteristiche morfologiche e di composizione del particolato, analizzate su immagini di particelle rappresentative dei prelievi, evidenziano la presenza di due tipologie comuni ad entrambe le sorgenti (Fig. 3.15), costituite da materiale di probabile origine crostale (feldspati, argille e calcite) e da particelle contenenti Fe metallico e/o ossidi di ferro con tracce di Cr e Te, riconducibili all'usura di elementi impiantistici. Nelle emissioni dalla centrale a vapore sono stati inoltre identificati ammassi di cenosfere spugnose (silico-alluminati con tracce di V, S e Ni), tipicamente prodotte dalla combustione dell'olio combustibile (Fig. 3.16) e riscontrate soprattutto nella frazione dimensionale compresa tra 2,5 μ e 10 μ . In nessun caso l'osservazione ha riscontrato presenze di particelle carboniose, indice di un'ottima efficienza di combustione per entrambe le unità indagate.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.40 of 46
Data	18/11/2004	

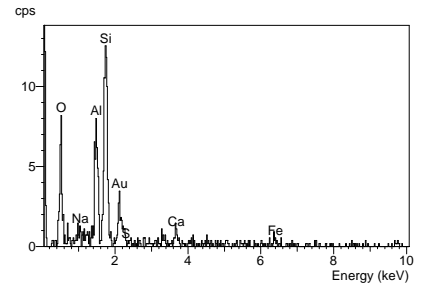
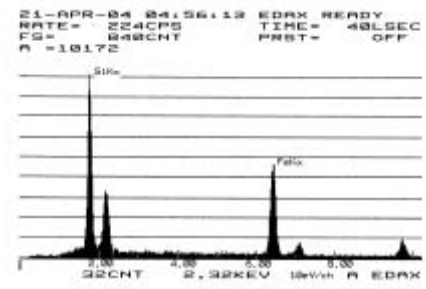
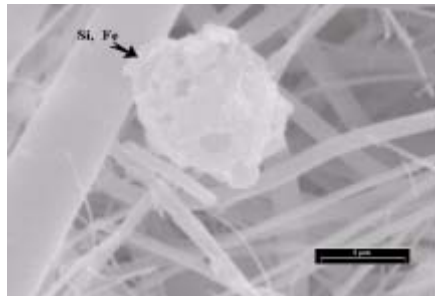
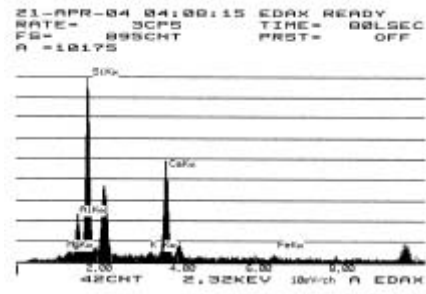
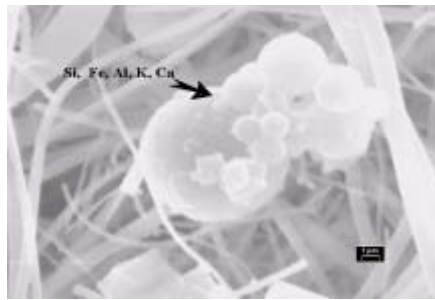


Figura 3.15 - Immagini di particelle di probabile origine crostale riscontrate all'emissione di entrambe le unità e presenze qualitative dei principali elementi identificati tramite tecnica SEM-EDS.

