Zeitschrift: Archi : rivista svizzera di architettura, ingegneria e urbanistica = Swiss review of architecture, engineering and urban planning

Herausgeber: Società Svizzera Ingegneri e Architetti

Band: - (2001)

Heft: 6

Artikel: Sviluppo tecnico-energetico e sviluppo sostenibile

Autor: Dones, Roberto / Hirschberg, Stefan / Gantner, Urs

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-132236

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Sviluppo tecnico-energetico e sviluppo sostenibile

Roberto Dones, Stefan Hirschberg, Urs Gantner*

Sommario

L'evoluzione tecnica nei sistemi energetici influisce sulle varie dimensioni di sostenibilità, che possono differire per situazioni di sviluppo economico diverse come nei casi svizzero e cinese qui illustrati. In generale, i miglioramenti anche notevoli attesi nelle efficienze dei sistemi di produzione di elettricità nei prossimi 20 anni non annullano le differenze relative, per cui uno schema di valutazione delle prestazioni complessive dei sistemi a riguardo della sostenibilità rimane necessario al fine di classificare le opzioni. Un proprio schema utilizzante la metodologia di analisi multi attributo nonché gli indicatori quantificati mediante ricerche proprie sono qui presentati. I risultati ottenuti al variare delle preferenze sui criteri economici, ambientali e sociali scelti per descrivere la sostenibilità sono paragonati con la classifica delle opzioni ottenuta mediante la propria valutazione dei costi esterni nel caso di sistemi futuri di produzione di elettricità in Svizzera. In sintesi, quando si privilegia l'economia ai fattori ambientali e umani, la classifica dei sistemi stabilita con l'analisi multi attributo è all'incirca uguale a quella ottenuta considerando i costi totali (esterni e interni). Si dimostra così come l'applicazione di diverse metodologie alla comparazione olistica di sistemi di produzione d'energia elettrica può contribuire a corroborare la maggiore o minore sostenibilità di una opzione rispetto ad altre. Tuttavia l'analisi multi attributo evidenzia come la classifica delle opzioni possa cambiare ove si determinino nella società preferenze diverse sui vari criteri di sostenibilità. La funzione di questi lavori è di trasferire alla società i principi sviluppati e i risultati della ricerca scientifica, affinché si possano operare scelte energetiche sulla base di informazioni complete sui fattori di sostenibilità.

1. Introduzione

Da quasi un decennio il progetto GABE[1] del PSI si occupa, talvolta in collaborazione con gli Istituti Federali di Tecnologia Svizzeri (ETH), dell'analisi comparata (olistica) di sistemi energetici attuali e futuri per la Svizzera, partecipa con altre Organizzazioni a programmi europei di ricerca e insieme a MIT, l'Università di Tokyo (UT) e altri Istituti di ricerca nel mondo lavora a studi specifici. Ad esempio di questi ultimi, sin dal 1999 il PSI collabora strettamente con varie Organizzazioni cinesi al progetto CETP[2] nell'ambito della Alliance for Global Sustainability (ETH, MIT e UT) per studiare scenari di espansione della generazione di energia elettrica nello Shandong, in Cina [1, 2].

I ricercatori facenti parte del progetto GABE hanno sviluppato competenze per curare direttamente la quantificazione non solo di parametri ecologici (emissioni totali Life Cycle Assessment LCA [1, 3, 4, 5], analisi di impatto ambientale di inquinanti atmosferici (ad esempio [1, 6]) e di rischio (incidenti severi [1, 7]) ma anche di parametri economici mediante analisi dirette di scenari e ottimizzazioni (vedasi a titolo d'esempio [1, 5, 8, 9]), insieme ad un attento utilizzo della ricerca condotta da altre istituzioni (ad esempio [10]; vedasi seguito). Pertanto il progetto GABE è in condizione di presentare un competente e originale contributo alla valutazione della sostenibilità di opzioni energetiche che comprende la creazione di un sistema per la valutazione complessiva e la determinazione quantitativa dei relativi indicatori [11].

Questo articolo illustra, ponendo particolare attenzione sugli aspetti tecnologici e meno sugli aspetti di politica economica, le varie sfaccettature della ricerca di GABE, i risultati ottenuti e come questi vengano integrati per la comunicazione alla società.

2. L'aspetto tecnico fra le dimensioni di sostenibilità

Tre elementi vengono comunemente proposti come costituenti l'insieme minimo o la semplificazione fondamentale da considerare per ogni approccio alla descrizione di sviluppo sostenibile: l'economia, l'ambiente e la società. Sono termini a valenza multipla che l'intuizione genera e accetta e che l'immaginazione facilmente riempie di contenuto ma la cui oggettivazione e utilizzazione ai fini di consentire una matura comparazione e quindi scelta di soluzioni operative non ha sino-

ra raggiunto una definizione comunemente accettata per una implementazione aliena da controversie.

La tecnologia è un elemento che sempre compare in ognuna delle tre prospettive prima esposte, utilizzando le risorse energetiche e non energetiche offerte dall'ambiente naturale, elaborandole all'interno di sistemi produttivi di trasformazione, generando macchine che nel loro ciclo vitale emettono sia inquinanti gassosi sia liquidi e producono rifiuti solidi generalmente nocivi all'ambiente, ma anche costituendo una base fondamentale della nostra società industriale, uno strumento di moltiplicazione economica, un modificatore efficace della qualità della vita e delle forme della coesistenza sociale sia che faciliti mobilità e comunicazione, sia che risolva problemi nella catena alimentare, ma anche che possa originare conflitti fra gruppi sociali (industria delle armi, ingegneria genetica, energia nucleare). Tutti questi aspetti sono ovviamente interconnessi. Certamente però la tecnologia continuamente ingenera nuovi casi e nuovi teatri, costantemente autoproponendosi capace di risolvere i problemi che lei stessa provoca. Seppure ciò non sia sempre assolutamente vero, la tecnologia resta una risposta importante per situazioni complesse quando non si voglia rinunziare ai suoi vantaggi.[3] Qui interviene pertanto la necessità di creare delle metodologie di valutazione che sulla base della conoscenza delle fenomenologie fisico-chimico-biologiche, dei meccanismi economici e delle caratteristiche della società, consentano di razionalizzare i processi decisionali per risolvere problemi concreti individuando quelle opzioni che all'adeguatezza in alcuni settori uniscano la minimizzazione sia dei rischi sia dei fattori di contrasto nella società.

L'uso intensivo delle risorse energetiche fossili, per circa tre secoli, e nucleari, dalla metà del secolo xx, ha consentito lo sviluppo economico mediante l'industrializzazione dapprima nel mondo occidentale, poi in sequenza e con diverse velocità negli altri paesi, che non hanno a tutt'oggi raggiunto gradi di sviluppo omogenei. Lo schema seguito si può condensare nei seguenti punti:

1. Da un iniziale uso inefficiente e non regimentato delle risorse naturali segue il miglioramento delle efficienze dei sistemi tecnici (estrazione, processo, trasporto, conversione, controllo delle emissioni e riciclo dei rifiuti) in risposta all'aumento dei costi delle materie prime e della resa per unità di prodotto energetico.
2. Quando la scala di diffusione di tecnologie inizialmente altamente inquinanti raggiunge un livello riconosciuto di pericolosità per la salute umana e per gli ecosistemi, la società reagisce allo scopo di controllare/ridurre le emissioni nocive e i conseguenti costi ambientali e sociali, per non rinunziare ai benefici delle tecnologie stesse. Varie componenti della società (gruppi d'interesse) intervengono dinamicamente.
3. In una fase più avanzata, tuttora in divenire nell'occidente industrializzato, la crescita delle tecnologie per il controllo e riduzione delle emissioni, delle tecnologie per la mitigazione dei danni ambientali nonché il recupero del territorio danneggiato in precedenza dall'uso indiscriminato di tecnologie, assieme all'espansione di tecnologie che usano fonti energetiche rinnovabili, può caratterizzare una fase di concertazione delle forze sociali e potenzialmente di apertura di nuovi spazi di sviluppo economico.
4. Guardando oltre, nel futuro potrebbe verificarsi la possibilità della diffusione di nuovi sistemi energetici più o meno complessi (per esempio utilizzanti tecnologie all'idrogeno o basati sulla fusione nucleare) oppure nuove scoperte scientifiche o applicazioni tecnologiche innovative. Tuttavia la necessità di profonde modificazioni strutturali che entrino in competizione con l'inerzia delle tecnologie affermate e la non conoscenza a tutt'oggi di soluzioni tecniche innovative definitive, introduce fattori di incertezza di costi e di tempo che bisogna considerare per la valutazione di codeste opzioni a fronte di altre più realistiche quando il principio di sviluppo sostenibile sia chiamato per definire scelte energetiche da farsi adesso.

Nelle analisi originali qui presentate sono considerati solo i sistemi energetici per la produzione di elettricità che alla luce sia delle conoscenze attuali che di fattori geo-politici hanno una concreta possibilità di essere impiantati nei prossimi venti-trenta anni, nel caso particolare in Svizzera, lasciando fuori dalla comparazione i sistemi classificabili sotto il punto No.4. Questa restrizione viene qui applicata anche a sistemi elettrici già tecnologicamente maturi per una utilizzazione industriale ma che per motivi di limitata espansione o espansibilità o per persistenti opposizioni popolari non vengono presi in considerazione come opzioni realistiche per applicazioni di grande scala.[4]

3. Le diverse condizioni: il caso svizzero e il caso cinese

Ogni valutazione di crescita sostenibile deve essere esaminata tenendo conto delle condizioni complessive di una situazione per comprendere la quale devono esserne innanzitutto definiti i contorni ma senza escludere le implicazioni di questa in relazione a realtà diverse nel tempo e

nello spazio. In altre parole, mentre sostenibilità come concetto astratto può essere utile a definire gli orientamenti delle politiche energetiche, potrebbe non essere sufficiente a una definizione operazionale, cioè mirante a determinare decisioni specifiche.

