

Un Sistema Energetico Integrato e Sostenibile: un lusso o una possibilità concreta?

Un sistema energetico sostenibile, alimentato esclusivamente con energie rinnovabili.
Potenzialità, architettura, componenti funzionali, dinamica, estensione delle
infrastrutture per la captazione delle energie primarie.
Fattibilità economica e politica.

(Sintesi)

1. Introduzione

Il sistema energetico attuale, basato sull'uso predominante dei combustibili fossili (CF), è destinato a collassare entro pochi decenni (vedi [1], capitoli 2 e 3).

Le catene energetiche del sistema CF, infatti, presentano due gravi handicap:

1. Nel punto in cui esse originano (estrazione dei CF dai giacimenti) incombe l'approssimarsi del picco di produzione, ormai prossimo per il petrolio, non lontano per il gas naturale. Se questo handicap non troverà rapidamente una soluzione credibile, sarà impossibile evitare crisi politiche incontrollabili a carattere globale.
2. Nel punto in cui esse terminano¹ (consumo dei CF) la combustione dei CF produce CO₂, che si accumula nell'atmosfera provocando il progressivo squilibrio del bilancio termodinamico sulla superficie terrestre (effetto serra). In estese fasce climatiche ciò metterà a rischio, nei prossimi decenni, il prosperare della fitosfera, base di tutte le catene alimentari.

Sulle possibili opzioni per prevenire gli effetti che i due handicap del sistema CF fanno incombere sui destini della vita sul pianeta e sulla sopravvivenza delle moderne società organizzate, è in corso da parecchi anni un'ampia discussione. Nonostante il diluvio di parole che è stato speso, tuttavia, le proposte della comunità scientifica sono riconducibili a un piccolo numero di opzioni, sintetizzabili come segue:

1. **L'accanimento terapeutico sul sistema CF.**
L'idea di fondo è quella di prolungare il più possibile, con ogni mezzo, la vita del sistema CF, concentrando lo sforzo tecnologico sulla cattura e sequestro della CO₂, nel tentativo di inibire gli effetti del secondo handicap del sistema CF. Purtroppo, questa opzione ha uno sgradevole effetto collaterale: essa fa maturare in anticipo il picco di produzione dei CF, perché la cattura ed il sequestro della CO₂ peggiorano notevolmente l'efficienza, già modesta, delle catene energetiche del sistema CF (si deve consumare più energia lorda per ottenere una stessa quantità di energia utile).
Dunque, questa opzione è intrinsecamente inadeguata a fronteggiare il primo handicap del sistema CF.
2. **Una rivoluzione tecnologica centrata sulla materia dello stock planetario.**
Fanno parte di questa opzione le speranze nella fusione nucleare controllata. Più in generale, questa opzione confida che, prima che si manifestino le crisi del sistema CF, sia possibile mettere a punto tecnologie che ricavano energia in abbondanza, senza limiti di tempo e senza effetti indesiderati sulla biosfera, dallo stock di materia del pianeta. Si potrebbe allora dismettere il sistema CF, e cancellare le minacce dei suoi due handicap.
Purtroppo, è assai bassa la probabilità:

¹Il sistema CF immette nell'atmosfera CO₂ anche lungo le catene energetiche, ma il principale contributo alle emissioni di CO₂ è associato ai punti in cui le catene CF terminano sull'utenza, siano essi caldaie (per l'erogazione di energia termica) o centrali termoelettriche (per l'erogazione di energia elettrica).

- a. che tecnologie futuristiche come la fusione nucleare controllata siano tecnicamente praticabili sul nostro pianeta;
- b. che, qualora queste tecnologie fossero tecnicamente praticabili, possano arrivare in tempo per prevenire le crisi del sistema CF;
- c. che, qualora queste tecnologie fossero tecnicamente praticabili e arrivassero in tempo, siano ambientalmente neutre, e che gli eventuali costi di implementazione (e smantellamento/riciclaggio) degli impianti siano sostenibili.

3. **Una rivoluzione tecnologica centrata sull'energia proveniente dall'esterno del pianeta.**

Questa opzione assume il potenziale delle fonti di energia rinnovabili (notevolmente superiore all'attuale domanda di energia utile) e le caratteristiche di variabilità nel tempo di tali fonti come vincoli fisici di fatto e si concentra sulle soluzioni tecniche più adatte per soddisfare la domanda energetica sfruttando con la massima efficienza il potenziale di energie rinnovabili disponibile.

Le prime due opzioni offrono basse probabilità di successo (opzione 2) o sono intrinsecamente non sostenibili nel lungo termine (opzione 1). Pertanto, se si adottassero strategie basate su una di queste opzioni o su un mix di queste due opzioni il rischio di un fallimento disastroso sarebbe molto elevato.

Nelle critiche condizioni ambientali, economiche e politiche esistenti, gli autori di questo studio ritengono irresponsabile intestardirsi sulle prime due opzioni, perché esse promettono di assorbire ingenti investimenti ma presentano scarse probabilità di successo nel lungo termine. Il loro fallimento, altamente probabile, indurrebbe nei popoli del pianeta una crisi di fiducia generale, dalle conseguenze incalcolabili, che coinvolgerebbe non solo le leadership politiche ma la stessa scienza nel suo complesso.

Lo studio mostra invece che l'opzione 3 (un nuovo sistema energetico alimentato esclusivamente da fonti di energia rinnovabili):

1. sarebbe realizzabile in pochi decenni, con uno sforzo finanziario tutt'altro che proibitivo, in gran parte utilizzando tecnologie consolidate e, per una piccola parte, con tecnologie sviluppabili in pochi anni;
2. sarebbe in grado, sotto opportune condizioni, di soddisfare la domanda delle moderne società industriali in tutte le sue forme;
3. non avrebbe impatti significativi sulla biosfera;
4. sotto opportune condizioni, sarebbe sostenibile senza limiti di tempo, sia da parte dei paesi di prima industrializzazione che da parte dei paesi di nuova industrializzazione;
5. sarebbe economicamente praticabile e straordinariamente vantaggioso dal punto di vista politico.

Se le conclusioni di questo studio sono vere, le leadership politiche dovrebbero seriamente riflettere sui rischi cui andrebbero incontro se trascurassero i vantaggi certi dell'opzione 3 e si lasciassero tentare dalle incaute sirene delle opzioni 1 e 2.

Lo studio che qui è sintetizzato si articola a grandi linee secondo il seguente schema:

1. Requisiti di un nuovo **Sistema Energetico Integrato e Sostenibile** (SEIS), alimentato esclusivamente con fonti di energia rinnovabili, con potenziale produttivo che permetta, in pochi decenni, la dismissione del sistema CF e la radicale eliminazione, dal nostro orizzonte, degli effetti dei suoi due handicap.
2. Un progetto dettagliato del SEIS. Architettura delle sue due catene energetiche.
3. Stima delle efficienze energetiche delle due catene del SEIS.
4. Mappatura delle tre catene energetiche del sistema CF sulle due catene energetiche del SEIS.
5. Stima del fabbisogno energetico in testa alle due catene del SEIS.

6. Dinamica della domanda di energia degli utenti del SEIS (in coda alle due catene energetiche) e della produzione di energia primaria (in testa alle due catene energetiche).
7. Dimensionamento ottimale dei contributi delle diverse fonti di energia rinnovabili, allo scopo di minimizzare l'entità delle immobilizzazioni nelle infrastrutture di raccolta dell'energia ricavabile dalle principali fonti energetiche (eolica e solare).
8. Stima delle immobilizzazioni associate al dispiegamento del SEIS.
9. Un piano di transizione dal sistema CF al SEIS in due fasi, nell'arco di pochi decenni.
10. Grandezze economiche in gioco nella transizione.
11. Condizioni politiche richieste per assicurare il successo della transizione.

2. Vincoli del SEIS

L'architettura generale di un sistema energetico alimentato esclusivamente con FER deve soddisfare i vincoli imposti dalle caratteristiche delle FER (sorgenti dell'energia) e dalle caratteristiche della domanda energetica degli utenti (destinazione dell'energia).

2.1 Vincoli del SEIS lato sorgente

L'analisi delle tipologie di FER sfruttabili sulla superficie del pianeta e del loro potenziale energetico ([1], capitolo 5) mostra che eolico e solare sono le FER con il potenziale maggiore. Queste due FER, tuttavia, hanno bassa intensità energetica per unità di superficie captante e grande variabilità nel tempo.

Ne consegue che le infrastrutture per la captazione di queste due energie devono essere molto estese e che gran parte di tali infrastrutture dovrà essere dispiegata in aree (**bacini di produzione** dell'energia, BP) situate a grande distanza dalle aree di consumo (**bacini di utenza** dell'energia, BU). Per questa ragione:

- l'energia captata nella forma sorgente (irraggiamento solare ed energia cinetica del vento) deve essere convertita in una forma energetica trasportabile (dai BP ai BU) con facilità ed efficienza;
- una volta consegnata all'utente (nella forma energetica nella quale è stata trasportata), l'energia deve essere convertibile con facilità ed efficienza nelle forme energetiche richieste dall'utenza.

2.2 Vincoli del SEIS lato destinazione (utenza)

L'utenza di un qualunque sistema energetico è raggruppabile in due categorie nettamente distinte:

1. **L'utenza statica** (abitazioni e industrie).

Tenendo conto dei vincoli lato sorgente e della distanza fra BP e BU, la forma energetica più adatta per soddisfare la domanda dell'utenza statica è quella elettrica. L'energia sorgente (irraggiamento solare ed energia cinetica del vento), infatti, è convertibile in energia elettrica nei siti di captazione. A sua volta, l'energia elettrica è trasportabile con elevata efficienza e costi limitati su lunghe distanze ed è convertibile con elevata efficienza in tutte le forme energetiche richieste dall'utente statico (luce, calore, energia meccanica, ecc.).

In conclusione: per soddisfare la domanda energetica dell'utenza statica, il SEIS dovrà includere una catena energetica che origina dalle FER (nei BP) e consegna agli utenti energia elettrica (nei BU-E). Questa catena energetica converte l'energia sorgente in energia elettrica nei BP e consegna energia elettrica agli utenti (nei BU-E), per cui essa è, a tutti gli effetti, una **catena dell'energia elettrica** (catena CEE).

2. **L'utenza mobile** (mezzi di trasporto).

Per soddisfare la domanda di energia degli utenti mobili, le energie nella forma sorgente (irraggiamento solare, energia cinetica del vento, ecc.) devono essere convertite in un opportuno vettore energetico, che deve soddisfare i seguenti vincoli (almeno):

- a. deve avere una adeguata densità energetica per unità di volume;
- b. deve essere distribuibile agli utenti e trasportato a bordo dei veicoli con facilità e senza rischi;
- c. deve assicurare effetti nulli, o almeno trascurabili, sull'ambiente;
- d. deve essere facilmente trasferibile da un serbatoio di energia all'altro;
- e. se stoccato in serbatoi e non utilizzato, deve conservare il proprio contenuto energetico virtualmente senza limiti di tempo.

Gli autori dello studio ritengono che solo un vettore chimico possa soddisfare questi requisiti e che, per molteplici ragioni (vedi [1], paragrafo 6.3.1, capitolo 7, paragrafo 8.3.1, paragrafo 9.7.2) il vettore chimico più adatto allo scopo sia il metanolo (alcol metilico, CH_3OH).

La conseguenza di questa assunzione è che il SEIS deve includere una catena energetica che origina dalle FER (nei BP) e consegna metanolo agli utenti mobili (utenti chimici, BU-C).

Questa catena energetica è identificabile come Catena della Mobilità Veicolare (CMV) e comporta due conversioni energetiche.

L'energia sorgente viene anzitutto convertita in energia elettrica, quanto più vicino possibile ai punti di cattura dell'energia sorgente (nei BP) e poi in energia chimica in opportuni impianti chimici.

Poiché i costi di implementazione degli impianti chimici hanno una forte dipendenza dalla scala degli impianti stessi e per evidenti ragioni di protezione ambientale e di sicurezza, conviene che la conversione da energia elettrica in energia chimica sia effettuata in impianti chimici concentrati in appositi nodi energetici (NEI). Pertanto, l'energia elettrica prodotta dai BP deve essere trasportata dai BP ai NEI e ivi convertita in energia chimica (massa di metanolo).

3. Architettura generale del SEIS

L'insieme dei vincoli lato sorgente e lato utenza impone dunque al SEIS una architettura generale costituita da due catene energetiche (vedi figura 1):

1. La **catena CEE** (catena dell'energia elettrica), che ha origine dalle FER e termina sull'utenza statica. Il compito della catena CEE è ricavare dalle FER l'energia elettrica necessaria per soddisfare, **in tempo reale**, la domanda di energia dell'utenza statica².
2. La **catena CMV** (catena della mobilità veicolare), che ha origine dalle FER e termina sull'utenza mobile. Il compito della catena CMV è ricavare dalle FER l'energia chimica richiesta per soddisfare la domanda di energia dell'utenza mobile.

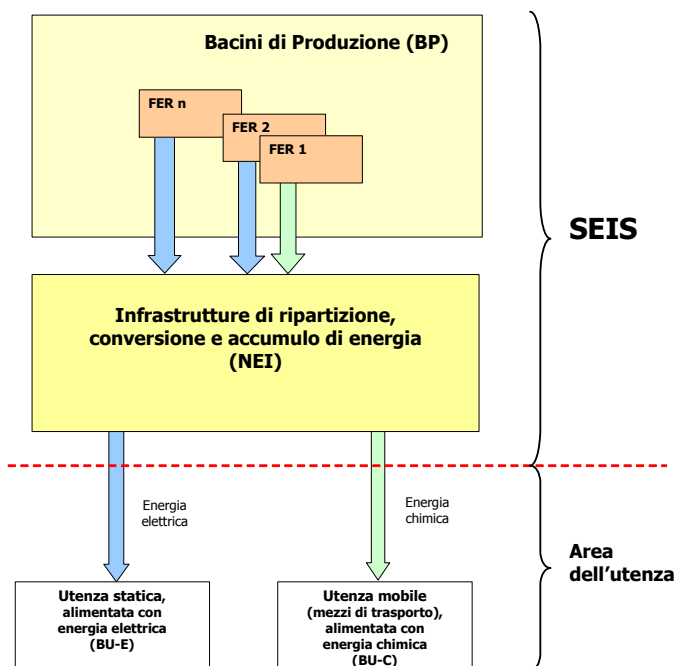


Figura 1. *Architettura funzionale generale del SEIS. Il sistema utilizza un insieme di FER (Fonti di Energia Rinnovabile) per soddisfare la domanda energetica degli utenti statici (catena dell'energia elettrica, CEE) e quella degli utenti mobili (catena dell'energia chimica, CMV). Le interazioni fra le infrastrutture che "originano l'energia primaria del SEIS" (Area di Produzione, BP) e le infrastrutture sulle quali "termina l'energia prodotta dal SEIS" (Area di Utenza, BU) sono mediate da una infrastruttura "nodale" (Nodi Energetici Integrati, NEI), che incorpora funzioni di "ripartizione, conversione e accumulo" dell'energia prodotta dai BP. Conviene che queste funzioni nodali siano dislocate in siti che ospitano centrali termoelettriche dell'attuale sistema energetico. In questo modo le infrastrutture di ripartizione dei NEI possono accedere alla rete elettrica di trasporto (per collegare i NEI fra loro) e alla rete elettrica di distribuzione locale (per servire gli utenti della catena CEE).*

² La mobilità su rotaia (treni, metropolitane, tramvie, ecc.) è, per lo più, alimentata dalla catena CEE. Tuttavia, dal punto di vista del SEIS, gli utenti effettivi sono le società che gestiscono la rete ferroviaria, metropolitana, ecc., al quale il SEIS fornisce energia elettrica come ad un qualunque altro utente statico.

3.1 Le catene energetiche del SEIS: vincoli indotti dalla forma delle energie sorgenti

L'analisi dei caratteri delle diverse tipologie di FER in testa alle due catene energetiche del SEIS ([1], capitolo 6) mostra che le potenze elettriche ricavabili dalle FER danno luogo a due componenti:

1. **La componente EEN** (energia elettrica nativa), funzionalmente schematizzata in figura 2 come originata dal blocco denominato "BP-E" (bacino di produzione della componente elettrica del potenziale di energia primaria del SEIS). Questa componente ha un potenziale produttivo di gran lunga dominante ed è ricavabile, nella forma di energia elettrica, dalle seguenti FER:
 - a. geotermica;
 - b. eolica;
 - c. solare.
 - d. idraulica ad acqua fluente;
 - e. idraulica a bacino (singolo o doppio).

