

Centrali termoelettriche a gas naturale

Produzione di particolato primario e secondario

di Nicola Armaroli, Claudio Po

La combustione del gas naturale produce particolato fine ed ultrafine, primario e secondario, ed è esente da particolato di taglia superiore. Nei progetti italiani per nuove centrali turbogas, anche già autorizzati dal Ministero, non si fa riferimento alla produzione di questi pericolosi inquinanti. I nuovi impianti brucerebbero miliardi di metri cubi di gas aggiuntivi rispetto agli attuali consumi e la produzione di particolato sarebbe tutt'altro che irrilevante.



Un'immagine della centrale turbogas di Porto Corsini (RA)

In un recente articolo su questa rivista [1] abbiamo discusso il problema dell'inquinamento atmosferico da centrali termoelettriche a ciclo combinato alimentate a gas naturale, tecnicamente denominate con la sigla Ngcc (Natural Gas Combined Cycle power plants) e comunemente note col nome "turbogas". Questo contributo ha suscitato una vivace discussione, specie laddove è prevista la costruzione di centrali di questo tipo. L'articolo che appare nel presente numero de "La Chimica e l'Industria" è un'ulteriore testimonianza di questo interessante dibattito. Noi siamo lieti di aver aperto un filone di discussione scientifica sul problema dell'inquinamento atmosferico e serra delle centrali turbogas, sostanzialmente assente sino a pochi mesi fa nel nostro Paese.

In Italia sono state presentate decine di progetti per nuove centrali Ngcc la cui taglia oscilla tipicamente tra 400 e 1.200 MW di potenza. I decreti di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) di alcune di queste sono scaricabili dal sito del Ministero dell'Ambiente [2]. In nessuno di questi progetti si menzionano le polveri PM_{10} e $PM_{2,5}$ come inquinanti di rilievo. Al contrario il nostro lavoro, probabilmente per la prima volta in Italia, riportava una cospicua serie di documenti di fonte statunitense [3-10], dai quali si evince che le polveri PM_{10} sono un inquinante rilevante per questi impianti. Da tali documenti, per centrali da 780 MW, taglia prevalente nei progetti italiani, si può stimare una produzione di PM_{10} primario nell'intervallo 150-250 t/anno. Con questo nuovo contributo desideriamo chiarire ulteriormente il problema dell'inquinamento da polveri per impianti turbogas, entrando nel merito della distinzione tra particolato primario e secondario. I dati qui riportati, frutto di ulteriori indagini, confermano, ed anzi aggravano, il quadro precedentemente esposto [1].

Dimensione degli impianti, quantità di combustibile bruciato, approvvigionamenti

Al fine di inquadrare il problema nelle sue dimensioni reali, occorre innanzitutto chiarire che una centrale turbogas da 780 MW elettrici, che opera per 6-7 mila ore/anno, consuma un'enorme quantità di combustibile: circa 1 miliardo di m^3 di gas l'anno. Per rendersi conto dell'entità effettiva di questo vo-

lume di gas basta confrontarla con i consumi complessivi italiani di gas naturale che nell'anno 2002 hanno toccato quota 70,4 miliardi di m^3 [11]. In altre parole un impianto turbogas di questa taglia, che occupa un'area di circa 10 ettari, consuma circa un settantesimo del gas naturale impiegato su tutto il territorio nazionale che si estende su 30 milioni di ettari. È inoltre importante rilevare che (a) la conversione di diversi impianti italiani da olio combustibile a gas, (b) la costruzione di numerosi impianti turbogas ex-novo e (c) la crescita continua dei consumi di gas in Italia indipendentemente da (a) e (b), sta ponendo impegnative sfide sul fronte degli approvvigionamenti dall'estero di gas naturale, come già peraltro rilevato da Eni [12]. A seguito del consistente aumento dei consumi avvenuto negli ultimi anni, il problema degli approvvigionamenti di gas naturale è già una realtà negli Stati Uniti ed il Presidente della Federal Reserve, Alan Greenspan, ha recentemente lanciato l'allarme per le possibili pesanti ripercussioni sull'economia nazionale [13].

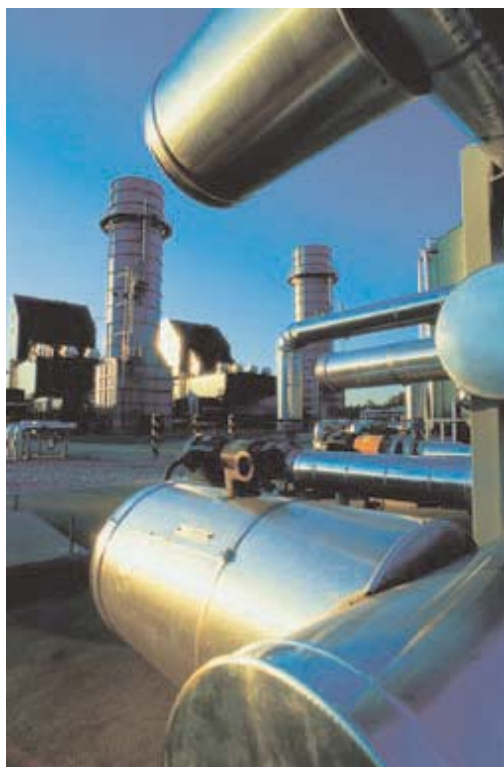
Certamente la scelta della metanizzazione del nostro sistema energetico, a scapito di petrolio e carbone, è positiva dal punto di vista ambientale. Non bisogna dimenticare però che il gas è comunque una risorsa finita, non rinnovabile, largamente importata, che viaggia in infrastrutture efficienti e a moderato impatto ambientale ma strategicamente vulnerabili, quali i gasdotti transcontinentali. Non entriamo nel merito della validità o meno del concetto di autosufficienza energetica di un Paese. Comunque, l'incremento della produzione elettrica nazionale potrà ridurre la nostra dipendenza dall'importazione da Paesi limitrofi (per esempio Francia, Svizzera), ma aumenterà la nostra dipendenza da fonti energetiche primarie provenienti da altri paesi (per esempio Algeria, Russia, Medio Oriente). Parlare di indipendenza elettrica per un Paese povero di fonti energetiche primarie fossili è fuorviante, in assenza di un cambio radicale della politica energetica. L'Italia ha un'autosufficienza energetica complessiva piuttosto modesta (15,6%) ed in lento ma costante declino [11]. Dunque la scelta strategica è decidere come modulare una

