

Emissioni da centrali termoelettriche a gas naturale

La letteratura corrente e l'esperienza statunitense

di Nicola Armaroli, Claudio Po

Da un punto di vista ambientale la tecnologia a ciclo combinato a gas naturale è una valida scelta per la riconversione di vecchie centrali ad olio combustibile o a carbone. Le emissioni di gas serra ed inquinanti sono comunque tutt'altro che trascurabili, e includono rilevanti quantità di polveri fini. Nel caso di nuovi impianti di grandi dimensioni, l'autorizzazione andrebbe concessa con cautela ed in presenza di adeguate misure compensative sulla qualità dell'aria, seguendo l'esempio della legislazione statunitense.

A partire dalla fine degli anni Novanta, a seguito di provvedimenti legislativi mirati a liberalizzare il mercato dell'energia elettrica, sono state avanzate proposte per costruire decine di nuove centrali termoelettriche in tutta Italia. Nella quasi totalità dei casi si tratta di impianti a ciclo combinato alimentati a gas naturale, comunemente denominati con la sigla Ngcc (Natural Gas Combined Cycle power plants). Allo stato attuale, questi impianti sono i più avanzati che la tecnologia termoelettrica possa offrire in termini di efficienza di produzione e contenimento di emissioni inquinanti. Con questa raccolta di dati, si intende fare il punto su quanto ad oggi è noto sull'inquinamento atmosferico prodotto da queste centrali. Abbiamo attinto informazioni dalle seguenti fonti governative americane: US Energy Information Administration (Eia), US Environmental Protection Agency (Epa), National Renewable Energy Laboratory dello US Department of Energy (Nrel/Doe), ed il California Air Resources Board (Carb).

Per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico si è seguito un approccio a tre stadi. Per avere una stima iniziale del tipo e della quantità di inquinanti emessi da centrali termoelettriche a gas si sono esaminati, in prima battuta, i fattori di emissione di turbine alimentate a gas naturale [1]. In seguito si è studiato un caso modello che fa il bilancio delle emissioni sia per il semplice funzionamento sia per l'intero ciclo di vita di una centrale Ngcc, dall'apertura del cantiere sino alla totale dismissione [2]. Infine sono stati esaminati casi reali di centrali Ngcc già autorizzate in California, per le quali esiste una gran mole di dati

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



La costruzione della centrale Enel di Porto Corsini (RA)

sull'inquinamento previsto ed in atto [3]. I valori che riportiamo evidenziano che per le loro dimensioni, tipicamente 400-1.200 MW di potenza, queste centrali hanno un consistente impatto ambientale in termini di emissioni di gas serra ed inquinanti. Riteniamo che questo contributo possa essere utile alle autorità pubbliche italiane che in questi mesi sono chiamate a decidere sulle autorizzazioni per la costruzione di questi impianti.

Cosa si dice in Italia ed in Europa

In un'assemblea tenutasi il 30 ottobre 2002 a Minerbio (BO) un'impresa di servizi ha presentato pubblicamente un progetto per la costruzione di una centrale Ngcc di una potenza elettrica nominale di 780 MW in quel comune. I proponenti hanno dichiarato che questo impianto lavorerebbe circa 6.000 ore l'anno per produrre 4.670 GWh di energia elettrica, bruciando circa 850 milioni/anno di metri cubi di gas naturale. Questa centrale, secondo un documento diffuso dai proponenti in quell'occasione, dovrebbe produrre unicamente i seguenti gas serra ed inquinanti: 1.634.500 t/anno di anidride carbonica (CO₂) e 1.541 t/anno di ossidi di azoto (NO_x). Si dichiarano 0 (zero) le emissioni di particolato (polveri fini) e di ossidi di zolfo.

Un progetto per la costruzione di un'analogo centrale Ngcc è stato presentato su un sito a 8 km in linea d'aria da quello di Minerbio, in comune di Bentivoglio (BO). La relativa domanda di autorizzazione presso il Ministero è stata presentata nel luglio 2002. Nello studio di impatto ambientale si afferma che "I principali inquinanti presenti nei fumi sono gli ossidi di azoto (NO_x) e, di gran lunga meno importante, l'ossido di carbonio (CO). L'emissione di altre sostanze non ha alcuna rilevanza