Tenendo conto delle caratteristiche di queste FER, la potenza elettrica in sviluppo da esse ricavabile può essere considerata composta da due diverse frazioni:

- a. La frazione EEN-NA, cioè la frazione **non accumulabile** (NA) della componente EEN. Questa frazione è prodotta dalle FER geotermica, solare, eolica e idraulica ad acqua fluente.
Queste tipologie di FER fanno parte della frazione NA perché non ammettono accumulo dell'energia nella forma di energia sorgente (calore geotermico, energia radiante solare, energia cinetica del vento e dell'acqua fluente), per cui l'energia elettrica da esse ricavabile è intrinsecamente "persa se non assorbita in tempo reale". Pertanto, il SEIS dovrà assorbire costantemente questa frazione al massimo della potenza elettrica istantanea da esse ricavabile.
Poiché le sottofrazioni eolica e solare sono le tipologie di FER con il potenziale energetico maggiore, l'architettura del SEIS dovrà essere progettata in modo che la potenza elettrica istantanea ricavabile dalla frazione EEN-NA sia in grado di soddisfare in tempo reale la domanda della catena CEE per la maggior parte del tempo ed in modo che l'eventuale esubero transitorio di potenza elettrica (non assorbito in tempo reale dall'utenza CEE) sia convertito in metanolo e accumulato in un opportuno sistema di accumulo.
- b. La frazione EEN-A, cioè la frazione **accumulabile** (A) della componente EEN. Questa frazione è ricavabile dalla FER "idraulica a bacino" (singolo o doppio). Questa tipologia di FER fa parte della frazione A perché ammette accumulo dell'energia nella forma dell'energia sorgente (energia potenziale gravitazionale), per cui la frazione EEN-A che se ne può ricavare è caratterizzabile come intrinsecamente "producibile su richiesta".
Pertanto, il SEIS dovrà essere progettato in modo che la produzione di energia elettrica ricavabile da questa frazione sia attivata quando e nella misura in cui la domanda energetica CEE non possa essere coperta in tempo reale dalla frazione EEN-NA.

2. **La componente ricavabile da ECN** (energia chimica nativa), funzionalmente schematizzata in figura 2 come originata dal blocco BP-C (bacino di produzione della componente chimica del potenziale di energia primaria del SEIS). Questa componente, che ha un potenziale relativamente modesto (rispetto al potenziale della componente EEN), è ricavabile da:

- a. rifiuti prodotti da consumi antropici (RUI, rifiuti urbani indifferenziati);
- b. scarti di biomasse (SB) prodotti dall'agricoltura, dall'industria agro-alimentare e dalla silvicoltura.

La forma sorgente (energia chimica) dalla quale questa componente è ricavabile è intrinsecamente "accumulabile".

L'energia elettrica che può essere ricavata da ECN è dunque "erogabile su richiesta", ma il ciclo termodinamico richiesto per la sua produzione comporterà una notevole perdita energetica. Pertanto, il SEIS dovrà essere progettato in modo che la produzione di energia elettrica per conversione di questa frazione sia attivata quando e nella misura in cui la domanda energetica CEE non possa essere coperta in tempo reale dalla frazione EEN nel suo complesso (somma dei potenziali istantanei massimi delle frazioni EEN-NA e EEN-A).

In conclusione, poiché la catena CEE assicura la massima efficienza energetica quando la domanda di potenza elettrica degli utenti BU-E (cioè degli utenti statici o, detto in altro modo, degli utenti CEE) è soddisfatta con energia elettrica della frazione EEN, il SEIS dovrà essere progettato in modo da gestire con la massima efficienza le dinamiche indipendenti della potenza elettrica generabile dai BP e della potenza elettrica assorbita dalle due catene (CEE e CMV). In altre parole, il SEIS dovrà essere progettato in modo che l'andamento nel tempo della potenza elettrica generata dai BP soddisfi i seguenti vincoli:

1. la domanda degli utenti BU-E deve essere coperta, in tempo reale e per la maggior parte del tempo (idealmente per il 100% del tempo) dalla potenza elettrica istantanea ricavata dalla frazione EEN-NA;
2. negli intervalli di tempo in cui la potenza elettrica istantanea ricavata dalla frazione EEN-NA è maggiore della domanda istantanea di potenza degli utenti CEE (stato di esubero elettrico della catena CEE), l'esubero di potenza deve essere convertito in metanolo e accumulato in un sottosistema di serbatoi, a disposizione della catena CMV;
3. negli intervalli di tempo in cui la potenza elettrica istantanea ricavata dalla frazione EEN-NA è minore della domanda istantanea di potenza degli utenti CEE, ma il deficit può essere coperto con il potenziale istantaneo ricavabile dalle frazioni EEN-A ed ECN (stato di deficit elettrico D2 della catena CEE), allora la potenza elettrica per coprire il deficit istantaneo deve essere prodotta in modo controllato per conversione delle frazioni EEN-A ed ECN;
4. negli intervalli di tempo in cui la potenza elettrica istantanea ricavata dalla frazione EEN-NA è minore della domanda istantanea di potenza degli utenti CEE, ma il deficit non può essere coperto con il potenziale istantaneo ricavabile dalle frazioni EEN-A ed ECN (stato di deficit elettrico D1 della catena CEE), allora si dovrà produrre in modo controllato il massimo di potenza elettrica dalle frazioni EEN-A ed ECN e coprire il deficit di potenza elettrica residuo convertendo opportune quote di energia chimica (metanolo) e/o di energia idraulica (ad esempio mediante sistemi di pompaggio a doppio bacino) accumulate durante le fasi di esubero elettrico³.

Come sommariamente accennato al punto 2, la produzione del metanolo per soddisfare il fabbisogno della catena CMV viene effettuata per conversione della frazione EEN-NA negli intervalli di tempo di esubero elettrico della catena CEE. Per le sue caratteristiche fisico-chimiche, il metanolo è facilmente accumulabile in serbatoi di grande capacità.

Tenendo conto dei criteri di gestione delle divergenti dinamiche della produzione istantanea, lato BP, e della domanda istantanea, lato BU, il progetto del SEIS deve includere:

1. un insieme di funzioni per regolare in modo ottimale, istante per istante, la produzione di potenza elettrica e la ripartizione ottimale di tale potenza fra le due catene del SEIS, in base allo stato di esubero o deficit elettrico della catena CEE (funzioni di scolmatura/combinazione di potenza elettrica);

³ La generazione di energia elettrica da energia chimica può essere effettuata sia con impianti centralizzati (nei nodi del SEIS), sia con impianti decentrati, ad esempio collegando alle reti elettriche di distribuzione automezzi privati dotati di sistemi efficienti di conversione di metanolo in energia elettrica. La generazione di energia elettrica da energia idraulica (con sistemi a doppio bacino) è probabilmente effettuabile solo con impianti centralizzati.

2. un insieme di funzioni specifiche della catena CMV, che hanno lo scopo di:
 - a. durante le fasi di esubero elettrico, convertire una quota dell'energia elettrica in esubero (cioè non assorbita dall'utenza CEE) in energia chimica per l'utenza CMV;
 - b. accumulare l'energia chimica così prodotta.

In figura 2 la funzione di conversione di energia elettrica in energia chimica è rappresentata con il blocco S1, quella di accumulo con il sottosistema di serbatoi S_{AM} .

3. un insieme di funzioni specifiche della catena CEE, che hanno lo scopo di:
 - a. durante le fasi di esubero elettrico, convertire una quota dell'energia elettrica in esubero (cioè non assorbita dall'utenza CEE) in energia chimica da accumulare in vista di fasi di deficit elettrico della catena CEE;
 - b. accumulare l'energia elettrica così prodotta;
 - c. durante le fasi di deficit D1, convertire energia chimica accumulata (metanolo) in energia elettrica nella misura in cui è richiesta per coprire il deficit elettrico della catena CEE;

In figura 2 la funzione di conversione di energia elettrica in energia chimica è rappresentata con il blocco S1, quella di accumulo è rappresentata con il sottosistema di serbatoi S_{AM} , quella di riconversione di metanolo in potenza elettrica è rappresentata con il blocco S3b.

Se le funzioni sopra descritte fossero concentrate in opportuni nodi (NEI, Nodi Energetici Integrati) e questi nodi coincidessero con i siti che hanno in precedenza ospitato centrali termoelettriche del sistema CF, si otterrebbero due importanti vantaggi:

1. La scala degli impianti chimici della catena CMV (per la conversione di energia elettrica in metanolo, blocco S1 di figura 2), può essere ottimizzata;
2. Le funzioni di scolmatura/combinazione di potenza elettrica possono riutilizzare le infrastrutture di trasporto e di distribuzione dell'energia elettrica esistenti, che a tali siti sono attestate.

3.2 Architettura funzionale delle catene energetiche del SEIS

Tenendo conto dell'insieme di vincoli identificati, l'architettura funzionale delle due catene energetiche del SEIS è modellizzabile sinteticamente con una serie di blocchi in cascata (vedi figura 2).

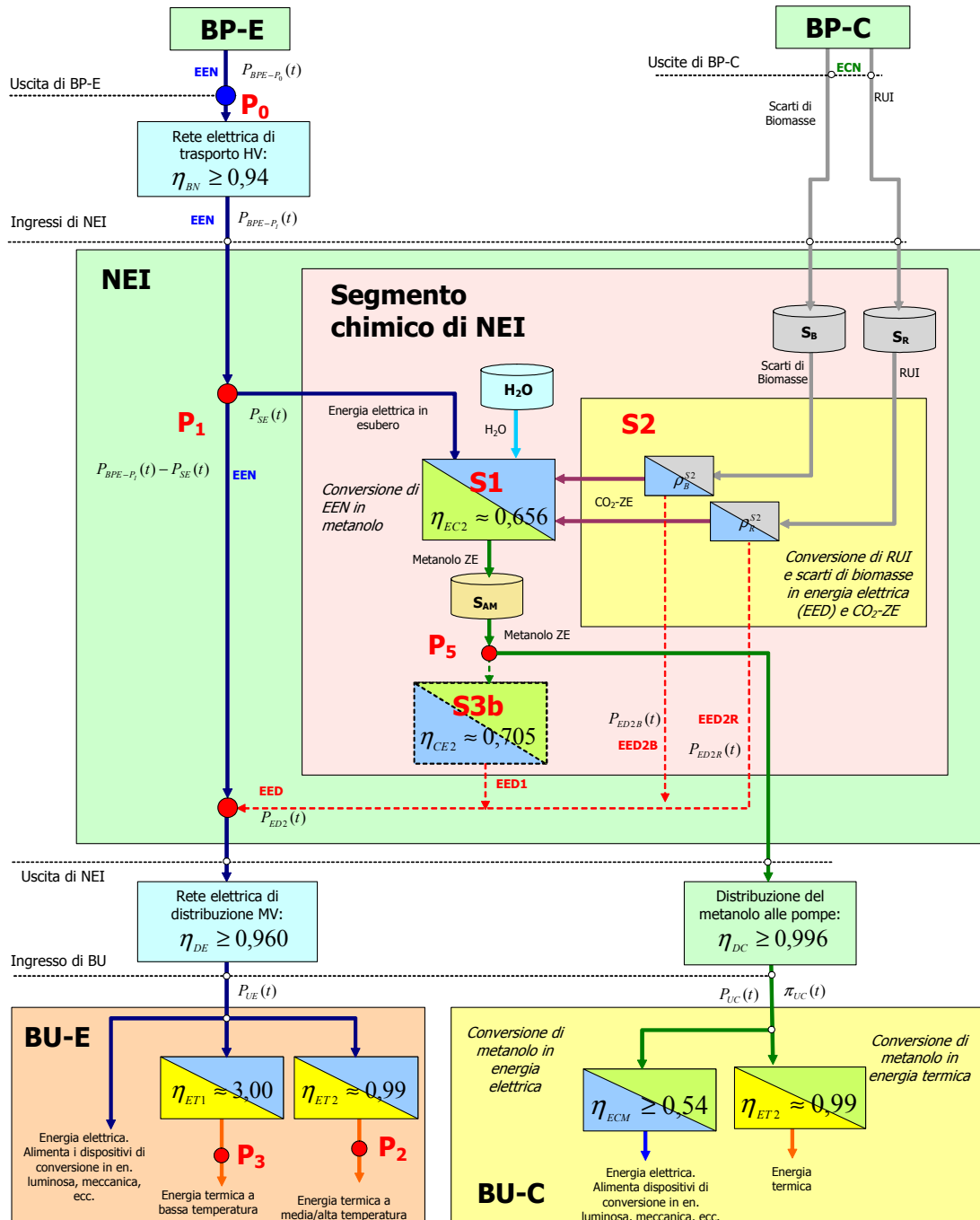


Figura 2. Architettura funzionale delle catene energetiche del SEIS.
 La catena dell'energia elettrica (CEE) si sviluppa dai BP ai BU-E (utenza statica).
 La catena della mobilità veicolare (CMV) si sviluppa dai BP ai BU-C (bacini dell'utenza mobile).
 Il blocco S1 converte la potenza elettrica in esubero, $P_{SE}(t)$, in una potenza chimica accumulabile (flusso di metanolo).
 Il blocco S2 converte l'energia chimica prodotta dai BP-C (RUI e scarti di biomasse) in:
 • energia elettrica (per la catena CEE);
 • CO_2 "zero emission" per la sintesi del metanolo (per la catena CMV).

Entrambe le catene originano dalle FER (blocco BP-E per la componente EEN, blocco BP-C per la componente ECN) e terminano all'interfaccia energetica verso gli utenti (blocco BU-E per gli utenti statici, blocco BU-C per gli utenti mobili).

In conseguenza dell'architettura funzionale illustrata in figura 2, ciascuna delle catene energetiche sarà dominata dalle dinamiche indipendenti delle grandezze esogene che si presentano in testa e in coda alle due catene:

1. **In coda alle due catene** energetiche il SEIS deve soddisfare la domanda totale di potenza, cioè la domanda istantanea combinata di:
 - a. potenza elettrica da parte degli utenti CEE (BU-E);
 - b. portata di metanolo, da parte degli utenti CMV (BU-C).

La dinamica istantanea della domanda totale di potenza è una grandezza esogena, perché è determinata quasi unicamente dagli stili di vita degli utenti del SEIS ed è solo parzialmente influenzabile con opportune politiche di offerta dei servizi del SEIS.

2. **In testa alle due catene** energetiche il SEIS assorbe una potenza elettrica inviluppo costituita dai contributi indipendenti di diverse tipologie di FER.

Poiché:

- la potenza elettrica inviluppo generata da ciascuna tipologia di FER è la somma pressoché istantanea delle potenze elettriche erogate da un numero più o meno grande di sottosistemi di captazione di quella specifica tipologia;
- per ciascuna tipologia di FER la dinamica temporale della potenza elettrica inviluppo generata ha caratteristiche specifiche.....

..... ne consegue che la dinamica temporale della potenza elettrica inviluppo che alimenta il SEIS sarà influenzata dall'incidenza del contributo di ciascuna tipologia di FER sul totale del potenziale istantaneo assorbito dal SEIS e dalla specifica dinamica temporale associata a ciascuna tipologia di FER.

3.2.1 Architettura funzionale della catena CEE

La catena CEE ha il compito di soddisfare **in tempo reale** la domanda di potenza elettrica degli utenti elettrici (BU-E), $P_{UE}(t)$, ricavando dalle FER la potenza elettrica richiesta. Nell'area dell'utenza (BU-E) opportuni dispositivi devono convertire la potenza elettrica fornita dal SEIS nelle diverse forme di energia di cui hanno bisogno gli utenti, come:

- riscaldamento e raffrescamento degli edifici civili e industriali (con pompe di calore con sonda atmosferica o geotermica);
- usi di cucina (forni a microonde, piani cottura a infrarossi, ecc.);
- illuminazione (con lampade CFL);
- forza motrice (con motori elettrici ad elevata efficienza);
- alimentazione degli apparati elettronici;
- ecc.

