

Metodologie ed esempi dell'analisi di scenario energia-economia-ambiente: l'esperienza ENEA

Maria Rosa Virdis, Umberto Ciorba, Ilaria d'Elia, Maria Gaeta, Chiara Martini, Marco Rao, Cristina

Tommasino

L'approccio

Da una decina d'anni l'ENEA è attiva nell'ambito dell'analisi di scenari energetici. Inizialmente l'interesse dell'ENEA era di esplorare degli scenari evolutivi della domanda e offerta di energia in Italia con una forte attenzione, data la *mission* dell'Ente, per gli aspetti tecnologici. L'esigenza era anche di condurre questa esplorazione in un'ottica coerente di sistema, vale a dire tenendo presenti simultaneamente le implicazioni dello sviluppo di una determinata tecnologia energetica sul resto del sistema energetico e la competizione delle tecnologie sul mercato. Da queste esigenze è scaturita logicamente la scelta di utilizzare come strumento di analisi un modello di tipo economico-ingegneristico disponibile nella sua formulazione di base, il modello MARKAL (MARKet ALlocation System) e poi il suo successore TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System).

Il modello, di cui si parlerà più diffusamente in un'altra presentazione, nella sua forma originaria nasce nell'ambito di una collaborazione internazionale (un *Implementing Agreement*) dell'Agenzia Internazionale per l'Energia, l'ETSAP-Energy Technology System Analysis Program) ed è costituito da un generatore di modelli generico adattabile a qualunque sistema energetico a scala nazionale, regionale. Il modello è di tipo bottom-up perché parte da una rappresentazione dettagliata di ciascuna tecnologia energetica di offerta e di uso finale (caratterizzata da parametri ingegneristici di input tecnologici e di costo) per poi arrivare a ricostruire gli elementi e i valori di un bilancio energetico alla scala desiderata.

L'ENEA ha sviluppato una versione del modello per l'Italia (il TIMES-Italia), caratterizzandola con parametri che riflettono la realtà nazionale e calibrandola a partire dai dati storici nazionali (al momento i bilanci energetici in formato Eurostat). Il modello lavora con una logica di programmazione lineare, e di ottimizzazione, tipicamente minimizzando i costi di sistema per soddisfare una determinata domanda di servizi energetici, sotto vincoli dati per la disponibilità di risorse (potenziali tecnologici) o relativi ad obiettivi di policy (ad esempio riduzione delle emissioni o della domanda di energia).

Per l'elaborazione di scenari futuri (il modello ha una gittata che può giungere al 2050 e oltre), il modello necessita di input esogeni relativi ai principali driver macroeconomici (tassi di crescita del PIL, popolazione, prezzi internazionali dell'energia) e alle verosimili traiettorie di evoluzione dei costi delle tecnologie. Altri vincoli esogeni possono essere costituiti da obiettivi di policy. L'insieme di questi input caratterizza lo scenario. La soluzione prodotta dal modello rappresenta il mix di tecnologie e di fonti energetiche che minimizza il costo per il raggiungimento dell'obiettivo dato. Questi esercizi possono essere utili ai fini di elaborazione di strategie energetiche e di una riflessione sulle implicazioni, i rischi e i vantaggi di ciascuno scenario.

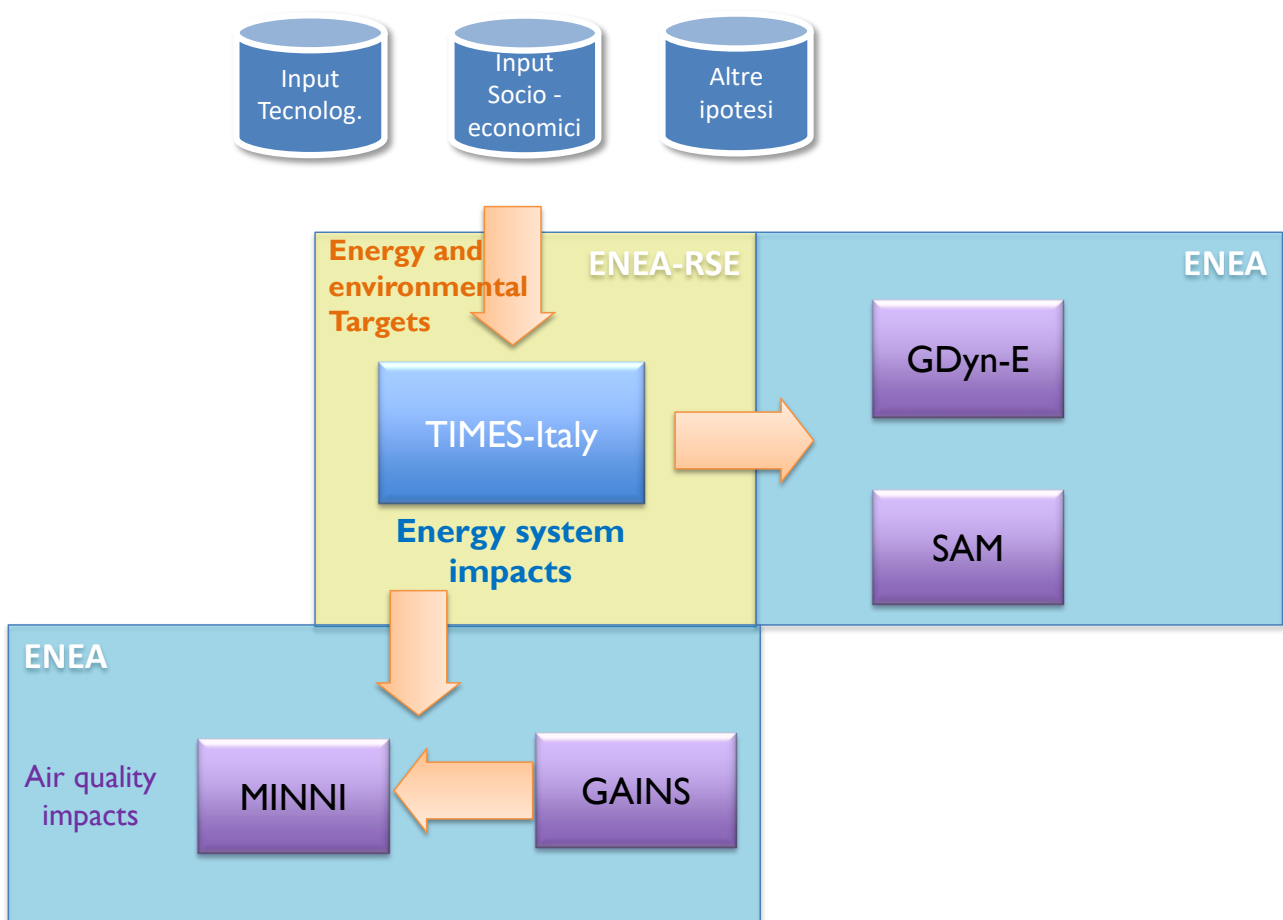
Nel corso degli anni l'ENEA ha elaborato e quantificato una serie di scenari, a orizzonte 2020, 2030 o 2050, proiettando immagini internamente coerenti della domanda e offerta futura di energia in Italia, rappresentate come bilanci energetici nazionali al tempo T. Tali scenari sono stati quantificati sia nel quadro di attività di ricerca indipendenti, sia nell'ambito di attività di supporto alle amministrazioni