ambientale" [4]. In questo studio si afferma inoltre che "la portata degli effluenti gassosi ai camini è di circa 2.100.000 m³/ora" [4] da cui si può stimare una porta annuale di 12,6 miliardi di m³ su un funzionamento di 6.000 ore/anno. In una lettera pubblicata su un settimanale popolare italiano Massimo Orlando di Energia SpA Milano dichiara, citando un non precisato rapporto dell'Istituto Superiore di Sanità di 9 anni fa che "la sola emissione minimamente significativa delle centrali Ngcc è costituita dagli ossidi di azoto (sostanze non cancerogene), che sono comunque emessi in concentrazioni molto limitate, senza impatto sulla salute" [5]. In un recente documento della Commissione Europea, Ufficio Ippc (Integrated Pollution Prevention and Control) relativo alle migliori tecnologie di controllo per grandi impianti di combustione si afferma che "...there are no problems with ash, char or SO₂ at Ngcc plants. The only problem is NO_x which, at modern plants, is controlled by using special low-NO_x burners" [6]. Da questi documenti emergerebbe che in Italia ed in Europa è abbastanza diffusa la convinzione che centrali Ngcc emettano, come unici inquinanti di rilievo, ossidi di azoto. È interessante notare, infine, che in molti documenti italiani e UE viene fatto un uso disinvolto, intercambiabile e sostanzialmente ambiguo di termini quali "polveri", "PTS", "ash", "dust". Quando si parla di combustione di gas naturale si ha essenzialmente a che fare con polveri fini, quindi sarebbe auspicabile l'esclusivo utilizzo dei termini PM₁₀ e PM_{2,5} (vedi oltre), seguendo l'esempio della letteratura e della prassi nordamericana.

Una prima stima: fattori di emissione per le turbine a gas naturale

Una stima delle emissioni inquinanti di un dispositivo a combustione viene fornita dai cosiddetti fattori di emissione.

Essi danno, per una data sorgente, un valore di peso di inquinante per unità di energia prodotta. Al fine di ottenere i fattori di emissione più aggiornati ed attendibili che si possano reperire in letteratura, abbiamo contattato la US Energy Information Administration di Washington ed i tecnici della US Environmental Protection Agency (Epa) a Raleigh, North Carolina (Usa). Essi ci hanno fornito le tabelle dei fattori di emissione per le turbine a gas naturale che si trovano nella loro banca dati; tali dati sono peraltro consultabili via Internet [7]. Nell'introduzione di questi inventari si legge: "Questo tipo di documento è stato pubblicato a partire dal 1968 e costituisce la compilazione primaria dei fattori di emissione della Epa. Tutte le agenzie federali, statali e locali nonché i consulenti e le industrie utilizzano questo documento per identificare i maggiori responsabili dell'inquinamento atmosferico, sviluppare strategie di controllo delle emissioni, determinare l'applicabilità di programmi di controllo e compilare gli inventari delle emissioni per le analisi d'impatto sull'aria ed i programmi di implementazione statale" [1].

Un'analisi di queste tabelle evidenzia che un numero rilevante di inquinanti vengono emessi da turbine a gas naturale. Mediante semplici calcoli, ed applicando opportuni fattori di conversione per le unità di misura europee, si stima che per produrre 4.670 GWh di energia da turbine a gas (progetto da 780 MW di Minerbio, vedi sopra) vengano prodotti annualmente gli inquinanti riportati in Tabella 1, oltre naturalmente all'anidride carbonica, che costituisce la parte di gran lunga preponderante (vedi oltre). Questi valori si riferiscono a turbine con emissioni "non controllate", ovvero senza dispositivi o tecnologie

specifiche per la riduzione di inquinanti (tranne che per il particolato). Essi sono riferiti ad un numero elevato di turbine (circa 200) localizzate in tutti gli Stati Uniti, e non unicamente finalizzate alla produzione di energia. A questo proposito Epa afferma che "sono stati determinati livelli di emissioni molto simili per le turbine a gas naturale indipendentemente dall'applicazione industriale" [1]. In una centrale a ciclo combinato, parte dell'energia elettrica viene ottenuta recuperando parzialmente il calore del gas di scarico della turbina primaria, senza ulteriore utilizzo di combustibile. I fattori di emissione di Tabella 1 debbono essere quindi considerati come stime significative, ma molto approssimate, della quantità di inquinanti atmosferici emesse da centrali Ngcc da 780 MW.

Il caso specifico: centrali termoelettriche a ciclo combinato alimentate a gas naturale

Al fine di focalizzare meglio il problema sul caso specifico delle centrali Ngcc ed ottenere stime e dati più pertinenti, abbiamo esaminato un recente studio del National Renewable Energy Laboratory del Dipartimento dell'Energia del governo americano (Nrel/Doe) [2].

In questo lavoro viene preso in esame il rilascio di inquinanti nell'ambiente di una centrale Ngcc nel corso del suo intero ciclo di vita, valutato in 32 anni. Al meglio delle nostre indagini, anche a seguito di contatti diretti con le autrici del rapporto, questo risulta la più recente stima di questo tipo disponibile in letteratura. Le stesse autrici hanno pubblicato analoghi lavori relativi a centrali termoelettriche a carbone [8] e a biomassa [9]. Lo studio sulle centrali Ngcc è riferito ad un caso modello di centrale da 505 MW, e tutti i dati sugli inquinanti sono riportati in peso per unità di energia. Risulta quindi agevole la stima per centrali da 780 MW dello stesso tipo. Questo processo di "scaling-up", come vedremo, garantisce una stima dei dati di emissione largamente affidabile e confrontabile con dati di centrali "reali".

