

# CRESCITA DEMOGRAFICA, SVILUPPO, RISORSE ENERGETICHE E AMBIENTE: L'OPZIONE NUCLEARE

Ing. Prof. D. Menniti\*, Ing. A. Burgio\*, Ing. N. Scordino\*, Ing. L. Guagliardi°

\* D.E.I.S., Università della Calabria, Via P. Bucci, cubo 42/C,  
87036 Arcavacata di Rende (CS) (e-mail: [menniti@deis.unical.it](mailto:menniti@deis.unical.it))

° Direttore del Consorzio Regionale per l'Energia e la Tutela Ambientale (CRETA)  
Via P. Bucci, cubo 42/C, 87036 Arcavacata di Rende (CS) (e-mail: [lguagliardi@deis.unical.it](mailto:lguagliardi@deis.unical.it))

## SOMMARIO

Partendo dai problemi connessi alla crescita ed allo sviluppo demografico, all'incremento dei consumi energetici ed al prossimo raggiungimento dei picchi di produzione di petrolio e gas naturale, in questa memoria è affrontato il problema del soddisfacimento della domanda italiana di energia elettrica riferita all'anno 2010.

Con riferimento alla situazione italiana, gli autori hanno quindi simulato due possibili scenari, con e senza la produzione di energia elettrica da fonte nucleare. Dai risultati ottenuti, il ricorso al nucleare appare strategico al fine di fronteggiare, nel breve/medio termine, l'attesa di nuove o più efficienti tecnologie per lo sfruttamento delle fonti energetiche rinnovabili ed alternative.

## 1. INTRODUZIONE

La crescita demografica, connessa alla contestuale forte crescita dei consumi energetici globali, rende sempre più complesso ed arduo il problema del reperimento delle risorse energetiche necessarie all'umanità. Infatti, alla crescita dei consumi dei Paesi che vengono tradizionalmente considerati sviluppati e che oggi costituiscono appena il 20% circa della popolazione mondiale, da oltre un decennio va aggiunta sia la crescita dei consumi di alcuni tra i Paesi più popolosi del globo, quali Cina e India, che da soli costituiscono ben il 35% dell'intera popolazione mondiale, sia, in un futuro più o meno prossimo, la crescita dei consumi della restante parte della popolazione mondiale.

A questo fenomeno si aggiunge quello degli effetti che hanno sull'ambiente le attuali modalità di produzione dell'energia che, come ben noto, si avvalgono prevalentemente dell'impiego di combustibili fossili.

Tra tali effetti, il primo fra tutti è quello dovuto alle emissioni di gas climalteranti, rispetto al quale esistono forti e preoccupate prese di posizione oltre che una concertazione internazionale che ormai dovrebbe potersi considerare operativa con l'entrata in vigore del protocollo di Kyoto.

E' evidente, quindi, la necessità di dover fronteggiare entrambi i fenomeni con soluzioni capaci di soddisfare l'inarrestabile crescita dei consumi energetici e la, oramai improrogabile, necessità di ridurre gli effetti che l'attuale produzione di energia ha sull'ambiente.

Per ciò che concerne la produzione di energia elettrica, attualmente esistono molte tecnologie ma nessuna sembra essere da sola capace di fronteggiare entrambi i fenomeni citati.

La generazione da fonti energetiche rinnovabili, ad esempio, se da un lato è a pieno adeguata per ciò che concerne le emissioni climalteranti dall'altro, stante la tecnologia attuale, non sembra possa soddisfare che una minima parte del fabbisogno energetico mondiale attuale e futuro.

D'altro canto il ricorso massiccio a combustibili fossili, anche ammesso che possa garantire il soddisfacimento del

fabbisogno energetico mondiale su un orizzonte temporale superiore al secolo (es. il carbone), continua ad essere fortemente in conflitto con i problemi connessi con l'ambiente, la cui rilevanza è oramai prioritaria.

Risulta quindi inevitabile investire nella ricerca scientifica e tecnologica al fine di poter giungere ad individuare soluzioni tecnologiche capaci di consentire la produzione di energia da fonti rinnovabili e non rinnovabili in proporzioni tali da rendere sostenibile, su scala planetaria, la crescita demografica accompagnata da uno sviluppo globale quanto più uniforme possibile.

L'individuazione di tali soluzioni richiede del tempo e questo non è preventivabile a priori. In aggiunta, l'evoluzione demografica e la crescita dei consumi energetici mondiali non sembrano essere compatibili con tale livello di incertezza. Tali incompatibilità sono preoccupanti se, come previsto da alcuni studiosi, il raggiungimento del picco massimo della produzione di petrolio e di gas naturale si avrà rispettivamente nel 2010 e 2020.

Da qui, l'esigenza di ricorrere a soluzioni che, se pure complesse per via dei problemi connessi ad una loro gestione in "piena sicurezza", consentano comunque di fronteggiare sia la progressiva richiesta di energia sia le problematiche ambientali.