pubbliche (Governo, Ministeri) nell'elaborazione di politiche, o di consulenze con committenti esterni e Associazioni di categoria.

Col tempo, l'interesse dell'ENEA si è esteso alla analisi di altre dimensioni, come quella economica e ambientale, degli scenari energetici, nel tentativo di comprendere gli impatti di determinati scenari sull'attività economica, sulle emissioni di inquinanti atmosferici e sulle loro concentrazioni (qualità dell'aria). L'approccio utilizzato, in mancanza di un modello integrato che affrontasse con un grado sufficiente di dettaglio questi aspetti e fosse in grado di analizzare i feedback fra sistema energetico e ambientale e sistema economico è stato quello di legare, per ora in maniera unidirezionale, il modello energetico di volta in volta con un modello ambientale o con un modello economico. Questo approccio ha messo a frutto la disponibilità in ENEA di alcuni altri modelli o metodologie (il modello GAINS-MINNI sulla qualità dell'aria, la matrice di Contabilità sociale, e il modello GTAP nella versione GDyn-E, per gli impatti macroeconomici) consentendo di mettere insieme una catena valutativa capace di analizzare gli impatti di ciascuno scenario energetico su più dimensioni, così arricchendo e irrobustendo l'elaborazione di qualsiasi strategia.

Ovviamente, la valutazione di impatto richiede che ciascuno scenario venga confrontato con un benchmark, uno "scenario di riferimento", che a quel punto deve essere quantificato sia per il sistema energetico che per il sistema economico o per le emissioni, e rispetto al quale si evidenziano le variazioni nelle variabili di interesse. La figura 1 illustra la catena modellistica utilizzata, che fa perno sul modello energetico TIMES-Italia.

Figura 1 Catena modellistica utilizzata in ENEA per le valutazioni energia, economia ambiente



A seconda di quale specifico impatto di uno scenario energetico si vuole considerare, il modello TIMES viene accoppiato di volta in volta con uno degli altri tre rappresentati nel grafico.

L'utilizzo in cascata del modello TIMES con il modello GAINS permette di calcolare le emissioni di gas serra (oltre la CO₂, già determinata dal TIMES per la parte energetica) e di inquinanti atmosferici (SO₂, NO_x, CH₄, NMVOC, PM₁₀, PM_{2,5}) corrispondenti a ciascuno scenario energetico, per l'intero periodo di proiezione. Il modello GAINS, anche esso un modello di tipo ingegneristico molto dettagliato sulle emissioni caratteristiche di ciascun processo produttivo, e sulle tecnologie di controllo "end of pipe" delle emissioni, è in grado di elaborare varianti di scenario considerando diverse strategie di controllo e di determinarne i costi corrispondenti. Come si vedrà più avanti, se si utilizza l'intera suite modellistica MINNI, per ciascuno scenario è anche possibile elaborare mappe di concentrazione di specifici inquinanti atmosferici a scala locale con una risoluzione spaziale di 20 km x 20 km. Questa combinazione di modelli è stata utilizzata nel 2015 da ENEA per esaminare l'impatto sulla qualità dell'aria di diversi scenari di utilizzo di biomasse solide per il riscaldamento domestico.

Per quanto riguarda gli impatti economici, il modello utilizzato a valle del TIMES è diverso a seconda dell'oggetto di interesse.

Per valutare gli effetti, in termini di produzione, valore aggiunto, occupazione, variazioni nel bilancio dello Stato a livello nazionale, di politiche energetiche viene utilizzata una matrice di contabilità sociale SAM. Si possono così confrontare gli impatti di diversi vettori di investimento in tecnologie energetiche corrispondenti a diversi scenari, così come l'impatto di risparmi energetici sulle scelte di spesa delle famiglie o delle imprese, o determinare per determinati risparmi nell'uso di fonti fossili di quanto si riduce il gettito fiscale dello Stato. I flussi di investimenti energetici o i consumi energetici e le rispettive variazioni per settore sono tipicamente un output del modello TIMES che diventa un input per la Matrice SAM. Un esempio di questo tipo di analisi è riportato nella pubblicazione ENEA *Rapporto Energia e Ambiente – Scenari e Strategie: verso un'Italia low-carbon: sistema energetico, occupazione e investimenti* del 2013. Una analisi dello stesso tipo, non pubblicata, fu fatta nel 2014 per il MiSE sull'impatto di uno scenario di riduzione delle emissioni di CO₂ del 36% al 2030 rispetto al 2005, a seguito della pubblicazione della Comunicazione "A policy framework for climate and energy in the period from 2020 up to 2030". L'analisi fu condotta da ENEA in collaborazione con RSE.