In Tabella 2 sono riportati i dati di emissione, dichiarati in sede di presentazione pubblica, dai proponenti la centrale di Minerbio, confrontati con quelli delle ricercatrici del Nrel/Doe. Da questo confronto si può ricavare che:

1) i valori di CO₂ sono in ottimo accordo;

Tabella 1 - Emissioni in atmosfera di inquinanti primari da parte di turbine alimentate a gas naturale per la produzione di 4.670 GW di energia elettrica, calcolate dai fattori di emissione tabulati dalla US Epa [1]^a

Inquinante	Quantità (t/anno)
Acetaldeide	0,3
Acroleina	0,06
Benzene	0,75
Formaldeide	22,6
Naftalene	0,01
Idrocarburi policiclici aromatici	0,02
Toluene	0,68
Xileni	0,40
Monossido di carbonio	1240
Metano	61
Ossidi di azoto	2070
Particolato totale ^b	48
Biossido di zolfo	24,5
Composti organici totali (Toc)	77,5
Composti organici volatili (Voc)	14,9
Totale	3.560,7

^a Per una serie di motivi, tali valori debbono essere considerati stime molto approssimate delle emissioni di una centrale Ngcc (vedi testo); ^b dispositivo di controllo emissioni: water-steam injection

- 2) i valori di ossidi di azoto dichiarati dai proponenti italiani sono del 70% più alti;
- 3) la discrepanza sui valori di particolato (polveri fini) è totale;
- 4) la quantità di SO₂ prodotta è piccola ma non nulla;
- 5) quasi 500 tonnellate l'anno di altri inquinanti non risultano dai dati forniti dai proponenti.

Il fatto che le quantità di ossidi di azoto dichiarate siano del 70% più alte, sembra suggerire che nell'impianto italiano non siano previsti impianti di abbattimento di questi inquinanti. Nell'impianto valutato da Spath e Mann è previsto un impianto di riduzione catalitica selettiva (Scr), in grado di abbattere gli NO_x, fino al 80%. Questa osservazione, assieme al buon accordo rilevato al punto (1) suggerisce che il calcolo per estrapolazione (505 MW→780 MW) è largamente affidabile. Tra gli altri inquinanti non dichiarati va sottolineato in primo luogo il particolato (polveri fini).

Esso viene oggi considerato il maggiore pericolo per la salute umana, nella famiglia dei più comuni inquinanti [10]. Il particolato di piccole dimensioni viene comunemente indicato come PM₁₀, ovvero polveri fini di diametro inferiore ai 10 micrometri, anche se vi è crescente preoccupazione per il PM_{2,5} (2,5 µm), più difficile da monitorare ma più penetrante lungo le vie respiratorie [11]. La composizione chimica del particolato varia molto a seconda della sorgente di produzione. In generale si può dire che esso contiene una parte organica (per esempio idrocarburi di varia origine) ed una parte inorganica (per esempio nitrati e solfati di metalli leggeri e pesanti). A questo proposito è opportuno sottolineare che la combustione del gas naturale comporta l'emissione in atmosfera di metalli pesanti (principalmente zinco, bario, vanadio, nichel, cromo, cadmio, piombo, mercurio [6, 12]). Tali quantità sono certamente molto più basse che nella combustione del carbone e dell'olio combustibile, ma possono difficilmente considerarsi trascurabili quando la quantità di materia prima che viene bruciata è dell'ordine del miliardo di metri cubi/anno (centrali da 800 MW di media). Tra gli altri inquinanti non dichiarati vi è il gas metano (principale componente del gas naturale) che viene rilasciato da perdite ineliminabili dalle condotte che lo portano alle turbine (1,4% [2]). Il metano è un gas ad effetto serra 21 volte più potente della CO₂ [13]. Infine, il monossido di carbonio è velenoso e la formaldeide è cancerogena. Tra gli "altri idrocarburi" giocano un ruolo rilevante il benzene (cancerogeno) e altri idrocarburi aromatici e non, tossici o cancerogeni (Tabella 1).