Nel presente lavoro, con riferimento alla situazione italiana, si è valutata quindi l'opzione nucleare come possibile soluzione transitoria in attesa che la ricerca possa offrire nuove e più efficienti tecnologie per la produzione di energia elettrica.

Lo studio è condotto mediante l'uso di un modello di ottimizzazione lineare che tiene conto del soddisfacimento della domanda di energia elettrica, di tutte le fonti energetiche oggi sfruttate per la sua produzione nonché degli impegni presi dall'Italia con la firma del protocollo di Kyoto, entrato definitivamente in vigore il 16 febbraio 2005.

Con riferimento al 2010, gli autori hanno quindi utilizzato il modello al fine di simulare due possibili scenari: nel primo le fonti energetiche sono quelle attualmente sfruttate, nel secondo si aggiunge quella nucleare.

Nella sezione 2 le problematiche della crescita demografica mondiale, dello sviluppo e delle risorse energetiche, dell'ambiente e dei gas climalteranti sono brevemente discusse;

Nella sezione 3 è presentato l'approccio numerico ed il modello di ottimizzazione lineare, nella sezione 4 sono invece riportati i risultati relativi ai due scenari simulati.

## 2. PROBLEMATICHE CONTRASTANTI

Le problematiche della crescita demografica mondiale, dello sviluppo e delle risorse energetiche e dell'ambiente devono essere affrontate contemporaneamente al fine di poter prospettare soluzioni adeguate ad affrontare gli scenari futuri. Non è la prima volta però che un intreccio così forte di problematiche deve essere affrontato dall'umanità.

In un passato non molto lontano, con molte meno conoscenze, l'uomo ha già dovuto affrontare una situazione per molti versi simile a quella attuale, per ristabilire l'equilibrio tra crescita demografica e risorse necessarie per la sussistenza della specie umana. All'epoca oltre che una grande quantità di risorse non ancora sfruttate, come ad esempio il carbone ed il petrolio, si disponeva anche di una situazione ambientale che era ben lontana da quella attuale. In quelle circostanze l'uomo riuscì grazie al suo ingegno a superare la crisi mediante invenzioni e scoperte impensabili prima. Oggi, anche se con difficoltà aggiuntive che almeno apparentemente sembrano ben più ardue da superare, sembra riproporsi lo stesso scenario.

Quindi, affinché la storia si ripeta, è necessaria una forte presa di coscienza da parte di tutti gli attori in gioco che, fuori da pericolose operazioni demagogiche e populistiche, vada nella direzione di un massiccio impegno nella ricerca scientifica e tecnologica per il ristabilimento di un nuovo equilibrio globale e senza dimenticare che il tempo è anch'esso una risorsa assai scarsa.

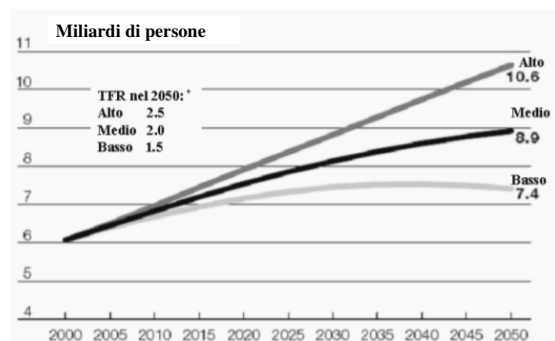
### 2.1 Crescita demografica

Alla fine del '700, la prospettiva di un crescente squilibrio tra la popolazione e le risorse disponibili per la sopravvivenza della specie umana è stata ritenuta da molti una delle cause che ha scatenato la grande ondata rivoluzionaria che, in Europa, prese ad allargarsi a macchia d'olio a partire dalla Francia con la Rivoluzione del 1789 [1].

Questo crescente squilibrio tra popolazione e risorse venne evidenziato da Thomas Robert Malthus nel 1798 come il più grande problema affrontato dalla specie umana e cioè che il "potere della popolazione è infinitamente maggiore del potere della terra di produrre sussistenza per l'uomo" [2]. Ciò in quanto, egli sostenne, la popolazione raddoppiava ogni venticinque anni (progressione geometrica) contro una crescita non altrettanto rapida (progressione aritmetica) della produzione alimentare.

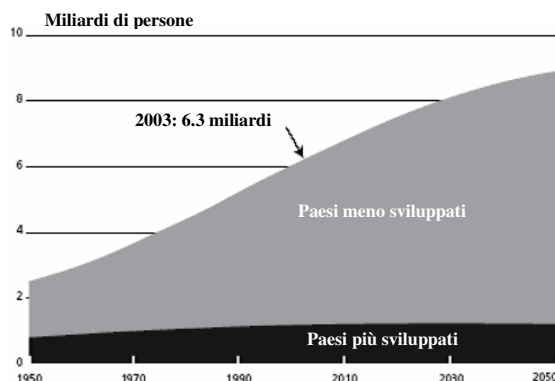
A salvare almeno parte della popolazione umana dalle terribili conseguenze della esplosione demografica che tanto aveva preoccupato Malthus fu la rivoluzione industriale del tempo. Questa consentì uno straordinario processo di espansione produttiva grazie alla sostituzione dell'uomo con le macchine meccaniche e dell'energia umana ed animale, inizialmente, con quella del vapore e, successivamente, con quella elettrica [3]. Come conseguenza, nel corso del XIX secolo ad esempio, la popolazione britannica aumentò di quattro volte mentre il prodotto nazionale crebbe di ben

quattordici volte [4].