Le dimensioni temporali e geografiche devono quindi essere definite, come anche i parametri più importanti all'interno di queste condizioni devono essere quantificati ma senza perdere la visione globale. Per esempio, mentre l'uso di materie prime, nella fattispecie energetiche, deve tenere conto di situazioni locali quali la disponibilità di risorse domestiche, i costi di trasporto, le condizioni storico-geo-politiche e le condizioni di mercato, la durata delle risorse energetiche mondiali non può essere esclusa da una valutazione obbiettiva di sostenibilità.

Come spiegato nell'Introduzione, il gruppo GABE di cui gli autori fanno parte lavora continuativamente ad analisi comparative di sistemi energetici in Svizzera ma si sta occupando anche di realtà in altre zone del mondo, in particolare la Cina. Allo scopo di comprendere i due casi svizzero e cinese la Tabella 1 introduce i dati generali più importanti per i due paesi.

La dimensione della Cina e il suo tasso di crescita economico e energetico sono tali da farne già oggi uno dei paesi con generazione di inquinanti più alta, seppure a livello pro capite la produzione di CO_2 ad esempio rimanga a livelli inferiori a quelli di paesi più sviluppati. Ovviamente, sul piano regionale (emissioni acide e di precursori di ozono troposferico) e globale (emissione di gas a effetto serra e di precursori di ozono stratosferico) l'influenza della politica energetica cinese è di gran lunga più importante di quella svizzera. Tuttavia l'intervento di ciascun paese, quantunque piccolo, allo scopo di limitare il livello di emissioni inquinanti pro capite dovute ad alti consumi di risorse energetiche fossili, ha una grande rilevanza per la diffusione nei paesi industrializzati di costumi individuali più orientati alla salvaguardia dell'ambiente e in ultima analisi al contenimento dell'inquinamento globale.

Tab. 1 – Comparazione di alcuni dati generali di Svizzera e Cina

Caratteristica	Anno	Unità	Svizzera	Cina
Superficie		km^2	41'284	9'586'000
Popolazione	1999	Milioni di persone	7.16	1'236
Prodotto nazionale lordo	1999	Miliardi US$	186.21	1'005 (685
Prodotto nazionale lordo pro capite	1999	US$ pro capite	25'990	813 (557)*
Tasso di crescita medio del prodotto nazionale	1988-1999	%/anno	1.2	9.2
Consumo di materie prime energetiche	1999	EJ/anno	1.128	39.1
Consumo di materie prime energetiche pro capite	1999	TJ/anno pro capite	0.157	0.032
Percentuale di carbone	1999	%	0.4	70.6
Potenza elettrica installata	1999	GWe	12.4	294
Produzione di elettricità	1999	TWh/anno	66.7	1'230
Tasso di crescita medio dell'elettricità prodotta	1988-1999	%/anno	1.4	8.3
Emissioni SO_2	1997	Mt/anno	0.03	~25
Emissioni CO_2	1998	Mt/anno	38.7	~3'000

* I numeri non in parentesi provengono da statistiche ufficiali cinesi mentre i numeri in parentesi sono stimati in [12], usando 8 per il rapporto Yuan:US$. Probabilmente la realtà sta tra i due valori.

I problemi di politica energetica possono grandemente variare con le condizioni di paesi diversi. Tuttavia alcune domande si possono formulare in modo generalizzato:

1. Quali sono i miglioramenti attendibili per le tecnologie energetiche, considerando l'intero processo delle fonti energetiche, e quali le conseguenze sui costi, l'ambiente e i rischi per la salute umana?
2. Quali sono i mix energetici che possano contemporaneamente soddisfare i criteri di economicità, minime conseguenze sull'ambiente e accettabile sicurezza in un contesto geografico e politico specifico?

Si introducono di seguito alcuni dei fatti più importanti per l'energia nei casi svizzero e cinese. Con la chiusura degli impianti nucleari (cinque unità in quattro siti), la produzione di energia elettrica in Svizzera potrebbe essere insufficiente a coprire la domanda interna. Attualmente (alla fine del 2000 [13]) la potenza elettrica nucleare installata in Svizzera è di 3'127 MWe netti che producono il 36-43%[5] della produzione totale. Assumendo 40 anni di vita per ognuno dei reattori nucleari svizzeri, fra il 2010 e il 2012 verrebbero a mancare 1'077 MWe (potenza installata a Beznau e Mühleberg), corrispondenti a circa 7'700 GWh/anno su un totale di produzione netta nell'anno 2000 di 65'300 GWh (che include le perdite in rete, prossime al 6%) e di domanda interna di 52'400 GWh. Intorno al 2019, con la chiusura di Gösgen, altri 970 MWe e circa 7'500 GWh/anno verrebbero meno.

L'evoluzione e l'ampiezza della lacuna nella produzione di elettricità dipenderanno ovviamente dal tasso di crescita dei consumi totali netti, cioè includendovi l'effetto di risparmi energetici. L'uso di sistemi rinnovabili di produzione elettrica da aggiungersi al cospicuo – ma sostanzialmene non

più espandibile – parco idroelettrico, seppure auspicabile sotto il profilo ecologico (con i limiti spiegati nel seguito), non appare realisticamente sufficiente a coprire mancanze dell'ordine delle migliaia di GWh, sia per i potenziali limitati e le basse efficienze e densità di energia di tali fonti (eolico, solare), sia per i costi che sono e dovrebbero rimanere piuttosto alti malgrado una loro relativa diminuzione sia prevista. In ogni caso, l'espansione dei sistemi rinnovabili viene in varie forme sostenuta da programmi del governo svizzero, quali il Programma d'azione «Energie 2000», da poco concluso, ed «EnergieSchweiz» [14].

Tenendo conto dei fatti qui sintetizzati, le seguenti domande specifiche possono essere poste in aggiunta alle domande generali sopra riportate:

1. Come è possibile rinunziare al nucleare elettrico e nello stesso tempo non incrementare la generazione di gas a effetto serra emessi dalla produzione complessiva di energia elettrica e calore,[6] al fine di contribuire al raggiungimento delle riduzioni previste nel Protocollo di Kyoto [15]?[7]
2. Sino a che punto la competitività dei sistemi tecnici a energia rinnovabile potrebbe essere agevolata dalla internalizzazione dei costi esterni?
3. Quali sono i fattori ecologici ed economici associati a una politica che agevoli la conquista di crescenti quote di mercato per le energie rinnovabili (eolico, solare, biomasse), pompe di calore e sistemi a cogenerazione?

Alcune delle domande specifiche più pressanti per la politica energetica del futuro in Cina sono invece le seguenti:

a. Come è possibile soddisfare il continuo rapido incremento della domanda di energia elettrica (attualmente circa 5% per anno) e nello stesso tempo limitare le emissioni di SO_x nell'atmosfera[8] a un costo compatibile con il mantenimento di alti tassi di sviluppo economico?
b. Quali sono le politiche perseguibili per razionalizzare l'uso delle fonti energetiche interne, considerando le ineguaglianze nella distribuzione delle risorse naturali,[9] le ineguaglianze nella crescita economica fra le Province,[10] e le priorità da stabilire per la risoluzione di problemi di salute pubblica?
c. Come e quando munirsi di tecnologie e strumenti legali per affrontare le future richieste da altri paesi del mondo, tendenzialmente sempre più pressanti, riguardanti il controllo o la riduzione dell'emissione di gas a effetto serra?[11]

4. Il ruolo della ricerca nelle deliberazioni della società nel campo energetico

4.1. *La quantificazione dei parametri per la comparazione di sistemi elettrici. Caso della Svizzera come esempio di paese industrialmente sviluppato.*

A meno che la Svizzera non si limiti a importare una quota plausibilmente crescente di elettricità prodotta in Germania o Francia e insieme diminuisca le esportazioni estive di origine idroelettrica verso l'Italia,[12] la costruzione nel proprio territorio di nuovi impianti di potenza si renderebbe necessaria fra pochi anni. Se questi impianti debbano essere centralizzati e quindi di relativamente grande potenza (dell'ordine delle centinaia di MWe) o possano essere impianti a cogenerazione decentralizzati e quindi di piccola-media potenza o se l'assetto futuro della produzione di elettricità sia una combinazione di ambedue soluzioni tecniche, questo dipende sia da scelte di politica energetica generale sia dal mercato la cui liberalizzazione si sta realizzando in questi anni. Per quanto riguarda i sistemi a cogenerazione decentralizzati, le potenze variano dalle decine-centinaia di kWe per unità installate allo scopo principale di riscaldamento di case, o delle centinaia-migliaia di kWe per sistemi a cogenerazione per teleriscaldamento urbano, sino alle unità-decine di MWe per singoli e rari casi di turbine a gas per l'industria svizzera.