Il blocco BU-E di figura 2, dunque, rappresenta funzionalmente tutte le infrastrutture che, presso gli utenti della catena CEE, permettono di convertire la potenza elettrica (fornita dal SEIS) in tutte le forme di potenza richieste dall'utente statico.

Il blocco BP-E di figura 2, invece, rappresenta funzionalmente l'infrastruttura di captazione (distribuita su estesi territori) costituita da:

- campi solari,
- campi eolici,
- centrali idroelettriche,

- campi geotermici.

La raccolta ed il trasporto della potenza elettrica prodotta dai BP-E ai siti che ospitano i nodi energetici (NEI) sono assicurati da una infrastruttura di concentrazione e trasporto ad alta e/o media tensione. Questo tipo di infrastruttura assicura perdite contenute (non più del 5% ogni 1.000 km).

Il blocco BP-C di figura 2, infine, rappresenta funzionalmente l'infrastruttura di captazione del potenziale energetico del SEIS ricavabile da energia chimica, cioè l'infrastruttura per raccogliere, dai territori origine, RUI e scarti di biomasse, per trasferirli nei siti che ospitano i nodi energetici (NEI).

La distribuzione dell'energia elettrica dai NEI all'utenza statica (BU-E) è assicurata dall'infrastruttura di distribuzione a media e bassa tensione esistente. I rami della rete elettrica di distribuzione hanno lunghezza assai minore delle distanze medie fra i siti NEI, per cui le perdite medie lungo i rami della rete di distribuzione (non più di pochi punti percentuali) sono notevolmente inferiori alle perdite medie lungo i rami della rete di trasporto che interconnettono i siti NEI.

3.2.2 Architettura funzionale della catena CMV

La catena CMV ha il compito di soddisfare la domanda di potenza chimica dell'utenza mobile (BU-C) con metanolo (alcol metilico) di sintesi.

Il blocco BU-C di figura 2 rappresenta funzionalmente tutte le infrastrutture che, presso gli utenti della catena CMV, permettono di convertire il metanolo fornito dal SEIS in tutte le forme di energia richieste dall'utente, come:

- forza motrice per il trasporto di merci e persone (su strada, per vie d'acqua, via aerea, ecc.);
- riscaldamento e raffrescamento all'interno di mezzi di trasporto;
- produzione di potenza elettrica e di calore in aree non servibili dalla rete elettrica.

Nella catena CMV:

1. Il blocco BP-E rappresenta funzionalmente l'infrastruttura di captazione del potenziale elettrico primario (distribuita su estesi territori) costituita da:
 - campi solari,
 - campi eolici,
 - centrali idroelettriche,
 - campi geotermici.
2. Il blocco BP-C rappresenta funzionalmente l'infrastruttura richiesta per la captazione del potenziale chimico primario del SEIS, cioè l'infrastruttura per raccogliere, dai territori origine, RUI e scarti di biomasse e trasferirli nei siti dei NEI.

La presenza, nella catena CMV, di sottosistemi di accumulo del metanolo assicura intrinsecamente il disaccoppiamento fra la dinamica temporale della domanda di metanolo degli utenti CMV (flusso di energia chimica prelevato dai sottosistemi di accumulo S_{AM}) e la dinamica temporale del flusso di metanolo che alimenta la catena stessa (flusso di energia chimica immesso nei sottosistemi di accumulo per conversione della frazione EEN-NA in esubero).

3.2.2.1 Il segmento chimico della catena CMV

Poiché la catena CMV deve includere la conversione di potenza elettrica in metanolo di sintesi per gli utenti mobili (BU-C), essa deve comprendere un segmento chimico.

In figura 2 la parte di tale segmento chimico ospitata nei siti nodali del SEIS (NEI) è schematizzata funzionalmente con i sottosegmenti S1 e S2.

Gli stessi sottosegmenti sono schematizzati più in dettaglio in figura 3, nella quale compare anche il sottosegmento S3a, che completa la catena CMV ma è localizzato nell'area dell'utenza (BU-C).

Una descrizione dettagliata dell'intero segmento chimico della catena CMV è contenuta in [1], paragrafi 8.3 e 9.6.4.

Il funzionamento del segmento chimico della catena CMV è sintetizzabile a grandi linee come segue (vedi figura 2 e sottosegmenti S1 e S2 di figura 3):

1. Quando la potenza involuppo della componente EEN-NA, $P_{BPE.P}(t)$ (somma istantanea delle potenze elettriche prodotte dalle frazioni solare, eolica, geotermica e idraulica ad acqua fluente), è maggiore del fabbisogno istantaneo di potenza elettrica degli utenti CEE-E, $P_{UE}(t)$, l'esubero di potenza elettrica $P_{SE}(t)$ viene deviato, da opportune funzioni di scolmatura (ospitate nei siti NEI), in testa al segmento chimico della catena CMV e alimenta il blocco 1 di figura 3 (elettrolizzatore).

2. Mediante elettrolisi di acqua distillata, la potenza elettrica $P_{SE}(t)$ viene convertita in un flusso di energia chimica (idrogeno) e di O_2 (16 grammi di O_2 ogni 2 grammi di H_2) secondo la seguente reazione elettrochimica:



3. Il flusso di H_2 prodotto dal blocco 1 alimenta il blocco 2, nel quale esso viene impacchettato in un flusso di metanolo, mediante la seguente reazione di sintesi catalitica con un flusso di CO_2 :



4. In parallelo, il flusso di O_2 prodotto dal blocco 1 viene liquefatto (blocco 3) ed accumulato allo stato liquido nel sistema di serbatoi S_O , dal quale può essere prelevato, quando richiesto e previa rigassificazione (blocco 5), per alimentare la combustione di RUI e scarti di biomasse (blocco 10), allo scopo di produrre CO_2 -ZE ("zero emission") per il blocco 2⁴.

Dato che la CO_2 utilizzata per impacchettare l' H_2 in molecole di metanolo è ricavato da RUI e/o scarti di biomasse (blocco 10) la CO_2 immessa nell'atmosfera al momento della combustione del metanolo (sottosegmento S3a di figura 3, nell'area dell'utenza) è CO_2 -ZE ("zero emission"), cioè non avrà alcun impatto sulla concentrazione atmosferica della CO_2 .

I calcoli riportati nel paragrafo 9.6.4 ([1]) mostrano che i valori dell'efficienza totale di conversione della potenza elettrica $P_{SE}(t)$ in un flusso di metanolo si situano fra i seguenti limiti:

- $\eta = 0,66$ (se l' O_2 prodotto dall'elettrolizzatore è utilizzato direttamente nel blocco 10, senza subire il processo di liquefazione/rigassificazione);
- $\eta = 0,60$ (se l' O_2 prodotto dall'elettrolizzatore viene liquefatto e rigassificato prima di entrare nel blocco 10).

Se l' O_2 viene liquefatto e rigassificato con "recupero del freddo" ([1], paragrafi 8.3.2.1.3, 8.3.2.1.3 e 8.3.2.1.3), l'efficienza di conversione totale può raggiungere un valore intermedio, cioè $\eta = 0,63$.

Il flusso di metanolo, prodotto dal blocco 2 di figura 3, secondo la relazione (2), viene accumulato nel sottosistema di serbatoi S_{AM} . L'utenza chimica (BU-C) attinge il metanolo dal sottosistema S_{AM} (vedi figura 2).

Dal punto di vista del sottosistema di serbatoi S_{AM} :

1. Il flusso di metanolo prodotto dal sottosegmento S1 è un immissario, la cui portata istantanea è determinata dalla dinamica (esogena) della potenza elettrica EEN-NA prodotta in esubero dal BP-E, $P_{SE}(t)$;

Il flusso di metanolo prelevato dal sottosegmento S3 è un emissario, la cui portata istantanea è determinata dalla dinamica della domanda (esogena) di potenza chimica $P_{UC}(t)$ proveniente dagli utenti CMV (BU-C).

⁴ La disponibilità di ossigeno puro prodotto dal blocco 1 di figura 3 permette di alimentare la combustione dei gas ricavabili da RUI e scarti di biomasse (mediante pirolisi/gassificazione, blocco S2 di figura 3). La combustione dei gas potrebbe essere effettuata in camere di combustione ermetiche, in atmosfera di ossigeno puro (in proporzioni quasi stechiometriche) e CO_2 di ricircolo (per limitare la temperatura di combustione). In queste condizioni i prodotti di combustione non conterrebbero ossidi di azoto (NO_x) ma quasi unicamente CO_2 e H_2O . La CO_2 sarebbe facilmente separabile, con un modesto consumo energetico, dagli altri prodotti di combustione (H_2O ed una piccola frazione di O_2 in eccesso rispetto alle proporzioni stechiometriche). Per i dettagli, [1], paragrafo 8.3.2.1.2.2.

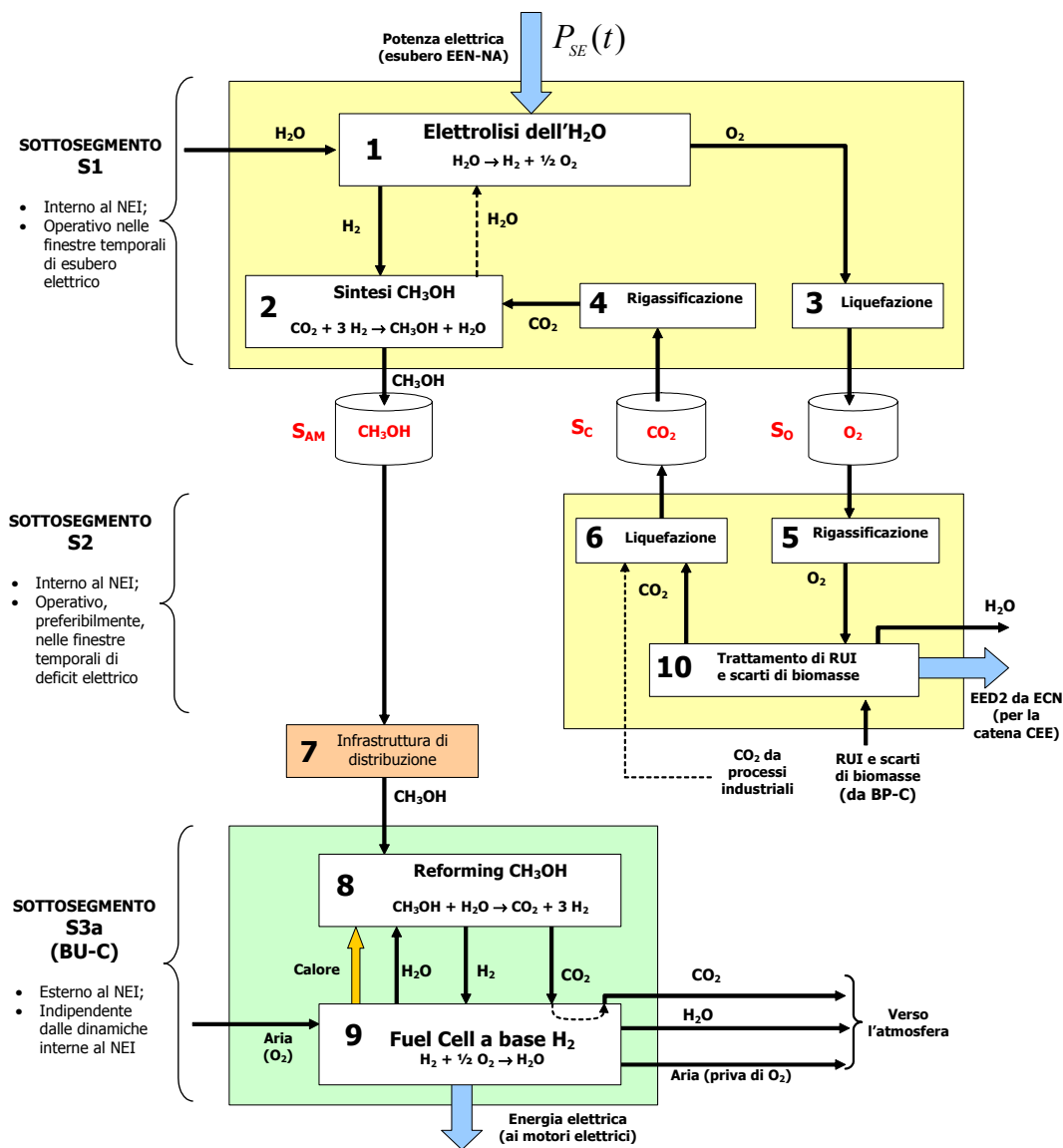


Figura 3. Schema a blocchi del segmento chimico della catena CMV.

Nel sottosegmento S1 l'esubero di potenza elettrica $P_{SE}(t)$ viene convertito in potenza chimica (flusso di metanolo), che viene accumulato in un sottosistema di serbatoi S_{AM} , dal quale viene prelevato, quando richiesto, per soddisfare la domanda di potenza chimica dell'utenza mobile (BU-C).

La CO_2 (zero emission) che alimenta la sintesi del metanolo è ricavata dalla combustione di RUI e scarti di biomasse (sottosegmento S2), in atmosfera di O_2 puro (prodotto dal blocco 1). In figura è inoltre schematizzato funzionalmente il sottosegmento S3 per il caso di mezzi di trasporto su strada o via mare. La conversione di energia chimica (metanolo) in energia elettrica avviene a bordo del mezzo di trasporto, in una FC, a monte della quale opera una funzione di reforming con vapor d'acqua.

La dinamica istantanea dell'immissario del sottosistema di serbatoi S_{AM} (cioè la dinamica della potenza elettrica primaria prodotta dai BP) non ha impatti sulla capacità del SEIS di soddisfare la domanda istantanea di potenza chimica (flusso di metanolo) degli utenti mobili (BU-C), a condizione che la dinamica delle portate di immisario ed emissario non determini lo svuotamento del sottosistema di serbatoi S_{AM} , o, in altre parole, a condizione che:

1. l'energia elettrica in esubero (rispetto alla domanda della catena CEE) coincida, in media, con il fabbisogno di energia elettrica della catena CMV;
2. il sistema di serbatoi S_{AM} abbia una capacità di accumulo adeguata.

In linea di principio, infatti, affinché il livello medio di accumulo del sistema di serbatoi S_{AM} rimanga stazionario in un dato intervallo di tempo T è sufficiente che, nell'intervallo di tempo T , le portate dei flussi immisario ed emissario abbiano lo stesso valor medio e che il sistema di serbatoi S_{AM} abbia una capacità di accumulo adeguata.

Il metanolo richiesto dall'utenza della catena CMV (BU-C) può essere trasportato alle stazioni di servizio con autobotti, con le stesse tecniche utilizzate per il trasporto delle benzine (blocco 7 di figura 3), e, in ogni stazione di servizio, può essere trasferito a bordo dei mezzi di trasporto degli utenti CMV con una specifica colonnina, affiancata a quelle delle benzine.

Il metanolo è allo stato liquido a pressione atmosferica in una estesa gamma di temperature (da -97 °C a $+64,7\text{ °C}$), per cui le modalità di trasferimento del metanolo dai serbatoi della stazione di servizio ai serbatoi degli utenti non presentano differenze rispetto alle modalità impiegate per le benzine.

A bordo dei mezzi di trasporto il metanolo può essere convertito in altre forme di energia con specifici dispositivi.

Se deve essere convertito in potenza motrice e calore, può essere sottoposto a efficienti reazioni elettrochimiche di combustione, in fuel cell (FC) con produzione di energia elettrica e di calore di scarto.

Il calore di scarto, a sua volta, può essere utilizzato per alimentare la funzione di reforming del metanolo e, una volta degradato a temperatura inferiore, può ancora essere impiegato per il riscaldamento a bordo del mezzo di trasporto.

I blocchi 8 e 9 di figura 3 illustrano funzionalmente la reazione di combustione elettrochimica che avviene in una FC. Il metanolo viene anzitutto sottoposto a reforming con vapor d'acqua (blocco 8), cioè alla reazione inversa della reazione di sintesi del blocco 2, utilizzando una frazione del calore dissipato dalla fuel cell a valle (blocco 9). Poiché riutilizza il calore dissipato dalla FC, la reazione di reforming con vapore d'acqua assicura un "guadagno energetico".