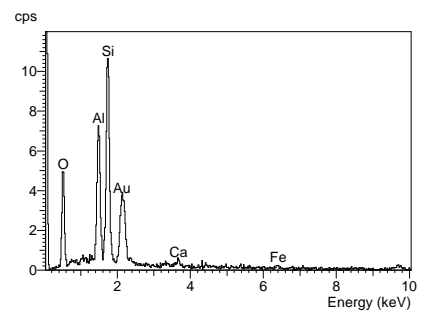
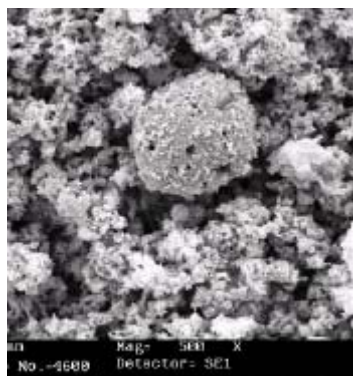


Figura 3.16 - Immagine di cenosfere riscontrate all'emissione dall'unità a vapore e presenze qualitative dei principali elementi identificati tramite tecnica SEM-EDS.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.41 of 46
Data	18/11/2004	

Presenze emissive di altri inquinanti in traccia.

Contemporaneamente ai prelievi finalizzati all'analisi del particolato, il flusso emissivo è stato anche sottoposto a campionamenti per la quantificazione di aldeidi ed idrocarburi policiclici aromatici (IPA), inquinanti organici in traccia di natura tossica che costituiscono presenze tipiche nelle emissioni da talune attività di combustione. I risultati ottenuti, riportati in dettaglio nell'Allegato 1, ne evidenziano presenze del tutto trascurabili, con livelli sistematicamente inferiori o molto prossimi ai limiti di rilevabilità delle metodiche analitiche utilizzate, ad ulteriore conferma dell'elevata qualità della combustione in entrambe le unità indagate. In un contesto generale così caratterizzato l'unico dato di un certo rilievo è relativo alla formaldeide dall'unità turbogas che, in occasione di uno dei tre prelievi, risulta pari a circa 2 mg m^{-3} , con un valore mediamente superiore rispetto ai livelli reperibili per sorgenti simili.

Considerazioni comparative e conclusioni

L'indagine ha consentito l'acquisizione dei principali elementi per inquadrare e caratterizzare le emissioni di particolato fine dalle tecnologie di produzione di energia elettrica largamente più diffuse nel parco impiantistico nazionale di potenzialità medio-alta, ancora relativamente poco documentate nella letteratura e nelle banche dati di riferimento. Lo studio ha esaminato, adottando tecniche di campionamento ed analisi appropriate alla quantificazione dei livelli di polveri attesi dalle sorgenti considerate, le emissioni delle classi dimensionali di maggior interesse nell'attuale contesto normativo, confrontandole con le presenze nell'aria comburente ed approfondendo la caratterizzazione delle distribuzioni granulometriche. I risultati ottenuti sono sintetizzabili, in termini comparativi, nei punti seguenti:

- le concentrazioni di polveri all'emissione dall'unità turbogas si collocano, per tutte le classi dimensionali esaminate (PM_{tot} , PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), su livelli inferiori di circa un ordine di grandezza rispetto agli analoghi valori rilevati nella centrale a vapore (Fig. 4.1), nonostante un regime di esercizio ed una configurazione impiantistica di quest'ultima particolarmente favorevoli alla minimizzazione dell'emissione stessa (minimo rapporto olio/gas in alimentazione, presenza di interventi spinti di depolverazione). Le concentrazioni di polveri del turbogas risultano inoltre inferiori a quelle dell'aria ambiente alimentata come comburente: tale effetto è presumibilmente da ricondursi, oltre agli effetti della filtrazione, all'ossidazione, in fase di combustione, delle componenti carboniose che costituiscono tipicamente una rilevante frazione delle polveri atmosferiche più fini, senza che ciò determini apprezzabili contributi emissivi propri;
- il confronto emissivo tra turbogas e centrale vapore permane sostanzialmente immutato anche considerando il particolato condensabile, stimato applicando ai risultati ottenuti nell'indagine il rapporto con quello filtrabile ricavabile dai dati di riferimento attualmente disponibili;
- il particolato fine costituisce la frazione prevalente dell'emissione complessiva per entrambe le sorgenti esaminate (Fig. 4.2): il turbogas presenta rapporti $\text{PM}_{10}/\text{PM}_{\text{tot}}$ e $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{\text{tot}}$ pari in media a circa 60% e 39%, rispettivamente, mentre per l'unità a vapore gli analoghi valori appaiono leggermente più consistenti, e collocati intorno all'80% ed al 43%, rispettivamente;
- in linea con le differenze osservate in termini di concentrazioni, i fattori di emissione ricavati per la centrale ad alimentazione mista olio/gas risultano collocati su livelli di un altro ordine di grandezza rispetto a quelli del turbogas (Fig. 4.3). Il divario emissivo appare ancor più consistente in termini di emissione riferita all'energia elettrica prodotta (Fig. 4.4), come conseguenza diretta del maggior rendimento che caratterizza i cicli combinati a gas;