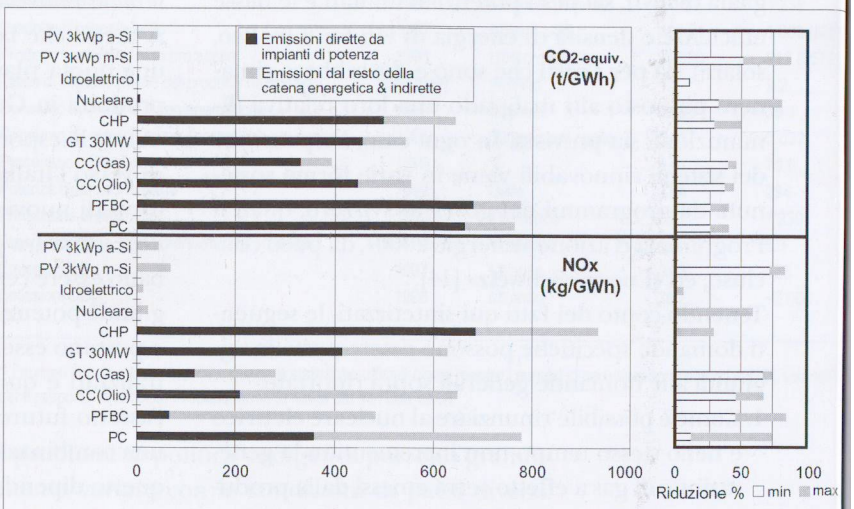
Sul versante dei sistemi di produzione di energia termica per riscaldamento e vapore industriale, le previsioni stimano una saturazione o perfino una riduzione della domanda, dovuta principalmente ai risparmi energetici conseguenti al miglioramento delle efficienze dell'isolamento delle case, al miglioramento delle efficienze medie delle caldaie installate e includendo anche la possibile continua espansione dell'uso di pompe di calore e di fonti rinnovabili quale le biomasse (principalmente legno) [5].

Alcuni possibili scenari di mix di produzione di energia elettrica e termica in Svizzera sono stati analizzati dal PSI nel progetto «Dezentral», finanziariamente sostenuto in parte dall'Associazione delle aziende elettriche svizzere AES/VSE, i cui risultati sono riportati in [5]. Qui interessa mostrare come le tecnologie considerate siano state valutate nelle loro componenti economiche e ecologiche.

La Figura 1 [16] mostra i risultati delle analisi LCA delle emissioni di gas a effetto serra[13] e di ossidi d'azoto dalle catene energetiche complete di sistemi futuri per la generazione di potenza elettrica in Svizzera [4] in rapporto alle relative emissioni da sistemi attualmente installati in Svizzera o nei paesi dell'UCTE [3].[14]

Secondo le previsioni dei tecnici dell'industria manufatturiera e degli analisti di sistemi energetici, nei prossimi 10-20 anni le emissioni da sistemi avanzati, relative all'unità di elettricità, dovrebbero in generale diminuire e in alcuni casi, come per le centrali a carbone, a gas naturale e le catene fotovoltaiche, persino vistosamente.[15] Naturalmente, durante il funzionamento normale degli impianti di potenza i sistemi a energia rinnovabile hanno emissioni di gas a effetto serra nulle mentre nel nucleare sono trascurabili, dovute principalmente al test annuale dei generatori diesel di sicurezza.[16] La Tabella 2 mostra i dati caratteristici principali usati nell'analisi dei sistemi futuri di generazione di energia elettrica. Le tecnologie prese in considerazione sono state discusse con AES/VSE per un precedente progetto [4] e i dati relativi ricevuti direttamente dai produttori delle tecnologie stesse o ricercati nella letteratura specializzata. Le prestazioni sono quelle attese nei prossimi 10-20 anni, in corrispondenza delle date di costruzione presunta. La Tabella 3 sintetizza i dati utilizzati nell'analisi [5] dei mix decentralizzati per i sistemi di generazione di energia termica e a cogenerazione. Le potenze considerate coprono l'intervallo di valori degli impianti adeguati a tutte le possibili applicazioni in Svizzera, dalle case monofamiliari (superficie da riscaldare di circa 180 m²), alle case multifamiliari (piccole con superficie da riscaldare di circa 580 m², medie con 1200 m² e grandi con 2800 m²), sino a caldaie per edifici più grandi utilizzati per servizi, commercio, industria e per sistemi di teleriscaldamento dell'ordine di 8500 m², 21000 m² e 60000 m² nel caso rispettivo di piccoli, medi e grandi sistemi. Per gli impianti a cogenerazione con una potenza elettrica di 100 kWe o maggiore, la tendenza è verso l'incremento dell'efficieza elettrica sino a 40%-50% con un fattore di utilizzazione del combustibile di 80%-90%. Piccoli impianti a motore rimangono a valori di efficienza elettrica di circa 25% ma avanzati sistemi di controllo consentono di rinunziare ai sistemi convenzionali per il back-up. Le emissioni dei sistemi più moderni di riscaldamento a gas naturale (non cogeneranti) presentano già emissioni nominali di CO e NO_x di un fattore almeno cinque sino a un ordine di grandezza inferiore ai limiti imposti per legge [19, 20].

Fig. 1 – Emissioni LCA di gas a effetto serra e di ossidi d'azoto da sistemi futuri per la generazione di energia elettrica in rapporto a sistemi correnti. Il diagramma sulla destra mostra le riduzioni relative, dove l'assenza di valori indica l'assenza di analisi di sistemi futuri [16].



CC = ciclo combinato; PC = Pulverized Coal Combustion (combustione di polverino di carbone); PFBC = Pressurized Fluidized Bed Combustion (combustione di carbone a letto fluido pressurizzato); PV 3kWp a/m-Si = pannelli solari di 3kW-picco con celle fotovoltaiche a silicio amorfo/monocristallino; CHP = Combined Heat&Power (cogenerazione); GT = turbina a gas.

Tab. 2 – Caratteristiche tecniche, emissioni LCA e costi di opzioni per la generazione di energia elettrica in Svizzera attorno all'anno 2020 (dati derivati principalmente da [4,17,18])

Catena energetica e tecnologia di conversione	Centrale elettrica		Emissioni gas serra (a) [tCO_2-eq./GWhe]		Emissioni SOx (a) [kg/GWhe]		Emissioni NOx (a) [kg/GWhe]		Costi di produzio [Rp/kWhe] (1US¢=1.6
	Potenza installata [MWe]	Efficienza elettrica netta [%]	Centrale elettrica	Resto della catena	Centrale elettrica	Resto della catena	Centrale elettrica	Resto della catena	
Carbone: PFBC (b)	600	53	679	92	34	391	68	414	6.3
Olio combustibile: CC (c)	600	60	445	104	420	468	210	438	6.1
Gas naturale: CC (c)	600	60	331	61	3	150	120	158	5.9
Nucleare: ABWR/APWR (d)	1300	33	0	6	0	31	0	23	6.5
Idroelettrica: accumulazione	600	84	0	4	0	8	0	10	8.0
Fotovoltaica (e)	0.003	10	0	28	0	104	0	42	45
Eolica (f)	0.15	–	0	28	0	100	0	50	21

(a) Le emissioni totali sono divise in due parti: quelle originate durante il funzionamento della centrale elettrica e tutte le altre as ciate alla catena energetica, includendo in quest'ultima anche le emissioni indirette (anche dette "grigie") associate ai materia combustibili non bruciati nella centrale elettrica, ai trasporti e ai servizi (per esempio le macchine per la costruzione degli imp ti industriali facenti parte della catena).
(b) Pressurized Fluidized Bed Combustion.
(c) Combined Cycle.
(d) Advanced Boiling Water Reactor, Advanced Pressurized Water Reactor.
(e) Celle di silicio amorfo - valori minimi riportati in tabella, assumendo alta efficienza del sistema.
(f) Per sistemi a maggiore capacità e con installazione in aree ottimali, le emissioni potrebbero diminuire di un fattore circa due.

Un interessante risultato dello studio [5] consiste nel paragone di due possibili opzioni future di generazione di calore ed elettricità per via fossile, allo scopo di identificare quella più efficiente:
1) produzione di energia elettrica in impianti a ciclo combinato a gas naturale senza cogenerazione (CC, alte efficienze elettriche di 57-60%) associata a pompe di calore (HP) che arbitrariamente si assumono alimentate da questa elettricità; 2) uso di impianti decentralizzati a cogenerazione (CHP), assumendo, ancora arbitrariamente, che l'elettricità da essi generata alimenti pompe di calore. Le emissioni di gas a effetto serra sono illustrate nella Figura 2, normalizzate con tutta l'energia generata espressa come termica. Risulta chiaro come solo CHP ad alta efficienza elettrica associati a pompe di calore possano rivaleggiare con CC+HP sotto il punto di vista delle emissioni (per NO_x e CHP le differenze sono nella stessa direzione, molto più marcate che per i gas a effetto serra) [5,17,19,20]. All'aumentare del COP il sistema CC+HP risulta sempre più efficiente rispetto al sistema CHP+HP. Ovviamente se l'elettricità che si assume alimenti le pompe di calore è prodotta con bassa emissione di gas a effetto serra, come il mix di produzione svizzero odierno, le emissioni risultano di molto inferiori a quelle delle combinazioni mostrate nella Figura 2. Tuttavia, considerando il saldo importazioni esportazioni di elettricità nelle varie ore del giorno e nei vari periodi dell'anno nonché l'origine delle importazioni, il mix attualmente usato dai consumatori svizzeri risulterebbe a più alto contenuto di gas a effetto serra del mix di produzione domestica (vedi modelli e discussione in [21, 22]) per cui il suo uso per alimentazione di pompe di calore potrebbe dare risultati comparabili a quelli inferiori di Figura 2.

