

## **I modelli per la valutazione delle politiche di riduzione delle emissioni di gas climalteranti: una rassegna preliminare**

F. Cellina<sup>1</sup>, G. A. De Leo<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Dipartimento di Scienze Ambientali, Università degli Studi di Parma, Parco Area delle Scienze, 43100 Parma. Email: [cellina@dsa.unipr.it](mailto:cellina@dsa.unipr.it)*

<sup>2</sup> *Settore Promozione e Sviluppo, Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale, Via Restelli 1, 20124 Milano, email: [g.deleo@arpalombardia.it](mailto:g.deleo@arpalombardia.it)*

**Parole chiave:** cambiamento climatico globale, modelli economici, Protocollo di Kyoto, politiche di risparmio energetico, esternalità ambientali

### **Riassunto**

Nel corso degli ultimi anni sono stati realizzati diversi studi per valutare la fattibilità delle prescrizioni previste dal Protocollo di Kyoto e identificare le migliori politiche di controllo dei fenomeni di Cambiamento Climatico Globale. I modelli cui questi studi si appoggiano sono oggi estremamente particolareggiati e permettono di confrontare una molteplicità di politiche sulla base di una valutazione, a vari livelli di dettaglio, dei costi e dei benefici conseguenti alla loro attuazione. In questo lavoro presentiamo un'analisi comparativa di alcuni fra i principali modelli elaborati negli ultimi anni per la valutazione economica delle politiche di contenimento dei gas serra. Nello specifico, consideriamo modelli prettamente tecnologici, ovvero quelli che permettono di effettuare una descrizione dettagliata del settore energetico e permettono di ricostruire la domanda e la produzione di energia con una notevole precisione (come la famiglia MarKal), modelli che considerano solo effetti economici attraverso matrici input-output utili a descrivere gli impatti indotti dalle politiche energetiche su tutti i settori del mercato, incluso la capacità di spesa delle famiglie (come i modelli CGE), modelli misti (come MarKal-Macro, MarKal-Micro e NEMS) nonché modelli aggregati, che permettono la valutazione contemporanea sia dei costi industriali sia di quelli ambientali in una classica matrice di analisi costi benefici. I modelli sono comparati sulla base delle seguenti proprietà e caratteristiche: tipologia (sistemico/settoriale), modalità d'utilizzo (ottimizzazione/ simulazione), endogenità di domanda e prezzi dei beni energetici, esplicita considerazione delle esternalità ambientali, della dinamica temporale, degli effetti economici indiretti delle politiche e, infine, dell'innovazione tecnologica. Il presente lavoro mostra che l'analisi delle componenti tecnologiche ed economiche direttamente influenzate dalle politiche energetiche e del relativo indotto è piuttosto avanzata e in alcuni casi decisamente sofisticata. Tuttavia la quasi totalità dei modelli economici, tecnologici e di quelli misti non considera in alcun modo gli impatti sanitari ed ambientali delle politiche energetiche, né per quanto riguarda i fenomeni di inquinamento su scala locale/regionale, né per quelli su scala globale. Ciò è particolarmente limitante in quanto non vengono riconosciute le importanti retroazioni sul sistema economico degli effetti sanitari ed ambientali della produzione ed uso di energia. Per questo motivo, i futuri sforzi di ricerca dovranno evolvere in modo da integrare questi aspetti nella rappresentazione dei sistemi energetici ed economici.

### **Introduzione**

Per tutti gli anni novanta la discussione sull'effetto serra è stata dominata dal dibattito sull'impressionante livello di incertezza scientifica che caratterizzava sia i modelli previsionali sia l'analisi dei dati di temperatura e precipitazione. In pratica, gli scettici incentravano le loro critiche intorno a tre argomenti. In primo luogo non esisteva, né c'era da aspettarsi, alcuna ragionevole evidenza scientifica che il Pianeta si stesse riscaldando, o avrebbe potuto riscaldarsi; le retroazioni positive e negative a livello climatico sono tante e talmente complesse che in pratica ogni ipotesi a favore o contro l'effetto serra era ugualmente valida. In secondo luogo, anche se la rete di raccolta dati sulla temperatura ed altre variabili climatologiche ed ecologiche cominciava a mostrare qualche

tendenza statistica in accordo con l'ipotesi dell'effetto serra, in pratica per lungo tempo sarebbe stato impossibile distinguere fra corso naturale degli eventi e cause antropiche a causa del notevolissimo livello di variabilità che naturalmente contraddistingue i fenomeni climatici: in fondo, da sempre anni caldi si erano succeduti a freddi, anni siccitosi ad anni umidi, senza alcuna apparente regolarità. Cicli naturali come quello di "7 anni di vacche magre e 7 di vacche grasse" di memoria biblica hanno caratterizzato il clima in modo bizzarro fino alle radici dell'antichità, quando l'uso spinto di combustibili fossili era ancora al di là da venire. Infine, il fenomeno del riscaldamento, anche ammettendo che fosse di origine antropica, avrebbe impiegato diversi decenni, verosimilmente secoli, prima di manifestarsi in modo chiaro, inconvertibile ed eclatante: pertanto non c'era ragione di preoccuparsi o, peggio, di affrettarsi ad investire subito energie, tempo e soprattutto risorse finanziarie a fronte di più pressanti e contingenti problemi di politica economica, occupazionale e sociale. In pratica, considerata tutta questa incertezza, investire in fonti alternative e in modelli di sviluppo più sostenibili sarebbe stato insensato e paurosamente costoso: prima di intraprendere qualsiasi azione significativa per la riduzione dei gas serra, si aspettasse che il mondo scientifico arrivasse a qualche ragionevole accordo sugli ancora numerosi punti oscuri del fenomeno e che si dotasse di strumenti di analisi e previsione molto più precisi e sofisticati di quelli che allora, negli anni novanta, erano a disposizione.

All'inizio del nuovo millennio possiamo almeno affermare che il mondo scientifico non ha tradito queste aspettative. Oggi si è infatti raggiunto un consenso scientifico pressoché unanime su una serie di problemi: a) diverse variabili fisiche (l'aumento di CO<sub>2</sub> in atmosfera), climatologiche (aumento della temperatura media del Pianeta, alterazione della frequenza ed intensità delle precipitazioni), ed ecologiche (*coral bleaching*, aumento dell'areale di diffusione di alcune specie animali e vegetali a seguito dell'aumento della temperatura e molte altre) mostrano in modo chiaro ed incontrovertibile che cambiamenti climatici a livello globale sono ormai in atto; b) questi cambiamenti (in modo particolare l'aumento dell'anidride carbonica e della temperatura media) hanno una preponderante componente di origine antropica; c) se non verranno prese iniziative per una drastica riduzione dei gas serra gli effetti nei prossimi 30-50 anni saranno verosimilmente molto rilevanti.