Un limite delle analisi con le matrici di contabilità sociale è di avere un focus solo nazionale. Per contro il decisore politico è molto sensibile oltre che all'impatto delle politiche energetiche e climatiche nazionali (in particolare quelle di decarbonizzazione) sulla crescita del paese, anche al loro impatto sulla sua competitività nel sistema di scambi internazionali. Questo tipo di problematica viene trattato in Enea accoppiando il modello TIMES, con un modello di equilibrio economico generale fortemente orientato all'analisi dell'aspetto *trade*, il GTAP (Global Trade Analysis Project), nella sua versione dinamica e dettagliata sul settore energetico (GDyn-E) di cui una variante è stata sviluppata in ENEA.

In assenza di un modello energetico globale *in house*, finora il modello GDyn-E è stato utilizzato prendendo a riferimento per l'Italia gli scenari energetico emissivi del modello TIMES, per l'Unione Europea gli scenari Europei o dell'IEA (World Energy Outlook), e per il resto del mondo gli scenari dell'IEA. Il tipo di confronto che è stato fatto riguarda situazioni in cui l'Italia realizza riduzioni emissive in linea con gli obiettivi europei e nel quadro di essi, mentre i paesi extraeuropei realizzano delle politiche di decarbonizzazione in linea con

impegni presi in ambito UNFCCC ma comunque meno ambiziose di quelle nazionali. Da questo punto di vista i casi analizzati sono realistici e improntati alla prudenza o al pessimismo sullo stato dei negoziati sul clima, ma nulla vieterebbe di analizzare casi in cui lo sforzo di decarbonizzazione fosse più condiviso. Questo tipo di applicazione è stato realizzato per la prima volta nel 2014 nell'ambito della citata valutazione di impatto per il MiSE su uno scenario di riduzione delle emissioni di CO₂ del 36% al 2030 rispetto al 2005. Un esercizio analogo è stato svolto nell'ambito del Deep Decarbonization Pathways Project¹, DDPP, progetto internazionale coordinato da IDDRI (Francia) e SDSN (US). Lo studio per l'Italia riguardava tre scenari tecnologici di decarbonizzazione spinta (riduzioni delle emissioni di CO₂ al 2050 dell'80% rispetto al 1990) ma con diverse traiettorie di sviluppo tecnologico. I risultati del lavoro sono riportati in Viridis et al. (2015) "Pathways to deep decarbonization in Italy"². In quell'esercizio, cui ha partecipato la FFEM, si è volute, fra l'altro, confrontare, per gli stessi scenari la diversa performance del modello GDyn-E dell'ENEA con un altro modello basato sul GTAP, il modello ICES di FEEM ma formulato in maniera differente.

Più di recente lo stesso approccio è stato utilizzato per analizzare per conto di Confindustria degli scenari di forte efficientamento energetico in Italia al 2030 (Confindustria, 2017).

L'approccio di utilizzare una catena modellistica per valutare scenari e politiche energetiche in maniera più compiuta, sta emergendo con forza e viene sviluppato in maniera più sistematica per fornire un supporto decisionale alla Pubblica Amministrazione. In questo caso, si tratta di collaborazioni fra enti di ricerca attivate per fornire un servizio al decisore pubblico. Esempi rilevanti di questo tipo di collaborazioni sono state la creazione del cosiddetto "Tavolo sulla Decarbonizzazione dell'Economia" istituito presso la presidenza del Consiglio dei Ministri, in cui un gruppo di lavoro composto da RSE, ENEA, Politecnico di Milano e ISPRA ha messo a sistema i propri modelli ed elaborato uno scenario di riferimento per l'Italia al 2030-2050 basato sulle stesse ipotesi dello scenario di Riferimento Europeo 2016. Un rapporto su questa esperienza è in corso di pubblicazione.

A questa esperienza ha fatto seguito una analoga per il Ministero dello Sviluppo Economico ed il Ministero dell'Ambiente, per la preparazione degli scenari per la Strategia Energetica Nazionale. L'attività è in corso, e si avvale della collaborazione di ENEA, RSE, ed ISPRA, ciascuno con i rispettivi modelli, utilizzati in cascata.

Su entrambe le esperienze si fa riferimento al paper dell'Ing. Maria Gaeta.

I modelli

Il modello GAINS Italia

Il modello GAINS-Italia (Greenhouse and Air Pollution Interaction and Synergies) è un modello di valutazione integrata, parte del progetto MINNI (Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'inquinamento atmosferico, Zanini et al., 2005), una suite modellistica sviluppata per conto del Ministero dell'Ambiente, del Territorio e del Mare, da ENEA in collaborazione con ARIANET s.r.l. e IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) e comprendente, oltre GAINS-Italia (D'Elia et al., 2009), il Sistema Modellistico Atmosferico, SMA-Italia, (Mircea et al., 2014), composto a sua volta da un modello meteorologico e da un modello di trasporto chimico con alcuni pre e post processori dei dati meteorologici ed emissivi.