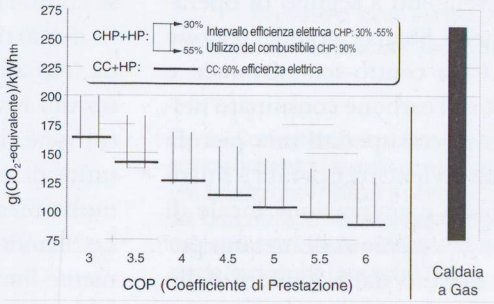
4.2 *Esempio di quantificazione delle emissioni atmosferiche da sistemi elettrici futuri in Cina.*
La Figura 3 mostra i risultati preliminari relativi alle catene energetiche future degli impianti che potrebbero essere installati nello Shandong, una provincia costiera ad alto tasso di sviluppo nell'est della Cina.[17] Il potenziale di riduzione dei gas a effetto serra emessi dalla catena energetica del carbone è dell'ordine del 15% rispetto ai valori corrispondenti alle migliori centrali cinesi PC esistenti oggi, costruite negli anni novanta. Dal paragone con i valori attesi per le catene energetiche medie relative agli impianti a carbone stimate per singoli paesi nel UCTE si evince che malgrado grossi miglioramenti previsti nell'efficienza delle centrali elettriche a carbone di progetto cinese[18] e qualche miglioramento nella catena energetica, le emissioni di gas

Tab. 3 – Caratteristiche tecniche, emissioni LCA e costi di opzioni per la generazione di energia termica e per la cogenerazione in Svizzera (circa 2010-2020) [5]

Tecnologia e combustibile usato	Caratteristiche impianto			Emissioni gas serra (b)	Emissioni SOx (b)	Costi di produzione
	Potenza installata	Efficienza elettrica	Efficienza termica (a)			
Cogenerazione (c)	[MWe]	[%]	[%]	[tCO_2-eq./GWhe]	[t/GWhe]	[Rp/kWhe] (d)
CarboCHP gas ?=1	0.007-0.5	25-39	60-48	1095-631	590-248	18-12
CHP gas lean-burn	0.05-0.5	33-42	55-45	822-642	306-248	16-12
CHP gas/diesel	1	45	40	622	256	6.5-8
CHP diesel	0.007-1	25-48	60-37	1391-712	2135-763	20-6.5
SOFC	0.004	45	50	596	853	Nd
GT gas	30	33	52	708	176	6.5
GT olio combustibile	30	33	52	1000	1026	6.5
Caldaie	[MWth]	[%]	[%]	[tCO_2-eq./GWhth]	[kg/GWhth]	[Rp/kWhth]
gas	0.01-1	-	102-95	258-277	126-101	17-5
olio extra light	0.01-1	-	96	353-348	511-529	21-5
olio pesante	5	-	92	377	1807	4
Pompe di calore	[MWth]		[COP] (e)	[tCO_2-eq./GWhth]	[kg/GWhth]	[Rp/kWhth]
ad aria	0.01	-	4.2	8 (f)	32 (f)	18
a terra	0.01	-	5	12 (f)	43 (f)	17
ad acqua	0.01/0.165	-	5.5./6	12/6 (f)	43/22 (f)	22/5

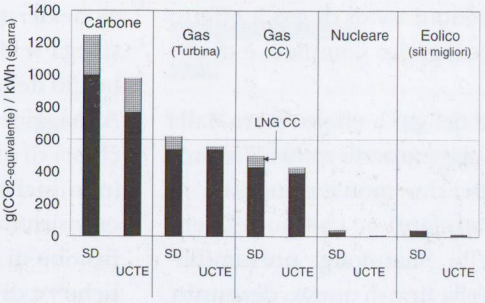
(a) Si considera il potere calorifico inferiore.
(b) Emissioni complessive dalle catene energetiche.
(c) CHP = Combined Heat&Power plant; SOFC = Solid Oxide Fuel Cell (cella di combustibile a ossidi solidi); GT = gas turbine (turbina a gas).
(d) 1 US¢ = 1.6 Rp.
(e) COP = Coefficient Of Performance - coefficiente di prestazione (annuale).
(f) Non sono state incluse le emissioni associate all'energia elettrica consumata durante il funzionamento della pompa di calore. Queste dovrebbero essere addizionate nel caso che si vogliano fare confronti diretti fra i vari sistemi a parità di servizi forniti. Nel computo delle emissioni totali dei mix energetici, le emissioni associate all'elettricità usata nelle pompe di calore sono tenute ovviamente in conto nell'inventario delle emissioni associate alla generazione complessiva di elettricità.

Fig. 2 – Paragone delle emissioni LCA di gas a effetto serra del sistema CC(gas)+HP con il sistema CHP(gas)+HP [5,17]



CC = Combined Cycle (ciclo combinato a gas); CHP = Combined Heat&Power (cogenerazione); HP = heat pump (pompa di calore)

Fig. 3 – Paragone delle emissioni LCA minime e massime di gas a effetto serra dalle catene energetiche associate a impianti di potenza futuri (2010-2020) nella provincia cinese dello Shandong (SD) e nel UCTE (risultati preliminari per lo Shandong, soggetti a possibili cambiamenti [1])



LNG = Liquefied natural gas (gas naturale liquefatto)

a effetto serra per unità d'elettricità netta immessa in rete[19] potrebbero essere da 20% a 45% più grandi in Shandong.

In particolare, il contributo della parte della catena energetica che precede l'impianto di potenza potrebbe arrivare sino a 25% del totale di tali emissioni principalmente per due cause relative alle miniere:

1. Cattiva gestione degli scarti di miniera che aumenta il pericolo di ignizione spontanea e conseguente combustione di grandi masse, a lunga durata e di difficile controllo. Sebbene non particolarmente rilevante per le miniere di carbone dello Shandong, l'ignizione spontanea dei residui di miniera o delle miniere stesse o dei depositi di carbone già estratto è una fonte molto importante di gas a effetto serra in Cina (specialmente nel nord-ovest), corrispondendo, secondo le più pessimistiche delle valutazioni, alla distruzione di carbone pari a circa un decimo[20] del totale prodotto annualmente. Pertanto, assumendo in prima approssimazione la formazione di CO_2 dalla combustione completa, circa 10% (o più) dovrebbe essere aggiunto al valore già alto delle emissioni di gas a effetto serra per kWh dalla catena energetica del carbone. Un problema di allocazione si pone, che può essere risolto usando valori minimi/massimi e spiegando i vari contributi alle emissioni totali, come qui sommariamente fatto.
2. Importanti emissioni di grisù, contenente circa il 40% di metano, avvengono a seguito di operazioni di miniera nello Shanxi, grande regione carbonifera della Cina centro-settentrionale e fonte di circa il 40% del carbone consumato nello Shandong. Solo in casi speciali una piccola percentuale dei rilasci viene recuperata a fini di riscaldamento urbano e generazione locale di elettricità. Tuttavia le emissioni di metano per unità di carbone estratto dalle miniere dello Shandong sono solo circa un decimo rispetto alle emissioni nello Shanxi e non sono recuperabili con vantaggio economico. In paragone, il contributo delle miniere che forniscono carbone all'Europa occidentale (principalmente USA, America del Sud, Sudafrica, Australia, Polonia, Germania) alle emissioni totali di gas a effetto serra della catena energetica completa è di circa 5% [3].

Nella Figura 3 i valori dei gas a effetto serra dalla catena energetica del gas naturale sono all'incirca paragonabili al UCTE per due motivi principali:

1. Si ipotizza che gli impianti CC che potrebbero essere costruiti nello Shandong, presumibilmente non prima della fine di questo decennio, sarebbero di efficienza paragonabile agli impianti CC europei attuali.[21]
2. Insieme si ipotizza che le fughe di metano per le due forme di trasporto del combustibile (in stato gassoso o liquido) come pure l'energia necessaria per il trasporto stesso (energia di pompaggio per il trasporto del gas mediante condutture[22] o energia per il trasporto in forma liquida (LNG) mediante navi cisterna dall'Asia meridionale insulare) siano ragionevolmente all'incirca rispettivamente uguali (per chilometro viaggiato) a quelle stimate per il trasporto dalla Siberia del nord e centrale all'Europa occidentale per il gas e dall'Asia insulare meridionale al Giappone per il LNG.

La ragione delle differenze nelle emissioni di gas a effetto serra nelle catene nucleari europea e cinese sono da attribuirsi principalmente all'effetto dell'origine dell'elettricità consumata nelle varie attività industriali della catena: prodotta in Cina principalmente da impianti a carbone (vedi Tabella 4) con mediocre efficienza, mentre nel caso UCTE il mix elettrico contiene sì il 50% di origine fossile ma di cui solo circa tre quinti è carbone, un quinto olio combustibile e un quinto gas naturale. Nel caso della Cina si ipotizza che l'arricchimento dell'uranio nell'isotopo fissile U-235 avvenga interamente con il processo di centrifugazione,[23] che ha una intensità energetica di molto inferiore al processo di diffusione (fattore 25-50 a dipendenza della tecnologia usata nei due processi). Pertanto se contrariamente a quanto qui assunto una parte dell'arricchimento necessario fosse effettuata da impianti a diffusione, e se l'elettricità ad essi fornita fosse solo prodotta da vecchie centrali a carbone, la quantità di gas a effetto serra per unità di elettricità nucleare potrebbe essere di molto maggiore.

Lo Shandong ha risorse di energia eolica relativamente limitate (circa 4 GW di potenziale «pratico» a 10 m di altezza, a confronto di 253 GW stimato per l'intera Cina [25]), con fattori di carico relativamente modesti in confronto alle province del nord e alle regioni costiere del sud-est della Cina. Quest'ultimo fatto, unito ancora una volta al mix di produzione dell'elettricità usata per la fabbricazione dei materiali e dei componenti delle turbine spiega le differenze dei valori in Figura 3 a svantaggio delle installazioni in Shandong.

A maggior ragione quando si considerino anche i rilasci di altre specie di inquinanti nell'atmosfera (non incluse in questo articolo per semplicità di esposizione, vedasi [1] in caso di interesse), la diffusione di sistemi fossili a minori emissioni specifiche[24] e di sistemi non fossili dovrebbe essere per-

seguita accanto all'attuazione di una politica che consenta di ridurre grandemente le emissioni di SO_x dalle centrali a carbone (uso di carbone processato a basso tenore di zolfo e inerti, installazione di sistemi de-SO_x negli impianti di potenza, uso di tecnologie «clean coal» avanzate, applicazione di limiti e tasse sulle emissioni nocive).