Nonostante questo, nonostante siano venuti meno i dubbi sulla natura scientifica dei fenomeni e delle previsioni ad essi associate, le resistenze al cambiamento della politica energetica sono ancora molto forti, anche se oggi non si concentrano più sull'esistenza o meno dell'effetto serra, quanto piuttosto sulle strategie da adottare per limitarne i danni. Il problema certamente è complesso e di non semplice soluzione, non solo per i costi economici in gioco, ma per gli aspetti logistici ed organizzativi che sono necessariamente richiesti per interventi infrastrutturali, visto che l'uso di combustibili fossili è pervasivo nella nostra società, profondamente radicato nel tessuto produttivo del mondo industrializzato e legato a fattori difficilmente controllabili come i comportamenti individuali generati dalla spesa di imprese e famiglie per beni di consumo e servizi, trasporti, ed energia. Inoltre, scelte radicali da un punto di vista energetico possono difficilmente essere prese in modo unilaterale da un solo Paese senza pesanti ripercussioni sul fronte della competitività sul mercato: le difficoltà tecniche ed i comprensibili – e, per molti versi, giustificati – timori per i costi eccessivi di transizione a sistemi sostenibili di produzione di energia rendono difficile l'adozione di soluzioni cooperative a livello internazionale ed incentivano fortemente il fenomeno del *free riding*. Tuttavia, diverse sperimentazioni operative in atto in Europa stanno mostrando che è possibile risparmiare energia e ridurre significativamente le emissioni di gas anche a livello unilaterale e con azioni domestiche serra senza penalizzare il mercato e la capacità di consumo delle famiglie, anzi, aumentando al contempo l'occupazione attraverso la creazione e la crescita di importanti nicchie di mercato.

A dispetto di questi sempre più frequenti - se pur ancora aneddotici - esempi, i detrattori del risparmio energetico e dell'uso di energie rinnovabili sostengono che i costi in gioco sarebbero insostenibili. In un mercato economico che da un paio di anni mostra segni di sofferenza e tarda a riprendersi, l'elevato costo delle fonti rinnovabili e la riduzione di consumi d'energia metterebbero in difficoltà l'economia del paese riducendo la capacità di spesa delle famiglie.

Quando si affrontano problemi così complessi e caratterizzati da tante variabili e numerosi retroazioni di segno diverso, l'unica seria alternativa alle pur significative argomentazioni verbali è rappresentata dall'uso di modelli matematici che simulino in modo più o meno sofisticato gli effetti di diverse politiche energetiche sul mercato.

Scopo di questo lavoro è di presentare un'analisi critica comparata dei principali modelli fino ad oggi elaborati al fine di valutare gli aspetti economici delle politiche di controllo delle emissioni di gas serra da fonte antropica. A tal fine prenderemo in esame una serie piuttosto eterogenea di modelli matematici sviluppati per contesti, ambiti geografici di applicazione e settori economici differenti, allo scopo di evidenziare la generalità dei vari approcci e i pregi e i limiti delle differenti strategie con cui è stato affrontato il problema delle valutazioni economiche delle politiche energetiche.

Il lavoro è strutturato nel modo seguente. Nella prima sezione vengono brevemente presentati i criteri con cui sono stati classificati i vari modelli. Nelle sezioni successive vengono sinteticamente presentati sei modelli (o approcci modellistici) illustrandone brevemente le caratteristiche e gli ambiti di applicazione. Si conclude infine il lavoro con una serie di considerazioni derivanti da un'analisi sinottica dei modelli mettendo così in evidenza le aree di forza e le lacune dei relativi approcci.

### **I criteri di classificazione dei modelli**

I metodi di classificazione dei diversi modelli di valutazione economica di politiche energetiche sono molteplici, e, almeno in parte soggettivi: senza la pretesa di essere esaustivi, descriviamo qui di seguito quali criteri abbiamo utilizzato nel presente studio. In primo luogo, seguendo l'approccio classico della letteratura (si veda ad esempio Sanstad & Greening 1998), i modelli possono essere classificati tipicamente in due principali categorie, ovvero modelli di carattere prettamente economico e modelli di carattere tecnologico-ingegneristico. I *modelli economici* si caratterizzano per la completa valutazione monetaria degli effetti delle politiche energetiche attraverso una descrizione piuttosto dettagliata del mercato nelle sue diverse componenti, come gli aspetti occupazionali, l'indotto economico e, nei modelli più sofisticati, la capacità di spesa delle famiglie e gli effetti diretti ed indiretti su altri comparti del mercato diversi dal settore energetico. Il risultato degli effetti diretti ed indotti sul mercato è in genere complesso ed articolato, ma può essere presentato sinteticamente in termini di variazioni percentuali sul Prodotto Interno Lordo. I *modelli tecnologici*, invece, partono da una rappresentazione dettagliata del sistema energetico e dei cicli di produzione e di consumo dell'energia attraverso un approccio *bottom-up* che rappresenta gli impianti di produzione effettivamente presenti in un dato paese, la loro localizzazione, la tecnologica implementata etc.

In verità esistono altri modelli che non ricadono chiaramente né in una né nell'altra categoria, che chiameremo *intermedi*. I modelli appartenenti a questa categoria possono a loro volta essere suddivisi in tre classi: la prima contiene i *modelli misti*, ovvero quei modelli che conciliano una dettagliata descrizione del sistema energetico con la rappresentazione dell'intero sistema economico, basata su semplici matrici di tipo *input-output*. La seconda è costituita dai *modelli integrati*, ovvero quelli che del settore energetico considerano anche gli aspetti economici, senza però effettuare considerazioni per gli altri settori del sistema economico. L'ultima, infine, contiene i *modelli aggregati*, ovvero quelli che considerano sia aspetti tecnologici sia aspetti economici ma ad un livello estremamente sintetico di macro-categorie o macro-settori, senza dettagli sulle dinamiche del mercato nel suo complesso e la descrizione puntuale del sistema energetico.

Un secondo criterio di classificazione riguarda la finalità e tipologia dei problemi che si vogliono affrontare: alcuni modelli (indipendentemente dalla loro natura economica, tecnologica, o intermedia) possono essere usati per simulare le dinamiche di mercato energetico e/o economico sotto diverse ipotesi (e possono quindi essere classificati come modelli di simulazione), oppure per identificare strategie ottimali in base ad obiettivi specifici - come minimizzare i costi industriali dell'energia o i costi socio-ambientali o la riduzione del prodotto interno lordo - ed in base a criteri preventivamente definiti - come quello della sicurezza degli approvvigionamenti (e verranno quindi classificati come modelli di ottimizzazione).

Altri criteri di classificazione che abbiamo utilizzato nel presente lavoro riguardano:

- il tipo di approccio al mercato: settoriale - quando viene analizzato un solo specifico settore energetico, come quello elettrico, valutandone naturalmente gli aspetti economici; misto - quando viene analizzato il comparto energetico nelle sue componenti settoriali (energia elettrica, energia termica, energia per trasporti); sistemico - quando vengono considerate tutte le componenti del mercato, comprese quelle non energetiche (in questo caso si rientra nel criterio di modello economico);
- la scala geografica di applicazione, che può essere tipicamente mondiale o nazionale;
- il modo in cui si trattano gli aspetti ambientali e sanitari: come vincolo, come esternalità, o in nessuno dei due modi;
- l'eventuale considerazione di variazioni di domanda e prezzo dei beni energetici;
- la determinazione della domanda energetica nazionale, che può essere fissata in modo esogeno al mercato simulato, o endogeno (e dipendere quindi dal costo medio dell'energia);
- l'eventuale inclusione degli effetti positivi dell'innovazione tecnologica sui cicli di produzione e consumo dell'energia;

Nel seguito, la descrizione dei vari specifici modelli ci permetterà di chiarire ulteriormente il significato dei criteri elencati. In accordo con questa classificazione, i modelli descritti nel seguito del lavoro sono:

- la famiglia dei modelli MarKal (Seebregts et al. 2001) nell'ambito dei modelli strettamente tecnologici;
- la classe di modelli CGE (Computable Equilibrium Model) come esempio dell'approccio strettamente economico;
- i modelli MarKal-Macro (Hamilton et al. 1992) e MarKal-Micro (Regemorter & Goldstein 1998) come esempio di modelli integrati;
- il modello NEMS (US/DOE 2000) come esempio di modello misto;
- il modello TOCANES (De Leo et al. 2001) come esempio di modello aggregato per l'analisi costi benefici comprendente anche le esternalità ambientali.