¹ <http://deepdecarbonization.org/>

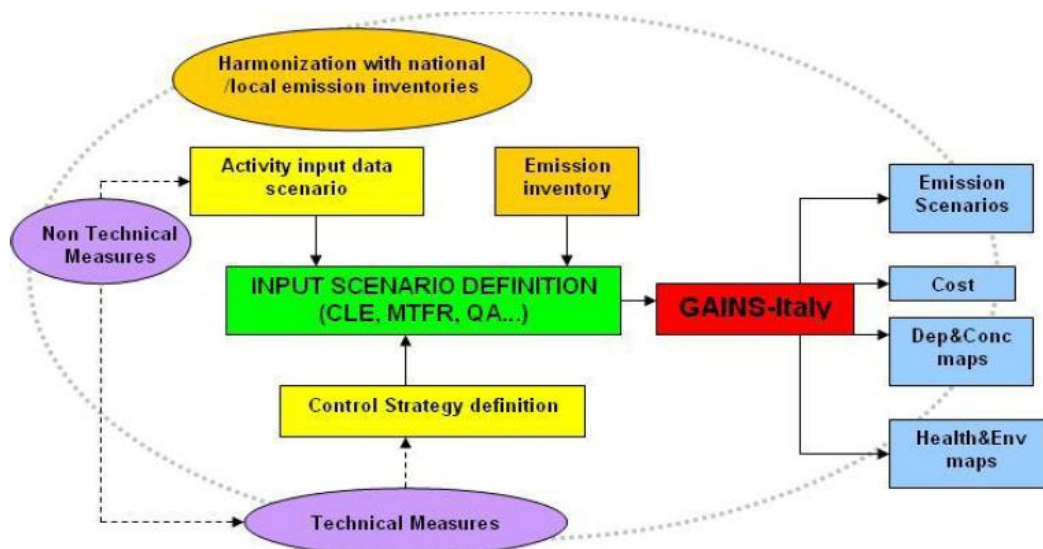
² http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_ITA.pdf

Il modello GAINS-Italia elabora, a livello nazionale e regionale, possibili scenari di riduzione delle emissioni di SO₂, NO_x, NH₃, NMCOV, PM (totale, PM10 e PM2,5) e dei sei gas ad effetto serra (GHGs) previsti dal protocollo di Kyoto, così da considerare anche le interazioni tra inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici. Attraverso le matrici di trasferimento elaborate dal sistema SMA-Italia e con una risoluzione spaziale di 20 km x 20 km, il modello stima gli effetti di acidificazione ed eutrofizzazione, i danni da ozono troposferico alla vegetazione e alla salute umana, nonché il danno alla salute umana da esposizione della popolazione alle concentrazioni di PM2.5.

Lo sviluppo di uno scenario emissivo, elaborato con il modello GAINS-Italia, richiede preliminarmente la quantificazione delle attività antropogeniche e la definizione di una strategia di controllo ad intervalli quinquennali per il periodo temporale 1990-2050. Per quanto riguarda le attività antropogeniche è necessario definire uno scenario energetico per stimare le emissioni provenienti da sorgenti energetiche, ed uno scenario relativo alle attività produttive, industriali e non, per stimare le emissioni provenienti dai processi produttivi (numero di capi allevati, quantità di fertilizzanti, quantità di vernici, quantità di solventi, produzione di cemento, acciaio, ecc.). La strategia di controllo rappresenta l'insieme delle misure tecnologiche che si prevede saranno introdotte entro l'orizzonte temporale di riferimento, e si esprime in termini di percentuale di applicazione per settore, combustibile e tecnologia.

Il modello GAINS-Italia integra quindi le informazioni provenienti da diversi modelli quali modelli emissivi, di qualità dell'aria, di ottimizzazione dei costi ed energetici, come per esempio il TIMES-Italia. Lo strumento GAINS-Italia consente quindi di ampliare i risultati prodotti da TIMES-Italia anche in termini di variazioni di emissioni e di impatti ambientali.

Figura 2 – Il modello GAINS-Italia (da D'Elia et al.2009)



Il modello può essere utilizzato per integrare la descrizione del contesto energetico-ambientale di valutazione delle politiche di mitigazione, definire il mix tecnologico ottimale anche in relazione alle altre politiche ambientali, evidenziare eventuali incompatibilità tra politiche di mitigazione e altre tipologie di politiche ambientali.

La matrice di contabilità sociale SAM

La matrice di contabilità sociale (SAM, dall'inglese Social Accounting Matrix) è una matrice a doppia entrata che registra i flussi che intercorrono tra gli operatori di un sistema economico. Essa consente di esaminare quantitativamente i rapporti di scambio e di interdipendenza che si stabiliscono tra tutti gli agenti di un sistema economico. Tale matrice, la cui introduzione nella modellistica economica è dovuta a Stone (1978), generalizza la matrice input-output introducendo, in aggiunta alle transazioni intersettoriali, gli scambi con e tra le istituzioni (famiglie, imprese, governo, formazione del capitale), con i fattori della produzione (lavoro e capitale) e con il resto del mondo.

Letta nel senso delle righe la SAM evidenzia a chi ogni settore o istituzione vende la propria produzione di beni o servizi; letta nel senso delle colonne evidenzia come un settore produttivo si approvvigiona di input intermedi da altri settori o istituzioni e come ciascuna istituzione alloca il suo reddito fra impieghi alternativi.

La SAM consente quindi di valutare in che modo gli investimenti produttivi all'interno di un settore possano incidere su alcune importanti variabili economiche, quali la produzione e l'occupazione, sia nel periodo di cantiere, sia nel periodo a regime.

Nel periodo di costruzione il progetto agisce sul sistema economico come uno shock esogeno nel settore/istituzione "formazione di capitale". Un progetto di investimento consiste infatti nell'acquisto di beni capitali (ossia di beni la cui esistenza sopravvive al periodo di produzione) da parte dei settori produttivi.

L'acquisto di questi beni, in presenza di capacità produttiva inutilizzata, attiva una catena di approvvigionamento che può coinvolgere, in misura varia, molti settori.

L'incremento della spesa contribuisce anche all'aumento dei redditi dei fattori produttivi innescando anche un secondo circuito moltiplicativo, ancora più significativo, perché aumenta il potere d'acquisto e quindi la spesa di istituzioni quali le famiglie e le imprese³. La possibilità di tenere conto anche di questo circuito moltiplicativo è una delle peculiarità della matrice di contabilità sociale, ed è l'elemento che maggiormente la differenzia dalla tradizionale analisi input-output.