N. Armaroli, Istituto per la Sintesi Organica e la Fotoreattività del Cnr - Bologna; C. Po, Unità Operativa Rischio Ambientale, Dipartimento di Sanità Pubblica - AUSL Città di Bologna. armaroli@isof.cnr.it

dipendenza incompressibile. Nel frattempo, la pianificazione dell'utilizzo delle uniche fonti energetiche nazionali (efficienza, risparmio, sole, vento, biomasse) o dei vettori energetici del futuro (idrogeno) restano ai livelli più bassi in Europa, escludendo l'importante contributo delle rilevanti risorse idroelettriche. A questo proposito giova menzionare quanto riportato nella Relazione 2003 dell'Autorità per l'Energia ed il Gas, pag. 101, "In prospettiva, senza un sensibile aumento delle nuove fonti rinnovabili, capace di compensare il calo della produzione di gas e la sostanziale stabilità della produzione petrolifera e dell'energia idroelettrica, il grado di dipendenza dall'esterno (dell'Italia) è destinato ad aumentare ulteriormente" [11].

Particolato: sorgenti e definizioni

Il particolato, detto anche "aerosol" o "polveri", è costituito dall'insieme di tutto il materiale non gassoso presente in sospensione nell'aria. Esso comprende un'ampia gamma di particelle la cui composizione chimica e dimensione sono estremamente variabili a seconda della sorgente di produzione, delle condizioni meteorologiche e del meccanismo di formazione. Il particolato ha origine naturale (per esempio erosione del suolo, pollini, eruzioni vulcaniche, polveri dei deserti, spray marino) o è frutto di attività umane (per esempio processi di combustione, attività estrattive, cantieri, trasporti, industrie). La definizione dei vari tipi di particolato ha conosciuto una lunga e complessa storia, con modifiche nel corso degli anni [14]. Per questo motivo a tutt'oggi è possibile imbattersi in definizioni, o più semplicemente modi di dire, non del tutto coerenti. La definizione corrente di particolato contempla



quattro categorie, a seconda dell'intervallo di dimensioni del diametro aerodinamico della particella (d_a): *ultrafine* ($d_a \leq 0,1 \mu\text{m}$); *fine* ($0,1 \mu\text{m} \leq d_a \leq 2,5 \mu\text{m}$); *grossolano* ($2,5 \mu\text{m} \leq d_a \leq 10 \mu\text{m}$); *ultragrossolano* ($> 10 \mu\text{m}$). Gli ultimi due tipi vengono spesso indicati con il termine inglese "coarse" e "supercoarse".

In pratica il diametro di una particella di PM_{10} è pari a circa un sesto del diametro di un capello. Questa articolata classificazione è semplificata nella prassi comune ove si utilizzano i termini PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ e $\text{PM}_{0,1}$ per indicare *tutto* il particolato con diametro minore od uguale a 10, 2,5 e, rispettivamente, 0,1 micron (μm). La distribuzione dimensionale di questi tre tipi di aerosol ha una forma a campana e le tre distribuzioni presentano larghe fette di sovrapposizione [14]. I termini PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ vengono spesso usati come sinonimi di particolato fine ed ultrafine, ma questo è sbagliato: il PM_{10} deve essere classificato come particolato "grossolano", il $\text{PM}_{2,5}$ come "fine", il $\text{PM}_{0,1}$ come "ultrafine" [15]. Il particolato di dimensioni maggiori, con diametro aerodinamico sino a $50 \mu\text{m}$, viene indicato comunemente come particolato totale (PT), spesso aggettivato come "sospeso" (PTS o PST). Fin dal 1979 è stata evidenziata la necessità di effettuare misure separate per i vari tipi di particolato [16]. Ognuna di queste misure richiede specifici accorgimenti.