Alcuni inquinanti di Tabella 2 possono generare altri inquinanti, detti secondari. In particolare occorre rimarcare che gli ossidi di azoto sono precursori di ozono, gas velenoso per l'uomo, gli animali e le piante [14]. La reazione di formazione è complessa e richiede sia la presenza di sostanze organiche volatili in at-

Tabella 2 - Confronto tra le emissioni in atmosfera dichiarate da un'impresa proponente in Italia e i dati di letteratura per una centrale Ngcc da 780 MW che produce 4.670 GWh/anno (in t/anno)

Inquinante	Dati dei proponenti	Letteratura
Anidride carbonica, CO ₂	1.640.000	1.730.000
Ossidi di Azoto, NO _x	1.541	444
Particolato, PM ₁₀	0	290
Ossidi di zolfo, SO _x	0	9
Metano, CH ₄	n.d. ^a	205
Monossido di carbonio, CO	n.d. ^b	126
Altri idrocarburi	n.d.	47
Formaldeide, CH ₂ O	n.d.	42
Ammoniaca, NH ₃ ^c	c	98

^a (n.d., non dichiarato)

^b La stessa impresa ha di recente ammesso l'emissione di CO;

^c questo inquinante deriva dall'utilizzo della tecnologia Scr per l'abbattimento degli ossidi di azoto, che presumibilmente non è prevista nel progetto italiano (cfr. testo)

mosfera, di varia provenienza, sia la luce solare; si tratta cioè di un processo fotochimico. L'incidenza di questo processo risulta particolarmente importante nelle ore centrali delle giornate estive, quando l'irraggiamento solare raggiunge la massima intensità [14]. Gli ossidi di azoto, assieme a CO₂ ed ossidi di zolfo, generano acidi di vario tipo in presenza di umidità atmosferica. Questo processo chimico dà origine a *ricadute acide* (nebbie e piogge). L'umidità necessaria al processo è sempre presente in atmosfera e, in ogni caso, una centrale termoelettrica emette vapore d'acqua in grandi quantità dai camini, essendo l'acqua uno dei prodotti primari della combustione di idrocarburi.

Tabella 3 - Emissioni in atmosfera stimate per una centrale Ngcc da 780 MW che produce 4.670 GWh/anno^a

Inquinante	Quantità (t/anno)
Anidride carbonica, CO ₂	2.050.000
Ossidi di azoto, NO _x	2.700
Particolato	620
Ossidi di zolfo, SO _x	1.500
Metano, CH ₄	13.000
Monossido di carbonio, CO	1.350
Benzene	300
Altri idrocarburi	2.900
Formaldeide, CH ₂ O	42
Ammoniaca, NH ₃ ^b	98

^a I dati riportati si riferiscono all'intero ciclo di vita della centrale, dall'apertura del cantiere alla dismissione dell'impianto;

^b questo inquinante deriva dall'utilizzo della tecnologia Scr per l'abbattimento degli ossidi di azoto, che presumibilmente non è prevista nel progetto italiano (cfr. testo)

Emissioni sull'intero ciclo di vita di una centrale Ngcc

Al fine di effettuare una completa valutazione delle emissioni di una centrale Ngcc occorre considerare il suo intero ciclo di vita, dall'apertura del cantiere sino alla completa dismissione, ovvero "dalla culla alla tomba". Le ricercatrici del Nrel/Doe affermano che "non considerando un'analisi sull'intero ciclo di vita nell'esame degli effetti ambientali di una centrale Ngcc, l'ammon-tare totale delle emissioni in atmosfera risulterebbe severamente sottostimato" [2]. In questo studio si sono considerati 2 anni per la costruzione dell'impianto e 30 anni di attività, per un periodo complessivo di 32 anni. A pieno regime la centrale opera per l'80% del tempo pari a circa 7.000 ore/anno ed ha un'efficienza di produzione di energia elettrica media del 48,8% sui 30 anni di attività. Si è infine considerato che la centrale si colleghi ad un gasdotto preesistente lungo 4.000 km, al fine di valutare la porzione di materiale del gasdotto "assegnabile" alla centrale in questione. Tale lunghezza è dell'ordine di

grandezza dei gasdotti che collegano l'Italia ai suoi principali paesi fornitori, Algeria (2.400 km) e Russia (>4.000 km). La stima dell'impatto delle emissioni in atmosfera (in t/anno) di una centrale da 780 MW nell'arco dell'intero ciclo di vita è riportato in Tabella 3. Essi tengono conto non solo dell'attività di produzione di energia elettrica della centrale ma anche di tutta l'energia necessaria per i processi che occorrono a monte (estrazione e pompaggio del gas naturale e costruzione della centrale) e a valle (smantellamento dell'impianto). Questo approccio (Life Cycle Assessment) è codificato a livello internazionale dalla certificazione ambientale Iso 14000. È opportuno notare che vi è, rispetto a Tabella 2, un'impena delle emissioni di metano, dovuta ai processi di estrazione e trasporto, che comportano notevoli perdite [2].

Anche altri inquinanti hanno aumenti considerevoli rispetto a Tabella 2, per esempio SO_x, CO, particolato ed altri idrocarburi. Questo è legato al fatto che i consumi di energia elettrica per la costruzione e la dismissione sono basati su un sistema (Stati Uniti) che utilizza principalmente centrali a carbone (molto inquinanti) e nucleari (emissioni zero). In Italia il sistema elettrico è principalmente basato su centrali ad olio combustibile, meno inquinanti di quelle a carbone. È quindi ragionevole assumere che il contributo di emissioni dovute all'uso di energia elettrica per le opere al contorno della centrale non sia molto dissimile in Italia e negli Usa. Va notato che l'impatto totale delle emissioni di una centrale Ngcc, va suddiviso tra effetti locali (immediate vicinanze), regionali (regione interessata) e globali (scala planetaria).