TFR (total fertility rate): numero medio di bambini che una donna avrà sulla base degli attuali parametri adoperati per la stima del tasso di natalità. UN Population Division, *World Population Prospects: The 2002 Revision*

Fig. 1 Popolazione mondiale al 2050



UN Population Division, *World Population Prospects: The 2002 Revision*

Fig. 2 Popolazione dei Paesi meno e più sviluppati al 2050

Oggi, a terzo millennio appena avviato, si ripropongono scenari simili a quelli analizzati da Malthus. Infatti, secondo gli studi del Population Reference Bureau (PRB), entro il 2050 la popolazione mondiale potrebbe attestarsi tra i 7,4 e i 10,6 miliardi di individui (Fig. 1) [5].

A tal proposito, è rilevante osservare (Fig. 2) il divario numerico esistente tra la popolazione dei paesi più sviluppati e quella dei meno sviluppati. La prima, che presenta una crescita prossima allo zero, non si discosta molto da 1,2 miliardi di individui; la seconda invece, già ai giorni nostri, è circa 5,2 miliardi [6,7].

### 2.2 Sviluppo e risorse energetiche

Sulla base delle osservazioni precedentemente fatte, è importante ricordare che attualmente gli Stati Uniti rappresentano solo il 4,6% della popolazione mondiale e consumano in un anno il 25% di tutta l'energia consumata sul globo terrestre [8]. Da questo dato ne discende che in futuro, qualora la popolazione della Cina raggiungesse i consumi pro capite statunitensi, il consumo mondiale di energia raddoppierebbe.

Va però realisticamente considerato che, ad oggi, un terzo della popolazione mondiale non può usufruire dell'elettricità, mentre per la restante parte la situazione non è molto più rosea. Pertanto, oggi, la popolazione umana vive disponendo pro capite di poche centinaia di kilowattora l'anno, molto meno di quanto servirebbe per garantire alla loro vita un salto di qualità.

Quindi, nell'ipotesi di poter realizzare l'obiettivo definito dalle grandi organizzazioni transnazionali per lo sviluppo, ovvero di raggiungere una elettrificazione globale entro il 2050, risulterà necessario offrire ogni anno un allacciamento alla rete elettrica a 100 milioni di persone in più. Per fornire a questi nuovi utenti anche solo la stessa quantità d'energia consumata da un cittadino statunitense medio nel 1950, sarebbe necessario creare una capacità di generazione pari a 10 milioni di megawatt entro il 2050, a cui corrisponderebbe una produzione di energia pari al quadruplo dei consumi mondiali attuali [9].

Mentre, invece, per fornire a tutta l'attuale popolazione del globo la possibilità di raggiungere i livelli di attuali di consumo di un cittadino statunitense, il consumo mondiale quintuplicherebbe.

Oggi è quindi irrealistico ipotizzare uno sviluppo sostenibile considerando i livelli di consumo energetico dei paesi più sviluppati estesi a tutta la popolazione mondiale. Sarebbe poi del tutto irragionevole ipotizzarlo in uno scenario futuro, con una popolazione pari ai livelli previsti per il 2050.

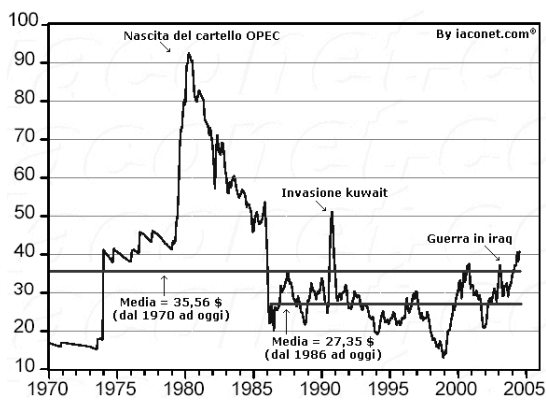


Fig. 3 Prezzo del petrolio negli ultimi 35 anni

Nella situazione attuale, in cui la produzione di energia è affidata prevalentemente ai combustibili fossili, anche la sola ipotesi di raddoppiare i consumi non risulta realizzabile, sia per i problemi di natura ambientale posti dall'utilizzo di tutti i combustibili fossili e sia per la scarsità delle riserve di quelli più utilizzati (petrolio e gas).