### **MarKal, l'approccio tecnologico per l'ottimizzazione**

MarKal – acronimo di *Market Allocation* (Seebregts et al. 2001) - è un modello tecnologico sistemico o globale, come lo definiscono gli autori, nel senso che identifica lo schema ottimo di allocazione delle risorse energetiche considerando tutti gli aspetti che i cicli energetici coinvolgono, sia quelli tecnici sia quelli economici/finanziari. MarKal permette di prendere decisioni adottando un approccio sistemico, considerando cioè il sistema nella sua totalità invece che soffermandosi solo su aspetti settoriali, senza trascurare dunque le retroazioni che agiscono sul sistema. L'effetto delle retroazioni potrebbe essere anche significativo, portando in alcuni casi a sovrastimare, in altri a sottostimare, gli effetti delle politiche in esame.

MarKal è spesso definito come un "generatore di modelli", cioè di una struttura che è più complessa ma, al contempo, più versatile di un modello completamente strutturato e tarato per una realtà specifica: esso è costituito da una struttura estremamente flessibile, che può essere declinata e implementata in modo diverso a seconda del livello spaziale e di dettaglio al quale si vuole effettuare l'analisi. La procedura da seguire per impostare un modello di tipo MarKal prevede l'identificazione di uno schema base che riproduce la configurazione del sistema energetico, secondo una rappresentazione di tipo bottom-up, evidenziando in moduli distinti la produzione, il consumo e la conversione dell'energia primaria. Questi tre moduli sono interconnessi fra di loro, in modo che il valore di ciascuna variabile del sistema possa essere ottenuto a partire dagli altri. La definizione dello scenario di riferimento (RES) è uno dei compiti più complessi, perché implica una profonda conoscenza del sistema energetico che si vuole modellizzare e, soprattutto, la piena disponibilità dei dati con cui calibrare tale modello. La Figura 1 mostra un esempio di RES (Seebregts et al. 2001).

Il modello MarKal effettua ottimizzazioni lineari vincolate, in cui la funzione obiettivo è rappresentata dai costi economici che il sistema sopporta una volta giunto nella configurazione d'equilibrio, mentre i vincoli garantiscono il soddisfacimento di standard qualitativi ambientali e la coerenza con la capacità e la potenzialità del sistema.

L'ottimizzazione si effettua per scenari, che sono identificati quando siano definite, ovvero la domanda totale d'energia espressa dal sistema e i prezzi dei beni energetici.

Queste due quantità sono dunque definite in modo esogeno al sistema: costituiscono l'input del modello e non variano per tutta la durata dell'ottimizzazione. L'analista può specificare la traiettoria temporale di queste variabili, effettuando ipotesi sul loro andamento per ciascuno degli anni di simulazione. Il modello, infatti, è di tipo dinamico multiperiodale, cioè permette di simulare l'evoluzione del sistema per ogni anno che appartiene all'orizzonte temporale. L'ottimizzazione effettuata dal modello permette dunque di individuare la configurazione del sistema (ripartizione fra le diverse fonti energetiche e corrispondente ripartizione percentuale dei consumi, fissato il livello di consumo totale) senza però influire sulle grandezze che definiscono lo scenario economico. Per capire quale sia la robustezza delle soluzioni proposte dal modello al variare di questi ultimi parametri, al di fuori del controllo del modello stesso, MarKal permette di eseguire analisi di sensitività.

I modelli della famiglia MarKal vengono usati soprattutto per effettuare la pianificazione energetica al livello strategico, su scala nazionale. Grazie alla loro modularità e replicabilità, tuttavia, a seconda della scala su cui si decide di applicarli, questi modelli possono anche essere usati per valutare politiche di tipo internazionale, basate sui meccanismi flessibili di Kyoto: uno degli aspetti positivi di MarKal, infatti, è proprio il fatto che esso può essere applicato a diverse nazioni contemporaneamente, il che garantisce che i risultati siano internamente coerenti e confrontabili l'uno con l'altro.

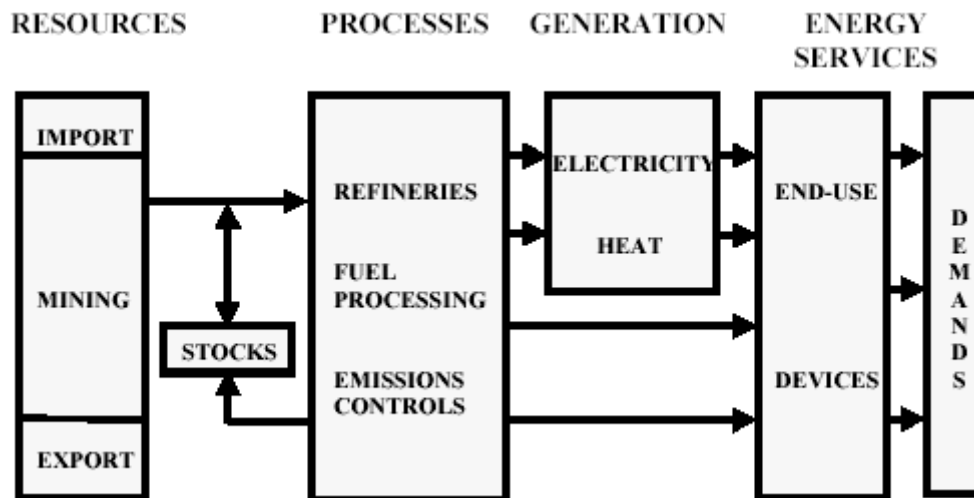


Figura 1 Il Sistema Energetico di Riferimento per un modello MarKal (fonte Seebregts et al. 2001).

In Markal l'ottimizzazione viene effettuata solo sui costi monetari diretti e dei parametri ambientali si tiene conto solo come vincolo, in termini di tetto alle emissioni di sostanze inquinanti, gas serra inclusi. La domanda d'energia e i prezzi dei beni energetici sono definiti in modo esogeno e rimangono costanti per tutta la durata della simulazione.

### **CGE, l'approccio economico per la simulazione**

I modelli economici tout-court si concentrano sulla descrizione delle grandezze economiche e del comportamento dei soggetti che operano sui mercati, rappresentando il sistema energetico in modo molto semplificato, tenendo conto, tuttavia, delle retroazioni tra domanda, offerta e prezzi dei beni