4.3 *Integrazione dei fattori di sostenibilità*

Allo scopo di integrare i vari aspetti e i numerosi livelli coinvolti nelle questioni di sostenibilità, vari approcci sono possibili. Uno piuttosto diffuso è la valutazione dei costi esterni ambientali di una specifica attività umana, costi non inclusi nel prezzo del relativo prodotto. Nella fattispecie, questa metodologia è stata applicata in svariati studi americani e europei alla produzione di energia elettrica, per esempio [10, 26], usando l'approccio «impact pathway» cioè valutando prima la dispersione, poi la deposizione e infine gli effetti degli inquinanti. Questa metodologia in sostanza riduce i vari impatti di un sistema in un indicatore monetario della prestazione complessiva. Tuttavia questo metodo non tiene conto di fattori sociali né di fattori ambientali non facilmente riconducibili o non riportabili del tutto a una quantificazione monetaria.

Anche considerandone le limitazioni, il computo dei costi totali rimane un metodo utile che necessita ancora ulteriori raffinamenti mediante ricerca e sviluppo di modelli. GABE ha effettuato stime dei costi esterni della generazione di elettricità in Svizzera per catene energetiche future, i cui risultati sono riportati nelle Figure 4-6. Questo approccio, effettuato sistematicamente sulla base dei dati LCA sulle catene energetiche future studiate in [4], va oltre le analisi effettuate dal progetto europeo ExternE che non considerano catene energetiche complete ma solo gli effetti degli impianti di potenza e di alcuni stadi delle catene o della vita degli impianti, in modo diverso catena per catena [26]. Per il calcolo qui mostrato sono stati utilizzati i modelli di danno ambientale e sulla salute umana più aggiornati, sviluppati anch'essi nell'ambito della ricerca ExternE [27].

La Figura 4 mostra un confronto dei risultati GABE per i costi totali dei sistemi elettrici futuri per applicazioni in Svizzera (escludendo la cogenerazione). Si avverte che i costi associati ai gas a effetto serra, stimati seguendo recenti studi [28] che danno valori inferiori rispetto ai modelli FUND 1.6 e Open Framework usati nel progetto ExternE [29],[25] si devono interpretare solo in modo illustrativo, poiché i modelli considerati e le basi per la valutazione dei

Fig. 4 – Costi totali (interni ed esterni) delle catene energetiche associate agli impianti elettrici assunti come opzioni per una probabile installazione in Svizzera intorno al 2020. I costi esterni per le conseguenze del riscaldamento globale sono mostrati separatamente dai contributi dovuti ad altri inquinanti atmosferici. [30]

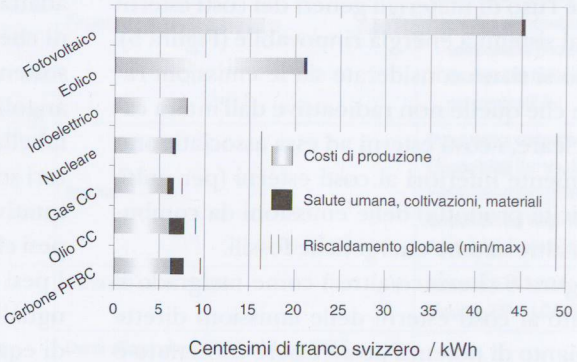
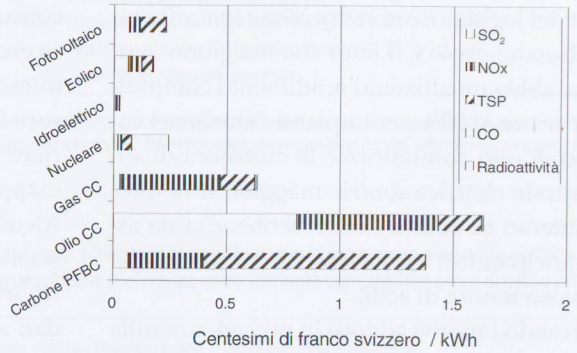
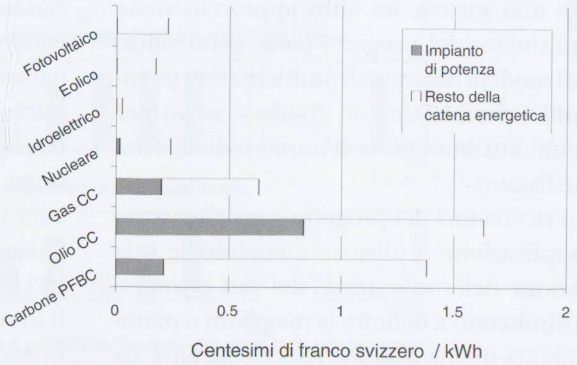


Fig. 5 – Costi esterni delle catene energetiche associate agli impianti elettrici assunti come opzioni per una probabile installazione in Svizzera intorno al 2020. I contributi dei vari inquinanti atmosferici (escludendo i gas serra) sono dati separatamente. [30]



TSP = Total Suspended Particulate - particolato in sospensione

Fig. 6 – Costi esterni delle catene energetiche associate agli impianti elettrici assunti come opzioni per una probabile installazione in Svizzera intorno al 2020. I contributi dal funzionamento nominale degli impianti di potenza e dal resto della catena energetica sono dati separatamente (escludendo i gas serra). [30]



danni associati al riscaldamento atmosferico hanno numerose incertezze.
In ogni caso si evince come i costi esterni penalizzino principalmente i sistemi fossili, malgrado i contributi associati alle altre catene energetiche mediante l'uso di materiali generi dei costi esterni anche dai sistemi a energia rinnovabile (Figura 5). Malgrado si siano considerate sia le emissioni radioattive che quelle non radioattive dall'intera catena nucleare, i costi esterni ad essa associati sono marcatamente inferiori ai costi esterni (per unità di elettricità prodotta) delle emissioni da combustione in altre catene energetiche fossili.
Dalla Figura 6 si evince altresì come malgrado il contributo ai costi esterni delle emissioni dirette dall'impianto di potenza possa essere contenuto o diventare addirittura trascurabile rispetto ai costi esterni totali per alcune catene energetiche, il contributo delle catene a monte dell'impianto possa rimanere sostanziale anche in futuro, inficiando la prestazione ecologica totale della catena. Pertanto l'attenzione degli analisti tecnici, dei gruppi di interesse e del legislatore non dovrebbe ignorare tali fatti. Rimarchevole è il fatto che malgrado l'impianto CC abbia un altissimo rendimento complessivo (superiore al 57% per impianti futuri), nel caso di uso di olio combustibile le emissioni di SO_x dalla centrale elettrica sono le maggiori fra i sistemi considerati in questa analisi, sebbene si sia assunto (anticipando il legislatore) l'uso di olio extra-light a basso tenore di zolfo.[26]
Considerando i motivi addotti in precedenza sulle limitazioni dell'approccio comparativo usante i costi esterni (o i costi totali interni + esterni), volendo disporre di un trattamento sinottico di tutti gli elementi coinvolti nella descrizione e quantificazione del concetto di sostenibilità, mantenendoli allo stesso momento separati, e allo scopo di facilitare la comunicazione e discussione con i gruppi d'interesse coinvolti in varia misura nelle scelte energetiche di una società, un altro approccio viene usato nell'ambito del progetto GABE, avvalendosi dell'uso di modelli decisionali multicriteriali (in inglese Multi Criteria Decision Analysis MCDA) per analisi multi attributo (dove il numero di alternative viene fissato).
Tuttavia i ricercatori del progetto GABE ritengono come l'applicazione di diverse metodologie e la comparazione delle valutazioni dei vari elementi che contribuiscono a definire la maggiore o minore sostenibilità di una opzione rispetto ad altre sia la via ottimale per verificare la robustezza delle conclusioni di ciascuna delle metodologie applicate separatamente, invece di caldeggiare solo l'applicazione di una di esse.

Uno schema per la valutazione di sostenibilità di opzioni per la generazione futura di elettricità in Svizzera mediante analisi multi attributo è stato sviluppato dal progetto GABE ed è illustrato in Tabella 4. Tre livelli sono stati definiti allo scopo di adattare in una struttura logica le varie dimensioni che contribuiscono a dare corpo al concetto di sostenibilità e a evidenziarne gli aspetti sotto vari angoli d'osservazione possibilmente esaustivi. La tabella include accanto ai criteri[27] anche gli indicatori scelti per la loro quantificazione, i metodi valutativi, le unità usate per gli indicatori nonché i pesi che definiscono il caso base della valutazione.
I pesi dei criteri al livello più alto sono stati scelti uguali per esprimere esplicitamente il principio di equità di importanza dei tre aspetti di sostenibilità. Gli altri pesi sono il risultato di proprie valutazioni e di considerazioni di importanza relativa dei vari indicatori come potrebbe essere percepita in media nella società. Tuttavia, non essendo l'insieme dei pesi il risultato di inchieste d'opinione o di ricerche statistiche nella società né di consultazione con gruppi di esperti al di fuori dei ricercatori di GABE, tale schema base deve essere inteso giusto come punto di partenza per osservare le variazioni della classifica dei sistemi al variare dei pesi in studi di sensibilità (sensitivity mapping [31]) .
Alcuni dei risultati di questa recente analisi [30] sono illustrati nella Figura 7 dove le classifiche sono riportate nei grafici a sinistra mentre i pesi relativi dati ai criteri di primo livello sono mostrati a destra. Le classifiche sono calcolate mediante una funzione multi attributo lineare.
Il caso base (A) rispecchia i valori dei pesi dati nella Tabella 4. In questo caso l'idroelettrico e il fotovoltaico risultano i sistemi preferiti, seguiti dal gas naturale, l'eolico e il nucleare.[28] Quando, come illustrato in (B), gli aspetti economici sono privilegiati dando loro un peso 80/100 contro 10/100 per ciascuno degli altri due, la classifica dei sistemi secondo questa preferenza cambia fortemente, penalizzando i sistemi rinnovabili, avvantaggiando il nucleare, che compare adesso al primo posto, e dando un maggiore rilievo alla possibilità dei sistemi fossili, in special modo al gas, che risulta ancora vincente fra i tre sistemi di questa categoria.
Quando si dà un peso rilevante agli aspetti ecologici e di salute umana (caso C) i sistemi rinnovabili ovviamente salgono ai primi posti ma seguiti da presso dal nucleare. I sistemi avanzati a gas perdono di posizione ma sono ancora di molto preferiti a olio e carbone, in successione.
Quando infine si privilegino gli aspetti sociali elencati nella Tabella 4, allo stato attuale il sistema più

penalizzato sembra essere il nucleare, superato persino dai sistemi fossili. Tuttavia fra i rinnovabili solo il solare prevarrebbe sul gas naturale. Nel caso che si adottassero impianti nucleari avanzati con una forte riduzione delle conseguenze ipotetiche degli incidenti nucleari severi e si introducessero processi per la riduzione sia della quantità dei rifiuti solidi radioattivi ad alta intensità che del tempo di confinamento in strati geologici profondi per la loro neutralizzazione (sino a livelli ritenuti sufficientemente sicuri), questa fonte di energia potrebbe guadagnare una posizione di prevalenza, come mostrato in figura nel caso E dove la classifica è stata calcolata con pesi uguali per i tre pilastri di sostenibilità, come nel caso di riferimento A.