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.42 of 46
Data	18/11/2004	

- le distribuzioni granulometriche ricavate dall'osservazione in microscopia appaiono generalmente plurimodali. L'emissione dal turbogas risulta caratterizzata da una prevalenza di particelle nelle classi dimensionali inferiori a $3 \mu\text{m}$ e dalla presenza di tre distinte mode, mentre quella dall'unità a vapore, in linea con l'effetto del dispositivo di depolverazione, si dimostra relativamente più uniforme, con una leggera prevalenza delle classi superiori a $3 \mu\text{m}$ e con una natura apparentemente bimodale;
- l'analisi morfologica non ha identificato in nessun caso la presenza di particelle carboniose, a conferma dell'elevata qualità della combustione in entrambe le unità. Le principali classi di particelle individuate appaiono del tutto analoghe per le due sorgenti, con tipologie attribuibili a materiale di origine crostale (silico-alluminati, carbonati) ed all'usura ed erosione di componenti impiantistiche (ferro ed ossidi di ferro con tracce di cromo). Nell'emissione dalla centrale convenzionale sono altresì presenti i tipici ammassi di cenosfere spugnose prodotte dalla combustione dell'olio combustibile;
- le presenze emissive di inquinanti organici tossici in traccia di interesse per attività di combustione (IPA, aldeidi) appaiono del tutto trascurabili, in linea con l'elevata efficienza di combustione già evidenziata. L'unica eccezione al proposito è rappresentata da uno dei rilevamenti di formaldeide dal turbogas, collocato su livelli superiori a quelli attesi per sorgenti simili ma da ritenersi, alla luce dei risultati ottenuti negli altri due prelievi, probabilmente occasionale.

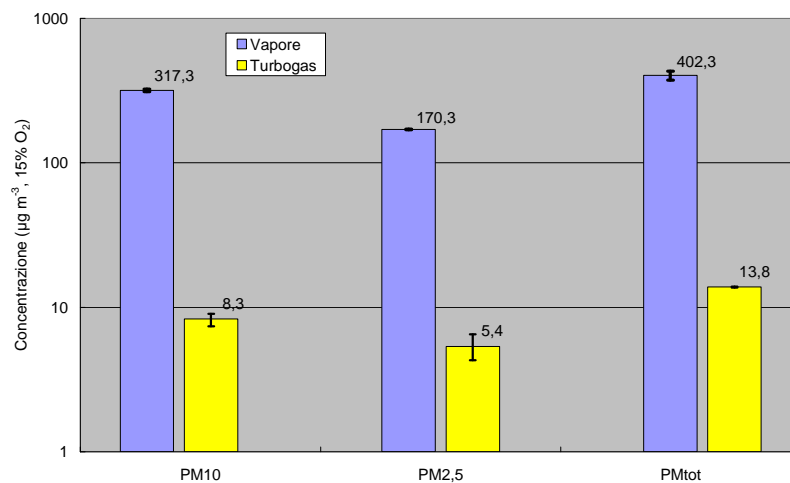


Figura 4.1 - Concentrazioni di particolato all'emissione rilevati nell'indagine.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.43 of 46
Data	18/11/2004	