In nessun modo è possibile utilizzare una misura di particolato totale come una misura soddisfacente di polveri grossolane (PM_{10}), fini ($\text{PM}_{2,5}$) o ultrafini ($\text{PM}_{0,1}$) [14]. E in effetti in tutto il mondo, oggi, vengono effettuate misure diverse e specifiche per PT, PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ [14, 17-19]. Minore è la dimensione del particolato, maggiore è la difficoltà nella misura. Ad esempio, nella misura del $\text{PM}_{2,5}$, è particolarmente difficoltoso il rilevamento del particolato semivolatile, principalmente di origine secondaria [20]. Tuttavia i progressi tecnologici nel campo sono notevoli ed è entrato in vigore nel 2003, dopo quasi un decennio di lavoro sul particolato fine, un metodo di riferimento provvisorio per il campionamento e la misurazione del $\text{PM}_{2,5}$

valido su tutto il territorio dell'Unione Europea, la cui versione definitiva è prevista per il 2004 [21]. Infine, una cruciale classificazione del particolato è quella basata sulla sua origine, che prevede tre categorie:

- particolato primario filtrabile*, che viene emesso in fase solida direttamente dalla sorgente;
- particolato primario condensabile*, che viene emesso in fase gassosa ad alta temperatura ma condensa a seguito di diluizione e raffreddamento entro pochi secondi dall'espulsione dalla sorgente [22];
- particolato secondario*, che si forma in atmosfera attraverso complessi processi, principalmente di natura fotochimica, a partire da emissioni gassose di biossido di zolfo (SO_2), ossidi di azoto (NO_x), ammoniaca, composti organici [23].

Dal punto di vista chimico, i principali componenti del particolato sono nitrati, solfati e cloruri di ammonio e sodio, carbonio elementare, carbonio organico, polveri minerali e biogeniche di varia composizione, acqua. Una volta

presente in atmosfera, il particolato viene rimosso per sedimentazione o precipitazione. Il tempo medio di permanenza in atmosfera varia a seconda delle dimensioni: si va da alcune ore per il particolato ultragrossolano fino a giorni o settimane per il particolato fine ed ultrafine. Questi ultimi possono essere trasportati per migliaia di chilometri e la loro presenza viene rilevata come fondo anche in stazioni di misura collocate in aree remote. La natura transfrontaliera dell'inquinamento da polveri fini è ormai ben nota. Studi effettuati nei Paesi Bassi, paese piccolo e non protetto da catene montuose evidenziano una concentrazione abbastanza uniforme di $\text{PM}_{2,5}$ tra zone urbane e zone rurali, con effetti importanti da parte della circolazione dei venti [24]. L'effetto a lunga distanza è invece molto meno marcato in regioni con scarsa circolazione dei venti e circondate da catene montuose, quali la Pianura Padana.

Produzione di particolato dalla combustione del gas naturale

Il gas naturale che dai gasdotti giunge alle utenze civili ed industriali dei paesi avanzati deve presentare notevoli standard di qualità ("pipeline quality natural gas", secondo la nomenclatura

dell'Agenzia Ambientale degli Stati Uniti, EPA). Ad esempio il contenuto medio di zolfo è estremamente basso, sia in Usa ($4,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [25]) sia in Europa ($7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [26]); a questo riguardo anche il gas asiatico è di ottima qualità [27]. Questo ed altri elevati standard qualitativi (per esempio tenore di metano $\geq 80\%$) [1], uniti alla stessa natura gassosa del combustibile, lo rendono sostanzialmente esente da emissioni di particolato di taglia superiore al PM_{10} . Di conseguenza, come abbiamo già rilevato in precedenza [1], quando si parla di emissioni di particolato da combustione di gas naturale occorre fare unicamente riferimento a PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ e $\text{PM}_{0,1}$. General Electric ha recentemente concluso che la gran parte (>95%) del particolato primario prodotto dalla combustione del gas naturale in turbina rientra nella categoria $\text{PM}_{2,5}$ [28]. Questo viene confermato da dati di fonte europea che per il gas naturale (comunemente chiamato "metano") parlano di polveri con diametro dell'ordine di $1 \mu\text{m}$ o inferiori (PM_1) [29]. Risulta quindi del tutto destituita di qualsiasi fondamento l'affermazione, scritta su decine di progetti italiani, ripresa su vari documenti di Via [30] e di Vas [31], riscontrabile in interviste televisive e alla stampa da parte di dirigenti di industrie energetiche, che la combustione del gas "non produce polveri". La combustione del gas non produce sostanzialmente Pst, ma non è affatto esente dalla produzione di PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, $\text{PM}_{0,1}$ che, purtroppo, hanno una ben maggiore rilevanza per la salute (v. oltre).

Produzione di particolato nelle centrali Ngcc: contributo primario

Nelle centrali californiane elencate nel nostro precedente articolo [1], i dati di PM_{10} (150-250 t/anno) si riferiscono al contributo primario previsto sulla base dei dati forniti dai produttori delle turbine utilizzate specificatamente per un dato impianto. Questi dati sono in buon accordo con uno studio modello effettuato dai laboratori del Department of Energy degli Stati Uniti, mai smentito [4]. Quindi i dati delle emissioni di PM_{10} da centrali Usa da noi riportati non sono determinati tramite tabelle di fattori di emissione, essendo questa una procedura troppo approssimata [1] e quindi non accettabile. Val la pena sottolineare che la produzione di PM_{10} da centrali turbogas non è un "pallino" americano: anche in Asia è noto che tali impianti producono quantità non trascurabili di PM_{10} primario [32]. Per le centrali californiane (alcune delle quali sono entrate in funzione in questi mesi, e altre seguiranno) occorre specificare in fase progettuale il numero di accensioni e spegnimenti previsti nel corso dell'anno [6, 7, 9, 10], dato che la produzione di inquinanti, incluso il particolato, è molto maggiore nella fase iniziale "a freddo" del funzionamento. Inoltre occorre tenere presente che le turbine non sono le uniche fonti emissive di particolato per una centrale turbogas, ma altri impianti accessori possono contribuire in maniera non trascurabile (per esempio boiler, caldaie ausiliarie, torri di raffreddamento) [6, 7, 9, 10]. Per una centrale da 750 MW in Usa è stato stimato un impatto