Infatti, secondo alcuni analisti, il picco della produzione petrolifera globale si attesterà intorno al 2010 [10], data a partire dalla quale il prezzo del petrolio subirà continui aumenti.

E' anche vero che negli anni passati il petrolio, pur ancora presente in abbondante quantità, ha visto alzare il proprio prezzo di vendita a causa di eventi bellici (Fig. 3) che potranno ripetersi anche prima del 2010 stesso.

A ciò, purtroppo si aggiunge che anche il gas naturale, molto meno inquinante del petrolio e del carbone [11], raggiungerà il suo picco nel 2025 [12].

### 2.3 Ambiente

I problemi di natura ambientale precedentemente citati sono quelli legati alle emissioni di "gas serra", prevalentemente biossido di carbonio, dovuti alla produzione di energia da combustibili fossili.

A tali emissioni si attribuiscono da più parti i cambiamenti climatici che si manifestano sempre più spesso con eventi estremi, quali alluvioni, tifoni e tornado, per l'effetto del riscaldamento globale del pianeta che le stesse sembrano

provocare, tanto da essere definite clima alteranti [13,14,15].

Questo aspetto è stato richiamato fortemente dal recente rapporto sui cambiamenti climatici commissionato dal Pentagono, "Lo scenario di un improvviso cambiamento climatico e le sue implicazioni per la sicurezza degli Stati Uniti", e pubblicato dal settimanale britannico The Observer [16]. Vengono descritte analisi molto complesse delle correlazioni tra le emissioni di "gas serra" e le variazioni del clima disegnando un quadro tanto apocalittico da essere stato persino preso a riferimento per la produzione del famoso film della Fox, "The Day After Tomorrow", in cui un'inattesa glaciazione coglie il mondo alla sprovvista.

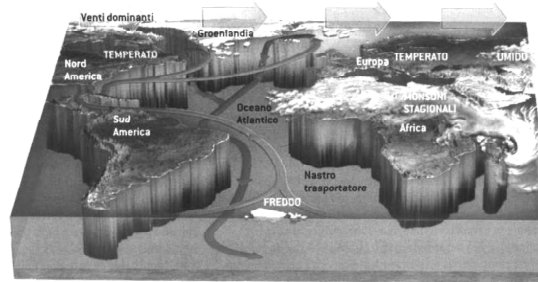


Fig. 4 La circolazione termoalina naturale

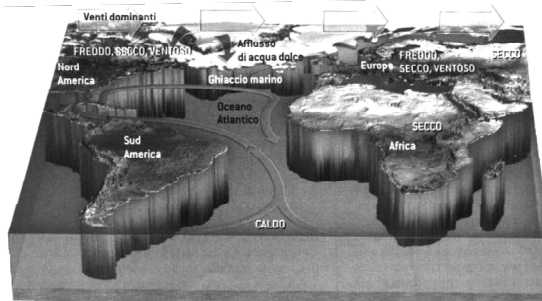


Fig. 5 La circolazione termoalina alterata

Nel rapporto si ritiene verosimile che, partendo dall'aumento globale della temperatura, il lento scioglimento della calotta di ghiaccio della Groenlandia e, forse, l'incremento delle piogge possano riversare nelle acque salate e dense del nord ingenti quantitativi di acqua dolce e, quindi, meno densa.

In tal modo (Fig. 4), la corrente d'acqua calda proveniente da sud, anch'essa meno densa poiché più calda e che viaggia sugli strati più superficiali dell'oceano, verrebbe ostacolata dall'acqua fredda e dolce anch'essa occupante gli stessi strati superficiali. Viene quindi ipotizzata la possibilità di un "collasso" più o meno rapido della circolazione termoalina [14]. In tal modo, la corrente d'acqua calda, non potendo raggiungere le latitudini più a nord come avviene in condizioni normali (Fig. 5), cessa di contribuire alla mitigazione del clima, che così passa da temperato a molto freddo. Vengono, quindi, considerate le ipotetiche misure di difesa nazionale che gli USA dovrebbero adottare per contrastare il prevedibile afflusso di decine di milioni di rifugiati ambientali.

Il rapporto non ha le caratteristiche di un documento scientifico, come quelli redatti dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [15], più volte messi in discussione dal governo statunitense e, per tale ragione, si rimane maggiormente colpiti dalle previsioni geopolitiche che il Pentagono azzarda. In definitiva, tale rapporto sembra porre l'umanità dinanzi ad una alternativa secca, tra un disastro ecologico globale e un impegno concreto e tempestivo per

invertire i processi in corso.

### 3. L'OPZIONE NUCLEARE

La crescita demografica, la contemporanea riduzione delle riserve di combustibili fossili e i problemi ambientali connessi con il loro utilizzo, non possono essere risolti facendo affidamento alle fonti di energia rinnovabili ed alternative (sole, vento,...) ed alle relative tecnologie ad oggi conosciute per il loro sfruttamento.