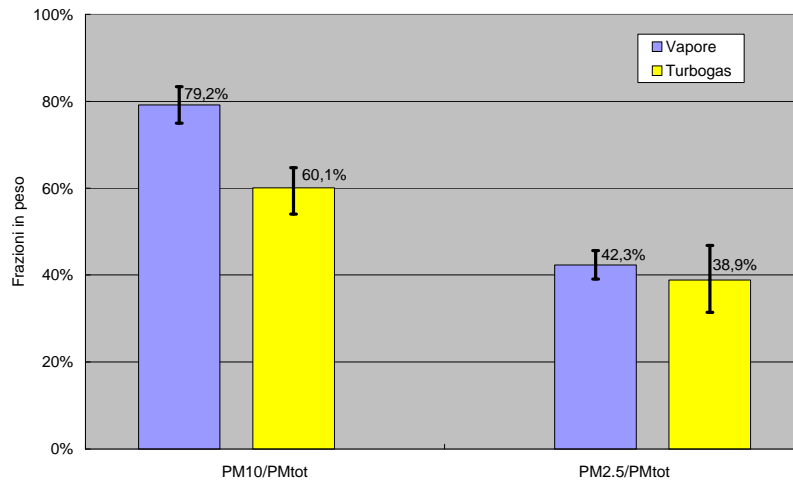


Figura 4.2 - Frazioni ponderali PM_{10}/PM_{tot} e $PM_{2,5}/PM_{10}$ rilevate nell'indagine.

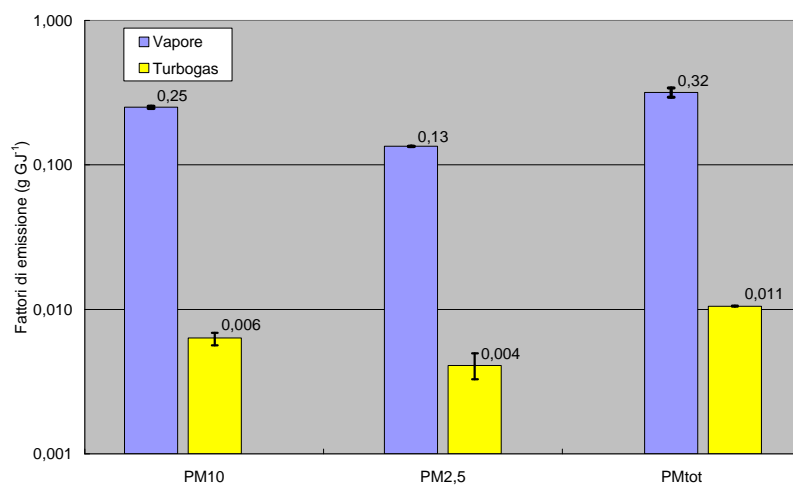


Figura 4.3 - Fattori di emissione riferiti all'energia termica in ingresso rilevati nell'indagine.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.44 of 46
Data	18/11/2004	

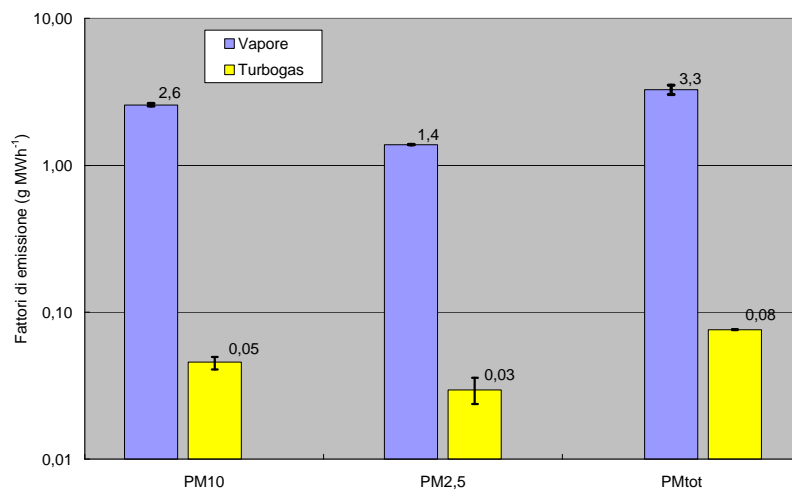


Figura 4.4 - Fattori di emissione riferiti all'energia elettrica prodotta rilevati nell'indagine.