energetici. L'approccio può essere distinto in *micro* o *macroeconomico*, a seconda del livello d'aggregazione con cui tali grandezze sono rappresentate. Gli output del modello sono dello stesso tipo, cioè sono le grandezze aggregate con cui tradizionalmente si valuta lo stato dell'economia di un paese (livello di occupazione, produzione, benessere sociale etc.). I modelli microeconomici, tuttavia, forniscono anche la corrispondente informazione disaggregata per settore e tipologia d'operatore economico. Non forniamo qui la descrizione dei modelli macroeconomici, tra i quali citiamo ad esempio il modello RICE (*Regional Integrated Climate Economy* - Nordhaus 2000), per i quali rimandiamo alla letteratura (Sanstad & Greening 1998). Negli ultimi dieci anni, infatti, è stato l'approccio microeconomico, nello specifico quello basato sulle teorie dell'equilibrio generale di Arrow-Debreu (Shoven & Whalley 1992), a godere del maggior seguito (Don et al. 1991): esso permette di esprimere in modo quantitativo gli effetti delle politiche, disaggregandoli per tipologia di soggetti, identificando chiaramente quali categorie sociali godono dei benefici e quali sopportano i costi, evidenziando esplicitamente, cioè, le ripercussioni delle politiche sul sistema economico. Modelli di questo tipo, che prendono il nome di CGE, *Computable General Equilibrium models*, sono stati sviluppati sia per scale spaziali nazionali che per scale mondiali (Cfr. Sanstad & Greening 1998). La principale differenza tra i modelli CGE e i modelli finora analizzati sta nel fatto che questi ultimi rappresentano l'intero sistema economico e quindi trattano il settore energetico come uno fra i tanti che compongono l'economia, spesso senza considerarne la sua complessità, ovvero il fatto che la produzione di energia può avvenire con una molteplicità di tecnologie differenti. I modelli CGE descrivono il sistema economico utilizzando la suddivisione tipica della teoria microeconomica, in genere ipotizzando che il mercato operi in condizioni di concorrenza perfetta. Il sistema è diviso in produttori e consumatori, ai quali si aggiunge lo Stato, che garantisce il trasferimento dei redditi tramite l'imposizione di tasse e sussidi, e, se il modello riproduce un'economia aperta, anche un operatore fittizio che rappresenta l'estero ed effettua scambi commerciali con la nazione (cfr. Fig. 2), che illustra la struttura di un modello CGE elaborato per la nazione italiana – tratto da Roson 2002). I produttori sono raggruppati in un certo numero di settori produttivi, mentre, in base allo stock di risorsa lavoro e di capitale, i consumatori sono classificati in famiglie, ciascuna delle quali esprime la propria domanda di beni e servizi, inclusi quelli energetici. Il settore energetico è dunque solo uno dei numerosi settori produttivi che rappresentano l'economia. Ciascun bene scambiato sul mercato si ottiene come composizione dei fattori produttivi primari (la forza lavoro e il capitale, posseduti dalle famiglie) e di eventuali beni intermedi; in alcuni modelli i beni domestici sono trattati allo stesso livello di quelli esteri, e quindi possono essere scambiati sul mercato come prodotti indifferenziati. Il modello presentato in Roson (2002), ad esempio, rappresenta l'economia italiana tramite trenta settori produttivi, dei quali uno solo, indifferenziato, rappresenta i sistemi energetici. I consumatori, invece, sono rappresentati da quattro famiglie, che esprimono una domanda diversificata a seconda degli usi che si fanno di questi prodotti energetici.

Coerentemente con i principi della microeconomia, nei modelli CGE i produttori operano massimizzando i propri profitti, mentre i consumatori massimizzano la propria utilità, che è funzione dei beni e servizi consumati e degli investimenti effettuati. Poiché per ogni bene scambiato sul mercato sono definite la curva di domanda e quella di offerta, l'equilibrio dell'intero sistema economico si ottiene in corrispondenza dei prezzi che uguagliano domanda e offerta contemporaneamente per tutti i beni scambiati sul mercato: l'equilibrio che si forma è dunque determinato dalle retroazioni che agiscono sull'intero sistema economico, al variare dell'insieme dei prezzi. Oltre all'equilibrio *intratemporale* che si ottiene in questo modo, i modelli più sofisticati possono operare in modo dinamico, identificando una successione di equilibri *intertemporali*. A tale scopo nella maggior parte dei casi il modello viene alimentato con ipotesi sull'evoluzione dell'economia, imposte dunque in modo esogeno. Alcuni modelli, tra cui anche quello di Roson (2002), simulano invece l'evoluzione temporale dell'economia senza bisogno di intervento esterno: il livello di risparmio, che si ottiene in modo endogeno massimizzando una funzione intertemporale delle utilità delle famiglie, è il motore che guida l'evoluzione dell'economia. Il livello di risparmio delle famiglie determina lo stock di capitale con cui queste si presentano all'inizio di un nuovo

intervallo temporale e quindi le condizioni da cui partire per cercare un nuovo equilibrio intertemporale. Operando in questo modo è possibile delineare il percorso d'evoluzione del sistema economico, che funge da scenario di riferimento con cui confrontare i nuovi scenari derivanti dall'adozione di politiche di controllo delle emissioni.

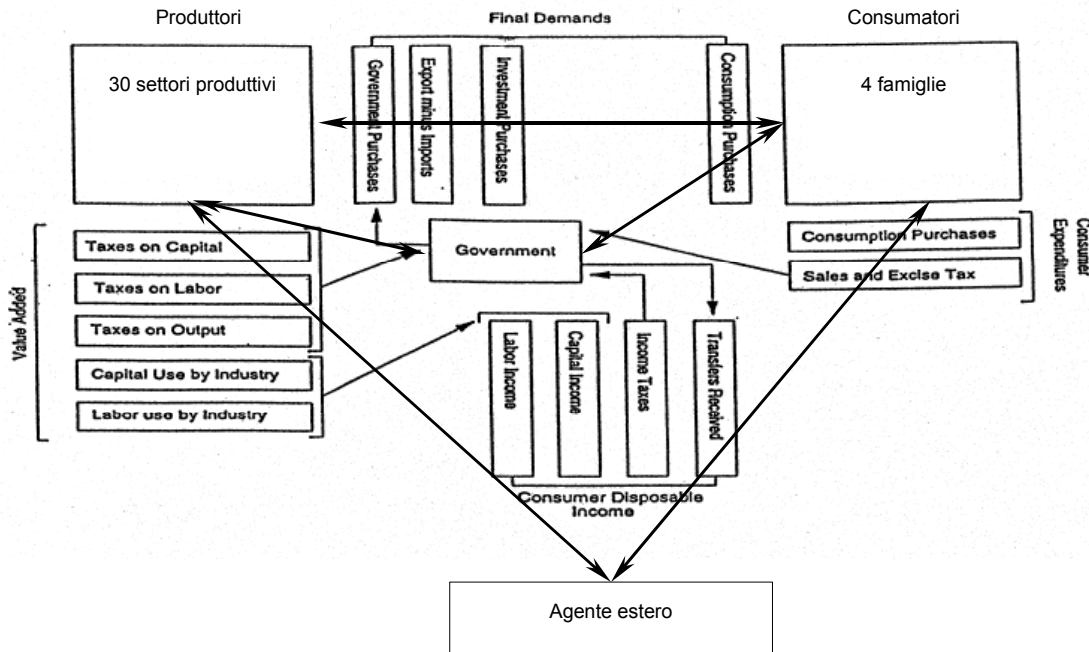


Figura 1 Lo schema di un modello CGE che rappresenta l'economia di una singola nazione (fonte: Roson 2002)

A seconda di quanto sofisticato è il modello, esso può rappresentare il progresso e la sostituzione tecnologica, due elementi spesso essenziali per poter determinare correttamente l'evoluzione del sistema energetico. Abbiamo già detto che tradizionalmente il cambiamento tecnologico è rappresentato in termini esogeni; alcuni modelli CGE, invece, esprimono l'innovazione tecnologica in modo endogeno, legandola direttamente al prezzo dei beni energetici (si parla in questo caso di *Induced Technological Change* - Weyant 2000).