A tal proposito, la Shell ha stimato che, entro la fatidica data del 2050, le fonti rinnovabili di energia, inclusa quella solare, copriranno solo poco più di un terzo del mercato della nuova generazione elettrica [12, 17]. Se anche tale scenario fosse attendibile e tenesse conto della crescita della popolazione mondiale e dell'incremento dei consumi dei paesi meno sviluppati, si capisce come tutto ciò comunque non sarebbe sufficiente ad evitare future crisi energetiche e gravi catastrofi ambientali.

Pertanto, con riferimento alla situazione italiana, in questa memoria viene considerato il possibile apporto della fonte energetica nucleare per il soddisfacimento della domanda di energia elettrica in Italia al 2010.

#### 3.1 Due possibili scenari

Dal 16 febbraio 2005 è entrato definitivamente in vigore il protocollo di Kyoto in tutti i paesi che lo hanno ratificato e quindi anche in Italia; con la ratifica questi paesi si sono assunti l'impegno a ridurre, entro il 2008-2012, le emissioni globali dei sei principali gas serra del 5,3% in media, rispetto ai valori del 1990.

Da qui, la necessità di esplorare tutte le possibili politiche energetiche per il raggiungimento degli obiettivi in esso contenuti.

In questa ottica, lo studio condotto dagli autori si pone l'obiettivo di ricavare la composizione ottimale della generazione di energia elettrica con le diverse fonti energetiche oggi sfruttate in Italia, nel rispetto dei vincoli di soddisfacimento della richiesta di energia prevista per il 2010 e nel rispetto del di protocollo di Kyoto.

#### 3.2 Modello matematico

Lo studio è condotto mediante un modello matematico per l'ottimizzazione della generazione dell'energia elettrica da fonti diverse. L'idea è quella di definire la configurazione ottimale della generazione minimizzandone il costo complessivo che comprende tanto quello economico-industriale quanto quello economico-ambientale.

Il modello matematico deriva da uno già utilizzato da altri autori in [20] col fine di valutare il vantaggio dell'Italia di aderire al Protocollo di Kyoto senza però contemplare la generazione da fonte nucleare.

Modificando opportunamente la funzione obiettivo e l'insieme dei vincoli del modello proposto in [20] si deriva il modello utilizzato nel presente lavoro, che consente così di portare in conto l'opzione nucleare.

La nuova funzione obiettivo è la somma di tutti i costi associati alle diverse risorse energetiche disponibili e che pertanto diventano le variabili decisionali del problema. Sono considerati distintamente i costi industriali (fattori di produzione), quelli ambientali locali (impatto ambientale/sanitario) e quelli ambientali globali (cambiamenti

climatici globali e gas clima alteranti) [18,19,20,21].

I vincoli consistono essenzialmente nel soddisfacimento della richiesta di energia elettrica in Italia prevista per il 2010 e nel soddisfacimento dei limiti di emissione di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>).

Il modello utilizzato è il seguente:

$$\min \sum_{i \in J} (c_i + g \alpha_i) \cdot x_i$$

s.v.

$$\sum_{i \in J} x_i \geq D(2010)$$

$$\sum_{i \in J} \alpha_i x_i \leq B(CO_2)$$

$$lb_i \leq x_i \leq ub_i \quad \forall i \in J$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall i \in J$$

dove:

- $x_i$  è la variabile decisionale, esprime la quantità di energia, in kWh, prodotta con la tecnologia  $i$ ;
- $c_i$  è la somma del costo ambientale locale ( $c_{loc-i}$ ) e di quello industriale ( $c_{ind-i}$ ), in €; il costo è riferito alla produzione di 1 kWh di energia con la tecnologia  $i$ ;
- $g$  è il costo ambientale globale medio, in €; il costo è riferito ad 1 grammo di CO<sub>2</sub> emesso;
- $\alpha_i$  è la quantità di CO<sub>2</sub>, in grammi, emessa per produrre 1 kWh di energia con la tecnologia  $i$ ;
- $J$  è l'insieme delle tecnologie di produzione; sono 22 considerando anche quella nucleare;
- $lb_i$  e  $ub_i$  sono il lower bound e l'upper bound della quantità di energia, in TWh, prodotta con la tecnologia  $i$ , previsti per il 2010;
- $D(2010)$  è la stima del fabbisogno energetico, in kWh, al 2010;
- $B(CO_2)$  è il limite, in grammi, di anidride carbonica che può essere emesso.

La stima della domanda al 2010 è dedotta dai dati forniti dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN) e consiste in 353 TWh.

Il valore limite di emissione di CO<sub>2</sub> è calcolato considerando che il settore elettrico produce circa un terzo delle emissioni di CO<sub>2</sub> nazionali e, pertanto, il valore limite è un terzo del 6.5% delle emissioni della sola CO<sub>2</sub> nel 1990, quindi 115,7 tonnellate/anno.