aggiuntivo in atmosfera in PM_{10} primario pari a $8,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media 24 h) e $1,45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (media annuale) [33]. Si tratta di un contributo rilevante, anche perché il particolato non ha una soglia minima di pericolosità: anche quantità apparentemente irrilevanti possono avere gravi implicazioni per la salute. Il permesso per la costruzione di questa centrale è stato rilasciato solo dietro presentazione di un adeguato pacchetto di misure compensative (offset package [1]) per annullare l'impatto negativo sulla qualità dell'aria nella regione interessata [8].

La differenza tra i valori emissivi di particolato totale calcolati sulla base dei fattori di emissione Epa (dell'ordine di decine di t/anno) e quelle di progetti veri (150-250 t/anno), già riportate

nel nostro precedente articolo (Tabella 1 vs. Tabella 5) [1] si può spiegare con l'inclusione dei fattori (i) accensione/spegnimento e (ii) impianti accessori. Inoltre, aspetto di cruciale importanza, i fattori di emissione Epa sono riferibili al particolato totale PT, mentre i dati dei progetti californiani si riferiscono esplicitamente al PM_{10} .

Di conseguenza, i due parametri sono profondamente diversi e non possono essere direttamente confrontabili. Per completare il quadro sulle emissioni primarie va aggiunto che la stessa General Electric ammette che, anche alla luce del sempre più massiccio impiego del gas naturale, si pone il problema della misura del $\text{PM}_{2,5}$ primario che è il vero target da tenere sotto controllo nella combustione del gas [34]. In ogni caso, una discussione sulle differenze di valori emissivi di particolato primario, pur importante, ci svierebbe dal cuore del problema che è costituito, per gli impianti turbogas, dalla produzione di particolato fine ed ultrafine secondario.

Particolato fine $\text{PM}_{2,5}$

Esiste una vasta evidenza che la porzione principale di $\text{PM}_{2,5}$ presente in atmosfera non sia direttamente emessa da sorgenti di combustione ma sia di origine secondaria [35]. Anche una frazione rilevante del PM_{10} ha origine secondaria [36, 37]. Il drastico calo dell'utilizzo di carbone realizzato nell'ultimo ventennio in Europa, ha notevolmente ridotto le emissioni di biossido di zolfo. Di conseguenza, a partire dalla fine degli anni Ottanta, gli inquinanti primari maggiormente responsabili della formazione di particolato secondario in Europa sono diventati gli ossidi di azoto NO_x [20, 35, 38-39]. La conversione di NO_x a particolato secondario viene stimata superiore al 60% [39]. Nei progetti italiani di centrali turbogas si prevede una produzione di NO_x attorno alle 1.500 t/anno per impianti da 780 MW, quindi si possono prevedere quantità alquanto consistenti di particolato secondario come nitrato (vedi oltre). Purtroppo, alla pari della produzione di particolato primario, questo ancor più rilevante aspetto del problema è del tutto ignorato nelle VIA dei progetti turbogas italiani, poiché non richiesto dalle vigenti leggi [2]. Le correlazioni tra concentrazioni di massa di PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ e concentrazioni di NO_x in atmosfera sono ormai ben associate da

studi effettuati in Europa [18], in America [40] e in Asia [41]. In questi ed altri studi [37] la comunità scientifica ha rimarcato la carenza delle vigenti legislazioni sul particolato, indicando la necessità di tenere in conto la formazione di particolato secondario se si vuole realizzare un efficace controllo della concentrazione di PM₁₀ e PM_{2,5} in atmosfera, dato il loro rilevante effetto per la salute pubblica [36]. In altre parole il particolato secondario potrà essere tenuto efficacemente sotto controllo solo se verranno messe in campo decise politiche miranti al contenimento della produzione degli NO_x, principali precursori chimici delle polveri secondarie. Questo approccio si accompagnerebbe a positivi effetti anche sulla riduzione di ozono, altro inquinante secondario la cui formazione dipende dalla presenza di NO_x [42]. In California, come già descritto in precedenza [1], questa politica viene attuata con decisione; per ottenere un permesso per la costruzione di un impianto turbogas occorre rispettare quanto segue:

- 1) definizione di adeguati pacchetti di compensazione per il PM₁₀ primario [8];
- 2) severe misure di abbattimento degli NO_x, precursori di particolato secondario [1, 6-10];
- 3) definizione di adeguati pacchetti di compensazione per tutti i precursori di particolato secondario (NO_x, SO₂, Voc), una volta abbattuti [8].