Al termine del periodo di cantiere un settore istituzionale o produttivo diventa proprietario dell'incremento di stock di capitale tangibile o intangibile e il profilo di spesa del settore/istituzione "a regime", ne risulta modificato. Il settore che diviene proprietario del progetto di investimento deve essere quindi reso esogeno e la valutazione dell'impatto a regime (basata su una accurata analisi finanziaria dei costi di gestione del progetto (costi di manutenzione, salari per gli addetti, acquisto di energia ecc.) possono essere considerati come uno shock esogeno che si protrae per tutta la vita economica dell'investimento.⁴

La SAM stimata per conto dell'Enea dal CEIS (Centre for Economic and International Studies) della Università di Tor Vergata è stata spesso utilizzata nelle valutazioni di impatto economico (in termini di valore aggiunto prodotto e unità di lavoro) di investimenti in tecnologie energetiche, investimenti il cui ammontare è stato determinato dalle soluzioni di ottimo individuate dal modello TIMES per ciascuno scenario energetico. Nella costruzione della SAM, il CEIS si è avvalso di fonti statistiche ufficiali quasi

³ Scandizzo P.L., Ferrarese C., Vezzani A., (2010) La Matrice di Contabilità Sociale: una nuova metodologia di stima, Il Risparmio Review

⁴ Per ulteriori dettagli Scandizzo et al., (2009) La Matrice di Contabilità Sociale (SAM): uno strumento per la valutazione, IPI, 2009

esclusivamente di provenienza ISTAT (dati di contabilità nazionale, matrici “*supply and use*”⁵, indagine sui consumi delle famiglie) opportunamente riaggregate e organizzate in modo da creare un quadro dettagliato dell’economia nazionale per l’anno base 2010 (21 settori produttivi, 2 fattori della produzione, 4 istituzioni e il resto del mondo). Per maggiori elementi sulle metodologie utilizzate si vedano Rao et al. (2014) e Rao et al. (2015).

Il modello di equilibrio economico generale GTAP e GDyn-E

Il modello

Il GTAP (*Global Trade Analysis Project*) è un modello di Equilibrio Economico Generale calcolabile, originariamente elaborato da un consorzio coordinato dalla Purdue University, Indiana-USA (Hertel 1997).

Esso rappresenta l’Economia Globale grazie alla Base Dati GTAP, caratterizzata da un massimo livello di disaggregazione di **140 Regioni** e **57 Settori** (classificazione ISIC rev.3).

Il modello **GDyn-E** è una versione Energetica Dinamico-Ricorsiva del modello, modella la domanda di energia a livello industriale, residenziale e terziario, la possibilità di sostituzione di input intermedi energetici nelle diverse funzioni di produzione settoriali, e le emissioni di CO₂ correlate al consumo di beni energetici.

Nel modello sono rappresentati come agenti rappresentativi le imprese e famiglie e sono modellati i mercati settoriali e quelli dei fattori produttivi. Tutti i mercati sono in equilibrio, cioè a dire i prezzi variano finché la domanda non uguaglia l’offerta. Ciò implica l’esistenza di piena occupazione nel modello; la forza lavoro subisce riallocazioni in seguito agli scenari modellati, ad esempio come conseguenza di specifiche politiche energetiche.

GDyn-E è adatto a simulare politiche energetico-ambientali di lungo periodo valutandone gli impatti su variabili macroeconomiche regionali quali:

- PIL
- Prezzi dei prodotti e dei fattori
- Valore Aggiunto Settoriale
- Competitività internazionale
- Benessere
- Occupazione

I dati

Il primo database GTAP è stato rilasciato nel 1993, per la costruzione di un modello statico (Hertel e Tsigas, 1997). Le versioni dinamica (Ianchovichina e McDougall, 2001) ed energetica (Burniaux e Truong, 2002; McDougall e Golub, 2009) sono state elaborate successivamente. In questo lavoro viene utilizzata una

⁵ “[...] Tali tavole sono matrici per branca di attività economica e per branca di produzione omogenea che descrivono dettagliatamente i processi di produzione interni e le operazioni sui prodotti dell’economia nazionale. Le due tavole forniscono un quadro dettagliato dell’offerta di beni e servizi, sia di produzione interna sia di importazione, e dell’utilizzo dei beni e servizi per usi intermedi o finali e mostrano, inoltre, il valore aggiunto e tutte le sue componenti generate dalle branche di attività economica. Sono quindi matrici che evidenziano la relazione esistente tra le branche di attività economica e le branche di produzione omogenea attraverso un’accurata descrizione dei processi di produzione interni e delle operazioni sui prodotti dell’economia nazionale. [...] A partire dalle tavole supply and use ai prezzi base si possono costruire tavole input-output simmetriche convertendo le informazioni “branca per prodotto” delle tavole SUT in statistiche “prodotto per prodotto” o “branca per branca” utilizzando informazioni tecniche e statistiche sulla struttura degli input o basandosi su assunzioni a priori sulle tecnologie produttive. Si ottengono in questo modo le tradizionali matrici prodotto per prodotto o branca per branca che permettono di riunire in un’unica tavola le risorse e gli impieghi.” (ISTAT, Le tavole delle Risorse e degli impieghi e la loro trasformazione in tavole simmetriche – Nota metodologica, ISTAT, 2006.

versione modificata del modello dinamico ed energetico GDyn-E (Golub, 2013), che include le rinnovabili (Martini, 2016)⁶.