Due sono le difficoltà da superare quando si voglia operare con siffatti modelli: prima di tutto, serve una profonda conoscenza delle dinamiche del sistema economico, perché le funzioni di domanda/offerta devono essere strutturate in modo da riprodurre l'effettivo comportamento degli operatori sul sistema economico. Inoltre, e questo è generalmente l'aspetto più critico, tali funzioni devono essere tarate in modo da riprodurre lo scenario base in un anno di riferimento. A tale scopo si elaborano i dati raccolti periodicamente dagli istituti di ricerca che redigono le tavole intersettoriali dell'economia (Accardo & Cavalletti 2000), basate sull'approccio Input-Output (Leontief 1970), ipotizzando che l'economia evolva in maniera stazionaria. Spesso, il livello di dettaglio sul quale operano tali tavole condiziona il livello di dettaglio del modello stesso: poiché tali tavole non rappresentano in modo approfondito il settore energetico, è spesso complesso riuscire a tarare un modello robusto e affidabile che lo consideri nella sua totalità.

Data la loro struttura e la ridotta descrizione degli aspetti tecnici, i modelli CGE sono molto usati per valutare gli effetti di politiche di riduzione delle emissioni di tipo economico, quali ad esempio le carbon-tax, e, soprattutto, di politiche di commercio delle emissioni a livello internazionale, cioè per valutare la fattibilità dei meccanismi flessibili previsti dal Protocollo di Kyoto. A seconda della complessità del modello, ipotesi diverse sono effettuate circa l'esistenza e la modalità di realizzazione di un mercato internazionale delle emissioni. Estremamente difficile, invece, è riuscire ad utilizzare i

CGE per la valutazione di politiche settoriali a livello domestico, proprio perché quest'operazione si scontra con la difficoltà di reperimento dei dati.

## **Modelli misti ed integrati**

### *L'approccio di ottimizzazione: MarKal-Macro e MarKal-Micro*

Negli ultimi cinque anni sono stati sviluppati diversi modelli che appartengono alla categoria dei modelli misti, secondo la classificazione sopra esposta: si tratta di modelli caratterizzati dalla descrizione ingegneristica dei cicli di produzione dell'energia, secondo un approccio bottom-up, pur contenendo esplicito riferimento alle variabili economiche, tramite il quale identificare gli effetti delle politiche energetiche su grandezze macroeconomiche quali il livello dell'occupazione e il Prodotto Nazionale Lordo della nazione cui sono applicati. In questa direzione si muovono MarKal-Macro (Hamilton et al. 1992) e MarKal-Micro (Regemorter & Goldstein 1998), due strumenti di ottimizzazione elaborati nel contesto della famiglia MarKal. Anche in questo caso si definiscono configurazioni di scenario sui prezzi del greggio e l'andamento dell'economia (PIL), che tuttavia costituiscono solo l'input del modello e sono lasciati liberi di variare durante l'orizzonte temporale di simulazione. La differenza sostanziale tra i due modelli sta nell'approccio con cui si affrontano gli aspetti economici: nel primo caso domanda e offerta sono rappresentate in modo aggregato per tutto il sistema (l'approccio è dunque di tipo *macroeconomico*), mentre nel secondo il sistema è rappresentato in modo disaggregato, diversificando domanda e offerta in base alle preferenze e al poter d'acquisto delle famiglie e al livello di investimento da parte dei produttori (approccio *microeconomico*). Nel primo caso, inoltre, la domanda e i prezzi dei beni energetici sono esogeni al sistema, mentre nel secondo sono endogeni. Per ciascun bene energetico, infatti, in MarKal-Micro sono esplicitate le intere curve di domanda e offerta, in funzione del prezzo. Tramite un algoritmo di ricerca, dunque, per ciascun bene energetico si determina il prezzo d'equilibrio, quello per cui l'offerta uguaglia la domanda. L'approccio è ancora quello di ottimizzazione, per cui, analogamente a quanto accade in MarKal, i due modelli evolvono in modo che si raggiunga la configurazione di minor costo complessivo sul sistema.

### *L'approccio di simulazione: NEMS*

In generale, i modelli di ottimizzazione si occupano di identificare la strategia energetica ottimale, senza valutare se il sistema riuscirà effettivamente a portarsi in quella posizione: in sostanza, non considerano la fattibilità operativa delle politiche scelte mediante l'ottimizzazione. I modelli di simulazione, invece, sono realizzati proprio a questo scopo: essi riproducono l'attitudine degli operatori del sistema economico nell'affrontare le decisioni in campo energetico.

Uno fra i più noti modelli di questo tipo è il modello NEMS (acronimo per *National Energy Modelling System*, US/DOE 2000), elaborato per il territorio degli Stati Uniti e già utilizzato in diversi studi - ad esempio, IWG (2000). Analogo a NEMS è il modello CIMS - Canadian Integrated Modelling System (ERG 2000), sviluppato per il Canada nell'ambito del programma *National Climate Change Process, NCCP*. Trattasi di un modello tecnologico/economico, di tipo bottom-up, caratterizzato quindi dalla dettagliata descrizione dei cicli energetici, realizzato per supportare la pianificazione energetica per gli Stati Uniti: non si tratta dunque di un modello realizzato con il solo obiettivo di affrontare le problematiche di cambiamento climatico globale. Il modello affronta gli aspetti puramente economici in un'ottica aggregata (macroeconomia), gestisce in modo endogeno l'evoluzione della domanda di beni energetici, così come l'andamento dei relativi prezzi. Questi si ottengono, all'equilibrio, dall'incontro tra domanda e offerta e sono dipendenti dalle assunzioni sullo scenario economico, espresse in termini di prezzo del greggio e crescita economica, definita in termini di forza lavoro e produttività.



Il sistema modellizzato è strutturato come in Fig. 3: tramite uno schema modulare, esso rappresenta i tre diversi aspetti di Produzione, Conversione e Consumo dell'energia a livello domestico, il commercio d'energia con l'estero e gli aspetti macroeconomici, messi in relazione tramite un ulteriore modulo d'integrazione. Tutte le informazioni riguardanti le componenti di ciascun modulo sono esplicitate a livello spaziale, con riferimento ai singoli stati che compongono il territorio modellizzato. Il livello di dettaglio con cui sono descritte le componenti di ciascuno di questi moduli è diverso a seconda della disponibilità di dati, che è appunto diversa da stato a stato. A partire da questa rappresentazione il modello effettua la simulazione dell'intero sistema, procedendo in modo iterativo finché la domanda e l'offerta non si equivalgano per tutti i beni energetici e tutte le tipologie di consumo. Analogamente a MarKal, NEMS simula l'equilibrio su base annuale per tutti gli anni appartenenti all'orizzonte temporale e permette quindi di valutare la risposta del sistema alle politiche energetiche anche durante il periodo transitorio.

Quando usato per simulare gli effetti di una politica strategica, il modello fornisce i costi e i benefici derivanti dall'attuazione di tale politica. I costi tengono conto dei costi diretti di ricerca e sviluppo, dei costi d'investimento e dei costi amministrativi di implementazione della politica. Questi ultimi sono ottenuti da una rassegna dei costi d'attuazione di una pluralità di politiche attuate dalla pubblica amministrazione statunitense, su problematiche afferenti al sistema energetico (ne sono state prese in esame 12). Non ci sono valutazioni dei costi indiretti legati agli effetti indiretti delle politiche sul sistema economico, ad eccezione di quelli derivanti da politiche di *Emission Trading* a livello domestico, rilevati da analisi statistiche e rassegne econometriche effettuate sui primi esperimenti di commercio delle emissioni condotti nel passato negli Stati Uniti. I benefici sono invece espressi sia in termini monetari (valore dell'energia risparmiata) sia in termini fisici (quantità di energia primaria risparmiata e emissioni di gas climalteranti evitate), tuttavia non compaiono valutazioni delle esternalità ambientali.