Per avere delle indicazioni sull'opportunità di ritenere attuale l'opzione nucleare si è considerata nel parco di generazione la presenza di una centrale nucleare tipo quella esistente a Caorso (PC); tale centrale, entrata in funzione nel 1981 e chiusa nel 1990, ha una potenza nominale di 882 MW; in cinque anni di attività, ha prodotto circa 30 miliardi di kWh di energia.

Il costo di riattivazione di questa centrale nel 2001 è stato stimato in 350 miliardi delle vecchie lire [22]; oggi la sua riattivazione non è più proponibile a causa della mancata manutenzione ed ammodernamento degli impianti e pertanto si è scartata l'ipotesi del suo riutilizzo e di conseguenza si è considerata quella di una sua costruzione ex novo.

#### 4. SIMULAZIONI NUMERICHE

Le diverse simulazioni determinano la composizione ottimale della generazione di energia elettrica in Italia nel 2010. Tale composizione è stata inizialmente calcolata considerando le risorse energetiche e le tecnologie attualmente impiegate (scenario 1); successivamente si è aggiunta quella nucleare (scenario 2). Entrambi gli scenari sono stati modellati come problemi di ottimizzazione lineare e risolti mediante il software Lingo®.

**Tabella I: Produzione attesa, costi attesi ed emissioni nel 2010**

tecnologia	$lb_i$	$ub_i$	$c_{loc-i}$	$c_{ind-i}$	$c_i$	$\alpha_i$
	[TWh]		[10 <sup>-3</sup> €/kWh]			[g/kWh]
Grande idroel. esist. >10 MW	36,3	36,3	3,6	13,9	17,5	0,0
Piccolo idroel. Esist. <10 MW	9,4	9,4	2,6	18,1	20,7	0,0
Piccolo idroel. Nuov <10 MW	0,0	8,7	2,6	69,7	72,3	0,0
Geotermico	4,0	5,5	1,5	74,9	76,4	440,0
Rifiuti solidi	4,0	6,7	12,4	93,0	105,4	510,0
Eolico	1,5	5,0	1,5	77,5	79,0	0,0
Biomasse	3,0	15,0	11,9	98,1	110,0	0,0
Biogas	0,4	1,0	0,0	47,5	47,5	0,0
Fotovoltaico	54.10 <sup>-4</sup>	0,2	1,5	433,8	435,3	0,0
Olio Ciclo Rankine	0,0	62,2	20,7	29,4	50,1	700,0
Cogeneraz. Derivati petroliferi	3,5	3,5	9,3	29,4	38,7	530,0
Gas naturale Repowering	91,0	130,0	5,7	32,5	38,2	360,0
Gas naturale. ciclo comb.	0,0	42,0	5,7	34,1	39,8	350,0
Gas naturale. Grandi imp.	25,6	32,0	2,6	35,1	37,7	312,0
Gas naturale. Medi imp.	15,5	28,0	2,8	38,7	41,5	313,0
Gas naturale. Piccoli imp.	2,0	10,0	3,1	45,6	48,7	325,0
Turbina Altri gas	8,0	8,20	10,3	49,1	59,4	660,0
TAR / ITGCC	9,1	12,0	6,2	46,5	52,7	779,0
Carbone Ciclo Rankine	0,0	25,0	25,8	22,7	48,5	930,0
Carbone Con cogen.	5,0	6,4	5,2	20,7	25,9	976,0
Carbone senza cogen.	1,5	2,0	5,2	12,9	18,1	1040
Nucleare	0,0	7,36	0,4	var		0,00

I dati utilizzati sono riportati nella tabella I e rappresentano la produzione minima e massima attesa per ciascuna risorsa energetica e relativa tecnologia, i costi ambientali locali, quelli industriali e la quantità di CO<sub>2</sub> emessa [20]. L'ultima riga riporta i dati relativi alla tecnologia nucleare.

Il costo ambientale globale,  $g$ , è un costo medio assunto pari a 30 € per ogni tonnellata di CO<sub>2</sub> equivalente emessa [21].

Il primo scenario è simulato assegnando al costo industriale di produzione di energia elettrica da fonte nucleare,  $c_{ind-nuclear}$ , un valore sufficientemente alto di modo che, all'ottimo, la relativa variabile decisionale sia certamente uguale a zero.

Successivamente tale costo industriale è stato progressivamente abbassato affinché il nucleare desse un

contributo alla generazione complessiva di energia elettrica nazionale. Per semplicità, in tabella II, si riportano i risultati di solo 4 degli esperimenti numerici effettuati. La prima colonna rappresenta lo scenario 1.

Posto  $c_{ind-nuclear}$  pari ad infinito, cioè 9999 millesimi di euro per kilowattora, si ha che il costo complessivo di generazione di energia elettrica in Italia al 2010 sarà di circa 17.890 milioni di euro.