Il flusso di H_2 prodotto dalla reazione di reforming va ad alimentare la FC a valle (blocco 9), dove esso viene sottoposto a combustione elettrochimica, producendo energia elettrica, vapore d'acqua e calore. Il calore sviluppato dalla reazione è utilizzabile per alimentare la reazione di reforming (a monte della FC) e, una volta degradato a basse temperature, per il riscaldamento a bordo del mezzo di trasporto.

Ipotizzando che la FC possa raggiungere una efficienza di conversione dell'ordine del 50%, l'efficienza totale raggiungibile nel sottosegmento S3 non sarebbe inferiore a $\eta_{S3} = 0,54$ (vedi paragrafo 9.6.4 di [1] e appendice A5.2 di [3]). Ne consegue che l'efficienza complessiva del segmento chimico della catena CMV, schematizzato in figura 3, dal punto di ingresso del sottosegmento S1 (potenza elettrica all'ingresso del blocco 1) al punto di uscita del sottosegmento S3a (potenza elettrica all'uscita del blocco 9) potrebbe variare dal 32,5% al 35,3% (vedi [1], paragrafo 9.6).

Anche considerando le perdite della rete elettrica di trasporto (dal punto P_0 al punto P_1 di figura 2), e le perdite per conversione dell'energia elettrica in energia meccanica alla ruota, nella intera catena CMV del SEIS (dall'uscita del BP alla ruota) si possono raggiungere, con un realistico sforzo tecnologico, valori di efficienza almeno doppi dell'efficienza media "dal pozzo alla ruota" ottenibile all'interno della catena CMV dell'attuale sistema energetico.

L'elettrolisi dell' H_2O distillata (reazione 1) e la sintesi catalitica del metanolo da CO_2 e H_2 (reazione 2) sono processi largamente impiegati nella moderna industria chimica (vedi [1], paragrafo 8.3.1 e [3], paragrafo A6).

Un'alternativa promettente, ancora in fase di studio, potrebbe diventare praticabile in un prossimo futuro: la cosiddetta "Fuel Cell rigenerativa", descritta in [4] e, in sintesi, nel paragrafo A4.1 ([3]). Una "Fuel Cell rigenerativa (FCR)" è un dispositivo che congloba le funzioni dei blocchi 1 e 2 di figura 3 (elettrolisi dell'acqua e sintesi del metanolo). Essa è alimentata con energia elettrica e converte acqua e CO_2 in metanolo e ossigeno.

4. Il SEIS: fabbisogno di energia elettrica primaria

Una volta definita l'architettura funzionale delle catene energetiche del SEIS (figure 2 e 3) e stimate le efficienze associabili ai blocchi funzionali che la compongono ([1], capitoli 9 e 10), è possibile utilizzare questi strumenti per stimare il fabbisogno netto di energia elettrica che il SEIS dovrebbe soddisfare in testa alle sue due catene nell'ipotesi che la domanda netta (in coda alle sue catene) coincida con quella soddisfatta dalle catene energetiche dell'attuale sistema energetico. Nei capitoli 11 e 12 ([2]) la stima di tale fabbisogno è effettuata nell'ipotesi che la domanda energetica lorda in testa alle tre catene dell'attuale sistema energetico sia rimappata in testa alle due catene del SEIS secondo i criteri seguenti:

1. Catena dell'energia elettrica dell'attuale sistema energetico (CEE-CFN⁵).

Questa catena:

- a. è alimentata, in testa, con combustibili fossili o con minerali di uranio;
- b. consegna agli utenti energia elettrica.

L'efficienza complessiva della catena (dal pozzo all'ingresso della rete elettrica di distribuzione) è condizionata dai processi di raffinazione dei combustibili grezzi e soprattutto dai cicli termodinamici che, nelle centrali termoelettriche e termonucleari, convertono energia termica in energia elettrica per cui difficilmente può superare il 30-35%.

A valle della transizione al SEIS, l'intera domanda netta di energia elettrica della catena CEE-CFN è coperta dalla catena CEE del SEIS, la quale, nel trasporto dai BP ai NEI, può assicurare una efficienza maggiore del 90%, quasi tripla di quella complessiva dell'omologa catena CEE-CFN.

2. Catena dell'energia termica dell'attuale sistema energetico (CET-CF).

Questa catena:

- a. è alimentata, in testa, con combustibili fossili;
- b. soddisfa la domanda degli utenti consegnando loro derivati della raffinazione di tali combustibili, la cui conversione in energia termica avviene presso l'utente (per mezzo di caldaie).

L'efficienza complessiva della catena CET-CF (dal pozzo al punto di erogazione dell'energia termica) è condizionata dai consumi energetici associati alle lavorazioni a monte delle caldaie, per cui difficilmente può superare l'80-85%.

A valle della transizione al SEIS, l'intera domanda netta di energia termica della catena CET-CF è coperta dalla catena CEE del SEIS.

Il SEIS consegnerebbe all'utente energia elettrica che verrebbe convertita in energia termica presso l'utente.

Per le applicazioni a bassa temperatura⁶ (es. riscaldamento di edifici civili o industriali, produzione di acqua calda per uso sanitario) la conversione di energia elettrica in energia termica può essere effettuata con pompe di calore. Queste tecnologie potrebbero assicurare una efficienza complessiva della catena (dai BP al punto di erogazione dell'energia termica a bassa temperatura) dell'ordine del 300-400% (più di tre-quattro volte l'efficienza della catena CET-CF a bassa temperatura).

Per le applicazioni ad alta temperatura (es. usi di cucina, processi industriali, ecc.) la conversione di energia elettrica in energia termica ha efficienza che può raggiungere quasi il 100%. L'efficienza complessiva della catena (dai BP al punto di erogazione dell'energia termica ad alta temperatura) è dell'ordine del 90%, cioè comunque superiore, anche se non di molto, all'efficienza della catena CET-CF ad alta temperatura).

⁵ Nell'attuale sistema energetico la catena dell'energia elettrica è costituita da due domini principali: il dominio CF (alimentato da combustibili fossili) e il dominio N (nucleare, alimentato con uranio arricchito). L'insieme dei due domini è qui indicato con l'acronimo CEE-CFN.

⁶ Le applicazioni a bassa temperatura assorbono una quota predominante dei consumi di CF associati alla catena CET-CF

3. **Catena della mobilità veicolare** dell'attuale sistema energetico (CMV-CF).

Questa catena:

- a. è alimentata, in testa, con combustibili fossili;
- b. soddisfa la domanda degli utenti con derivati della loro raffinazione. La conversione in energia meccanica avviene presso l'utente (per mezzo di cicli termodinamici).

L'efficienza complessiva della catena CMV-CF (dal pozzo alla ruota) è condizionata dalla bassa efficienza dei cicli termodinamici (che convertono in energia meccanica l'energia termica prodotta dalla combustione), per cui non supera, in media ponderata, il 15-20%.

A valle della transizione al SEIS, l'intera domanda netta di energia meccanica della catena CMV-CF è coperta dalla catena CMV del SEIS.

Il SEIS consegnerebbe all'utente metanolo purissimo, che verrebbe convertito (almeno nella sfera dei trasporti su strada e via mare) prima in energia elettrica (con FC) e poi in energia meccanica (con motori elettrici ad alta efficienza).

L'efficienza complessiva della catena (dal BP alla ruota) in questo quadro di ipotesi è dell'ordine di almeno il 30%, valore che supera del 50-100% l'efficienza dell'omologa catena CMV-CF.

Una stima grossolana della domanda media pro-capite di potenza elettrica che il SEIS dovrebbe soddisfare (nel punto P₁ di figura 2) se le tre catene dell'attuale sistema energetico venissero rimappate sulle due catene del SEIS secondo i criteri appena esposti, in modo che il SEIS sostituisca completamente l'attuale sistema energetico, è sviluppata nel paragrafo 12.1 ([2]), ipotizzando che:

1. Il SEIS debba soddisfare la domanda totale netta pro capite di energia che l'attuale sistema energetico (incluso tutti i suoi domini, cioè il dominio CF, quello nucleare e quello delle energie rinnovabili) si trova attualmente a soddisfare nel territorio dell'Unione Europea;
2. Le due catene energetiche del SEIS assicurino valori di efficienza energetica non inferiori ai valori calcolati nel capitolo 10 ([1]), riportati nella tabella 42 ([2]);
3. Opportuni incentivi incoraggino gli utenti ad effettuare investimenti nell'area dell'utenza, in modo da "sterilizzare" almeno in parte (moderatamente) la loro domanda di energia.

Con queste ipotesi (che denominiamo scenario "target di fabbisogno europeo", in sigla "TFE"), i fabbisogni medi pro-capite di potenza elettrica nel punto P₁ di figura 2 che il SEIS dovrebbe soddisfare non potrebbero essere superiori ai seguenti valori:

1. Domanda media pro-capite di potenza elettrica da utenza CEE (nel punto P₁ di figura 2)⁷, $\bar{p}_{UE.P_1}$:

$$\bar{p}_{UE.P_1} = 7.864 \frac{kWh_E}{\text{anno} \cdot ab} = 7.864 \frac{kWh_E}{8.766 h \cdot ab} = 897 \frac{W_E}{ab} \quad (3)$$

2. Domanda media pro-capite di potenza elettrica da utenza CMV (nel punto P₁ di figura 2), $\bar{p}_{UC.P_1}$:

$$\bar{p}_{UC.P_1} = 6.891 \frac{kWh_E}{\text{anno} \cdot ab} = 6.891 \frac{kWh_E}{8.766 h \cdot ab} = 786 \frac{W_E}{ab} \quad (4)$$

3. Fabbisogno medio pro-capite di potenza elettrica dell'insieme delle catene CEE e CMV (nel punto P₁ di figura 2), $\bar{p}_{FE.P_1}$:

$$\bar{p}_{FE.P_1} = \bar{p}_{UE.P_1} + \bar{p}_{UC.P_1} = (897 + 786) \frac{W_E}{ab} = 1.683 \frac{W_E}{ab} \quad (5)$$

E' interessante notare che, in Italia, la produzione media pro-capite di potenza elettrica destinata alla catena CEE dell'attuale sistema energetico, è stato di circa 735 W/ab nel mese di dicembre 2001.

⁷ L'abbreviazione "ab" sta per "abitante"

Nell'anno 2000 la potenza elettrica media pro-capite generata nell'intero territorio dell'Europa Occidentale è stata dell'ordine di 790 W/ab. Il confronto di questi valori con il valore stimato per la domanda media pro-capite di potenza elettrica da utenza CEE del SEIS (897 W/ab, vedi relazione 3), mostra che, grazie alla maggiore efficienza della catena energetica CEE del SEIS, con una potenza elettrica media pro-capite di poco superiore (+13% circa) a quella generata attualmente nei paesi dell'Europa Occidentale sarebbe possibile soddisfare la domanda elettrica e termica TFE.

Un piccolo sforzo ulteriore per sterilizzare la domanda degli utenti statici (con opportuni investimenti⁸) permetterebbe di soddisfare la domanda elettrica e termica TFE senza significativi investimenti nelle reti elettriche di distribuzione.

5. Il SEIS: dinamica delle catene energetiche

5.1 Dinamica della domanda (in coda alle catene energetiche)

In figura 4 è visualizzato graficamente l'andamento (qualitativo) prevedibile della domanda istantanea di potenza elettrica degli utenti della catena CEE nel punto P_1 , $P_{UE.P_1}(t)$, e la corrispondente energia elettrica assorbita da tali utenti nell'intervallo di tempo T di alcuni giorni (area sottesa dalla funzione $P_{UE.P_1}(t)$, evidenziata in giallo), nell'ipotesi che il SEIS debba soddisfare il target di fabbisogno europeo (TFE) di un territorio popolato da un milione di abitanti. La linea rossa orizzontale tratteggiata rappresenta il valore medio della domanda CEE nel punto P_1 , $\bar{P}_{UE.P_1}$, il cui valore è:

$$\bar{P}_{UE.P_1} = n \cdot \bar{p}_{UE.P_1} = 10^6 \cdot 897 W_E = 897 MW_E \quad (6a)$$

La linea blu orizzontale tratteggiata di figura 4 rappresenta invece il valore medio del fabbisogno di potenza elettrica dell'insieme delle catene CEE e CMV nel punto P_1 , $\bar{P}_{FE.P_1}$:

$$\bar{P}_{FE.P_1} = \bar{P}_{UE.P_1} + \bar{P}_{UC.P_1} = 10^6 \cdot (897 + 786) W_E = 1.683 MW_E \quad (7)$$

La domanda istantanea della catena CEE, $P_{UE.P_1}(t)$, tenderà a fluttuare attorno al valore medio

$\bar{P}_{UE.P_1} = 897 MW_E$. L'ampiezza della sua fascia di fluttuazione dipenderà da fattori stagionali (riscaldamento invernale e condizionamento estivo) e dagli stili di vita degli utenti della catena CEE. In generale, soprattutto nei paesi industrializzati, il picco giornaliero della domanda CEE si manifesta al centro della giornata, mentre il minimo della domanda CEE si presenta nel corso della notte. Una stima grossolana indica che la domanda di potenza elettrica $P_{UE.P_1}(t)$ dell'insieme degli utenti della catena CEE dell'attuale sistema energetico in un tipico paese industrializzato può fluttuare attorno al valor medio di lungo termine entro una fascia di ampiezza dell'ordine di $0,3 \cdot \bar{P}_{UE.P_1}$ (30% del valor medio di lungo termine).

Si può ragionevolmente assumere che lo scenario SEIS offra svariate opzioni per contenere il picco giornaliero della domanda degli utenti CEE, $P_{UE.P_1}(t)$.

⁸ Ad esempio: isolamento avanzato degli edifici, estesa autoproduzione di energia con sistemi solari a facciata e sui tetti, utilizzo generalizzato di elettrodomestici e lampade ad alta efficienza, ecc.