Su questi ultimi vanno caricati essenzialmente tre effetti: cambiamento climatico, produzione di precursori per la distruzione di ozono stratosferico, impoverimento di risorse non rinnovabili. Gli effetti dell'inquinamento chimico primario e secondario sono essenzialmente di tipo locale e regionale. Dalla culla alla tomba, la resa energetica complessiva di un sistema Ngcc è del 40%. In altre parole per 100 unità di energia fossile consumata, 40 unità vengono convertite in elettricità, al netto di tutti i consumi energetici di contorno e dei limiti termodinamici intrinseci correlati alla trasformazione dell'energia [2].

Influenza sul riscaldamento globale: impatto serra

Considerato il potenziale devastante dei cambiamenti climatici sulla vita civile, sociale ed economica della nostra società, tutte le sostanze che contribuiscono al cambiamento climatico tramite effetto serra vengono ormai considerate dei veri e propri inquinanti. Al fine di affrontare il problema, le più avveniristiche soluzioni sono già allo studio di alcuni fra i principali centri di ricerca del mondo [15]. L'anidride carbonica, per quantità prodotta, è il principale gas ad effetto serra di natura

Tabella 4 - Emissioni in atmosfera per un impianto Ngcc dei tre principali gas serra sia in peso che in contributo relativo al riscaldamento globale del pianeta (Gwp)*

Gas serra	Emissioni in peso, %	Gwp, %
Anidride carbonica, CO ₂	99,4	88,1
Metano, CH ₄	0,6	11,9
Monossido di diazoto, N ₂ O	0,0002	0,04

* I dati sono riferiti al solo funzionamento dell'impianto

antropica. Una centrale Ngcc emette fondamentalmente tre gas ad effetto serra: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e monossido di diazoto (N₂O). Essi vengono presi in esame per valutare il cosiddetto potenziale di riscaldamento globale (Global warming potential, Gwp). La capacità cumulativa di CH₄ e monossido di diazoto (N₂O) di contribuire al riscaldamento dell'atmosfera sono, rispettivamente di 21 e 310 volte superiori a quella di CO₂ sull'arco di 100 anni [13].

In Tabella 4 sono riportati i dati delle emissioni di gas serra di un sistema Ngcc. Il metano emesso è frutto di due contributi: incombusto e perso lungo le condotte. Pur avendo un valore in peso trascurabile rispetto alla CO₂ (0,6% vs. 99,4 %) il metano, dato il suo elevatissimo carattere di gas serra, contribuisce in maniera sostanziale al riscaldamento globale. In altre parole, questi dati indicano che non considerare il metano come un inquinante tipico emesso da centrali Ngcc, porta ad una rilevante sottostima del loro impatto serra. L'impatto serra globale sull'intero ciclo di vita per una centrale Ngcc da 780 MW che opera 6.000 ore/anno è pari a 2.330.000 t/anno di CO₂ equivalente, suddivisi come indicato in Tabella 5. In pratica la quantità di gas serra in peso di CO₂ equivalente generata da una sola centrale da 780 MW sull'intero ciclo di vita è pari allo 0,5% di quanto l'Italia potrà produrre complessivamente nel periodo 2008-2012 secondo il trattato di Kyoto, ovvero 487 milioni di t/anno, corrispondenti ad un calo del 6,5% rispetto alle emissioni del 1990 [16].

Tabella 5 - Emissioni in atmosfera di gas serra per impianti Ngcc sull'intero ciclo di vita, scorporato per singoli contributi*

Sorgente gas serra	peso, %
Funzionamento della centrale	74,6
Produzione e distribuzione del gas naturale	24,9
Costruzione e smantellamento impianto	0,4
Produzione e distribuzione dell'ammoniaca	0,1

* L'ultima voce va considerata solo se il sistema prevede impianti di abbattimento di NOx tramite riduzione catalitica con ammoniaca (Scr)

Centrali Ngcc in California

La tecnologia Ngcc è relativamente recente per l'Europa e per l'Italia, in particolare. Al contrario un certo numero di queste centrali è già attivo in California, moltissime sono in fase di realizzazione, alcune delle quali entreranno in funzione nel corso del 2003. Va sottolineato che la legislazione ambientale californiana è tra le più severe al mondo, di conseguenza questi impianti debbono essere sempre forniti delle migliori tecnologie di abbattimento degli inquinanti (Bact, Best Available Control Technologies).

Gli inquinanti emessi da centrali californiane Ngcc sono classificati in cinque categorie principali: ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), particolato (PM₁₀), ossidi di zolfo (SO_x), composti organici volatili (Voc). In quest'ultima categoria rientrano tutti gli inquinanti organici di varia natura riportati singolarmente nelle Tabelle 1-3.