In virtù dell'accurata rappresentazione che dà del sistema energetico, NEMS può essere utilizzato per valutare una molteplicità di politiche settoriali, che mirino alla diminuzione dell'intensità energetica della produzione e del consumo, cioè all'aumento dell'efficienza nelle tecnologie di produzione e negli usi finali, ma anche alla riduzione dell'intensità di carbonio dell'economia, agendo dunque solo dal lato produzione.

Poiché anche NEMS è un modello dinamico multiperiodale è possibile simulare politiche d'intervento attuate in modo graduale nel tempo: le politiche non devono necessariamente partire dall'istante iniziale di simulazione ma possono essere dilazionate nel corso degli anni di simulazione (si noti, tuttavia, che l'avvicendamento temporale delle politiche è programmato in modo esogeno all'inizio della simulazione e non è il risultato di decisioni prese in modo endogeno durante la simulazione stessa).

NEMS permette inoltre di tenere conto del cambiamento tecnologico, che si verifica naturalmente anche in assenza di politiche strategiche e interventi da parte dello stato. La letteratura tradizionale (Fisher & Pry 1970) ritiene che il cambiamento tecnologico sia un fenomeno esogeno, svincolato dal livello dei prezzi dei beni energetici e, in un certo senso, dipendente solo dal passare del tempo. Il progresso tecnologico è generalmente rappresentato tramite un coefficiente di incremento autonomo dell'efficienza -*Autonomous Energy Efficiency Improvement, AEEI*, Weyant (2000) - in base al quale l'energia primaria necessaria per una unità di output diminuisce al variare del tempo, indipendentemente dall'andamento dei prezzi. NEMS presuppone che il cambiamento tecnologico avvenga in modo indipendente dai prezzi, tuttavia non lo esprime direttamente in funzione del tempo ma fa ricorso alle cosiddette *curve d'esperienza*. Queste curve riproducono gli effetti dei processi di *learning by doing*, che, sulla base di successivi aggiustamenti e modifiche, determinano la diminuzione dei costi associati a ciascuna tecnologia di produzione di energia elettrica. All'aumentare dell'esperienza nell'utilizzo di una certa tecnologia, infatti, i costi d'investimento diminuiscono sensibilmente. NEMS modella questo fenomeno mediante una funzione che lega i costi d'investimento per l'aumento di capacità produttiva delle centrali al numero di centrali insediate.

All'aumentare delle centrali, il costo d'investimento diminuisce, secondo un trend determinato in modo esogeno sulla base di analisi di tipo statistico econometrico.

### L'internalizzazione dei danni ambientali: il modello tecnologico settoriale TOCANES

Spesso gli effetti ambientali delle politiche compaiono solamente ai margini del mercato e frequentemente eventuali effetti negativi sull'ambiente dovuti all'azione antropica non sono ricompensati con il corretto valore che ad essi spetta: nel linguaggio degli economisti (Turner et al. 1998) si dice che tali effetti negativi non passano attraverso il mercato, cioè non c'è nessuno che paga per i danni causati, e per questo vengono chiamati esternalità. Se invece fossero inseriti nel meccanismo di mercato tradizionale, probabilmente le scelte di pianificazione sarebbero diverse. Per internalizzare le esternalità, cioè per riportare il mercato al suo corretto funzionamento, è necessario l'intervento esterno, l'intervento pubblico. In questo senso, dovrebbero proprio essere i modelli per la pianificazione strategica a indicare la strada verso l'internalizzazione: i modelli, cioè, dovrebbero essere strutturati in modo da tenere esplicitamente conto degli effetti ambientali, allo stesso modo in cui trattano altri aspetti, e non dovrebbero relegarli in termini lessicografici.

Ne risulta che non considerare esplicitamente gli effetti ambientali delle politiche energetiche è chiaramente un errore, almeno nel lungo periodo ed in assenza di interventi strutturali sul sistema energetico, quando i cambiamenti climatici impatteranno sul sistema economico complessivo almeno in termini di spese difensive per il contenimento e la mitigazione dei danni. Trattare le questioni ambientali solo come vincolo (ad esempio sulle emissioni di gas serra), come in MarKal, porta inevitabilmente a risultati sub-ottimi rispetto a quelli che si potrebbero conseguire con una completa valutazione dei costi industriali ed ambientali. A tale scopo si possono percorrere due strade diverse: la prima consiste nel riconoscere esplicitamente la multidimensionalità del problema, affrontandola quindi con i classici metodi di Analisi a Molti Obiettivi (Keeney & Raiffa 1976), che garantiscono all'ambiente un ruolo paritario con quello degli aspetti monetari tradizionalmente considerati. La seconda consiste nel proiettare la multidimensionalità del problema lungo una sola scala, quella di

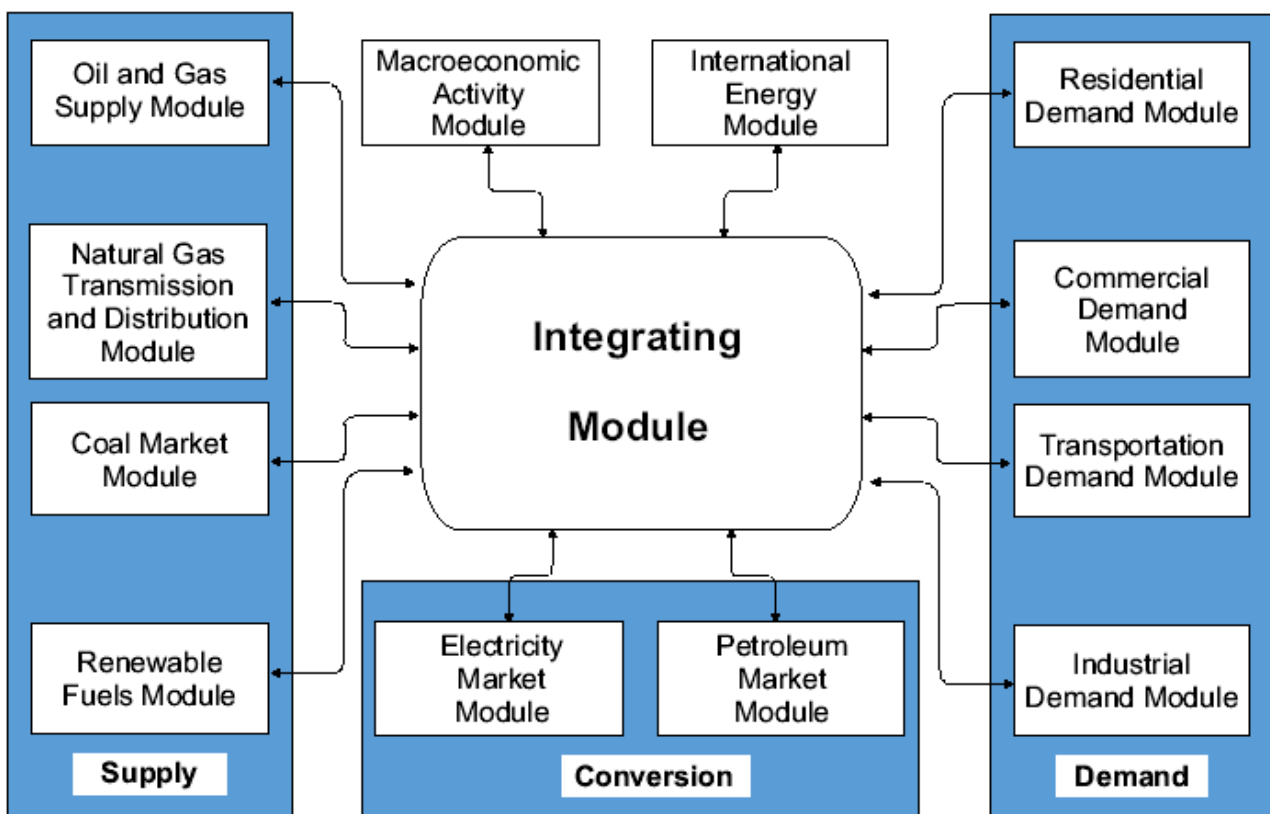


Figura 3 La rappresentazione del sistema energetico in un modello tecnico (fonte US/DOE 2000).

carattere monetario. Questo approccio, che è quello classico dell'Analisi Costi Benefici (Turner et al. 1998), richiede l'identificazione del valore monetario delle esternalità ambientali. Queste vengono trattate come componenti aggiuntive della funzione obiettivo dei costi, che quindi vengono minimizzati nel loro complesso.