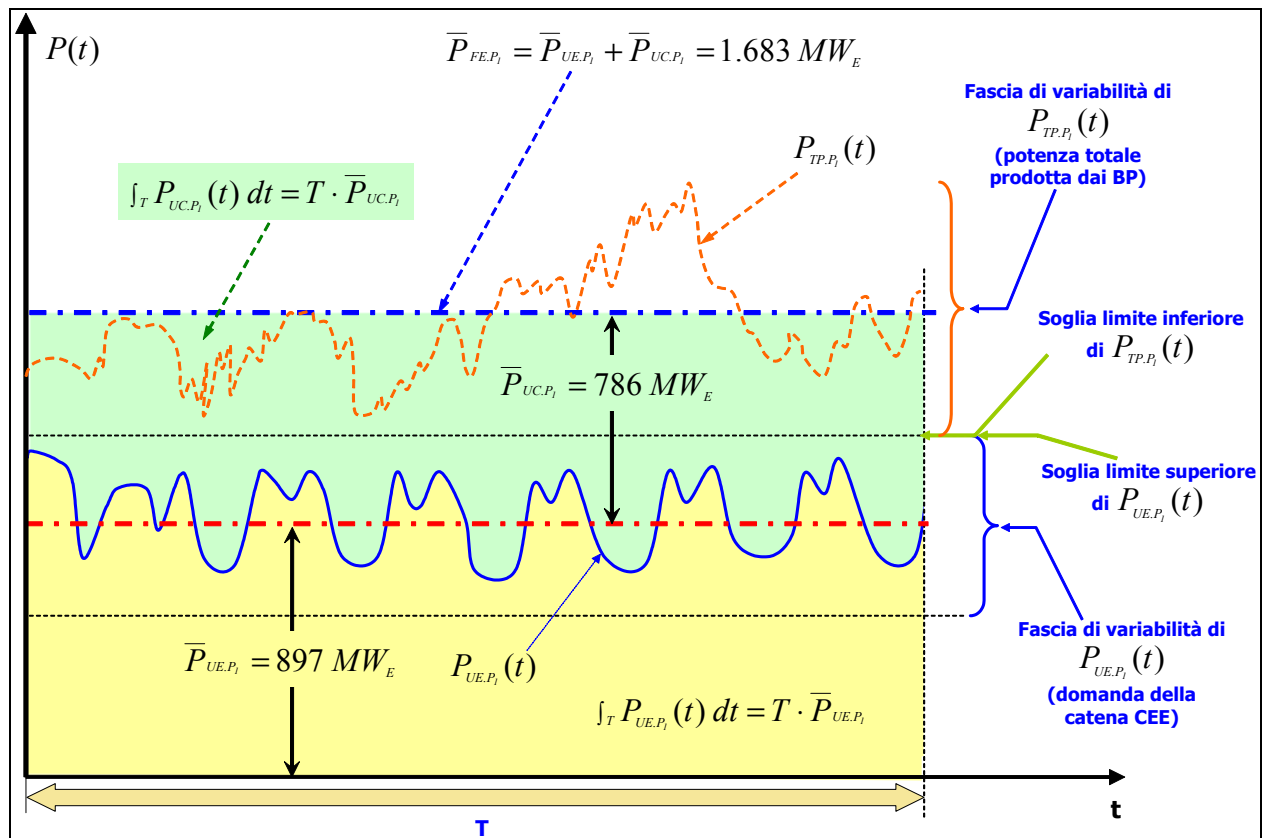


Figura 4. *Illustrazione grafica (qualitativa) delle relazioni fra le grandezze associate a un SEIS che debba servire 10^6 utenti in uno scenario TFE (target di fabbisogno europeo).*

I grafici rappresentano le seguenti grandezze:

- *fabbisogno medio di potenza elettrica degli utenti dell'insieme delle due catene CEE e CMV, nel punto P_1 , \bar{P}_{FE,P_1} ;*
- *domanda media di potenza elettrica degli utenti della catena CEE nel punto P_1 , \bar{P}_{UE,P_1} ;*
- *domanda istantanea di potenza elettrica degli utenti della catena CEE nel punto P_1 , $P_{UE,P_1}(t)$.*

La domanda istantanea di potenza elettrica degli utenti della catena CEE deve essere soddisfatta in tempo reale, mentre la domanda di potenza elettrica degli utenti della catena CMV non impone la copertura in tempo reale. Ne consegue che lo "scenario ottimale" (cioè lo scenario che comporta la massima efficienza energetica per entrambe le catene energetiche del SEIS) si manifesta quando la potenza elettrica istantanea totale $P_{TP,P_1}(t)$ prodotta dai BP nel punto P_1 abbia un andamento nel tempo, nell'intervallo T , tale che:

- *il suo valore medio nel punto P_1 sia pari al fabbisogno medio totale degli utenti del SEIS nel punto P_1 , cioè quando $\bar{P}_{TP,P_1} = \bar{P}_{FE,P_1}$;*
- *per nessun valore di $t \in T$ sia inferiore alla domanda istantanea della catena CEE $P_{UE,P_1}(t)$, cioè $P_{TP,P_1}(t) \geq P_{UE,P_1}(t)$, per ogni $t \in T$.*

Le due opzioni di maggiore efficacia sarebbero certamente le seguenti (vedi [2], paragrafo 12.2.3.1):

1. Se una quota significativa degli utenti del SEIS si equipaggiasse con sistemi solari per l'autoproduzione di energia (elettrica o termica), l'energia per l'autoconsumo così prodotta tenderebbe in modo naturale a ridurre l'entità del picco della domanda elettrica, perché l'energia ricavabile dal sole è, per ovvie ragioni, concentrata proprio nella finestra di irraggiamento diurno, cioè in fase con il picco della domanda elettrica.

- Se il gestore del SEIS praticasse per il kWh_E tariffe differenziate in base al livello istantaneo della domanda, questo incentiverebbe la riduzione dei consumi nelle tradizionali fasce di picco della domanda.

Possiamo dunque ipotizzare che, con l'aiuto di opportune politiche di incentivazione dell'autoproduzione da solare e di tariffe orarie, la domanda di picco giornaliera del SEIS possa essere "controllata" in modo che la domanda istantanea di potenza $P_{UE.P_1}(t)$ sia costantemente

inferiore a un valore di soglia $\left[P_{UE.P_1}(t)\right]_{max} = \bar{P}_{UE.P_1} + 30\%$, cioè:

$$P_{UE.P_1}(t) \leq \left[P_{UE.P_1}(t)\right]_{max} = 1,3 \cdot \bar{P}_{UE.P_1} \quad (6b)$$

Nello scenario TFE, tenendo conto delle relazioni (6b) e (7), il valore massimo di soglia per un SEIS che serva un milione di abitanti avrebbe il valore:

$$\left[P_{UE.P_1}(t)\right]_{max} = 1,3 \cdot \bar{P}_{UE.P_1} = 1,3 \cdot 897 \text{ MW} = 1.166 \text{ MW} = 0,69 \cdot \bar{P}_{FE.P_1} \quad (6c)$$

5.2 Copertura ottimale della domanda di potenza delle catene CEE e CMV

La presenza del sottosistema di serbatoi S_{AM} , nel quale viene accumulato il metanolo prodotto dal sottosegmento S1 di figura 3, permette di disaccoppiare la dinamica istantanea della domanda di potenza chimica degli utenti CMV, $P_{UC}(t)$, (emissario del sistema di serbatoi S_{AM}) dalla dinamica istantanea della potenza elettrica $P_{SE}(t) = P_{TP.P_1}(t) - P_{UE.P_1}(t)$ (che, nelle fasi di esubero elettrico della catena CEE, pilota il valore istantaneo della portata di metanolo all'ingresso del sottosistema di serbatoi S_{AM}).

Ne consegue che la potenza elettrica istantanea $P_{SE}(t)$ può liberamente fluttuare attorno al suo valor medio, senza che venga alterata l'efficienza con la quale essa viene convertita in metanolo.

Per converso, la domanda di potenza elettrica degli utenti statici (utenti CEE), $P_{UE.P_1}(t)$, può essere soddisfatta con la massima efficienza soltanto se, istante per istante, la potenza elettrica ricavabile in testa alle catene (somma delle componenti EEN e ECN) è maggiore o al massimo uguale alla domanda della catena CEE.

Se denominiamo con $P_{TP.P_1}(t)$ la somma istantanea delle potenze elettriche istantanee prodotte dai BP del SEIS (ricavate dalle componenti EEN ed ECN) nel punto P_1 di figura 2, per effetto dell'architettura funzionale del SEIS, dunque, la domanda di energia di entrambe le catene energetiche del SEIS può essere soddisfatta con la massima efficienza se, in un intervallo di tempo T sufficientemente lungo (vedi figura 4):

- Il valor medio della potenza elettrica $P_{TP.P_1}(t)$, $\left[\bar{P}_{TP.P_1}\right]_T$, è uguale al valore medio del fabbisogno totale di potenza elettrica delle due catene del SEIS, $\left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T$, cioè:

$$\left[\bar{P}_{TP.P_1}\right]_T = \left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T = \left[\bar{P}_{UE.P_1}\right]_T + \left[\bar{P}_{UC.P_1}\right]_T \quad (8)$$

Come mostra la figura 4, questa condizione significa che i valori istantanei della potenza elettrica, $P_{TP.P_1}(t)$, dovranno distribuirsi attorno al valor medio $\left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T$ in modo che il valor medio della funzione $P_{TP.P_1}(t)$, $\left[\bar{P}_{TP.P_1}\right]_T$, coincida con il valor medio $\left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T$, (linea orizzontale blu tratteggiata di figura 4).

2. per nessun valore di $t \in T$, la potenza elettrica istantanea prodotta dai BP del SEIS, $P_{TP.P_1}(t)$, è inferiore alla domanda istantanea della catena CEE $P_{UE.P_1}(t)$, cioè:

$$P_{TP.P_1}(t) \geq P_{UE.P_1}(t), \text{ per ogni } t \in T \quad (9)$$

Questa condizione significa che il SEIS deve includere funzioni che permettano di regolare la potenza elettrica istantanea totale, $P_{TP.P_1}(t)$, in modo che essa sia sempre in grado di soddisfare in tempo reale la domanda istantanea della catena CEE, $P_{UE.P_1}(t)$.

5.3 Variabilità della potenza elettrica inviluppo in testa alle catene CEE e CMV

Poiché $P_{TP.P_1}(t)$ è la potenza inviluppo prodotta da varie tipologie di FER, dobbiamo verificare se sia possibile dimensionare il contributo di ciascuna tipologia di FER in modo che l'andamento nel tempo della potenza inviluppo $P_{TP.P_1}(t)$ soddisfi le due condizioni (8) e (9) in un intervallo di tempo T abbastanza lungo.

La trattazione sviluppata nel capitolo 12.2.6 ([2]) mostra che, almeno in linea teorica, ciò è effettivamente possibile.

Se si analizzano i potenziali produttivi delle diverse FER e le specifiche caratteristiche di variabilità di ciascuna tipologia di FER si può facilmente verificare che le FER sfruttabili sono classificabili, in base alla loro variabilità, in quattro distinte frazioni. A grandi linee, il quadro che se ne ricava è il seguente:

1. **Frazione EEN-NAC**, $P_{NAC.P_1}(t)$.

E' costituita dalle FER idraulica ad acqua fluente e dalla FER geotermica.

Queste due FER appartengono alla categoria EEN-NA, dal momento che le forme energetiche sorgenti non sono accumulabili e la potenza da esse ricavabile è **pressoché costante** nel tempo o, al più, lentamente variabile.

In prima approssimazione possiamo considerare costante nel tempo questa frazione di potenza e identificarla con l'acronimo EEN-NAC. Ne consegue che, qualunque sia l'incidenza del valore medio di questa frazione, $\bar{P}_{NAC.P_1}$, sul valore medio totale $\bar{P}_{TP.P_1}$, questa frazione non contribuisce significativamente alla variabilità di $P_{TP.P_1}(t)$.

Le fonti più ottimistiche stimano che il potenziale di questa sottofrazione a scala mondiale sia dell'ordine di $\left[\bar{P}_{NAC.P_1}\right]_T = 3.000 W_E / ab$, corrispondente a circa il 178% del fabbisogno medio pro-capite $\left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T$. Tuttavia la quota effettivamente sfruttabile non potrà che essere assai più piccola.

Possiamo stimare che la potenza elettrica media pro-capite realisticamente ricavabile da queste tipologie di FER, $\left[\bar{P}_{NAC.P_1}\right]_T$, non superi il 5-10% del fabbisogno medio pro-capite $\left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T$.

2. **Frazione eolica**. La potenza elettrica ricavata da FER eolica fa parte della categoria EEN-NA. Essa ha una notevole variabilità nel tempo (vedi [3], A14). In un SEIS sufficientemente esteso la potenza elettrica inviluppo ricavata da questa FER, $P_{\Sigma_e}(t)$, sarà la somma istantanea di n contributi provenienti da altrettanti campi eolici dislocati a distanza più o meno grande l'uno dall'altro.

Come illustrato in [3], capitolo A14, per valori di n sufficientemente grandi i valori istantanei della potenza involuppo, $P_{\Sigma_e}(t)$, tenderanno a fluttuare attorno al valor medio $\mu_{\Sigma_e} = \bar{P}_{\Sigma_e}$ e, in un intervallo di tempo T sufficientemente lungo, presenteranno valori inferiori a una soglia $P_S = \kappa \cdot \mu_{\Sigma_e}$ (con $0 < \kappa < 1$) soltanto per un tempo totale T_f , esprimibile come frazione f del tempo totale T ($T_f = f \cdot T$). L'entità della frazione f diminuisce con la diminuzione di κ , con l'aumento di n e con l'aumento della distanza fra i siti eolici sul territorio. Nell'ipotesi semplificata che ciascuno degli n campi eolici generi una stessa potenza elettrica media $\bar{P}_e = \mu$ e sia soggetto a regime di vento statisticamente indipendente dal regime di vento al quale sono soggetti tutti gli altri campi eolici, i valori della potenza elettrica involuppo $P_{\Sigma_e}(t)$ si distribuiscono secondo una densità di probabilità gaussiana nella quale il rapporto fra deviazione standard σ_{Σ_e} e valor medio μ_{Σ_e} sono legati dalla relazione (vedi [3], A14):

$$\frac{\sigma_{\Sigma_e}}{\mu_{\Sigma_e}} < \frac{3,0}{\sqrt{n}}$$

In questo quadro di ipotesi se $n = 400$, allora $\frac{\sigma_{\Sigma_e}}{\mu_{\Sigma_e}} < \frac{3,0}{20} = 0,15$, cioè i valori che la potenza elettrica istantanea involuppo $P_{\Sigma_e}(t)$ può assumere in un intervallo di tempo sufficientemente lungo risultano:

- inferiori a una soglia $0,7 \cdot \mu_{\Sigma_e}$ (70% del valor medio μ_{Σ_e}) per non più del 2,28% del tempo;
- inferiori a una soglia $0,55 \cdot \mu_{\Sigma_e}$ (55% del valor medio μ_{Σ_e}) per non più dello 0,14% del tempo.

Se invece $n = 900$, allora $\frac{\sigma_{\Sigma_e}}{\mu_{\Sigma_e}} < \frac{3,0}{20} = 0,10$, cioè i valori che la potenza elettrica istantanea involuppo $P_{\Sigma_e}(t)$ può assumere in un intervallo di tempo sufficientemente lungo risultano:

- inferiori a una soglia $0,8 \cdot \mu_{\Sigma_e}$ (80% del valor medio μ_{Σ_e}) per non più del 2,28% del tempo;
- inferiori a una soglia $0,7 \cdot \mu_{\Sigma_e}$ (70% del valor medio μ_{Σ_e}) per non più dello 0,14% del tempo.

In conclusione: almeno in linea teorica, agendo sul numero n di campi eolici e sulla loro distribuzione territoriale si può ottenere una variabilità della potenza elettrica involuppo $P_{\Sigma_e}(t)$ tale che i valori di $P_{\Sigma_e}(t)$ siano inferiori a una data frazione κ del valor medio \bar{P}_{Σ_e} per non più di una frazione f dell'intervallo di tempo T .

Si stima che il potenziale sfruttabile a scala mondiale dalla FER eolica sia all'incirca $\left[\bar{P}_{TP.P_1}^{Eolico} \right]_T = 3.100 W_E / ab$, corrispondente a quasi il doppio del fabbisogno medio pro-capite $\left[\bar{P}_{FE.P_1} \right]_T$.

3. **Frazione solare.** La potenza elettrica ricavata da FER solare fa parte della categoria EEN-NA. Essa ha una notevole variabilità nel tempo (vedi [3], A13). In un SEIS sufficientemente esteso, la potenza elettrica involuppo ricavata dalla FER solare, $P_{\Sigma_s}(t)$, è la somma istantanea di un grande numero di contributi di potenza elettrica provenienti da campi solari dislocati a distanza più o meno grande l'uno dall'altro. Come illustrato in [3], capitolo A13, se $P_{\Sigma_s}(t)$ (frazione EEN-NA ricavata da solare) è il valore della potenza elettrica involuppo prodotta da n campi solari, se gli n campi solari del SEIS

hanno la stessa superficie attiva e se $P_s^{[S]}(t)$ è la potenza elettrica istantanea generata da ciascuno di essi in condizioni di cielo uniformemente sereno, la potenza istantanea involuppo in condizioni di cielo uniformemente sereno, $P_{\Sigma_s}^{[S]}(t)$, sarebbe data grossolanamente da

$$P_{\Sigma_s}^{[S]}(t) = n \cdot P_s^{[S]}(t).$$

In altre parole, in condizioni di cielo uniformemente sereno, i contributi degli n campi solari tenderanno a sommarsi in fase, dando luogo a valori deterministicamente nulli all'esterno delle finestre di irraggiamento diurno e a un valore di picco deterministicamente al centro della finestra di irraggiamento diurno⁹.

Le variazioni locali della trasparenza dell'atmosfera inducono localmente una attenuazione dell'irraggiamento solare diretto a terra, per cui i valori dei contributi istantanei di potenza elettrica prodotti dai singoli campi solari potranno discostarsi più o meno profondamente dai valori corrispondenti a cielo sereno e gli effetti perturbanti della variabilità locale della trasparenza atmosferica tenderanno a sommarsi statisticamente.