**Tabella II: Produzione e costi complessivi per i due scenari**

	Scenario 1	Scenario 2		
<b>Costo complessivo [10<sup>+6</sup> €]</b>	17.890,74	17.824,58	17.800,81	17.364,33
<b>Risparmio [10<sup>+6</sup> €]</b>	0,00	66,16	89,93	526,41
<b><math>c_{ind-nucleare}</math> [10<sup>-3</sup> €/kWh]</b>	9999	80,00	75,00	15,00
<b>Tecnologia</b>	<b>Produzione annua [TWh]</b>			
Grande idroel. esist. >10 MW	36,30	36,30	36,30	36,30
Piccolo idroel. Esist. <10 MW	9,40	9,40	9,40	9,40
Piccolo idroel. Nuov <10 MW	8,70	8,70	8,70	7,07
Geotermico	4,00	4,00	4,00	4,00
Rifiuti solidi	4,00	4,00	4,00	4,00
Eolico	5,00	5,00	1,50	1,50
Biomasse	5,23	3,00	3,00	3,00
Biogas	1,00	1,00	1,00	1,00
Fotovoltaico	54.10 <sup>-4</sup>	54.10 <sup>-4</sup>	54.10 <sup>-4</sup>	54.10 <sup>-4</sup>
Olio Ciclo Rankine	8,37	8,37	8,37	8,37
Cogeneraz. Derivati petroliferi	3,50	3,50	3,50	3,50
Gas naturale Repowering	130,00	130,00	130,00	130,00
Gas naturale. ciclo comb.	42,00	42,00	42,00	42,00
Gas naturale. Grandi imp.	32,00	32,00	32,00	32,00
Gas naturale. Medi imp.	28,00	28,00	28,00	28,00
Gas naturale. Piccoli imp.	10,00	10,00	10,00	10,00
Turbina Altri gas	8,00	8,00	8,00	8,00
TAR / ITGCC	9,10	9,10	9,10	9,10
Carbone Ciclo Rankine	0,00	0,00	0,00	0,00
Carbone Con cogeneraz.	6,40	6,40	6,40	6,40
Carbone Senza cogeneraz.	2,00	2,00	2,00	2,00
Nucleare	0,00	2,23	5,73	7,36

Tale costo si abbassa in corrispondenza dell'impiego di energia da fonte nucleare come si può facilmente osservare dalle colonne dello scenario 2; il problema di ottimizzazione attiva la variabile decisionale  $x_{nucleare}$  in corrispondenza di un valore  $c_{ind-nucleare}$  pari a 110.10<sup>-3</sup>€/kWh e decrementa l'impiego delle biomasse fino ad attingerne il lower bound produttivo.

Tale soluzione è facilmente comprensibile se si nota che le biomasse hanno il più alto costo  $c_i$  (vedi Tab. I) tra le fonti

energetiche che, nello scenario 1, non attingono al lower bound produttivo.

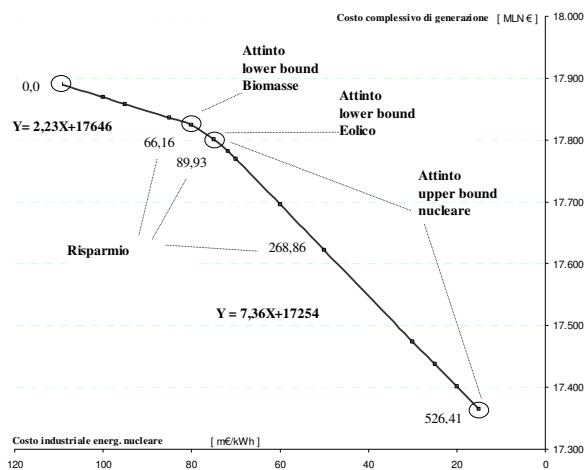


Fig. 6 Costo complessivo di generazione al 2010

E' facile prevedere che, per valori decrescenti di  $c_{ind-nucleare}$ , si avrà un ricorso crescente al nucleare a discapito delle fonti energetiche più costose ed un crescente risparmio sul costo complessivo di generazione di energia elettrica; il grafico di Fig. 6 riporta proprio l'andamento del costo complessivo in funzione di  $c_{ind-nucleare}$ . Il primo punto dei quattro individuati con un cerchio è lo scenario 1.

Per  $c_{ind-nucleare}$  pari a  $80 \cdot 10^{-3} \text{€}/\text{kWh}$  si è nello scenario 2 ed in corrispondenza del secondo punto cerchiato (Fig. 6); in riferimento a tale valore si consegue un risparmio di circa 66 milioni di euro rispetto al costo complessivo dello scenario 1 (vedi Tab. II) e una diminuzione del ricorso alla fonte eolica. Il lower bound produttivo eolico viene attinto per  $c_{ind-nucleare}$  pari a  $75 \cdot 10^{-3} \text{€}/\text{kWh}$ ; in tal caso il risparmio sale a 90 milioni di euro circa.