Capitolo 5

FORMAZIONE DI PARTICELLE FINI E ULTRAFINI NEI PROCESSI DI COMBUSTIONE IN FASE OMOGENEA

a cura di:

- o Eliseo Ranzi, ordinario di “Impianti chimici”, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”
- o Tiziano Faravelli, ordinario di “Sperimentazione Industriale”, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”
- o Antonio D’Alessio, ordinario di “Impianti chimici”, Dipartimento di Ingegneria Chimica Università Federico II di Napoli
- o Andrea D’Anna, associato di “Impianti chimici”, Dipartimento di Ingegneria Chimica Università Federico II di Napoli
- o Anna Ciajolo, dirigente di ricerca, Istituto di Ricerche sulla Combustione, CNR. Napoli

Il capitolo analizza in dettaglio i meccanismi di formazione di particelle fine e ultrafini nei processi di combustione in fase omogenea, quali quelli che avvengono nei moderni combustori a premiscelamento delle turbine a gas alimentate a gas, giungendo alle seguenti conclusioni:

La cinetica chimica ci assicura che per un sistema in condizioni stechiometriche ed a maggior ragione per un sistema in eccesso di ossigeno, purché perfettamente miscelato alla scala molecolare, non viene attivata la chimica di pirolisi che porta alla formazione di IPA, di particelle carboniose e di fuliggine. I combustori premiscelati delle moderne turbine a gas prevedono diversi sistemi di micromiscelazione tra la fase di iniezione e quella di combustione. Oggetto prioritario nella corretta progettazione ed ottimizzazione di queste apparecchiature diventa proprio la garanzia della perfetta miscelazione di combustibile e comburente tramite opportuni accorgimenti. Con riferimento alle prestazioni dei combustori premiscelati delle turbine a gas, così come rilevati nella presente sperimentazione, è possibile notare una bassa formazione di NO_x (circa 10-15 ppmv), una scarsa presenza di CO (2-3 ppmv) ed una completa assenza di benzene, naftalene ed idrocarburi poliaromatici. Tutte queste osservazioni sperimentali sono delle chiare indicazioni della bontà del premiscelamento effettuato nei combustori indagati. La bassa concentrazione di NO_x è un indice di una moderata temperatura di fiamma, quindi di una combustione effettuata realmente in presenza di eccesso di aria. L’assenza di benzene, primo composto aromatico, è un altro indice di una fiamma ben premiscelata. L’assenza di aromatici superiori, tipici precursori del particolato carbonioso, è un ulteriore e evidente segnale dell’assenza di particolato anche a livello nanometrico.

E’ comunque indubbio che la misura sperimentale della concentrazione di nanostrutture con dimensioni tipiche al di sotto di 3nm rimane necessaria per poter concludere che questa tecnologia sia completamente non nociva per le emissioni di polveri fini. Occorre infine sottolineare quanto queste considerazioni e analisi si devono applicare a tutte le attuali tecnologie di combustione, dal riscaldamento domestico, alla moderna autotrazione diesel o a benzina, ai combustori industriali ed agli impianti di termovalorizzazione, e quindi il problema delle turbine a gas va necessariamente valutato nell’ambito complessivo delle emissioni di particolato dalle varie fonti antropiche.

Coordinatore della ricerca	E. Macchi	Pag.46 of 46
Data	18/11/2004	