Se i campi solari sono in grado di captare in modo ottimale sia la componente normale diretta che la componente diffusa dell'irraggiamento solare, se il numero dei campi solari, n , è sufficientemente grande e se ciascuno degli n campi solari è soggetto a trasparenza atmosferica statisticamente indipendente dalla trasparenza atmosferica alla quale sono soggetti tutti gli altri campi solari, le perturbazioni locali dell'irraggiamento (indotte dalle variazioni locali della trasparenza dell'atmosfera) tenderanno a presentarsi come insieme di variabili

stocastiche, per cui i valori istantanei che la potenza elettrica istantanea involuppo $P_{\Sigma_s}(t)$ può assumere tenderanno ad essere, con elevata confidenza, maggiori di un valore minimo $[P_{\Sigma_s}(t)]_{min} \geq 0,1 \cdot P_{\Sigma_s}^{[S]}(t)$. D'altra parte, poiché la potenza istantanea dell'irraggiamento solare a

cielo sereno si concentra deterministicamente nella finestra di irraggiamento diurno, se $[\overline{P}_{\Sigma_s}]_T$ è il valor medio della potenza elettrica prodotta dalla frazione solare in un intervallo di tempo T sufficientemente lungo, il picco di $P_{\Sigma_s}(t)$ al centro della finestra di irraggiamento diurno tenderà con elevata confidenza ad avere valori non inferiori alla metà di $[\overline{P}_{\Sigma_s}]_T$ (vedi [2], paragrafi 12.2.5.3 e 12.2.6.3), cioè, con elevata confidenza, sarà:

$$[P_{\Sigma_s}(t)]_p \geq \frac{[\overline{P}_{\Sigma_s}]_T}{2}$$

In conclusione: almeno in linea teorica, agendo sul numero n di campi solari e sulla loro distribuzione territoriale si può ottenere una variabilità della potenza elettrica involuppo $P_{\Sigma_s}(t)$ tale che i valori di picco della potenza involuppo nella finestra di irraggiamento diurno siano, con elevata confidenza, non inferiori al 50% della potenza media involuppo $[\overline{P}_{\Sigma_s}]_T$ e i valori istantanei della potenza elettrica involuppo $P_{\Sigma_s}(t)$ siano, con elevata confidenza:

$$P_{\Sigma_s}(t) \geq [P_{\Sigma_s}(t)]_{min} \geq 0,1 \cdot P_{\Sigma_s}^{[S]}(t)$$

Si stima che la potenza elettrica media pro-capite ricavabile a scala mondiale dalla FER solare sia maggiore di $8.300 W_E / ab$, corrispondente a circa 5 volte il fabbisogno medio pro-capite $[\overline{P}_{FE,P}]_T$.

⁹ Ovviamente questo è vero solo in prima approssimazione. Le differenze di latitudine e longitudine dei siti che ospitano i diversi campi solari determineranno sfasamenti temporali fra i contributi degli n campi solari, con l'effetto di allargare la finestra diurno della potenza elettrica involuppo e di appiattirne leggermente la sezione corrispondente alle ore centrali del giorno.

4. **Frazione accumulabile** (EEN-A e ECN). Questa frazione è ricavata da FER idraulica a bacino¹⁰, da RUI e da scarti di biomasse (ECN). Essa è completamente controllabile, per cui il suo andamento nel tempo, $P_A(t)$, può essere deterministicamente regolato allo scopo di compensare gli stati di deficit elettrico eventualmente indotti dalla variabilità della potenza iniluppo prodotta dalle frazioni eolica e solare.
- Come illustrato nel paragrafo 11.2.2 di [2], la componente ECN (RUI e scarti di biomasse) produce CO₂-ZE per la catena CMV. Pertanto, l'entità della potenza minima elettrica che deve essere ricavata dalla frazione ECN è fissata dal fabbisogno di potenza elettrica della catena CMV e dalla efficienza di conversione della frazione ECN in energia elettrica. Con i valori di efficienza stimati nei capitoli 9 e 10 di [1] e ipotizzando un fabbisogno energetico di livello TFE (capitoli 11 e 12 di [2]) per la catena CMV del SEIS, la frazione di potenza elettrica da ECN inciderebbe per almeno il 3% del fabbisogno medio di potenza pro-capite dell'insieme delle catene del SEIS, cioè per almeno 48 W/ab nel punto P₁.
- L'altra sottofrazione accumulabile, la FER idraulica a bacino, ha un potenziale produttivo medio pro-capite, su scala globale, non superiore a circa 40 W/ab, nel punto P₁, cioè inciderebbe, in uno scenario di fabbisogno TFE, per non più del 2,3% del fabbisogno medio di potenza pro-capite dell'insieme delle catene del SEIS. Dunque, il valore medio della frazione accumulabile, $\left[\overline{P_A(t)}\right]_T$, inciderebbe sul fabbisogno medio totale delle due catene del SEIS, $\left[\overline{P_{FE,P_1}}\right]_T$, per il 5% circa.

Nella tabella 1 sono sintetizzate le considerazioni qui sviluppate.

Frazione	Potenziale (in % del fabbisogno)	Caratteristiche di variabilità	Incidenza sulla variabilità della potenza iniluppo $P_{TP,P_1}(t)$
EEN-NAC	5-10%	Quasi costante	Trascurabile
EEN-NA eolica	Circa 200%	Confinabile, con confidenza definita, entro una fascia di ampiezza $\Delta P_e = k \cdot \overline{P_{\Sigma e}}$ attorno al valor medio di lungo termine $\overline{P_{\Sigma e}}$	Entro una fascia $\Delta P_e = k \cdot \overline{P_{\Sigma e}} = k \cdot k_e \cdot \overline{P_{FE,P_1}}$, dove k_e è l'incidenza della frazione eolica sul fabbisogno $\overline{P_{FE,P_1}}$
EEN-NA solare	>500%	Concentrata nella finestra diurna. Nella finestra diurna: confinabile, con elevata confidenza, al di sopra di una curva a campana con picco $\left[P_{\Sigma s}(t)\right]_p$ non inferiore al 50% della potenza media iniluppo $\overline{P_{\Sigma s}}$	Contributo nullo all'esterno della finestra diurna. All'interno della finestra diurna: andamento non inferiore a una curva a campana con picco $\left[P_{\Sigma s}(t)\right]_p \geq 0,5 \cdot \left[\overline{P_{\Sigma s}}\right]_T \approx 0,5 \cdot k_s \cdot \overline{P_{FE,P_1}}$, dove k_s è l'incidenza della frazione solare sul fabbisogno $\overline{P_{FE,P_1}}$
EEN-A + ECN	Almeno 5%	Deterministicamente controllabile	Deterministicamente controllabile

Tabella 1. *Caratteristiche di variabilità delle frazioni di potenza elettrica originate dalle diverse tipologie di FER e loro incidenza sulla variabilità della potenza elettrica iniluppo $P_{TP,P_1}(t)$*

E' del tutto evidente che la variabilità nel tempo della potenza elettrica iniluppo $P_{TP,P_1}(t)$ è condizionata unicamente dalla variabilità delle potenze elettriche prodotte dalle frazioni eolica e solare.

¹⁰ Può essere considerata parte di questa frazione anche la FER "Idraulico a doppio bacino", che è particolarmente adatta a convertire l'energia prodotta da FER con regime di produzione altamente variabile (ad esempio energia solare) in una forma energetica completamente controllabile (energia potenziale gravitazionale).

Se il territorio del SEIS è sufficientemente esteso, è teoricamente possibile distribuire i campi eolici e solari sul territorio in modo da ottenere che:

1. la variabilità della frazione eolica sia confinata, con una desiderata confidenza, in una fascia ΔP_e di ampiezza $\Delta P_e \leq k \cdot \bar{P}_{\Sigma e} = k \cdot k_e \cdot \bar{P}_{FE.P_1}$, dove $k = \frac{\Delta P_e}{\bar{P}_{\Sigma e}}$ e $k_e = \frac{\bar{P}_{\Sigma e}}{\bar{P}_{FE.P_1}}$;
2. Il contributo della frazione solare nella finestra di irraggiamento diurno non sia inferiore a una curva a campana con picco $[P_{\Sigma s}(t)]_p \geq 0,5 \cdot \bar{P}_{\Sigma s} \approx 0,5 \cdot k_s \cdot \bar{P}_{FE.P_1 T}$, dove $k_s = \frac{\bar{P}_{\Sigma s}}{\bar{P}_{FE.P_1}}$.

5.4 Configurazioni ottimali del SEIS

La trattazione sviluppata nel paragrafo 12.2.6 di [2] mostra che in un territorio sufficientemente esteso vi sono ampi margini per dimensionare i contributi delle diverse FER in modo da realizzare "configurazioni ottimali" del SEIS, cioè configurazioni che:

1. Soddisfano le condizioni (8) e (9), cioè assicurano che la potenza elettrica primaria, $P_{TP.P_1}(t)$, sia utilizzata con la massima efficienza lungo l'intero sviluppo delle due catene CMV e CEE;
2. Permettono di minimizzare le immobilizzazioni nelle infrastrutture di captazione, compatibilmente con il mix di FER sfruttabili.

In uno scenario TFE, per esempio, se la frazione EEN-NAC e la frazione accumulabile possono offrire ciascuna un contributo di potenza media dell'ordine del 5% del fabbisogno totale $[\bar{P}_{FE.P_1}]_T$, sono tecnicamente realizzabili configurazioni ottimali nelle quali la frazione solare può incidere dallo 0% fino a un massimo di 25% del fabbisogno totale $[\bar{P}_{FE.P_1}]_T$ mentre la quota residua, variabile fra il 90% e il 65% del fabbisogno totale $[\bar{P}_{FE.P_1}]_T$, è ricavata dall'eolico.

Naturalmente se la frazione EEN-NAC e quella accumulabile possono assicurare, nel loro insieme, un contributo maggiore del 10%, potrà corrispondentemente diminuire la quota affidata alle altre due frazioni.

5.5 Criteri di gestione del potenziale produttivo primario

Come illustrato nei paragrafi 12.2.5 e 12.2.6 di [2], se:

- il territorio del SEIS è sufficientemente esteso;
- i contributi delle diverse tipologie di FER sono dimensionati opportunamente;
- le infrastrutture di captazione delle frazioni di potenza eoliche e solari sono distribuite opportunamente sul territorio del SEIS...

..... allora sono realizzabili molteplici configurazioni ottimali del SEIS. Poiché tali configurazioni sono alimentate da un mix di FER, ciascuna con specifiche caratteristiche di variabilità e accumulabilità, all'interno dei nodi energetici (NEI) dovranno essere implementati opportuni meccanismi funzionali che permettano di sfruttare al meglio tali caratteristiche di variabilità e accumulabilità in modo da soddisfare le condizioni (8) e (9).

Tali meccanismi funzionali hanno il compito di combinare dinamicamente i contributi delle quattro frazioni di potenza:

- $P_{NAC}(t) \approx \bar{P}_{NAC}$, frazione con regime di produzione pressoché costante, da assorbire sempre, al massimo del potenziale producibile;
- $P_{\Sigma eolico}(t)$, frazione con variabilità dipendente dalla distribuzione territoriale dei campi eolici, con valore medio $\bar{P}_{\Sigma eolico}$, da assorbire sempre, al massimo del potenziale producibile;
- $P_{\Sigma solare}(t)$, frazione con variabilità dipendente dalla distribuzione dei campi solari sul territorio, con valore medio $\bar{P}_{\Sigma solare}$, da assorbire sempre, al massimo del potenziale producibile;
- $P_A(t)$, frazione ricavabile da FER accumulabili, cioè:
 - dalle FER della componente ECN (RUI e scarti di biomasse), $P_{EED2}(t)$;
 - dalle FER della frazione EEN-A (idraulico a bacino), $P_{EEN-A}(t)$;
 - dalla riconversione in energia elettrica di metanolo $P_{EED1}(t)$.

La produzione di questa quota verrebbe attivata per lo più in caso le altre frazioni siano complessivamente insufficienti a coprire la domanda istantanea della catena CEE (deficit elettrico della catena CEE). Per tutta la durata dello stato di deficit elettrico della catena CEE l'entità della frazione $P_{TP,P_i}^A(t)$ prodotta verrebbe regolata in modo da coprire esattamente il deficit.

I meccanismi necessari per la gestione dinamica dei contributi delle diverse frazioni di potenza elettrica possono essere rappresentati funzionalmente come mostra la figura 5 (confronta con figura 2).

Come si vede, il blocco funzionale BP-E è qui sdoppiato in due sottoblocchi (BPE-A, che rappresenta le infrastrutture che producono la frazione A, e BPE-NA, che rappresenta le infrastrutture che producono la frazione NA). La rappresentazione con due sottoblocchi separati permette di mettere in evidenza che la frazione NA ($P_{EEN-NA}(t) = P_{NAC}(t) + P_{\Sigma eolico}(t) + P_{\Sigma solare}(t)$) deve essere assorbita dal SEIS sempre al massimo delle sue potenzialità, mentre la frazione A ($P_{EEN-A}(t)$, potenza elettrica da idraulico) deve essere prodotta su comando, solo quando la frazione NA è insufficiente a coprire la domanda elettrica degli utenti statici, $P_{UE}(t)$.

Quando il SEIS è in esubero elettrico, cioè quando la frazione $P_{EEN-NA}(t)$ assume valori maggiori della domanda di potenza dell'utenza statica (cioè quando $P_{EEN-NA}(t) > P_{UE}(t)$), il surplus elettrico

$P_{SE}(t) = P_{EEN-NA}(t) - P_{UE}(t)$ viene deviato da una apposita funzione (rappresentata in figura 5 dal blocco funzionale SPE, Scolmatore di Potenza elettrica in Esubero):

- a. verso il segmento chimico dei NEI, per la sua conversione (S1) in energia chimica (metanolo) e l'accumulo nel sottosistema S_{AM} ;
- b. verso sistemi di accumulo idraulico a doppio bacino (non illustrato in figura 5, per non appesantire il disegno).

Quando il SEIS è in deficit elettrico, cioè quando la frazione $P_{EEN-NA}(t)$ assume valori minori della domanda di potenza dell'utenza statica (cioè quando $P_{EEN-NA}(t) < P_{UE}(t)$), la quota di potenza elettrica mancante $P_{\Delta}(t) = P_{UE}(t) - P_{EEN-NA}(t)$ deve essere fornita dalla frazione $P_A(t)$, frazione ricavabile da FER accumulabili.

In figura 5 il blocco funzionale CPA (Combinatore di Potenza Accumolata), ha il compito di comandare la produzione di potenza elettrica per conversione delle diverse FER accumulabili. Questo blocco attiva/disattiva i sistemi di conversione delle FER accumulati, in modo da coprire esattamente il deficit elettrico CEE, $P_{\Delta}(t)$, cioè la porzione della domanda di potenza elettrica CEE che la potenza

istantanea della frazione NA, $P_{EEN-NA}(t)$, non è in grado di coprire.

Per questa ragione, in figura 5 al CPA fanno capo le potenze elettriche ricavabili per conversione di:

- c. Scarti di biomasse, EED2B;
- d. Rifiuti urbani indifferenziati, EED2R;
- e. Energia idraulica (a bacino o doppio bacino), EEN-A;
- f. Energia chimica (metanolo), EED1.

Per i criteri con i quali i blocchi SPE e CPA operano in tandem, si rimanda al paragrafo 3.1.