Per quanto riguarda gli impianti di abbattimento di NO_x, per una centrale turbogas da 500 MW vengono stimati i costi riportati in Tabella [10]. Una centrale da 800 MW ha presumibilmente costi più elevati. La tecnologia Scr (Selective Catalytic Reduction) implica l'emissione in atmosfera di circa 30 t/anno di polveri primarie aggiuntive, largamente compensate da quelle secondarie evitate [10]. Sconox (riduzione catalitica di NO_x, accoppiata ad ossidazione catalitica di monossido di carbonio CO), più costoso, non dà luogo all'emissione di polveri. Con questi accorgimenti, accoppiati nel caso Scr ad impianti di ossidazione catalitica, si raggiungono elevatissimi livelli di abbattimento di NO_x e CO, con fattori di riduzione 5-10 rispetto alle turbogas previste in Italia [1]. La formazione di PM_{2,5} secondari è piuttosto lenta ed è più consistente in zone relativamente distanti dalle sorgenti di inquinanti precursori [24]. Il meccanismo di formazione varia dall'inverno all'estate: nella stagione fredda prevale la trasformazione dei precursori in fase acquosa, in quella calda il processo è prevalentemente in fase gassosa. Nelle zone caratterizzate da particolato

Costi (\$ Usa) connessi a due possibili impianti di abbattimento degli NO_x per 2 turbine a gas General Electrics F7A, centrale da 500 MW complessivi [10]*

Tecnologia	SCR ^a	SCONOx ^b
Costo installazione	6.500.000	31.000.000
Costi annuali diretti e indiretti per il funzionamento e la manutenzione	4.249.100	13.921.100
Inquinante rimosso (t/anno)	428	456
Costo per t di inquinante rimosso	9.928	30.529

* La tecnologia Sconox, più costosa, non implica l'utilizzo ed il trasporto di ammoniaca, garantendo una maggiore sicurezza ed un minore impatto dell'impianto. Con tale tecnologia si abbatte anche il monossido di carbonio, CO

^aRiduzione catalitica selettiva di NO_x

^bRiduzione catalitica di NO_x ed ossidazione catalitica di CO

con elevato contributo di PM₁₀ e PM_{2,5} secondari semivolatili da nitrati, specifici effetti termodinamici portano a più elevate concentrazioni di polveri in inverno che in estate [29]. In questa casistica rientra presumibilmente la Pianura Padana coi suoi picchi invernali.

Particolato ultrafine PM_{0,1}

L'attenzione della comunità scientifica internazionale si sta progressivamente spostando verso il particolato ultrafine, PM_{0,1}, poiché è ormai assodato che gli effetti

sanitari delle polveri sono inversamente proporzionali alle loro dimensioni [15]. Il PM_{0,1} può penetrare molto profondamente nelle vie respiratorie e, addirittura, passare direttamente nel sangue a livello polmonare [43]. Il particolato ultrafine rappresenta una grandissima parte del numero delle particelle presenti in atmosfera, ma una porzione minuscola della massa complessiva di particolato sospeso [15]. Di conseguenza per questo pericolosissimo inquinante perde significato la misura della concentrazione di massa, comunque modesta, e prende rilievo la misura della concentrazione numerica (numero di particelle per unità di volume). Studi sulla composizione chimica di PM_{0,1} nella California meridionale mostrano che esso ha un'origine primaria (principalmente carbonio organico) e secondaria (nitrati) [44]. La concentrazione di particolato ultrafine in atmosfera tende progressivamente ad aumentare ponendo seri interrogativi sulle conseguenze per la salute pubblica. Tale

concentrazione è stata trovata sostanzialmente identica in tre città europee: Helsinki (Finlandia), Erfurt (Germania) ed Amsterdam (Olanda), a dimostrazione del fatto che questo inquinante ha lunghi tempi di permanenza in atmosfera e la sua concentrazione tende ad uniformarsi su territori molto estesi [45].

Studi recentissimi evidenziano che nella Germania riunificata la qualità dell'aria è generalmente migliorata, grazie agli interventi di risanamento ambientale effettuati nella ex-Germania Orientale. Questo miglioramento non si è però verificato per il particolato ultrafine, la cui concentrazione numerica è raddoppiata nell'ultimo decennio [46].

Nella regione di Erfurt, Germania, tra il 1991 ed il 1998 la concentrazione numerica del particolato ultrafine è aumentata del 115% ed il rapporto numerico PM_{0,1}/PST è aumentato di più del 500%. In questo periodo vi è stata la progressiva sostituzione del vecchio parco veicolare



(per esempio la famosa Trabant) con automezzi catalizzati, mentre nella produzione di energia l'uso del carbone è calato dell'84% e l'uso del gas naturale è aumentato del 300% [47]. In sostanza l'uso di tecnologie innovative di combustione e controllo degli inquinanti ed il passaggio al gas naturale stanno progressivamente portando ad uno spostamento della distribuzione di massa del particolato dalle dimensioni maggiori a quelle minori. In parallelo però il numero di particelle sospese in atmosfera tende ad aumentare. Alla luce di questo andamento, e considerata l'estrema rilevanza sanitaria delle polveri ultrafini, si presenta con forza la necessità di modificare la legislazione corrente per passare dalla misura della concentrazione di massa a quella numerica [15, 45, 47].

Particolato secondario dal sistema energetico europeo: contributo della produzione termoelettrica da gas naturale

Se gli Usa sono all'avanguardia nella consapevolezza dell'enorme impatto sanitario della produzione di particolato primario e secondario da grandi impianti termoelettrici per la produzione di energia, non è da meno l'Europa. Le istituzioni europee hanno commissionato autorevoli studi per quantificare l'inquinamento atmosferico del sistema energetico europeo e stimare le esternalità sanitarie ad esso connesse [48]. Secondo un recente rapporto della European Environment Agency (Eea) la produzione di PM_{10} secondario prodotto dal sistema energetico europeo è di 7 volte superiore a quello primario [49]. Nei numerosi progetti turbogas italiani non si menziona il PM_{10} primario ma, cosa ancora più preoccupante, non vi è alcun accenno al problema della formazione di particolato secondario.