In sintesi, quando si privilegi l'economia a fattori ambientali e umani, la classifica dei sistemi è all'incirca uguale sia che si considerino i costi totali (Figura 4) sia che si valuti la performance complessiva dei sistemi con MCDA (caso B in Figura 7).[29] Ove si escludano i costi esterni, i sistemi fossili rimangono i più competitivi, all'incirca comparabili ai costi del nucleare.[30]

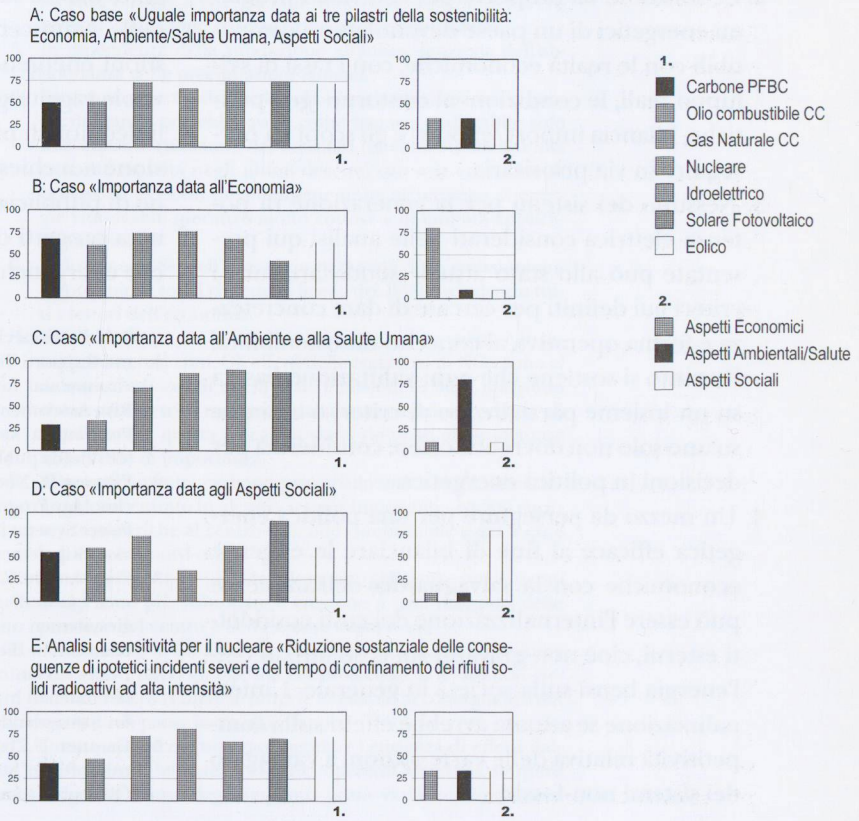
Altre analisi di sensitività, basate su una parzializzazione dei criteri ottenuta escludendo gli aspetti sociali, si trovano in [30]. L'approccio MCDA è anche applicato in CETP a scenari di produzione e consumo di elettricità nello Shandong seppure, sotto la guida del Laboratorio di Sistemi Energetici LASEN all'EPFL, con l'applicazione di metodi e software differenti da quelli usati per l'analisi qui illustrata. In questo caso i criteri scelti differiscono da quelli usati per le comparazioni fatte per i sistemi futuri svizzeri non solo perché nello studio MCDA in CETP si considerano mix energetici in numerosi scenari e non singoli sistemi, ma anche per tenere conto delle peculiarità del caso cinese e degli input ricevuti da dieci rappresentanti di organizzazioni governative e industriali cinesi (*stakeholders*) con cui il gruppo completo dei ricercatori coinvolto nelle analisi ha interagito nei due anni del progetto [2]. Gli undici criteri selezionati per lo studio cinese sono stati: a) per «Economia» il Costo medio dell'elettricità, gli Investimenti totali nel settore elettrico, la Massa totale di combustibili da trasportare; b) per «Salute e Ambiente»: il Riscaldamento globale (emissione di gas a effetto serra), gli Impatti sulla salute pubblica degli inquinanti atmosferici, gli Impatti potenziali sull'uomo degli incidenti severi (composto dei due sotto-criteri Vittime per unità di elettricità e Massime conseguenze credibili da un incidente severo), l'Uso di risorse energetiche non rinnovabili, i Rifiuti solidi (composto dei due sotto-criteri Quantità e Tempo di confinamento di rifiuti pericolosi), lo Sfruttamento del

Tab. 4 – Schema di riferimento (caso base) proposto per analisi multi attributo di sistemi elettrici futuri in Svizzera: criteri, indicatori, base valutazionale, unità e pesi. [30]

Livello I	P	Livello II (base valutazionale, unità)	P	Livello III (base valutazionale, unità)	P
Economia	1/3	Finanze	70	Costi di produzione (Rp/kWh)	50
				Investimenti (centrale elettrica, SFr/kW)	25
				Sensibilità all'incremento del costo combustibile (Incremento dei costi di produzione per raddoppiamento dei costi del combustibile)	25
		Risorse		Potenziale a corto-medio termine (GWh/anno)	40
				Disponibilità (fattore di carico)	15
				Fattori geo-politici (stima propria, scala arbitraria)	15
				Sostenibilità a lungo termine (anni)	10
				Adattabilità ai picchi di carico (scala relativa)	20
Salute umana e ambiente naturale	1/3	Danni alla salute umana	30	Mortalità (EIA & LCA, Rp/kWh)	90
				Malattie (EIA & LCA, Rp/kWh)	10
		Danni all'agricoltura (EIA & LCA, Rp/kWh)	1		
		Impatto sui materiali (EIA & LCA, Rp/kWh)	4		
		Effetti non dovuti a sostanze inquinanti	5	Territorio occupato (m^2/kWh)	
		Gas a effetto serra (LCA, gCO_2-equiv./kWh)	30		
		Rifiuti solidi	15	Volume (LCA, m^3/kWh)	
		Incidenti severi	15	Vittime (RA, vittime/kWh)	
Aspetti Sociali	1/3	Occupazione (lavoratori per unità d'energia)	20		
		Rischio di proliferazione nucleare(si/no)	5		
		Danni locali (stima, per unità d'energia)	25		
		Tempo di confinamento dei rifiuti critici (anni)	25		
		Avversione al rischio (RA, ipotetico massimo numero di vittime per incidente)	25		

P = peso relativo di un criterio; EIA = Environmental Impact Assessment (Valutazione di impatto ambientale); LCA = Life Cycle Assessment (Analisi del ciclo di vita); RA = Risk Assessment (Analisi di rischio); SFr = Franco Svizzero; Rp = rappen (centesimi di franco svizzero)

Fig. 7 – Analisi multi attributo di sistemi futuri per la produzione di energia elettrica nel caso svizzero; sensitività alle preferenze entro l'insieme completo dei criteri di primo livello. [30]



territorio; c) per «Società»: gli Impatti sull'occupazione; d) per «Tecnologia»: la Maturità tecnologica dei sistemi adottati [32]. Essendo il progetto ancora in corso d'esecuzione, i risultati relativi al caso cinese non sono ancora disponibili, per cui si rimanda a future pubblicazioni di LASEN e al libro riportante i risultati completi di CETP [33].

Allo scopo di divulgare l'approccio sinottico multi attributo dove i vari aspetti per la valutazione di sostenibilità sono dati esplicitamente e dove viene data la possibilità di esprimere preferenze, GABE ha sviluppato un software interattivo chiamato «EnergyGame», al presente installato al PSI Forum, lo spazio espositivo dove le attività di ricerca del PSI sono rese comprensibili ai visitatori di ogni età mediante modelli di impianti e di esperimenti. Tuttavia questo software viene correntemente usato anche in presentazioni di GABE per la sua efficacia illustrativa [11]. Un'applicazione di questo software nel progetto CETP è in fase di attuazione allo scopo di essere inserita nel CD-ROM, progettato e sviluppato dal PSI, che comprenderà la descrizione e i risultati dell'intero Programma (sarà accluso al libro [33]).