Nel database GTAP confluiscono due tipologie di dati, tavole nazionali I-O e dati provenienti da organizzazioni internazionali, come ad esempio: dati commerciali dal database Comtrade delle Nazioni Unite, dati macroeconomici dai World Bank Development Indicators e dati energetici dall'Agenzia Internazionale dell'Energia. Questi dati possono presentare delle incoerenze quando vengono aggregati nel database GTAP, ad esempio nel caso dei dati di commercio internazionale dovute alle diverse classificazioni adottate o a una non congruenza a livello globale. Il metodo Gehlhar è l'approccio utilizzato per conciliare i dati commerciali; è inoltre adottato anche il metodo FIT che aggiusta i dati I-O per renderli coerenti con i dati esterni provenienti dalle organizzazioni internazionali⁷. Nel database sono incluse anche le emissioni di CO₂ in modo proporzionale al contenuto carbonico dei diversi prodotti energetici, di provenienza domestica e importata, consumati da industrie e famiglie. Le emissioni degli altri gas serra sono disponibili come database satellite ma non inclusi nella versione del modello utilizzata in questo studio.

Nell'ultima versione del modello sono stati inclusi i dati sulla produzione di energia elettrica da fonte rinnovabili (**GTAP-Power Database**).

I processi di produzione e consumo

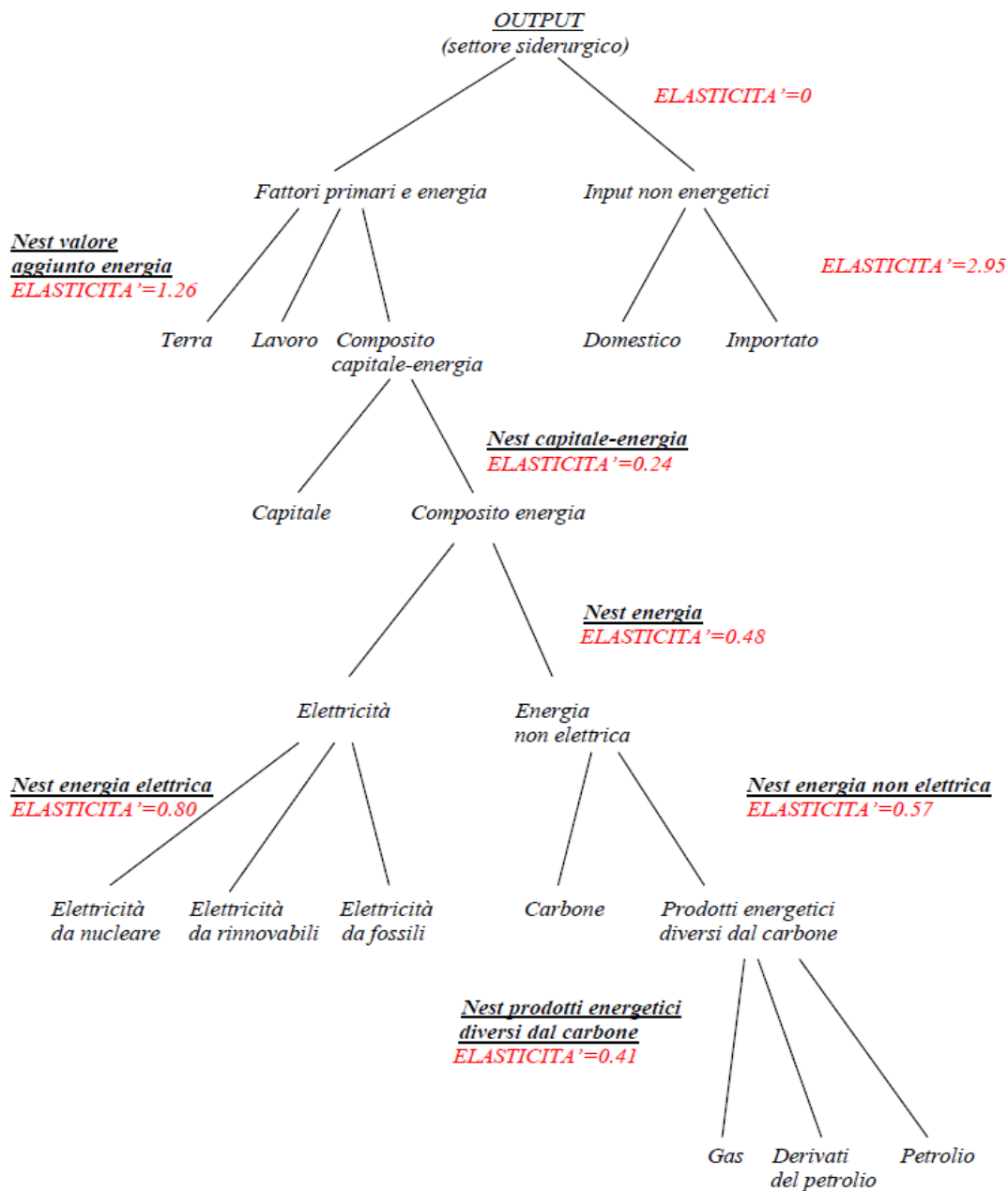
Per quanto riguarda la rappresentazione dei processi produttivi, l'utilizzo degli input, in particolare fattori primari e beni intermedi, il modello adotta una funzione di produzione a elasticità costante (CES, Constant Elasticity of Substitution) ramificata (*nested*). Nella struttura di produzione vi sono diversi livelli (*nest*), dove è possibile la sostituzione tra i diversi input, come beni domestici e importati o input individuali e compositi. Gli input compositi sono una combinazione di input individuali appartenenti al livello inferiore della funzione, come nel caso dell'input composito capitale-energia mostrato in Figura 3.

Guardando al livello superiore della funzione, le imprese producono il loro output combinando beni intermedi non energetici con un input composito di fattori di produzione primari, e l'elasticità di sostituzione è assunta pari a zero (funzione Leontief). I beni intermedi non energetici possono essere domestici o importati, come mostrato dal relativo livello. Il livello sottostante all'input composito di fattori primari include forza lavoro, qualificata e non, terra, risorse naturali e input composito capitale e energia. La funzione prosegue con gli input individuali capitale ed energia, e successivamente con le ulteriori possibilità di sostituzione tra input energetici. Questa struttura consente di catturare le scelte di sostituzione operate dalle imprese al variare dei prezzi relativi⁸.