Quest'ultimo approccio è stato adottato per il modello di ottimizzazione del settore elettrico per la nazione italiana TOCANES – acronimo per *TOTal Coast Analysis of National Energy System* (De Leo et al. 2001) - sviluppato al fine di valutare il costo reale dell'implementazione del Protocollo di Kyoto in Italia, operando con politiche di tipo domestico per la riduzione delle emissioni di gas climalteranti. Il modello descrive il solo sistema di produzione dell'energia elettrica, trascurando gli altri settori e fasi coinvolti nei cicli energetici, ad un livello di dettaglio molto meno approfondito di quello previsto da MarKal. Ciononostante, esso è particolarmente innovativo perché considera esplicitamente i costi ambientali, inserendoli a tutti gli effetti all'interno della funzione obiettivo (i vincoli che agiscono sul sistema sono unicamente legati alla potenzialità di ciascuna fonte energetica di soddisfare la domanda). A partire dalle valutazioni monetarie sviluppate nell'ambito del progetto europeo ExternE (EC 1998), tale modello permette di associare a ciascuna fonte energetica un valore di costo, che tenga conto degli aspetti d'inquinamento locale e degli effetti sulla salute, oltre che di quelli legati al riscaldamento climatico globale. Il modello, tuttavia, non considera le interazioni che caratterizzano il sistema energetico e ipotizza che sia la domanda sia i prezzi dei beni energetici siano costanti. Inoltre, esso è statico e non permette di effettuare analisi dinamiche del periodo di transitorio di attuazione delle politiche di trasformazione del sistema di produzione dell'energia elettrica.

## **Discussione**

Il quadro dei modelli analizzati nel presente lavoro è piuttosto complesso ed articolato come rappresentato in Tab. 1 per quanto riguarda la scala geografica di applicazione e in Tab. 2 per quanto riguarda tutti gli altri criteri di classificazione. L'ambito geografico di analisi del modello dipende in parte dall'approccio tecnologico o economico utilizzato. I modelli CGE, ad esempio possono essere ragionevolmente tarati e sviluppati solo su scala geografica nazionale. L'uso di questi modelli a scala inferiore o per le analisi settoriali verticali (del solo mercato elettrico, per esempio) non avrebbe senso in quanto verrebbero trascurate le importanti relazioni del mercato locale o settoriale col resto del paese e del mercato. I modelli Markal, invece, grazie alla loro flessibilità e modularità, risultano adatti ad un'applicazione su scala locale, come mostrano numerose applicazioni italiane e straniere (Jank & Tosato 2001).

Entrambe le tipologie di modelli, invece, possono essere applicate alla scala mondiale, anche se con notevoli differenze. MarKal su scala mondiale, infatti, altro non è che un insieme di modelli MarKal, ciascuno dei quali rappresenta una singola nazione (o un aggregato di nazioni); un CGE mondiale, invece, è un unico modello semplificato, che rappresenta il mondo come un insieme di economie nazionali aperte, che interagiscono tra di loro. I modelli a scala mondiale realizzati con l'approccio MarKal richiedono uno sforzo enorme di taratura e calibrazione dei parametri del modello. Spesso si finisce per ricorrere ad altri studi di letteratura che sono però stati sviluppati con finalità e metodologie diverse. In queste condizioni, il risultato rischia di essere meno attendibile di quello fornito da modelli più semplici ma realmente tarati sui sistemi in esame.

La stessa tipologia di problemi affligge l'applicazione dei modelli CGE a scala globale, per l'insormontabile difficoltà di raccolta della base informativa, almeno al livello di dettaglio del modello di Roson (2000). L'unico approccio percorribile diventa quello di semplificazione-aggregazione in termini macroeconomici, tipo RICE (Nordhaus 2000).

D'altra parte, modelli semplificati e aggregati rischiano di trascurare aspetti significativi della struttura dei sistemi energetico/economici, portando così a risultati altrettanto inaffidabili. In entrambi i casi, quindi, si ha una perdita di informazione. I modelli a scala mondiale sono tuttavia necessari per poter valutare le politiche di *Emission Trading* e i meccanismi flessibili del Protocollo di Kyoto, che hanno impatti significativamente diversi a seconda che siano effettuati in ambito nazionale o internazionale.

In funzione della disponibilità dei dati e degli aspetti cui si è più sensibili, dunque, di volta in volta si sceglierà la tipologia di modello da adottare. Se si sceglie di valutare solo politiche di tipo domestico è logico concentrarsi su modelli a scala nazionale.

Tab. 1 I modelli considerati e la loro classificazione rispetto alla scala spaziale e al tipo di approccio. Per il significato dei termini di classificazione dell'approccio si rimanda al testo).

	SCALA			APPROCCIO			
	Locale	Nazionale	Mondiale	Tecnologico	Economico	Integrato	Aggregato
MarKal	X	X	X	X			
TOCANES		X					X
MarKal-Macro		X	X			X	
MarKal-Micro		X	X			X	
NEMS		X		X	X		
CGE		X	X		X		

Dall'esame della Tab. 2 emerge in modo lampante che solo il modello TOCANES di De Leo et al. (2001) considera esplicitamente nel computo dei costi complessivi le retroazioni generate dalle esternalità ambientali. Stupisce particolarmente che tutti gli altri modelli, anche quelli particolarmente sofisticati, trascurino l'aspetto più rilevante del problema dell'effetto serra, ovvero confrontare i costi diretti di politiche mitigative coi benefici in termini di danni evitati con la riduzione dell'uso dei combustibili fossili. MarKal, almeno per come è stato applicato finora, permette di considerare gli aspetti di rilevanza ambientale di diverse politiche energetiche (ovvero i gas serra), ma solo in termini di vincolo alle emissioni. D'altro canto, il modello TOCANES di De Leo et al. (2001) non è esente da limiti, il primo dei quali è la descrizione aggregata e statica del mercato dell'energia elettrica. A questo proposito si può affermare che non ci sono difficoltà concettuali ad estendere l'approccio ad altre componenti del settore energetico diverse da quello elettrico ed a ripetere i conti per altre nazioni o a livello aggregato europeo o americano, purché però siano disponibili i dati per popolare la pur semplice base informativa del modello. L'approccio di TOCANES risulta comunque estremamente più semplice rispetto a quello molto più complesso e sofisticato di NEMS, probabilmente lo studio migliore ad oggi pubblicato di descrizione del settore energetico di una nazione. Infine, l'approccio di De Leo et al. (2001) non considera gli effetti indotti sul mercato di diverse politiche energetiche, come invece fanno i modelli CGE.