La legge californiana impone che per ognuno dei cinque tipi di inquinanti venga specificata, nel corso del processo autorizzatorio, la quantità di emissione prevista, corredata da un adeguato "pacchetto di compensazione" (Offset Package,

OP). Si tratta di un meccanismo complesso in base al quale posta 100 la quantità di un certo inquinante di una data sorgente, debbono essere ridotte nella regione interessata le emissioni da altre fonti, tipicamente impianti produttivi, per almeno 100 dello stesso inquinante. L'impresa proponente deve farsi carico dell'onere economico dell'acquisto di OP. Esso può essere effettuato con varie modalità tra le quali l'acquisto di un pacchetto presso la banca dello Stato che vende questi "diritti", o il pagamento di impianti di abbattimento più moderni in imprese della zona, che possono venire letteralmente pagate anche per cessare la loro attività. In poche parole l'apertura di una centrale non può peggiorare la qualità dell'aria nella regione interessata, al massimo la può lasciare inalterata, se non migliorarla, grazie al meccanismo virtuoso indotto dai pacchetti di compensazione.

Questo severo meccanismo rende possibile un progressivo miglioramento della qualità dell'aria incentivando l'uso di tecnologie sempre meno inquinanti e bloccando la spirale infinita dell'aumento incontrollato delle emissioni. In Tabella 6 sono riportate le emissioni annuali previste di alcune centrali autorizzate in California [17-21]. Gli ordini di grandezza delle quantità emesse sono paragonabili, ma leggermente variabili a seconda del progetto specifico, e delle diverse tecnologie di abbattimento usate di volta in volta. Le emissioni di PM₁₀, che vengono regolarmente ignorate nei progetti e negli studi di impatto ambientale italiani [4], sono dell'ordine delle 150-250 t/anno. Esse sono in buon accordo coi valori dello studio modello di Spath e Mann (290 t/anno, Tabella 2). I pacchetti di compensazione per il PM₁₀ previsti in queste centrali vanno da un "offset ratio" minimo di 1:1 fino a 2.4:1 nel caso di Elk Hills [19,21]. Vale a dire Elk Hills produrrà 159 t/anno di PM₁₀, ma ben 385 t di emissioni di PM₁₀ dovranno essere eliminate in zona come effetto compensativo. È di cruciale importanza sottolineare inoltre che le centrali californiane debbono essere munite di tecnologie di prevenzione o abbattimento per tutti i tipi di inquinanti. Nel caso di High Desert Power Plant sono previsti [18]:

- NO_x: Combustori Dry Low NO_x + riduzione selettiva catalitica (Scr);
- CO + Voc: catalizzatori di ossidazione;
- PM₁₀: abbattimento in torre di raffreddamento.

Nella centrale di Bentivoglio (BO) sarebbero previsti unicamente Combustori Dry Low NO_x per gli ossidi di azoto e null'altro per gli altri inquinanti [4]. Questo del resto non sor-

prende poiché in Italia tali inquinanti paiono essere considerati del tutto irrilevanti, come già sottolineato. Questa sottovalutazione è particolarmente grave per quanto riguarda le polveri fini PM₁₀, poiché i dati qui riportati dimostrano che una centrale Ngcc da 780 MW con il massimo di controllo sugli inquinanti primari produce comunque una quantità di PM₁₀ dell'ordine delle 150-250 t/anno. Non è quindi difficile ipotizzare che in assenza di severi controlli su NO_x, Voc, CO, SO_x (tutti precursori di polveri fini secondarie [22]) la produzione di PM₁₀ possa agevolmente superare le 300 t/anno negli impianti italiani. Si noti ad esempio che le quantità permesse di ossidi di azoto negli Stati Uniti (Tabella 6) sono ben 5-10 volte minori di quelle di un impianto italiano (Tabella 2). Va ricordato infine che,

Tabella 6 - Centrali Ngcc recentemente autorizzate in California e quantità di emissioni previste ed autorizzate per ognuna delle 5 principali classi di inquinanti (t/anno)

Centrale (Localizzazione), Potenza	NO _x	CO	PM ₁₀	Voc	SO ₂
Delta Energy Center (San Francisco Area), 880 MW	298	1229	162	79	20
Pastoria Energy (Bakersfield), 750 MW	206	n.d.	228	121	42
High Desert Power Plant (Southern California Intl. Airport), 700 MW	205	750	234	129	14
Los Medanos Energy Center (Contra Costa), 555 MW	153	488	124	98	40
Blythe (Riverside County), 520 MW	202	306	103	24	24
Elk Hills (Kern County), 500 MW	148	112	159	33	29

secondo l'approccio che descrive l'impatto sull'intero ciclo di vita, la quantità di PM₁₀ prodotta da una centrale Ngcc da 780 MW va stimato in ben 620 t/anno. È da escludere che le centrali americane siano più inquinanti di quelle italiane per la peggiore qualità del gas naturale utilizzato (Tabella 7).