Per ultimo, abbassando ulteriormente  $c_{ind-nucleare}$  fino a  $15 \cdot 10^{-3} \text{€}/\text{kWh}$  cioè fino ad un costo complessivo  $c_i$  per il nucleare poco più alto di quello del *Grande Idroelettrico* o del *Carbone* (vedi Tab. I) si consegue un risparmio complessivo di 526 milioni di euro circa (vedi Tab. II) ed una diminuzione del ricorso al *Piccolo Idroelettrico Nuovo*.

## 5. CONCLUSIONI

In questa memoria è evidenziata la necessità di una rivoluzione energetica che consenta di risolvere gli attuali problemi dell'umanità. Una rivoluzione simile a quella che nel XIX secolo evitò l'avverarsi delle catastrofiche previsioni di Malthus e che consista nel trovare soluzioni innovative per la produzione di energia elettrica atte a fronteggiare la crescita demografica ed i relativi consumi energetici, l'esaurimento delle riserve di combustibili fossili e le mutazioni climatiche derivanti dal riscaldamento globale del pianeta.

Per una tale rivoluzione potrebbe non esserci tempo a sufficienza. Essa, infatti, richiede tempi molto lunghi e difficilmente preventivabili. Diventa quindi categorico individuare soluzioni che, seppure transitorie, consentano nel frattempo di fronteggiare la crescente domanda di energia, senza compromettere ulteriormente il clima, al fine di poter guadagnare il tempo mancante.

Pertanto, con riferimento alla situazione italiana, in questa memoria è stato affrontato il problema del soddisfacimento della domanda di energia elettrica nell'anno 2010, ipotizzando

due possibili scenari: uno senza ed uno con la fonte energetica nucleare.

L'utilizzo di un modello matematico per l'ottimizzazione della generazione dell'energia elettrica da fonti diverse, ha consentito di effettuare alcune simulazioni numeriche dalle quali è risultato che il nucleare appare essere una fonte energetica da tenere in forte considerazione, nel breve/medio termine, in attesa che l'avvento di nuove tecnologie possa consentire il soddisfacimento della crescente richiesta di energia nel rispetto di quelle condizioni necessarie a garantire all'Italia, e all'intero pianeta, uno sviluppo sostenibile.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Kennedy, *Preparing for the Twenty-First Century*, Random House, Inc., New York, 1993;
- [2] T.R. Malthus, *An Essay on the Principle of Population as it Affects the Future Improvement of Society*, London 1798, p. 13, riedito con note da J. Bonar, NY, 1965;
- [3] D.S. Landes, *The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to Present*, Cambridge Univ. Press, 1969;
- [4] C.M. Cipolla, *The Economic History of World Population*, Harmondsworth, Md, ed. 1978;
- [5] Population Reference Bureau Staff, *Transition in World Population*, Population Bulletin, Vol 59, No.1, Marzo 2004, p. 36, [www.prb.org](http://www.prb.org);
- [6] Population Reference Bureau, *2003 World Population Data Sheet*, pp. 2, 3, [www.prb.org](http://www.prb.org);
- [7] Population Reference Bureau, *2004 World Population Data Sheet*, p. 5, [www.prb.org](http://www.prb.org);
- [8] J. Rifikin, *Economia all'idrogeno*, Mondadori, 2002, p. 60;
- [9] Vedi [8], p. 286;
- [10] C.J. Campbell, J.H. Laherrère, *The End of Cheap Oil*, Scientific American, Marzo 1998;
- [11] J.H. Asubel, *Energy and Environment, The Ligth Path*, in "Energy System and Policy", vol 15, 1991, [http://phe.rockefeller.edu/ligth\\_path](http://phe.rockefeller.edu/ligth_path);
- [12] Shell Oil International, *Energy Needs, Choices and Possibilities. Scenarios to 2050*, Shell Oil International, 2001, [www2.shell.com](http://www2.shell.com);
- [13] Daniel L. Albritton et al., *Summary for Policy Makers. Climate Change 2001. A report of Working Group I of the IPCC*, IPCC, 2001
- [14] Richard B. Alley, *I ghiacciai, all'improvviso*, Le Scienze, edizione italiana di Scientific American, n. 437, gennaio 2005.
- [15] Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, 2001
- [16] Schwartz Peter, Randall Doug, *An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States Security*, Ottobre 2000.
- [17] Vedi [8], p. 228;
- [18] Michael Nicklas, *Societal Costs of Energy*, American Solar Society Roundtable, 1989;
- [19] D. Zanolotti, *Il nucleare in Italia: quando il ritorno?*, AEI, dicembre 2003, p. 5;
- [20] A. Caizzi, M. Gatto, L. Rizzi, G. De Leo, *Benefici Economici del Protocollo di Kyoto*, AEI, maggio 2002
- [21] The ExternE Project, <http://extern.e.jrc.es/index.html>.
- [22] F. Battaglia, *L'imbroglione verde del no al nucleare*, <http://www.galileo2001.it>