⁶ Altri studi, con versioni precedenti del modello GDyn-E, sono stati dedicati al carbon leakage (Antimiani et al., 2013) e all'elaborazione del Country Report per l'Italia nell'ambito del Deep Decarbonization Pathways Project (Virdis et al., 2015).

⁷ Per ulteriori informazioni sulla procedura di costruzione del database si veda Harslett (2013).

Figura 3 La funzione di produzione industriale: esempio per il settore siderurgico



La Figura 3 mostra, a titolo di esempio, i parametri del settore siderurgico; si vuole sottolineare che questi hanno un range di variabilità a seconda del settore considerato, offrendo una rappresentazione semplificata delle opzioni tecnologiche disponibili. In particolare, l'elasticità di sostituzione tra capitale ed energia varia tra un valore minimo di 0.24 a un valore massimo di 0.45, mentre quella tra energia elettrica e non elettrica varia tra un minimo di 0.48 a un massimo di 0.9. Analogamente esiste una variabilità dell'elasticità tra prodotti domestici e importati per ogni bene intermedio, e dell'elasticità tra due diversi importatori.

Un settore degno di particolare attenzione, verso cui si sono rivolti molti sforzi per ottenere una maggiore disaggregazione in particolare per rappresentare le fonti rinnovabili, è quello elettrico. Nelle più recenti versioni del modello GDyn-E il settore *electricity* è stato disaggregato evidenziando il settore *Transmission and Distribution* ('T&D'), 7 *Base Load Technologies* ('NuclearBL', 'CoalBL', 'GasBL', 'HydroBL', 'OilBL', 'WindBL', 'OtherBL'), e 4 *Peak load technologies* ('GasP', 'OilP', 'HydroP', and 'SolarP'). (Peters 2005).

Electricity	
<i>Transmission and Distribution</i>	T&D
<i>7 Base Load Technologies</i>	NuclearBL, CoalBL, GasBL, HydroBL, OilBL, WindBL, OtherBL
<i>4 Peak load technologies</i>	GasP, OilP, HydroP, and SolarP

La struttura di consumo del settore residenziale è più semplificata, offrendo la possibilità di sostituire tra beni non energetici ed energetici in un primo livello, mentre in un secondo livello la sostituzione avviene tra i diversi beni energetici. In entrambi i livelli è inoltre possibile scegliere tra prodotti di provenienza domestica o importata. Un ulteriore parametro rilevante è in questo caso anche l'elasticità rispetto al reddito dei diversi beni di consumo.

È interessante evidenziare come una domanda aggregata a livello mondiale più o meno rigida può determinare, in presenza di crescita di PIL e popolazione e di trend crescente dei prezzi dei prodotti energetici, un aumento oppure una riduzione della quantità consumata. Chiaramente, accanto all'elasticità della domanda dei settori industriali e residenziali nazionali, un ruolo chiave nel determinare il livello finale di domanda energetica è giocato dal progresso tecnologico, in particolare dal livello di penetrazione delle tecnologie per l'efficienza energetica.

La mobilità internazionale dei capitali

Per modellare la mobilità internazionale dei capitali sono introdotti i prodotti finanziari, che rappresentano diritti sul capitale, il quale può essere spostato a livello internazionale. Tra i fattori primari diversi dal lavoro presenti nel modello, cioè capitale, terra e altre risorse naturali (risorse minerarie, risorse ittiche e foreste), soltanto il capitale è associato ai prodotti finanziari. Essendo la rappresentazione del mercato finanziario principalmente mirata a rappresentare la mobilità internazionale del capitale, soltanto l'*equity* è rappresentata e sono escluse le altre due macro-classi di prodotti finanziari, rappresentate da disponibilità liquide e titoli di debito. Di conseguenza, le imprese non hanno passività nel modello, ma sono in possesso di capitale fisico (associabile al prodotto finanziario *equity*), il cui deprezzamento è stimato al 4%⁹.

Le imprese utilizzano terra e risorse naturali messe a disposizione dal paese dove risiedono, mentre i paesi¹⁰ investono in prodotti finanziari. Per modellare la possibilità per i paesi di investire nelle imprese di tutti gli altri, si ricorre all'artificio modellistico di un fondo fiduciario globale come intermediario finanziario per gli investimenti all'estero. I diversi paesi nel modello non investono quindi direttamente in imprese straniere, ma solo in imprese nazionali e nel fondo, che a sua volta investe in *equity* in tutti i paesi.

Il mercato dei capitali ipotizza perfetta mobilità dei capitali nel lungo periodo, e funziona con aspettative adattive sui tassi di ritorno, che convergono gradualmente verso un valore comune attraverso una graduale correzione degli errori nelle aspettative. Sulla base della stima dei tassi di ritorno futuri, gli investitori aumentano lo stock di capitale a un tasso di crescita che aggiustano gradualmente nel tempo.

I fenomeni di carbon leakage

Fra i meccanismi di carbon leakage occorre fare delle distinzioni. I principali passano per i canali strutturale ed energetico. Nel primo caso, il *carbon leakage* deriva dall'aumento dei costi di produzione dei settori ad alta intensità energetica nei paesi che adottano obiettivi di riduzione, e dall'associata perdita di

⁹ Per maggiori dettagli può essere consultato Aguiar (2016).