Al contrario, il gas algerino distribuito in molte regioni italiane attraverso il gasdotto Transmed è certamente di qualità inferiore rispetto a quello americano a causa del minor contenuto di metano e del maggior contributo di idrocarburi superiori ed azoto. A questo punto è necessario riportare i valori di PM₁₀ prodotti da centrali Ngcc da 780 MW (150-600 t/anno) con grandezze "comprensibili". Per questo scopo ci viene in aiuto il Rapporto di Sintesi sullo Stato dell'Ambiente del Comune di Bologna pubblicato nel dicembre 2002, con Prefazione dell'Assessore alla Sanità e Ambiente, Gian Paolo Salvioli, già Preside della Facoltà di Medicina presso l'ateneo bolognese. In questo documento, a pag. 4 si legge "...dalle marmitte dei veicoli che circolano nell'area urbana di Bologna esce ogni giorno circa una tonnellata di polveri sottili PM₁₀, di cui ben il 60% è dovuto alla circolazione sulle strade urbane di autoveicoli, ciclomotori, motocicli, veicoli commerciali, mentre il sistema tangenziale-autostrada contribuisce per circa il 40%" [24]. In conclusione i dati qui riportati dimostrano che, una centrale da 780 MW produce in un anno, una quantità di PM₁₀ dell'ordine di quella prodotta dal traffico della città di Bologna nella quale risiedono 375 mila persone, verso la quale migliaia di persone si muovono in auto per andare al lavoro, caratterizzata dallo snodo autostradale chiave per i collegamenti nord-sud

Tabella 7 - Composizione media (mol %) del gas naturale utilizzato negli Stati Uniti [2] e di quello, di varia provenienza, utilizzato in Italia [23]

Componente	Usa	Algeria	Russia	Olanda	Italia
Metano	94,40	83,28	98,07	91,01	99,62
Etano	3,10	7,68	0,60	3,70	0,06
Propano	0,50	2,05	0,22	0,88	0,02
Idrocarburi superiori	0,40	1,10	0,12	0,42	0,02
Anidride carbonica	0,50	0,19	0,11	1,11	0,02
Azoto	1,10	5,52	0,87	2,84	0,26
Elio	0,00	0,18	0,01	0,04	0,00

ed est-ovest del sesto Paese più industrializzato del mondo. I già gravi problemi d'inquinamento atmosferico dei capoluoghi dell'Emilia Romagna sono peraltro testimoniati dal fatto che, da ottobre 2002 ad aprile 2003, è stata imposta la circolazione a targhe alterne per 2 giorni la settimana.

Conclusioni

I risultati dell'istruttoria a tre stadi qui riportata concorrono univocamente a dimostrare che le centrali termoelettriche a ciclo combinato alimentate a gas naturale sono una sorgente tutt'altro che trascurabile d'inquinamento atmosferico. Gli inquinanti principali sono ossidi di azoto [25], monossido di carbonio, polveri fini, sostanze organiche volatili ed ossidi di zolfo. In Italia ed in Europa sembra prevalere una certa sottovalutazione del problema come testimoniato dal fatto che a) non si prevedono sistemi di abbattimento per tutti gli inquinanti, come accade in Usa; b) si considera irrilevante l'emissione di PM_{10} [4-6]. È certamente vero che la riconversione di vecchie centrali a carbone o ad olio combustibile in impianti Ngcc può produrre un'apprezzabile riduzione dell'inquinamento atmosferico e dell'impatto serra [2, 26]. Tuttavia, quando si tratti di nuovi impianti, occorre ponderare con molta attenzione la loro localizzazione. Riteniamo che l'autorizzazione alla costruzione di nuovi impianti Ngcc, che tra gli altri producono alcune centinaia di tonnellate/anno di polveri fini PM_{10} , non potrà essere disgiunta da iniziative compensative adeguate in modo da non peggiorare la qualità dell'aria nelle regioni interessate.

Se nel nostro Paese venisse adottata una normativa rigorosa come quella californiana, data l'elevata densità di popolazione e le caratteristiche orografiche e meteorologiche di alcune aree specifiche (per esempio Pianura Padana), l'autorizzazione potrebbe essere data solo se la qualità complessiva dell'aria migliorasse (offset packages con rapporti superiori ad 1:1).

Per quanto riguarda i gas serra va rilevato che solo politiche di forte incentivazione all'uso delle fonti rinnovabili [27], in linea con quanto accade in altri paesi europei [28], possono ridurre stabilmente la produzione. Queste sono le sfide che le autorità legislative italiane sono chiamate a raccogliere, se vorranno garantire la sicurezza degli approvvigionamenti energetici [29] senza trascurare possibili, gravi implicazioni per la salute dei cittadini [30-32] e il futuro climatico del pianeta [33-36].