5. Conclusioni

1. Le problematiche energetiche e il modo di risolverle a fronte delle sfide nel futuro prossimo in paesi industrializzati possono avere caratteristiche e dimensioni del tutto differenti da quelle di paesi in via di sviluppo.
2. Le soluzioni da proporre per risolvere i problemi energetici di un paese devono essere compatibili con le realtà economiche, con i tassi di sviluppo reali, le condizioni al contorno (geo-politiche, bilancia import/export) e gli scopi da perseguire in via prioritaria.
3. Nessuno dei sistemi per la generazione di potenza elettrica considerati nelle analisi qui presentate può allo stato attuale soddisfare tutti i criteri qui definiti per cercare di dare concretezza e forma operativa al concetto di sostenibilità. Pertanto si sostiene che ogni valutazione basata su un insieme parzializzato di criteri o al limite su uno solo non dovrebbe essere considerata per decisioni in politica energetica.
4. Un mezzo da perseguire per una politica energetica efficace al fine di bilanciare le esigenze economiche con la salvaguardia dell'ambiente può essere l'internalizzazione dei costi cosiddetti esterni, cioè non gravanti sui costi attuali dell'energia bensì sulla società in generale. L'internalizzazione se attuata avrebbe effetti sulla competitività relativa delle varie opzioni a vantaggio dei sistemi non-fossili.
5. La riduzione dei costi sociali (esterni) della produzione di energia può contribuire al miglioramento dell'economia complessiva ed è socialmente accettabile. Nel caso limite cinese (uso esteso del carbone unito a un'alta densità di popolazione), i costi esterni dell'elettricità prodotta con impianti a carbone sforniti di controllo delle emissioni degli ossidi di zolfo possono essere anche marcatamente maggiori dei costi interni. Si può in tale situazione facilmente dimostrare come gli investimenti in tecnologie per il controllo delle emissioni, insieme alla gestione ottimale dei picchi di carico e al risparmio energetico, siano inferiori ai costi sociali indotti dai sistemi energetici correnti.[31]
6. L'applicazione di diverse metodologie alla comparazione olistica di sistemi energetici o di mix di sistemi energetici può contribuire a corroborare la maggiore o minore sostenibilità di una opzione rispetto ad altre. Nel caso di sistemi futuri candidati a produrre energia elettrica in Svizzera, le analisi GABE con i costi esterni e l'applicazione di metodologie MCDA convergono a risultati simili.

Affinché i risultati delle ricerche effettuate dal team di GABE e collaboratori non rimanga confinata in circoli tecnico-scientifici, ove vengono diffusi mediante i canali delle pubblicazioni scientifiche nazionali e internazionali, ma possa essere usufruita dalla società per assisterla a operare scelte energetiche razionali, una delle finalità del progetto GABE è stata sin dall'inizio l'ampia diffusione delle conoscenze specialistiche riguardanti questioni energetiche. Questa disseminazione, che si vuole raggiunga il pubblico generico come i livelli decisionali più alti, avviene mediante partecipazione a inchieste pubbliche in Svizzera, produzione di pubblicistica divulgativa [34] e partecipazione a progetti di valutazione degli effetti di politiche energetiche in Svizzera e altrove.

Pubblicazioni citate

1. PSI, Rapporti Tecnici dei Progetti: Life Cycle Assessment, Environmental Impact Assessment-External Costs Assessment, Risk Assessment, Energy-Economy Modelling, nell'ambito del Programma ABB/AGS «China Energy Technology Program (CETP)» (da pubblicare come Rapporti PSI nel 2002).
2. Eliasson B., Xue B., e Lee Y.Y., «CETP - The China Energy Technology Program - Integrated Impact Assessment of Electric Power Systems in China», ABB Corporate Research Ltd, ABB Review Supplement 2/2000, Baden Dättwil (2000).
3. Frischknecht R. (Ed.) et al., «Ökoinventare von Energiesystemen - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz», III Ed., ETHZ/PSI, Zurigo (1996).
4. Dones R. Gantner U., Hirschberg S., Doka G., Knoepfel I., «Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland», PSI Report No. 96-07, Villigen (1996).
5. Gantner U., Jakob M., e Hirschberg S., «Perspektiven der zukünftigen Strom- & Wärmeversorgung für die Schweiz - Ökologische und ökonomische Betrachtungen», Progetto GABE

(da pubblicare nel 2001 come Rapporto PSI). Disponibile in Internet col titolo «Perspektiven der zukünftigen Energieversorgung in der Schweiz unter Berücksichtigung von nachfrageorientierten Massnahmen - Ökologische und ökonomische Betrachtungen (12. Mai 2001)» nel sito http://gabe.web.psi.ch/.
6. Andreani-Aksoyoglu S. e Keller J., «Short-term impacts of air pollutants in Switzerland: Model evaluations and preliminary scenario calculations for selected Swiss energy systems», Proc. 6th International Conference «Air pollution '98», Genova, 28-30 Settembre 1998. In Brebbia C. A., Ratto C. F. e Power H. (Ed.), Air Pollution VI, WIT Press, Southampton (1998) 799-808.
7. Hirschberg S., Spiekerman G., e Dones R., «Severe Accidents in the Energy Sector», PSI Report Nr. 98-16, Villigen-PSI (1998).
8. Kypreos S., «The Global MARKAL-MACRO Trade model», in E. Laege and P. Schaumann (Editors), Energy Models for Decision Support: New Challenges and Possible Solutions, IER Stuttgart, Proceedings of the Joint IEA-ETSAP/FEES Workshop, Berlino (maggio 1998) 99-112.
9. Bahn O., «Combining policy instruments to curb greenhouse gas emissions», Proceedings of the 1999 European Environment Conference, ERP Environment, Londra (settembre 1999) 11-18.
10. European Commission, «ExternE - Externalities of Energy, Vol. 10: National Implementation», EUR 18528, Directorate-General XII, Science, Research and Development, Luxembourg (1999).
11. Hirschberg S. e Dones R., «Analytical Decision Support for Sustainable Electricity Supply», Proceedings of VDI Conference on «Energy and Sustainable Development: Contributions to Future Energy Supply», VDI, Düsseldorf (2000) 168-187.
12. Sinton J. E. e Friedly D. G., «What goes up: recent trends in China's energy consumption», Energy Policy 28 (2000) 671-687.
13. Ufficio federale dell'energia, «Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2000», Sonderdruck aus Bulletin SEV/VSE, Nr.12/2001, Berna (2001).
14. Dipartimento federale dell'Ambiente, dei Trasporti, dell'Energia e delle Comunicazioni ATEC, «EnergieSchweiz - Das Nachfolgeprogramm von Energie 2000», Ufficio federale dell'energia, Berna (gennaio 2001).
15. UNFCCC, Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change (11 dicembre 1997).
16. Hirschberg S. e Dones R., «Health and Environmental Risk Assessment of Energy Systems in Support of Decision-Making», presentato al PSAM 4 International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management, New York City, 13-18 September 1998. In Mosleh A. e Bari R. A. (Eds.), «Probabilistic Safety Assessment and Management - PSAM 4», Vol 3, Springer, London (1998) 1629-1634.
17. Gantner U., Jakob M. e Hirschberg S., „Total Greenhouse Gas Emissions and Costs of Alternative Swiss Energy Supply Strategies», in Williams D., Durie B., McMullan P., Paulson C. e Smith A. (Ed.), Proceedings of the Fifth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-5), Cairns, Australia, 13-16 August 2000; IEA Greenhouse Gas R&D Programme, CSIRO Publishing, Collingwood, Australia (2000) 991-996.
18. Dones R., Gantner U. e Hirschberg S., «Greenhouse gas total emissions from current and future electricity and heat supply systems». In Eliasson B., Riemer P. and Wokaun A. (Eds.), Proceedings of 4th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-4), Interlaken, 31 agosto - 2 settembre 1998, Pergamon, Amsterdam (1999) 891-896.
19. Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW/SSIGE), «Information - Zulassungsliste der Zertifizierungsstelle Gas 2001», SVGW, Zurigo (gennaio 2001).
20. Elcotherm, Catalogo di caldaie a gas, Horgen, Svizzera (2001).
21. Ménard M., Dones R., e Gantner U., «Strommix in Ökobilanzen - Auswirkungen der Strom-modellwahl für Produkt- und Betriebs-Ökobilanzen», PSI Report Nr. 98-17, Villigen PSI (1998).
22. Ménard M. e Dones R., «Die Bedeutung von Importen für die Ökobilanz des schweizerischen Stromes», VSE Bulletin 20/98, Zurigo (1998).
23. Walker S., «Uncontrolled fires in coal and coal wastes», IEA Coal Research, Londra (1999).
24. Girdis D., Tavoulareas S., e Tomkins R., «Liquefied Natural Gas in China», World Bank Discussion Paper No.414, Washington DC (2000).
25. Wind Power Expert Team, US Clean Air and Clean Energy Technology Cooperation Activities (CACETC), «China wind power - Study Report», NREL (febbraio 2000) disponibile al sito web: www.nrel.gov/tcapp/pdfs/china_wind_study.pdf
26. European Commission, «ExternE - Externalities of Energy, Vol. 7: Methodology 1998 update», EUR 19083, Directorate-General XII, Science, Research and Development, Luxembourg (1999).
27. European Commission, «ExternE Core/Transport», Final report prepared under contract No. JOSRCT-97-0015 (2000).
28. Tol R. S. J. e Downing T. E., «The Marginal Costs of Climate Changing Emissions», Institute for Environmental Studies, Amsterdam (2000).
29. European Commission, «ExternE - Externalities of Energy», Vol. 8, «Global Warming» (1998).
30. Hirschberg S., Dones R., e Gantner U., «Use of External Cost Assessment and Multi-criteria Decision Analysis for Comparative Evaluation of Options for Electricity Supply», in Kondo S. e Furuta K. (Ed.), Proceedings of the 5th International Conference on Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM-5), Osaka, 27 novembre - 1 dicembre 2000 (2000) 289-296. Una versione più estesa con lo stesso titolo si trova in «PSI Annual Report 2000 - Annex IV».
31. Sterling A., «Multi - Criteria Mapping - Mitigating the Problems of Environmental Valuation?», in J. Foster (Ed.), «Valuing Nature?», Ethics, Economics and the Environment, Routledge, Londra e New York (1997) 186 - 210.
32. Haldi P. - A. e Pictet J., «CETP - Criteria Definition (Revised June 2001)», documento interno CETP, LASEN, EPFL, Losanna (2001).
33. Eliasson B. e Lee Y. Y. (Ed.), «Integrated Assessment of Sustainable Energy Systems in China - The China Energy Technology Program (CETP) - A Framework for Decision Support in the Electric Sector of Shandong Province» (titolo provvisorio - da pubblicare presso Kluwers Academic Publisher nel 2002).
34. Progetto GABE, «Energiespiegel», Ni. 1-5, PSI, Villigen (1999-2001). Disponibili al sito www.psi.ch/gabe/.