¹⁰ Nella rappresentazione semplificata di una regional households.

competitività. Nel caso del canale energetico, il *carbon leakage* è associato all'elasticità di offerta dei produttori di combustibili fossili e alla flessibilità tecnologica dei processi produttivi, espressa dal parametro di elasticità di sostituzione tra prodotti energetici a diverso contenuto carbonico. Analisi di sensitività (Golub, 2013) hanno confermato questo fenomeno: più elastica al prezzo è l'offerta di combustibili fossili, in particolare quella del carbone, minore è il tasso di *carbon leakage*; inoltre, maggiore è l'elasticità di sostituzione ai diversi livelli della funzione di produzione, quindi ad esempio tra energia elettrica e non elettrica ma anche tra capitale ed energia, minore è il tasso di *carbon leakage*.

Ma a questi si aggiunge un meccanismo di tipo finanziario. Il meccanismo attraverso cui le politiche di riduzione delle emissioni influenzano gli investimenti internazionali e la competitività nazionale è il seguente. Poiché l'elasticità di sostituzione tra capitale ed energia è relativamente bassa, le politiche di riduzione delle emissioni avranno l'effetto di ridurre il costo e il tasso di ritorno del capitale nei paesi dove sono in vigore, creando opportunità di profitto negli altri paesi. Di conseguenza, gli investitori riallocheranno gradualmente i capitali nei paesi dove stimano più elevati tassi di ritorno, in altri termini quelli dove gli obiettivi di riduzione delle emissioni sono meno elevati o assenti. Le politiche di riduzione delle emissioni implicheranno quindi una riallocazione internazionale dei capitali e conseguenti effetti di *carbon leakage*.

Riferimenti

Aguiar, A. (2015) "Chapter 6 – Macroeconomic Data" in *GTAP 9 Data Base Documentation*, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4823

Antimiani et al. (2013) "Assessing alternative solutions to carbon leakage," *Energy Economics*, 36, p. 299-311.

Burniaux, J-M, e Truong, T. (2002) "GTAP-E: An Energy-Environmental Version of the GTAP Model", GTAP Technical Paper 16, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=923

Confindustria (2017): Rapporto Efficienza Energetica. http://www.confindustria.it/wps/wcm/connect/www.confindustria.it/5266/2e540224-8ea0-44e4-a7e1-fa7a10194fe7/Rapporto+Eff+energetica+chiavetta+2017.pdf?MOD=AJPERES&CONVERT_TO=url&CACHEID=2e540224-8ea0-44e4-a7e1-fa7a10194fe7

D'Elia et al., (2009). "Technical and Non-Technical Measures for air pollution emission reduction: The integrated assessment of the regional Air Quality Management Plans through the Italian national model". *Atmospheric Environment*, 43, 6182-6189.

ENEA (2013): *Rapporto Energia e Ambiente – Scenari e Strategie: verso un'Italia low-carbon: sistema energetico, occupazione e investimenti*. Pp. 92. ISBN 978-88-8286-299-2.

Gaeta M., Baldissara B. (2011), "Il modello energetico Times-Italia. Struttura e dati" - ENEA-RT-2011-09, http://opac.bologna.enea.it:8991/RT/2011/2011_9_ENEA.pdf

Golub, A. (2006) "Projecting the Global Economy to 2025: A Dynamic General Equilibrium Approach" Ph.D. dissertation, Purdue University.

Golub, A. (2013) "Analysis of climate policies with GDyn-E", GTAP Technical Paper 32, <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/6632.pdf>

Gracceva, F., Camporeale, C., Mattucci, A., Calisi, M. (2009): TIAM-ITALIA, un modello del sistema energetico Italiano, RT/2009/28/ENEA, ISSN/0393-3016.

Harslett, P. (2013), "The GTAP Data Base Construction Procedure", GTAP Working Paper 76, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=4289

Hertel, T. W. e Tsigas, M. E. (1997) "Structure of GTAP", https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=413

Ianchovichina, E, e McDougall, R. (2001) "Theoretical Structure of Dynamic GTAP", GTAP Technical Paper 17, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=480

Martini, C. (2016), "Building a new version of GDyn-E ITA including renewable electricity", Rapporto Tecnico Enea 19/2016, <http://openarchive.enea.it/bitstream/handle/10840/7890/RT-2016-19-ENEA.pdf?sequence=1>

McDougall, R. e Golub, A. (2009) "GTAP-E: A Revised Energy-Environmental Version of the GTAP Model", GTAP Research Memorandum 15, https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=2959

Mircea et al., 2014. "Assessment of the AMS-MINNI system capabilities to simulate air quality over Italy for the calendar year 2005". Atmospheric Environment, 84, 178-188.

Rao M., U. Ciorba, G. Trovato, C. Notaro, c. Ferrarese (2014) "Costruzione di una Matrice di Contabilità Sociale Allargata al Settore Energetico" RT/2014/12/ENEA <http://openarchive.enea.it/bitstream/handle/10840/4940/RT-2014-12-ENEA.pdf>

M. Rao, U. Ciorba, M. C. Tommasino, M. Gaeta (2015) A Software Application For Times-Sam Linkage: a VBA program to connect energy and macroeconomic models. RT/2015/19 ENEA ISSN/0393-3016 <http://openarchive.enea.it/bitstream/handle/10840/7213/RT-2015-19-ENEA.pdf?sequence=1>

RSE (2017): Decarbonizzazione dell'economia italiana: Scenari di sviluppo del sistema energetico nazionale. Ottobre 2017 (di prossima pubblicazione)

Scandizzo P.L., Ferrarese C., Vezzani A. (2010): La Matrice di Contabilità Sociale: una nuova metodologia di stima, Il Risparmio Review

Virdis et al. (2015) "Pathways to deep decarbonization in Italy", http://deepdecarbonization.org/wp-content/uploads/2015/09/DDPP_ITA.pdf

G. Zanini, T. Pignatelli, F. Monforti, G. Vialetto, L. Vitali, G. Brusasca, G. Calori, S. Finardi, P. Radice, C.

Silibello (2005): **The MINNI Project: an integrated assessment modeling system for policy making**,

Proceedings of MODSIM05, International Congress on Modelling and Simulation, , Melbourne, Australia (2005). December 12–15, 2005