Per concludere, in termini applicativi e non di approccio metodologico, è interessante notare che dalle analisi condotte col modello NEMS risulta che una politica energetica intelligente, basata essenzialmente sul risparmio energetico e sulla cogenerazione, permetterebbe agli Stati Uniti di soddisfare gli impegni sottoscritti a Kyoto nel 1998 senza apprezzabili costi aggiuntivi e ricadute negative sul Prodotto Nazionale Lordo (IWG 2000). Tale risultato verrebbe ulteriormente rinforzato se, oltre ai costi industriali, venissero contabilizzati anche i danni ambientali evitati grazie ad un uso più razionale dell'energia.

## Conclusione

L'analisi qui condotta mostra che nessuno dei modelli qui considerati presenta contemporaneamente tutte le caratteristiche desiderate in termini di computo delle esternalità e valutazione degli effetti diretti ed indotti sui vari settori del mercato. Il modello NEMS appare ad oggi il più completo fra i modelli tecnologici, non solo per il notevolissimo livello di dettaglio con cui vengono ricostruiti produzione e domanda di energia, ma anche per la considerazione, se pur in termini aggregati, dei principali aspetti economici attraverso semplici modelli input-output. Da un punto di vista generale ci

sembra estremamente promettente lavorare su un'estensione dei modelli di simulazione di tipo CGE al fine non solo di descrivere con precisione il mercato, ma di considerare anche esplicitamente le possibili retroazioni generate dai gas serra sul mercato medesimo, visto che il controllo degli effetti generati dai cambiamenti climatici finirà per incidere sulla spesa pubblica o direttamente - come spese per la costruzione di opere difensive attive- o indirettamente - in termini di danni alle infrastrutture ed alla produzione agricola ed impatti sulla salute. Tutti questi aspetti, infatti, avrebbero evidenti ricadute dirette sulla spesa sanitaria o indirette sulla produttività del paese.

Risulta quindi auspicabile che, nell'ambito di futuri sviluppi della ricerca in questo settore, si elabori un modello di simulazione di tipo CGE, che, oltre a considerare in modo esplicito le retroazioni delle politiche energetiche sull'intero sistema economico, rappresenti il settore energetico con una adeguata disaggregazione e, inoltre, conteggi esplicitamente le esternalità ambientali. A questo scopo, particolarmente semplice risulterebbe almeno il conteggio delle esternalità sulla salute pubblica, che potrebbero essere valutate come riduzione della spesa del settore sanitario a seguito dell'applicazione delle politiche di controllo delle emissioni.

## **Bibliografia**

Accardo, B. M., B. Cavalletti, Febbraio 2000 - *Costruzione di una base-dati microconsistente per l'implementazione di un modello di equilibrio economico generale dell'economia italiana*, in Matrici di contabilità sociale, Seminario sui processi di distribuzione del reddito, Collana Sintesi IRER, n.25.

De Leo, G.A., L. Rizzi, A. Caizzi, M. Gatto, 2001 - *The economic benefits of the Kyoto Protocol*, *Nature* 413:478-479.

Downing, T.E., N. Eyre, R. Greener, 1995 - *The economic impacts of climate change: assessment of fossil fuel cycles for the ExternE project*, Oxford and Lonsdale, Environmental Change Unit and Eyre Energy Environment.

Downing, T.E., N. Eyre, R. Greener, D. Blackwell, 1996 - *Projected costs of climate change for two reference scenarios and fossil fuel cycles*, Environmental Change Unit, Oxford.

ERG, Energy Research Group, M.K. Jaccard and Associates, June 30, 2000 - *Integration of GHG emission reduction options using CIMS*, Prepared for the Analysis and Modelling Group Climate Change Modelling Implementation Process, Vancouver.

European Commission, 1998 - *ExternE: Externalities of Energy*, Vols. 1-9, Brussels

Fisher, J.C., R.H. Pry, June 1970 - *A simple substitution model of technological change*, Report 70-c-215, GEC, Schenectady, New York.

Hamilton, L.D., G. Goldstein, J.C. Lee, A. Manne, W. Marcuse, S.C. Morris, C-O. Wene, 1992 - *MarKal-Macro: An overview*, Brookhaven National Laboratories, #48377, 1992.

Jank, R., G. Tosato (Eds.), 2001 - *Guida alla pianificazione energetico ambientale a scala locale (ALEP)*, Agenzia Internazionale dell'Energia, Annesso 33.

Keeney, R., H. Raiffa, 1976 - *Decision with multiple objectives: preferences and value trade-offs*, John Wiley & Sons, New York, NY.

IWG, Interlaboratory Working Group (Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, and Lawrence Berkeley National Laboratory, California), 2000 - *Scenarios for a Clean energy Future*, OPRNL/CON-476 and LBNL-44029.

Leontief, W., 1970 - Environmental repercussion and economic structure: an Input-Output approach, *The review of Economics and Statistics*, 52, pages 262-271.

Regemorter, D. van, G. Goldstein, December 1998 - *Development of MarKal model: towards a partial equilibrium model*, ETSAP working Paper.

Roson, R., 2002 - *Dynamic and distributional effects of environmental revenue recycling schemes*, FEEM Working Papers, 15.2002.

Sanstad, A.H., L.A. Greening, 1998 - Economic models for climate policy analysis: a critical discussion, *Environmental modelling and Assessment*, 3: 3-18.

Seebregts, A.J. G. Goldstein, K. Smekens, December 2001- *Energy-environmental modelling with the MarKal family of models*, ETSAP Working Paper.

US/DOE (Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585), March 2000 - *The National Energy Modeling System: An Overview*.

Weyant, J.P., 2000 - *An introduction to the economics of climate change policy*, Pew Center on Global Climate Change.

Wigley, T.M.L., M. Hulme, S.C.B. Raper, 1993 – *MAGICCC: model for the assessment of Greenhouse Induced Climate Change*, University Consortium for Atmospheric Research, Boulder.

Tabella 2 Le caratteristiche dei modelli sopra presentati.

<b>Modello</b>	<b>Approccio</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Utilizzo</b>	<b>Domanda beni energetici</b>	<b>Prezzi beni energetici</b>	<b>Ambiente/ Esternalità</b>	<b>Dinamico</b>	<b>Effetti Economici Indiretti</b>	<b>Cambiamento Tecnologico</b>
<b>MARKAL</b>	Tecnologico, solo mercati energetici	Ambiente per generare modelli	Ottimizz.	Esogena	Esogeni	Vincolo	Si	No	Dipende
<b>TOCANES</b>	Aggregato, Settoriale, solo mercato elettrico	Specifico per Italia	Ottimizz.	Esogena	Esogeni	Obiettivo	No	No	Curve d'esperienza
<b>MarKal-Macro</b>	Integrato, solo mercati energetici	Ambiente per generare modelli	Ottimizz.	Esogena	Esogeni	Vincolo	Si	No	Dipende
<b>MarKal-Micro</b>	Integrato, solo mercati energetici	Ambiente per generare modelli	Ottimizz.	Esogena	Endogeni	Vincolo	Si	Si	Dipende
<b>NEMS</b>	Misto, principalmente mercati energetici	Specifico per USA	Simulaz.	Esogena	Endogeni	No esternalità	Si	No (solo per Emission Trading)	Curve d'esperienza
<b>CGE</b>	Economico, Sistemico, tutti i mercati	Ambiente per generare modelli	Simulaz.	Endogena	Endogeni	No esternalità (ma possibile)	Dipende	Si	Dipende