Alcuni anni fa il Consiglio d'Europa ha commissionato uno studio sul particolato secondario prodotto dal sistema elettrico europeo. In esso si stima che una centrale termoelettrica a gas naturale da 800 MW che opera per 6.500 ore/anno produce una quantità di $PM_{2,5}$ secondario dell'ordine di 1.700 t/anno [50]. Tale valore è pari ad un terzo delle emissioni di una centrale di eguale potenza a carbone. Per quanto riguarda la stima delle esternalità ambientali del sistema termoelettrico europeo è stato valutato (in meuro/KWh) che mediamente, posto a 100 il carico dei costi socio-ambientali degli impianti a carbone, 50 e 30 sono, rispettivamente, i costi per gli impianti ad olio combustibile e gas naturale [48, 51].

Per valutare l'impatto sanitario di una grande centrale per la produzione di energia non basta considerare il combustibile utilizzato, i sistemi di controllo dell'inquinamento o la potenza erogabile. Un parametro di importanza ancora maggiore è la *localizzazione*. Per esempio, per il sistema energetico thailandese, è stato stimato che una centrale a turbogas da 600 MW situata nelle vicinanze della capitale Bangkok ha un costo di esternalità sanitarie quasi doppio rispetto ad una centrale a carbone da 1.000 MW localizzata in un'area remota del Paese [32].



Effetti sulla salute

Studi epidemiologici hanno dimostrato robuste associazioni tra effetti avversi alla salute e inquinamento da particolato [52]. Da alcuni anni argomenti teorici e studi sperimentali sugli animali e sull'uomo indicano che la componente più tossica si trova nella frazione sotto $1 \mu m$ (PM_{10}), e più probabilmente in particelle attorno a $0,1 \mu m$ di diametro, $PM_{0,1}$ [53, 54]. Gli studi epidemiologici hanno trovato maggiori effetti avversi per il $PM_{2,5}$ che per il PM_{10} [55]. Le principali correlazioni riguardano gli effetti a carico del sistema respiratorio e cardiaco, specialmente in anziani e bambini, dove causano esacerbazione di patologie preesistenti. Questi effetti acuti avvengono anche a concentrazioni relativamente basse, e sono associati anche a particelle di composizione relativamente innocua (carbonio organico, ammonio, solfato e nitrato). Si è quindi supposto un meccanismo patogenetico che non è più basato sul peso del particolato inalato ma sul numero, meglio sulla superficie (area) disponibile a reagire nell'epitelio dei bronchioli terminali e degli alveoli. Questa ipotesi è stata confermata sperimentalmente su animali (ratti) che esposti a particolato molto fine hanno sviluppato un'inflammatione più grave di quelli esposti a particolato di granulometria maggiore [54]. Il fattore rilevante potrebbe quindi essere il *numero* delle particelle inalate e ritenute a livello alveolare.

Per una concentrazione di PM_{10} di $100 \mu g/m^3$, tipica in prossimità di strade ad elevato traffico, si hanno in media $40 \mu g/m^3$ di $PM_{2,5}$ (40%) e $2 \mu g/m^3$ di $PM_{0,1}$ (2%) ed un numero di particelle di $10^5/cm^3$. Assumendo per un individuo adulto i valori medi di tasso di ventilazione e superficie polmonare si può stimare che meno di un alveolo su mille entrerà in contatto con una particella PM_{10} al giorno, mentre un alveolo tipo entrerà in contatto con centinaia di particelle ultrafini, che hanno un'elevata capacità di penetrazione nelle più profonde vie respiratorie.

Le particelle fini ed ultrafini attorno ai 100 nm derivate dalla combustione e caratteristiche del fondo urbano, esercitano effetti biologici avversi rilasciando dalla loro superficie idrocarburi policiclici aromatici (Ipa) e radicali liberi tossici [56]. A seconda della temperatura e pressione gli Ipa e loro derivati possono trovarsi sia in forma gassosa adsorbita al particolato sia in forma particellare. Vengono prodotti dalla combustione incompleta di carburanti fossili o vegetali, incluso il gas naturale [57]. Gli Ipa hanno un'emivita media nella troposfera stimata da 3,5 a 10 giorni e una vita complessiva da 5 a 15 giorni. Essi reagiscono con gli ossidi di azoto dando idrossi- e nitro-Ipa, questi ultimi particolarmente pericolosi per la salute. Le possibili vie di esposizione per l'uomo sono inalazione, ingestione e contatto con la pelle; gli effetti sulla salute sono sia cancerogeni sia non cancerogeni. La letteratura scientifica che discute effetti del particolato sulla salute umana è vastissima, e in parte anche consultabile liberamente in rete [58, 59].