Bibliografia

- [1] Emission Factor Documentation of AP-42 Section 3.1, Stationary Combustion Turbines, US Environmental Protection Agency, Alpha-Gamma Technologies Inc., Raleigh, North Carolina, 2000.
- [2] 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.
- [3] A questo proposito si può consultare il sito del California Air Resources Board alla voce centrali elettriche: <http://www.arb.ca.gov/energy/powerpl/powerpl.htm> (7 aprile 2003).
- [4] Centrale a ciclo combinato di Bentivoglio: Studio d'impatto ambientale (sintesi non tecnica), 3E Ingegneria Srl, Pisa, p. 23.
- [5] Su *Oggi* (RCS Periodici) n. 51, 18 dicembre 2002, p. 177.
- [6] Draft Reference Document on Best Available Techni-

ques for Large Combustion Plants, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), The European Commission, marzo 2001, p. 299.

- [7] Si veda il sito: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html> (7 aprile 2003).
- [8] P.L. Spath, M.K. Mann, Life Cycle Assessment of Coal-fired Power Production. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, TP-570-25119, 1999.
- [9] P.L. Spath, M.K. Mann, Life Cycle Assessment of a Direct-fired Biomass Power Generation System. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, TP-570-26942, 2000.
- [10] J.M. Samet *et al.*, *N. Engl. J. Med.*, 2000, **343**, 1742.
- [11] Uno dei maggiori database del mondo sul $PM_{2.5}$ si trova presso il sito della US Environmental Protection Agency: <http://www.epa.gov/region4/sesd/pm25/p2.htm> (7 aprile 2003).
- [12] Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Fifth Edition, Volume I, Section 1.4: External Combustion Sources-Natural Gas Combustion, US Environmental Protection Agency, Eastern Research Group, Morrisville, North Carolina, 1998.
- [13] J.T. Houghton *et al.* (Eds.) 1996. Climate Change 1995. The Science of Climate Change, Cambridge University Press, New York.
- [14] Ozono e Smog Fotochimico, V. Poluzzi, M. Deserti, S. Fuzzi (Eds.), Maggioli Editore, 1998.
- [15] M.I. Hoffert *et al.*, *Science*, 2002, **298**, 981.
- [16] Relazione sullo stato dell'ambiente 2001, L'inquinamento atmosferico e i cambiamenti climatici", Ministero dell'Ambiente, Roma, p. 112.
- [17] Final Determination of Compliance, Delta Energy Center, Bay Area Air Quality Management District, 21 ottobre 1999.
- [18] Final Determination of Compliance, High Desert Power Project, Mojave Desert Air Quality Management District, 29 giugno 1999.
- [19] Documento complessivo sugli offset packages del California Air Resources Board: www.arb.ca.gov/energy/powerpl/guidedoc/offsets.doc (7 aprile 2003).
- [20] Final Determination of Compliance, Blythe Energy Project, Mojave Desert Air Quality Management District, 25 ottobre 2000.
- [21] Final Staff Assessment, Elk Hills Power Project, California Energy Commission, aprile 2000.
- [22] W.R. Stockwell *et al.*, *Atmos. Environ.*, 2000, **34**, 4711.
- [23] ExternE National Implementation, Italy, Fondazione Enrico Mattei, Contratto JOS3-CT95, 0010 (Joule III Programme, European Commission) Final Report, 1997, p. 83.
- [24] Rapporto di sintesi sullo stato dell'ambiente del Comune di Bologna, dicembre 2002, p. 4.
- [25] R. Zhang *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2003, **100**, 1505.
- [26] S.W. Hadley, W. Short, *Energ. Policy*, 2001, **29**, 1285.
- [27] J. Johnson, *Chem. & Eng. News*, 24 febbraio 2003, p. 27.
- [28] D. Bachtold, *Science*, 2003, **299**, 1291.
- [29] Autori vari, *Science* (numero speciale sull'energia), 30 luglio 1999: <http://www.sciencemag.org/content/vol285/issue5428/index.shtml#toc> (7 aprile 2003).
- [30] Organizzazione Mondiale della Sanità, Health impact assessment of Air Pollution in the Eight Major Italian Cities. <http://www.who.dk/document/E75492.pdf> (7 aprile 2003).
- [31] A. Rabl, J.V. Spadaro, *Annu. Rev. Energy Environ.*, 2000, **25**, 601.
- [32] K.A. Kolburn, P.S. Johnson, *Science*, 2003, **299**, 665.
- [33] F.W. Zwiers, *Nature*, 2002, **416**, 690.
- [34] R. Knutty *et al.*, *Nature*, 2002, **416**, 719.
- [35] P.A. Stott, J.A. Kettleborough, *Nature*, 2002, **416**, 723.
- [36] D. Kennedy, *Science* (editorial), 2003, **299**, 17.