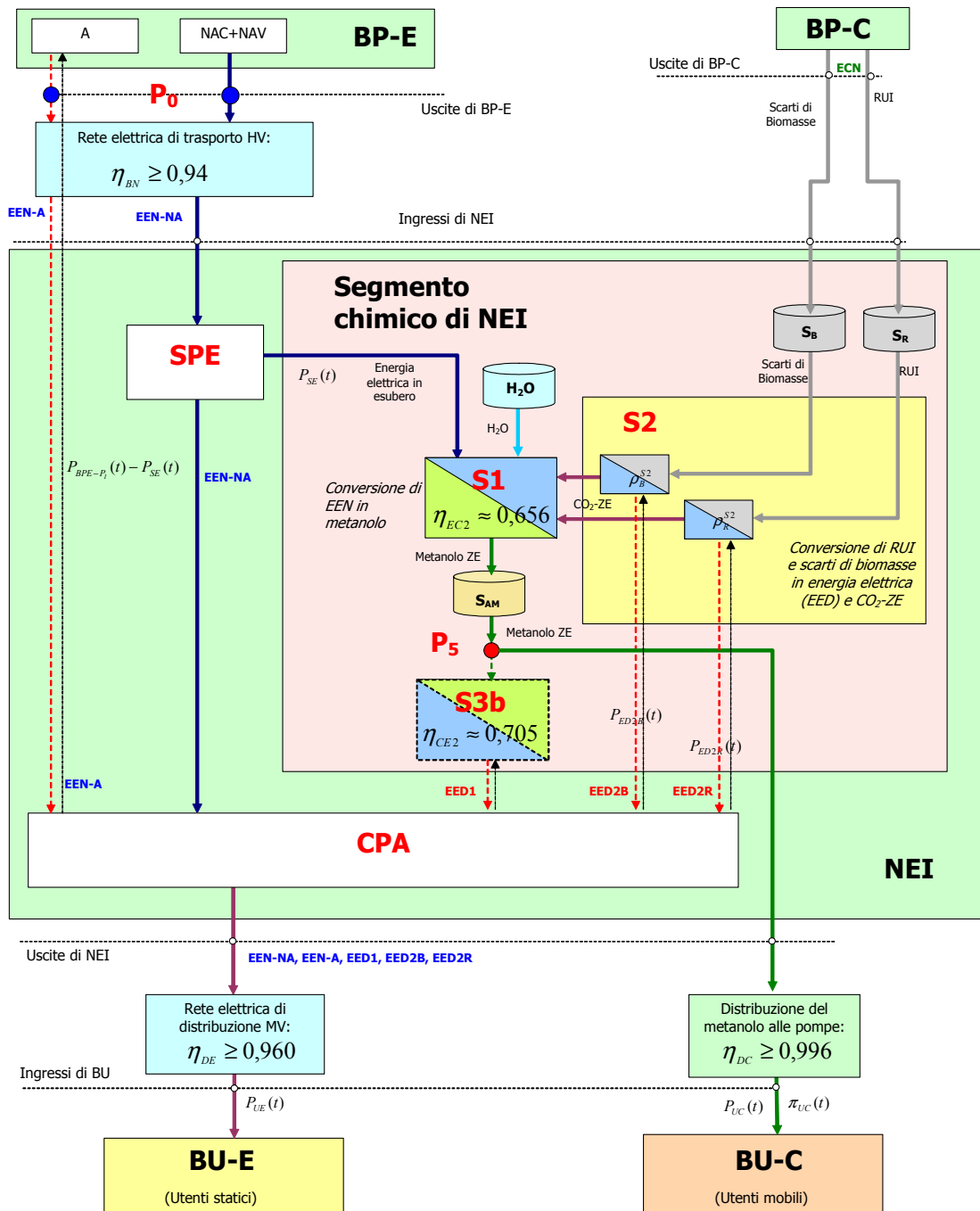


Figura 5. Schema a blocchi del SEIS per la gestione delle fasi di deficit/esubero elettrico.

Le funzioni SPE e CPA cooperano per gestire:

- nelle fasi di esubero elettrico: ripartizione della potenza elettrica fra le catene CEE e CMV;
- nelle fasi di deficit elettrico: compensazione del deficit mediante conversione in energia elettrica di energia accumulata (EEN-A, EED1, EED2).

6. Il SEIS: sostenibilità, impatto sul territorio

6.1 Sostenibilità del SEIS

Il SEIS è sostenibile soltanto se le condizioni per soddisfare il fabbisogno di energia elettrica degli utenti CEE e quello di metanolo degli utenti CMV si mantengono inalterate nel lungo termine. L'analisi sviluppata nel paragrafo 12.3 di [2] mostra che, in conseguenza della sua architettura e della sua dipendenza esclusiva dalle FER, il SEIS è sostenibile se sono sostenibili:

1. il fabbisogno di CO₂-ZE per la sintesi del metanolo per la catena CMV;
2. il fabbisogno di energia elettrica da eolico e solare degli utenti delle due catene del SEIS.

6.1.1 Sostenibilità del fabbisogno di CO₂-ZE della catena CMV

In base all'architettura del segmento chimico del SEIS, il fabbisogno annuo pro-capite di metanolo per la catena CMV, f_{CH_3OH} , ha una dipendenza lineare dal fabbisogno di CO₂-ZE richiesto per la sintesi del metanolo stesso. Nel quadro di ipotesi assunto nel paragrafo 11.1.3 ([2]), il fabbisogno annuo di CO₂-ZE, f_{CO_2-ZE} , non sarebbe superiore a 1.123 kg/ab . Una parte di questo fabbisogno potrebbe agevolmente essere ricavato dal trattamento di RUI, la parte residua dal trattamento di scarti di biomasse. Nell'ipotesi che la quota coperta con il trattamento di RUI sia nulla, cioè che l'intero fabbisogno debba esser coperto con scarti di biomasse, e ipotizzando che la frazione massica di carbonio contenuta in media negli scarti di biomasse sia del 45%, il fabbisogno annuo di scarti di biomasse f_{SB} sarebbe non superiore a 936 kg/ab .

Poiché il territorio pro-capite disponibile per la produzione di biomasse è intrinsecamente limitato e la produttività specifica di un territorio, p_B (in kg di biomassa per ettaro), varia notevolmente in funzione delle latitudini, delle caratteristiche orografiche, della fertilità dei terreni, della disponibilità di acqua, ecc., la frazione di biomassa assorbita dal SEIS non può essere sostenibile se essa incide troppo sul totale della biomassa prodotta annualmente dal territorio del SEIS. Idealmente, se d è la densità della popolazione nel territorio del SEIS (in abitanti per ettaro), e p_B è la produttività specifica del territorio del SEIS, la sostenibilità del SEIS sarebbe assicurata dalla condizione:

$$f_{SB} \cdot d \ll p_B \quad (10)$$

Se accettiamo il vincolo che la quota di CO₂-ZE da biomasse sia ricavata da **scarti di biomasse** e che tali scarti siano ricavati da biomassa prodotta senza particolari vincoli di fertilità del terreno, di orografia, di latitudine e di disponibilità di sistemi di irrigazione, allora dobbiamo accettare che la produttività specifica del territorio del SEIS, p_B , non possa essere forzata oltre i suoi limiti naturali.

In questo quadro di vincoli, la sostenibilità del fabbisogno di metanolo della catena CMV sarà assicurata soltanto se, come mostra la relazione (10), la densità della popolazione, d , e il fabbisogno annuo pro-capite di metanolo f_{CH_3OH} non cresceranno oltre un limite che comporti una incidenza eccessiva sulla biomassa totale prodotta annualmente nel territorio del SEIS.

L'assunzione di vincoli sulle grandezze d e f_{CH_3OH} è nella piena disponibilità della sfera politica.

Applicata al territorio dell'UE, l'analisi mostra che il fabbisogno annuo pro-capite di scarti di biomasse inciderebbe per meno del 15% sul totale delle biomasse prodotte annualmente, e potrebbe incidere ancor meno se una quota del fabbisogno di CO₂-ZE fosse ricavata dal trattamento di RUI.

6.1.2 Sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica delle catene CMV e CEE

Come illustrato in [2], paragrafo 12.2.3, le configurazioni del SEIS che soddisfano le relazioni (8) e (9), cioè le configurazioni di sistema che assicurano la massima efficienza di utilizzo della potenza elettrica primaria (configurazioni ottimali), assegnano alla frazione eolica la copertura della quota maggiore del fabbisogno totale di potenza elettrica primaria (dal 65% al 90%) e al solare una quota che può arrivare al massimo al 25%. Pertanto, la sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica primaria delle due catene di una configurazione del SEIS è garantita se, e solo se, le quote di tale fabbisogno assegnate all'eolico e al solare sono entrambe, e indipendentemente, sostenibili.

6.1.2.1 Sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica da eolico

Se d è la densità della popolazione sul territorio del SEIS (in abitanti per ettaro), f_e è il fabbisogno medio annuo pro-capite di potenza elettrica da eolico (in $kW/ab.$), e π_e è il potenziale produttivo medio di potenza elettrica da eolico ricavabile, per unità di superficie, dal territorio del SEIS (in kW/ha), allora il fabbisogno medio di potenza elettrica da eolico per unità di superficie del territorio del SEIS, F_e , si può esprimere sia come frazione k_e del fabbisogno medio di potenza elettrica primaria delle due catene del SEIS, \bar{p}_{FE,P_1} , che come frazione β_e del potenziale elettrico medio da eolico stimato per il territorio del SEIS, π_e , come mostra la relazione seguente:

$$F_e = f_e \cdot d = k_e \cdot \bar{p}_{FE,P_1} \cdot d = \beta_e \cdot \pi_e \quad (11)$$

Come appare evidente dalla relazione (11), il fabbisogno medio di potenza elettrica da eolico per unità di superficie del territorio, F_e , è sostenibile soltanto se $\beta_e \leq 1$.

In uno scenario TFE, i valori del fabbisogno F_e corrispondenti alla minima incidenza dell'eolico (65% del fabbisogno \bar{p}_{FE,P_1}) e della massima incidenza dell'eolico (90% del fabbisogno \bar{p}_{FE,P_1}), sarebbero:

$$F_e = k_e \cdot \bar{p}_{FE,P_1} = 0,9 \cdot \bar{p}_{FE,P_1} = 1.515 W/ab \quad k_e = 0,9 \quad \text{90\% del fabbisogno medio di potenza elettrica primaria coperto dall'eolico}$$

$$F_e = k_e \cdot \bar{p}_{FE,P_1} = 0,65 \cdot \bar{p}_{FE,P_1} = 1.094 W/ab \quad k_e = 0,65 \quad \text{65\% del fabbisogno medio di potenza elettrica primaria coperto dall'eolico}$$

Nel caso dell'Unione Europea, poiché $d = 108 ab/km^2 = 1,08 ab/ha$ e $\pi_e = 8,23 kW/ha$ ¹¹, il coefficiente β_e ricavabile dalla relazione (11) ha il valore:

$$\beta_e = \frac{k_e \cdot \bar{p}_{FE,P_1} \cdot d}{\pi_e} = \frac{1,515 \cdot 1,08}{8,23} = 0,199 \quad \text{per } k_e = 0,9;$$

$$\beta_e = \frac{k_e \cdot \bar{p}_{FE,P_1} \cdot d}{\pi_e} = \frac{1,094 \cdot 1,08}{8,23} = 0,144 \quad \text{per } k_e = 0,65.$$

In uno scenario TFE, dunque, sarebbe possibile realizzare configurazioni "ottimali" del SEIS nel territorio dell'Unione Europea sfruttando:

¹¹ European Environment Agency, Technical Report n. 6/2009
SEIS - Abstract Ed. 014.06.doc

1. non più del 20% del potenziale eolico dell'intero territorio per coprire il 90% del fabbisogno di potenza elettrica primaria delle due catene del SEIS;
2. non più del 15% del potenziale eolico dell'intero territorio per coprire il 65% del fabbisogno di potenza elettrica primaria delle due catene del SEIS.

Ciò significa che, in entrambi i casi, vi sarebbero ampi margini per scegliere i siti eolici in modo da contemperare la duplice esigenza di:

1. minimizzare le immobilizzazioni, dislocando i campi eolici nei siti con la migliore producibilità annua;
2. contenere al minimo la fascia di oscillazione della potenza elettrica aggregata, distribuendo i siti eolici in modo da ridurre il più possibile la correlazione statistica delle potenze elettriche generate nei diversi siti.

Naturalmente, eventuali miglioramenti tecnologici che aumentino l'efficienza con la quale l'energia eolica viene convertita in energia elettrica aumenterebbero la produttività π_e , per cui il coefficiente β_e si ridurrebbe in proporzione.

6.1.2.2 Sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica da solare

Se d è la densità della popolazione sul territorio del SEIS (in abitanti per ettaro), f_s è il fabbisogno medio annuo pro-capite di potenza elettrica da solare (in $kW/ab.$) e π_s è il potenziale produttivo medio di potenza elettrica da solare ricavabile, per unità di superficie, dal territorio del SEIS (in kW/ha), allora il fabbisogno medio di potenza elettrica da solare per unità di superficie, F_s , si può esprimere sia come frazione k_s del fabbisogno medio di potenza elettrica primaria delle due catene del SEIS, $\bar{p}_{FE.P_1}$, che come frazione β_s del potenziale produttivo medio di potenza elettrica da solare ricavabile dal territorio del SEIS, π_s , come mostra la relazione seguente:

$$F_s = f_s \cdot d = k_s \cdot \bar{p}_{FE.P_1} \cdot d = \beta_s \cdot \pi_s \quad (12)$$

Come appare evidente dalla relazione (12), il fabbisogno medio di potenza elettrica da solare per unità di superficie, F_s , è sostenibile soltanto se $\beta_s \ll 1$.

Nell'ipotesi di configurazione ottimale del SEIS in cui la frazione solare debba coprire il 25% del fabbisogno totale di potenza elettrica primaria, $\bar{p}_{FE.P_1}$, il fabbisogno F_s sarà dato dalla relazione:

$$F_s = k_s \cdot \bar{p}_{FE.P_1} = 0,25 \cdot \bar{p}_{FE.P_1} = 0,25 \cdot 1.683 W/ab = 421 W/ab$$

Nel caso dell'Unione Europea ($d = 108 ab/km^2 = 1,08 ab/ha$), se ipotizziamo che i campi solari abbiano una efficienza media di conversione $\eta = 0,17$, che siano distribuiti in modo che la potenza radiante solare media captata sia di circa $180 W/m^2$ (valore tipico della latitudine di Parigi) e che la superficie lorda occupata dai campi solari sia il triplo della superficie captante utile, allora i campi solari produrranno una potenza elettrica media $\pi_s = 102 kW/ha$ e il coefficiente β_s avrà il valore:

$$\beta_s = \frac{k_s \cdot \bar{p}_{FE.P_1} \cdot d}{\pi_s} = \frac{0,421 \cdot 1,08}{102} = 0,0045$$

Dunque, se nell'UE si adottasse una configurazione ottimale con $k_s = 0,25$ (25% del fabbisogno medio di potenza elettrica primaria coperto dal solare), basterebbe impegnare meno dello 0,45% del territorio (e meno dello 0,15% del potenziale energetico teorico da solare del territorio). Ciò significa che vi sarebbero ampi margini per dislocare le infrastrutture di captazione solari sul territorio in modo da contemperare la duplice esigenza di:

1. minimizzare le immobilizzazioni, dislocando i campi solari nei siti con la migliore producibilità annua (basse latitudini e bassa frequenza della copertura nuvolosa);
2. contenere al minimo la fascia di perturbazione della potenza elettrica aggregata attorno ai valori medi, distribuendo i campi solari sul territorio in modo da ridurre il più possibile la correlazione statistica fra le variabilità locali della trasparenza atmosferica al di sopra dei diversi campi solari.

Ovviamente, eventuali miglioramenti tecnologici che aumentino l'efficienza con la quale l'energia radiante solare viene convertita in energia elettrica aumenterebbero la produttività π_s , per cui il coefficiente β_s si ridurrebbe in proporzione.

6.1.3 Sostenibilità del SEIS: conclusioni

Come illustrato in [2], paragrafo 12.3.3 e come appare evidente dalle relazioni (10), (11) e (12), la sostenibilità del SEIS nel lungo termine sarà garantita se la densità della popolazione d , il fabbisogno medio annuo pro-capite di potenza elettrica per le due catene del SEIS, $\bar{p}_{FE.P_i}$, e il fabbisogno annuo pro-capite di scarti di biomasse per la sintesi del metanolo per la catena CMV, f_{SB} , (cioè il fabbisogno annuo pro-capite di metanolo, f_{CH_3OH}), saranno posti sotto controllo.

L'assunzione di vincoli sulle grandezze d , $\bar{p}_{FE.P_i}$ e f_{SB} è nella piena disponibilità della sfera politica.

D'altra parte, eventuali miglioramenti tecnologici che, a parità di superficie occupata dalle infrastrutture di captazione eoliche e/o solari, aumentino la potenza elettrica media prodotta riducono l'estensione delle infrastrutture di captazione (e dunque le immobilizzazioni) e assicurano un miglioramento della sostenibilità del SEIS. Come è ovvio, miglioramenti tecnologici di questo genere sono nella piena disponibilità della comunità scientifica, ma dovranno sempre essere soggetti ai più generali vincoli di compatibilità ambientale.