Note

1. Ganzheitliche Betrachtung von Energiesystemen (http://www.psi.ch/gabe/).
2. China Energy Technology Program.
3. Le conseguenze di una ipotetica realizzazione di teorie anti tecnologiche, seppure queste facciano parte del pensiero (e pertanto percorso possibile nel futuro agli occhi dei fautori di tali filosofie) non sono qui discusse come soluzioni alternative agli avanzamenti della tecnologia.
4. Esempio per il primo caso sono i reattori nucleari veloci malgrado, caso singolo, questi possano generare più combustibile di quanto ne brucino e quindi mostrare un vantaggio rispetto ad altre opzioni a energia non-rinnovabile almeno per il criterio di valutazione «risorse primarie di combustibile».
5. In dipendenza della produzione idraulica, funzione dell'abbondanza delle precipitazioni annuali.
6. Se si dovesse considerare la sola energia elettrica totale questa domanda potrebbe avere come risposta realizzabile solo una enorme riduzione dei consumi (in controtendenza alla costante crescita negli ultimi decenni con sola eccezione di brevissimi periodi) possibilmente unita all'impiego di energie rinnovabili (peraltro molto costose e di limitata applicabilità pratica).
7. Riduzione di 8% dell'inventario nazionale delle emissioni antropogeniche totali rispetto al livello del 1990, includendo tutti i settori dell'economia.
8. Una campagna per la riduzione del particolato solido è in atto da numerosi anni. Gli effetti delle emissioni di NOx sono al momento minori di quelli delle emissioni di SOx, malgrado che con la crescita rampante della motorizzazione privata gli inquinanti di questa categoria siano destinati ad aumentare fortemente di importanza.
9. Schematicamente: carbone principalmente a nord e centro-nord, concentrato in alcuni - seppur imponenti - bacini; risorse idroelettriche al centro-sud; olio combustibile e gas a est e nell'estremo nord-ovest.
10. L'area costiera a est (dal Shandong sino al Fujan) e sud (Guangdong) sono più sviluppate e crescono a tassi maggiori delle province del centro e dell'estremo ovest/nord)
11. Al momento la Cina occupa il secondo posto al mondo come emettitore, dopo gli USA, ma nel protocollo di Kyoto non viene richiesta di ridurre le proprie emissioni in conseguenza del suo stato di paese in via di sviluppo.
12. Questo approccio non cambierebbe l'esistenza di effetti dalle emissioni dei sistemi elettrici operanti all'estero, seppure la localizzazione degli impianti possa variarne l'entità, ma

certamente influenzerebbe l'inventario delle emissioni domestiche dei paesi coinvolti nel commercio di elettricità relativo ai consumi interni.

13. Le emissioni di gas a effetto serra sono qui calcolate usando i potenziali di riscaldamento globale (GWP) con orizzonte temporale di 100 anni dell'Intergovernamental Panel on Climate Change IPCC (1996). Il GWP esprime il forcing radiattivo causato dall'unità di massa di un gas relativamente alla CO_2, integrato tra il tempo dell'emissione assunta istantanea e, nel caso considerato, 100 anni più tardi. Il forcing radiativo è definito come il cambiamento nella radiazione netta media alla sommità della troposfera causato da un cambiamento della radiazione solare oppure infrarossa.
14. Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, associazione che comprende i paesi: Belgio, Bosnia-Erzegovina, Germania, Lussemburgo, Spagna, Olanda, Francia, Austria, Grecia, Portogallo, Italia, Svizzera, Slovenia, Repubblica Ceca, Croazia, Ungheria, Repubblica Federale di Jugoslavia, Polonia, Macedonia e Repubblica Slovacca.
15. Nel caso del carbone la diminuzione è dovuta principalmente all'effetto dell'aumento dell'efficienza degli impianti di potenza. Per il gas naturale la riduzione di un fattore circa due dei gas a effetto serra per unità di elettricità netta prodotta è dovuta principalmente all'aumento dell'efficienza elettrica delle centrali a ciclo combinato rispetto alle centrali a ciclo unico (Rankine o Joule). Nel caso del fotovoltaico la diminuzione è dovuta principalmente all'aumento dell'efficienza dei processi di produzione dei materiali e delle celle.
16. Non mostrata in figura è la drastica riduzione di SO_x dagli impianti PFBC rispetto agli impianti PC senza FGD (flue gas desulphurisation) dovuta alle reazioni che hanno luogo nel letto fluido fra lo zolfo e il calcare per formare gesso (similmente a quello che avviene nei FGD).
17. Seppure la Cina abbia ricche riserve di energia idroelettrica ancora da sfruttare, queste sono concentrate nelle regioni centrali e meridionali, pertanto molto lontano dallo Shandong che di per se è quasi del tutto mancante di tale risorsa. Considerando che l'elettricità prodotta dalle centrali idroelettriche cinesi verrebbe utilizzata dopo trasmissione a lunga distanza nelle province meridionali ma non in Shandong, questa fonte energetica è stata esclusa dalle analisi nel progetto CETP.
18. I più moderni impianti PC cinesi di 300 MW o 600 MW hanno una efficienza elettrica netta di 34%-37% contro il valore medio attuale in Europa di circa 37%-38%.
19. Se il paragone fosse fatto a livello del consumatore di elettricità, probabilmente i valori cinesi sarebbero ancora più penalizzati dalle maggiori perdite in rete, specialmente a basso voltaggio (alcune fonti cinesi riferiscono di perdite sino al 40% ma non ci sono riscontri obbiettivi a supporto dell'informazione). Si può comunque ipotizzare che il miglioramento futuro dell'efficienza media delle reti ridurrebbe questo svantaggio.
20. Circa 100 Mt/anno, ma il massimo valore stimato arriva a ben 200 Mt/anno [23].
21. I cinesi non hanno al presente una tecnologia avanzata per la fabbricazione di turbine a gas e dei relativi impianti di produzione d'elettricità, poiché questa risorsa energetica, seppure non assente in alcuni bacini compresi nel territorio cinese, non è stata sfruttata se non in tempi relativamente recenti e prevalentemente per fini industriali (produzione di fertilizzanti) o di consumo domestico a sostituzione dell'altamente inquinante carbone.
22. Le fonti più probabili per la fornitura di metano mediante condutture alle fiorenti province costiere dell'est della Cina sono: la Russia, dai bacini di Irkusk nella Siberia orientale meridionale, dell'isola Sakhalin, della Repubblica di Sakha e della regione di Krasnoyarsk; i paesi dell'Asia Centrale Kazakhstan, Turkmenistan e Uzbekistan [24].
23. Impianti di centrifugazione sono stati costruiti in Cina su progetti russi, ma non se conosce con certezza la capacità totale, né se questa da sola o con successivi incrementi pianificati potrebbe soddisfare la domanda interna di arricchimento dell'uranio per futuri impianti nucleari di potenza ad acqua pressurizzata. Impianti di arricchimento a diffusione furono costruiti negli anni sessanta per scopi militari ma non si ha nessuna prova che vengano usati per scopi civili.
24. Il petrolio estratto da bacini cinesi, seppure usato nel passato come olio combustibile in impianti elettrici, è oggi preferibilmente raffinato per l'uso in mezzi di trasporto. Per questo motivo non si ritiene che l'olio combustibile sia un'opzione reale per la generazione di potenza nello Shandong, seppure uno dei bacini più importanti in Cina sia proprio in questa provincia (Shengli, nel golfo di Bohai). In più, a seguito della forte crescita della motorizzazione e della domanda di prodotti petroliferi in altri settori, a partire dal 1996 la Cina è diventata un paese importatore netto di petrolio.
25. Vedi confronto riportato nella versione dell'articolo [30] inclusa nel rapporto annuale PSI 2000.
26. Per inciso, la maggiore spesa energetica necessaria per ottenere questo prodotto rispetto agli oli pesanti aumenta le emissioni nell'ambiente associate all'unità di prodotto di raffineria e quindi all'unità di elettricità generata dalla centrale elettrica [3].
27. Per quasi tutti i criteri in tabella il nome unito all'unità di misura costituisce sufficiente descrizione, per cui non si ritiene necessario commentarli nel testo.
28. I valori assoluti della classifica non devono essere presi in modo rigido come indici di sostenibilità, mentre ciò che conta sono le distanze relative fra i livelli. Nel caso base, praticamente l'idroelettrico e il solare mostrano uguale preferenza, l'eolico e il gas seguono come seconda preferenza, seguiti a loro volta dal nucleare ma a distanza ravvicinata, mentre i sistemi fossili a carbone e olio sono nettamente sfavoriti.
29. Si noti la scala di merito usata per visualizzare i risultati MCDA, opposta alla scala dei costi ove a costi più alti corrisponde ovviamente una maggiore penalizzazione.
30. I costi interni sono gli stessi considerati nella Tabella 3 sotto la voce «Costi di produzione».
31. I risultati, qui non riportati, saranno disponibili in [1,33].

* Paul Scherrer Institut
CH-5232 Villigen PSI
Roberto.dones@psi.ch