Conclusioni

Le centrali Ngcc rappresentano il meglio che la tecnologia termoelettrica può oggi offrire in termini di efficienza di produzione e contenimento di emissioni inquinanti. Esse sono quindi un'ottima scelta per la *riconversione* di centrali meno efficienti e più inquinanti ad olio o a carbone [1]. Tuttavia è profondamente infondato ritenere che questi impianti presentino modesti impatti ambientali. In questo lavoro ci siamo soffermati ad esaminare il problema della produzione di particolato primario e secondario. Questo ci è parso necessario alla luce dell'infondata credenza, anche suffragata da documentazione ufficiale [2, 30, 31], che questi impianti non contribuiscano alla produzione di polveri. Per le centrali italiane, ai fini della valutazione dell'inquinamento atmosferico, è richiesto unicamente di misurare il Pst primario filtrabile, che peraltro ha scarsa rilevanza sanitaria. Questo approccio si rivela quindi totalmente inutile per valutare l'inquinamento da polveri di centrali a gas che producono PM₁₀, PM_{2,5} e PM_{0,1}, principalmente di natura secondaria. In quest'ultimo decennio è stata acquisita un'impressionante mole di conoscenza tecnico-scientifica sugli impatti ambientali dei sistemi energetici, sulla produzione di polveri fini ed ultrafini, sulla rilevanza sanitaria di questi inquinanti. In Italia, sino a questo momento, esse non sono state recepite e trasformate in adeguati provvedimenti di legge.

Questa carenza risulta particolarmente grave alla luce dei documenti prodotti da autorevoli istituzioni europee [29, 49, 50] e della severità che vige in altri Paesi nel rilascio di concessioni per nuove centrali turbogas [1]. La situazione italiana per le polveri fini è già estremamente grave. Un recentissimo studio rivela che la misura della concentrazione di massa di PM_{2,5} invernale in 21 città europee pone le tre città italiane esaminate (Torino, Pavia, Verona) ai primi tre posti di questa non invidiabile classifica [60]. Il particolato è un inquinante per il quale non esiste una soglia minima di pericolosità. In futuro la misura del particolato in Europa verrà effettuata da satellite, senza distinzioni tra primario e secondario [61] mentre, a tutela della salute pubblica, verranno imposti limiti più restrittivi per le concentrazioni di PM_{2,5} in atmosfera [29]. In questo stesso periodo di tempo dovrebbero entrare in funzione in Italia decine di nuove centrali turbogas che bruceranno miliardi di metri cubi di gas naturale aggiuntivi che, stando ai progetti e alle autorizzazioni fin qui concesse, non contribuiranno in alcun modo alla produzione di polveri fini ed ultrafini. Questo è totalmente destituito di qualsiasi fondamento scientifico, come qui argomentato.

Sarebbe quindi auspicabile che oggi, finché si è in tempo, si analizzasse questo problema con maggiore rigore. Questo per non assistere, domani, di fronte ad una realtà ben diversa dalle attese, ad uno scarico di responsabilità tra le numerose Autorità che sovrintendono al rilascio di autorizzazioni o sono chiamate ad esprimere giudizi tecnici in fase preliminare. È possibile costruire centrali turbogas limitando l'impatto ambientale in misura molto maggiore di quanto non previsto oggi in Italia. Altrimenti, questo approccio è una consolidata realtà [6-10].

Bibliografia

- [1] N. Armaroli, C. Po, *Chimica e Industria*, 2003, **85**(4), 45.
- [2] http://www.minambiente.it/Sito/settori_azione/via/legislazione/tabella_decreti.htm (10 ottobre 2003).
- [3] Emission Factor Documentation of AP-42 Section 3.1, Stationary Combustion Turbines, U.S. Environmental Protection Agency, Alpha-Gamma Technologies Inc., Raleigh, North Carolina, 2000.
- [4] P.L. Spath, M.K. Mann, Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined Cycle Power Generation System, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, TP-570-27715, 2000.
- [5] California Air Resources Board, centrali elettriche: <http://www.arb.ca.gov/energy/powerpl/powerpl.htm> (10 ottobre 2003).
- [6] Final Determination of Compliance, Delta Energy Center, Bay Area Air Quality Management District, 21 ottobre 1999.
- [7] Final Determination of Compliance, High Desert Power Project, Mojave Desert Air Quality Management District, 29 giugno 1999.
- [8] Documento complessivo sugli offset packages del California Air Resources Board: www.arb.ca.gov/energy/powerpl/guidedoc/offsets.doc (10 ottobre 2003).
- [9] Final Determination of Compliance, Blythe Energy Project, Mojave Desert Air Quality Management District, 25 ottobre 2000.
- [10] Final Staff Assessment, Elk Hills Power Project, California Energy Commission, aprile 2000.
- [11] Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas, Relazione Annuale 2003.
- [12] "Indagine conoscitiva della Camera dei Deputati sulla situazione e sulle prospettive del settore dell'energia", Documento conclusivo approvato il 18 aprile 2002, cap. 4.7 "Il fabbisogno energetico nazionale".
- [13] "Natural gas supply and demand issues", The Federal Reserve Board, Testimony of Chairman Alan Greenspan before the Committee on Energy and Commerce, U.S. House of Representatives, 10 giugno 2003.
- [14] W.E. Wilson, H.H. Suh, *J. Air Waste Manage.*, 1997, **47**, 1238.
- [15] L.M. Brown *et al.*, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2000, **358**, 2563.
- [16] F.J. Miller *et al.*, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 1979, **29**, 610.
- [17] C. Monn *et al.*, *Atmos. Environ.*, 1995, **29**, 2565.
- [18] R.M. Harrison *et al.*, *ibid.*, 1997, **31**, 4103.
- [19] K. F. Ho *et al.*, *ibid.*, 2003, **37**, 31.
- [20] D.J. Eatough *et al.*, *ibid.*, 2003, **37**, 1277.
- [21] Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee, n. 12, 17 gennaio 2003, p. 31.
- [22] L.A. Corio, J. Sherwell, *J. Air Waste Manage.* 2000, **50**, 207.
- [23] M.E. Jenkin, K.C. Klemmshaw, *Atmos. Environ.*, 2000, **34**, 2499.
- [24] S.C. van der Zee, *et al.*, *ibid.*, 1998, **32**, 3717.
- [25] Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Section 1.4: External Combustion Sources-Natural Gas Combustion, U.S. Environmental Protection Agency, Eastern Research Group, Morrisville, North Carolina, 1998.
- [26] European Environment Agency, EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook, 3rd Edition, B111-46, ottobre 2002.
- [27] M.S. Reddy, C. Venkataraman, *Atmos. Environ.*, 2002, **36**, 677.
- [28] Dr. Mike Ringer, California Energy Commission, comunicazione privata.
- [29] Draft for Second Position Paper on Particulate Matter, Clean Air for Europe Working Group on Particulate Matter, The European Commission, agosto 2003.
- [30] Si veda per esempio il Decreto di VIA per la trasformazione in ciclo combinato di 3 dei 4 gruppi della centrale termoelettrica "La Casella" (PC), Prot. 158, Ministero dell'Ambiente, Pag. 5 e 9.
- [31] Valutazione Ambientale Strategica del Piano Energetico Regionale dell'Emilia Romagna, pag. 53.

- [32] B.D. Thanh, T. Lefevre, *Environ. Impact Assess. Rev.*, 2000, **20**, 137.
- [33] Pastoria Energy Facility (99-AFC-7), Request to Amend Conditions of Certification, California Energy Commission, 21 maggio 2002.
- [34] G. England *et al.*, "Fine Particle and Precursor Emissions From Power, Oil & Gas Industry Sources", Proceedings of the conference "PM_{2.5} and Electric Power Generation: Recent Findings and Implications", Pittsburgh PA, aprile 2002, National Energy Technology Laboratory Publications.
- [35] "Source Apportionment of Airborne Particulate Matter in the United Kingdom", Report of the Airbone Particle Expert Group, Department of Environment, Food, and Rural Affairs, UK Government, Gennaio 1999.
- [36] P. Lenschow *et al.*, *Atmos. Environ.*, 2001, **35**(1), S23.
- [37] T. Chatterton *et al.*, *Water Air Soil Poll.*, 2002, Focus **2**, 173.
- [38] M. Amann *et al.*, *ibid.*, 2001, **130**, 223.
- [39] F.A.A. M. de Leeuw, *Environ. Sci. & Pol.* 2002, **5**, 135.
- [40] N. Motallebi *et al.*, *J. Air Waste Manage.* 2003, **53**, 876.
- [41] S.-J. Chen *et al.*, *Chemosphere* 2003, **53**, 29.
- [42] M. Rizzo *et al.*, *J. Air Waste Manage.* 2002, **52**, 593.
- [43] A. Nemmar *et al.*, *Circulation*, 2002, **105**, 411.
- [44] G.R. Cass *et al.*, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2000, **358**, 2581.
- [45] J. Ruuskanen *et al.*, *Atmos. Environ.*, 2001, **35**, 3729.
- [46] W.G. Kreyling *et al.*, *ibid.*, 2003, **37**, 3841.
- [47] S. Ebel *et al.*, *Environ. Health Persp.*, 2001, **109**, 325.
- [48] External Costs, Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport, The European Commission, 2003.
- [49] "Energy and Environment in the European Union", The European Environment Agency, 2002, p.33.
- [50] "Fine-particle emissions and human health", Committee on Science and Technology, The Council of Europe, doc. 8167, luglio 1998.
- [51] A. Rabl, J.V. Spadaro, *Annu. Rev. Energ. Env.*, 2000, **25**, 601.
- [52] B. Brunekreef, S.T. Holgate, *Lancet*, 2002, **360**, 233.
- [53] H.E. Wickmann, A. Peters, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2000, **358**, 2751.
- [54] K. Donaldson, *Occup. Environ. Med.*, 2001, **58**, 211.
- [55] C.A. Pope *et al.*, *JAMA-J. Am. Med. Assoc.*, 2002, **287**, 1132.
- [56] J.I. Levy *et al.*, *J. Expo. Anal. Env. Epid.* 2002, **12**, 104.
- [57] W.R. Rogge *et al.*, *Environ. Sci. Technol.*, 1993, **27**, 2736.
- [58] EPA, <http://www.epa.gov/ttn/oarpg/naaqsfm/pmhealth.html> (10 ottobre 2003).
- [59] OMS, <http://www.euro.who.int/air> (10 ottobre 2003).
- [60] M.E. Hazenkamp-von Arx *et al.* *J. Air Waste Manage.*, 2003, **53**, 617.
- [61] ICAROS-NET: Integrated Computational Assessment Of Urban Air Quality Via Remote Observation Systems Network, European Commission, Joint Research Centre, <http://icaros-net.jrc.cec.eu.int/> (10 ottobre 2003).