6.2 Densità delle infrastrutture di captazione

In uno scenario TFE, si può dimostrare che sul territorio dell'Unione Europea:

1. Se l'eolico dovesse coprire il 65% (90%) del fabbisogno totale del SEIS e tutte le infrastrutture di captazione fossero installate onshore, la densità delle infrastrutture di captazione eoliche sarebbe all'incirca di 420 kW nominali per km² (580 kW nominali per km²) e il territorio occupato da tali infrastrutture sarebbe una frazione non superiore allo 0,11% (0,15%) del territorio. Ovviamente questa frazione diminuirebbe, anche notevolmente, se una parte delle infrastrutture di captazione fosse installata offshore.
2. Se il solare dovesse coprire il 25% del fabbisogno totale del SEIS e se i campi solari:
 - a. avessero una efficienza media di conversione $\eta = 0,17$;
 - b. fossero distribuiti in modo che la potenza radiante solare media captata fosse di circa $180 \text{ W} / \text{m}^2$ (valore tipico della latitudine di Parigi)...

... allora le infrastrutture di captazione richieste avrebbero una densità netta di circa 1.400 m² di pannelli solari per ogni km² di territorio, e la superficie occupata corrisponderebbe a non più dello 0,14% del territorio.

Se ipotizziamo che gli impianti di captazione solari siano spazati in modo da occupare una superficie totale lorda tripla di quella captante netta, allora la frazione di territorio occupato sarebbe non superiore allo 0,42%.

3. In complesso la frazione del territorio che sarebbe occupata dalle infrastrutture di captazione eoliche e solari potrebbe variare da 0,15% (90% del fabbisogno totale del SEIS coperto da eolico, nessun contributo del solare) allo 0,53% (65% del fabbisogno totale del SEIS coperto da eolico, 25% coperto dal solare).

7. Transizione al SEIS

I principali requisiti di un **piano di transizione** dall'attuale sistema energetico al SEIS sono così sintetizzabili:

1. La transizione deve essere graduale e senza traumi;
2. La transizione deve essere tecnologicamente ed economicamente realistica, cioè:
 - a. deve basarsi sull'utilizzo di tecnologie mature o in fase avanzata di sviluppo;
 - b. deve assicurare la sostenibilità economica delle immobilizzazioni che devono essere effettuate;
3. La transizione deve permettere il massimo riutilizzo:
 - a. delle infrastrutture energetiche preesistenti;
 - b. delle competenze immateriali diffuse fra gli utilizzatori dell'attuale sistema energetico;
 - c. delle competenze tecnologiche e organizzative diffuse nella rete di soggetti economici che hanno gestito, fino ad oggi, la rete energetica.

Nel paragrafo 13.1 di [2] è descritto un piano di transizione che punta a soddisfare al meglio tutti questi requisiti.

Il piano è strutturato in due fasi indipendenti, temporalmente in serie l'una all'altra, e si articola complessivamente su un arco di 50-60 anni (figura 6).

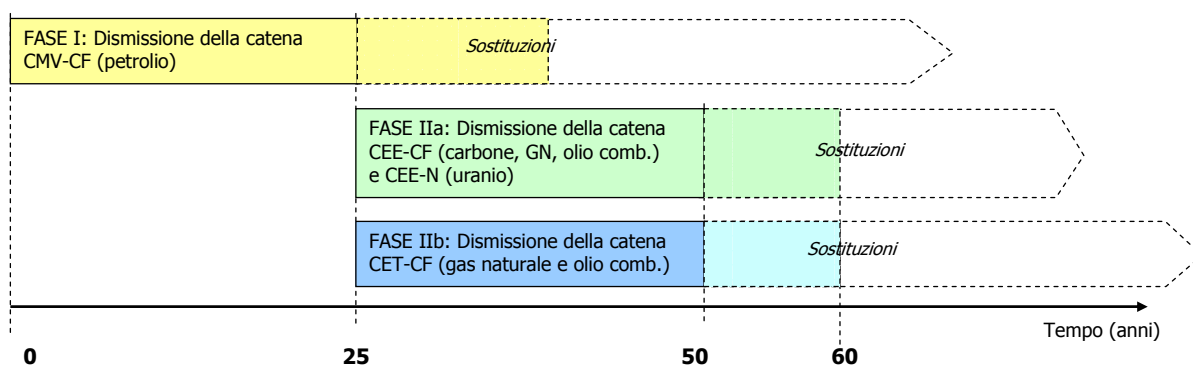


Figura 6. Articolazione in Fasi della transizione del SEIS.

7.1 Fase I: dismissione della catena CMV-CF

La Fase I ha l'obiettivo di dismettere l'intera catena della mobilità veicolare dell'attuale sistema energetico, basata sull'uso di prodotti della raffinazione del petrolio, e di sostituirla con la catena CMV del SEIS, basata sull'uso di metanolo di sintesi. Questo obiettivo è raggiungibile implementando un primo segmento della catena CMV del SEIS. A tale scopo il piano di transizione propone di procedere come segue:

1. Un sottoinsieme dei siti delle attuali centrali termoelettriche (in via prioritaria quelli delle centrali termoelettriche a carbone) viene scelto per ospitare i nodi energetici del SEIS (siti SEIS).
In ciascuno dei siti SEIS viene creato un embrione di nodo chimico (NC), corrispondente, funzionalmente, al sottosegmento S1 di figura 3. A questo embrione vengono attestate le infrastrutture di captazione eoliche (blocco BP-E di figura 7) che devono fornire l'energia elettrica in quantità sufficiente ad alimentare la produzione di metanolo per la catena CMV¹² del SEIS.
2. Ciascuna centrale termoelettrica dei siti SEIS viene ricondizionata, cioè viene attrezzata in modo che il comburente sia, invece che aria, una miscela di:
 - a. ossigeno puro (ricavato, come mostra la figura 7, dall'elettrolisi dell'H₂O che ha luogo nel blocco S1);
 - b. CO₂ di ricircolo (per moderare la temperatura di combustione).In questo modo, i prodotti di combustione della centrale termoelettrica contengono unicamente H₂O e CO₂ (e piccole quantità di ossigeno), per cui è possibile separare e catturare CO₂ con limitato dispendio energetico e, con tale CO₂, alimentare la sintesi del metanolo per la catena CMV. Dunque, nella Fase I la centrale termoelettrica svolgerebbe (transitoriamente) la funzione del sottosegmento S2 di figura 3.
3. L'energia elettrica proveniente dalle infrastrutture eoliche (BP-E di figura 7) viene utilizzata nel blocco S1 per dissociare elettroliticamente l'H₂O in H₂ e O₂. I prodotti dell'elettrolisi vanno ad alimentare:
 - a. la combustione dei CF nella centrale termoelettrica (O₂);
 - b. la sintesi del metanolo (H₂).
4. La sintesi del metanolo è alimentata con la CO₂ prodotta dalla centrale termoelettrica e dall'H₂ prodotto dall'elettrolisi (blocco S1).
5. Il metanolo di sintesi viene trasportato verso le stazioni di servizio con autobotti (con le stesse modalità già impiegate per le benzine). In ciascuna stazione di servizio viene installata una colonnina per il trasferimento del metanolo a bordo dei mezzi di trasporto (con le stesse modalità già impiegate per le benzine).

¹² Le tecnologie di captazione eoliche hanno raggiunto, già oggi, un notevole livello di maturazione, mentre le tecnologie per l'utilizzo efficiente del metanolo a bordo dei mezzi di trasporto (FC) non hanno ancora un soddisfacente livello di maturazione. È prevedibile, pertanto, che all'inizio della Fase I non saranno disponibili mezzi di trasporto alimentabili a metanolo. Ciononostante, mentre sarà in corso il perfezionamento delle tecnologie delle FC alimentabili a metanolo (es. SOFC), sarà comunque opportuno procedere con il dispiegamento delle infrastrutture di captazione eolica, dal momento che la potenza elettrica da esse prodotta può vantaggiosamente essere assorbita dall'utenza della catena CEE del sistema energetico attuale, in sostituzione di energia ricavabile da CF. Quando le tecnologie delle FC alimentabili a metanolo saranno sufficientemente mature, il dispiegamento del primo segmento chimico della catena CMV del SEIS e la produzione dei mezzi di trasporto alimentati a metanolo potrà procedere in parallelo, per cui l'esubero di potenza elettrica fornito dalle infrastrutture eoliche potrà essere progressivamente impiegato per la sintesi del metanolo per la catena CMV del SEIS, in stretta relazione con la domanda proveniente dall'effettiva utenza BU-C di tale catena.

6. In parallelo, vengono posti sul mercato mezzi di trasporto ad elevata efficienza, alimentabili con metanolo.
 Nel caso dei trasporti su gomma, i veicoli saranno equipaggiati con FC a metanolo (vedi requisiti in [3], paragrafo A7.2) e con funzione di recupero dell'energia in fase di frenata e di discesa.

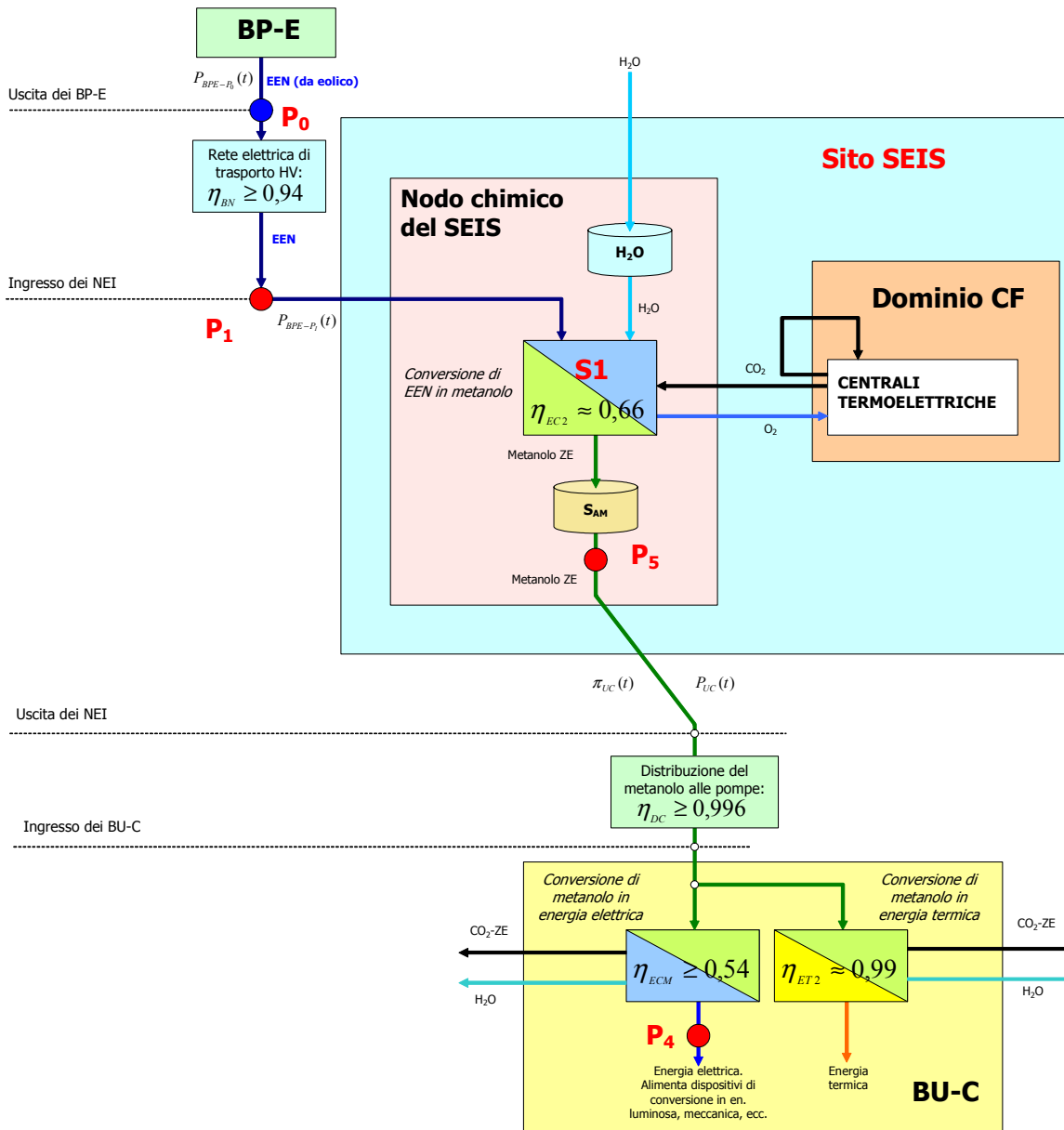


Figura 7. Quadro sintetico delle relazioni fra la catena CEE del dominio CF e la catena CMV del SEIS, nella Fase I della transizione.
 Le infrastrutture eoliche del SEIS (BP-E) forniscono l'energia elettrica per l'elettrolisi dell'H₂O e la susseguente sintesi del metanolo, che ha luogo in nodi chimici (NC) ospitati negli stessi siti che attualmente ospitano centrali termoelettriche del dominio CF (siti SEIS).
 Le centrali termoelettriche del dominio CF sono sottoposte a ricondizionamento in modo da poter utilizzare, come comburente, l'ossigeno puro (invece che ossigeno mescolato agli altri gas che compongono l'aria) prodotto dall'elettrolisi dell'acqua nel blocco S1. In tal modo i prodotti di combustione del ciclo termodinamico delle centrali termoelettriche sono unicamente CO₂ e H₂O, per cui la separazione della CO₂ (necessaria per la sintesi del metanolo destinato alla catena CMV del SEIS) prodotta dalla combustione richiede un consumo energetico molto contenuto.

Al termine della fase I (20-30 anni dall'inizio della transizione):

1. le emissioni di CO₂ della catena CMV sono azzerate (perché, come mostra la figura 7, la catena CMV ricicla e immette nell'atmosfera la CO₂ che, in assenza del SEIS, vi verrebbe immessa dalle centrali termoelettriche dei siti SEIS);
2. la domanda di derivati del petrolio per la mobilità veicolare è azzerata, con ciò eliminando alla radice la minaccia di crisi politica indotta dal picco di produzione del petrolio.

7.2 Fase II: dismissione delle catene CEE e CET dell'attuale sistema energetico

La Fase II, che viene avviata al termine della fase I (20-25 anni dall'inizio della fase I), ha l'obiettivo di dismettere:

1. la catena CEE (energia elettrica) dell'attuale sistema energetico, costituita dall'insieme del dominio CEE-CF (basato sull'uso di combustibili esauribili del dominio CF, cioè petrolio, gas naturale, carbone) e del dominio CEE-N (basato sull'uso di combustibili esauribili come l'uranio);
2. la catena CET (energia termica) dell'attuale sistema energetico, basata sull'uso predominante di combustibili esauribili del dominio CF (petrolio, gas naturale, carbone).

Le due catene vengono rimpiazzate con la catena CEE del SEIS.

L'implementazione della Fase II richiede sostanzialmente (confronta la figura 7 con la figura 2):

1. L'estensione delle infrastrutture di captazione dei BP-E. Questo include:
 - l'estensione delle infrastrutture di captazione eoliche;
 - il dispiegamento progressivo delle infrastrutture di captazione solari;
 - l'integrazione nel SEIS delle infrastrutture di captazione idrauliche e geotermiche;
 - l'integrazione nel SEIS delle infrastrutture di raccolta e concentrazione di RUI e di scarti di biomasse.
2. Il potenziamento eventuale delle infrastrutture di distribuzione di energia elettrica agli utenti (la rete di distribuzione deve coprire anche la domanda statica di energia termica¹³).
3. La dismissione delle centrali termoelettriche dei siti SEIS ed il contestuale completamento del segmento chimico della catena CMV.
Il completamento del segmento chimico consiste, come mostra la figura 2 (confronta con la figura 7), nella implementazione del sottosegmento S2 di figura 3, costituito dai sottosistemi per il trattamento di RUI e scarti di biomasse per ricavarne:
 - energia elettrica (per la catena CEE);
 - CO₂-ZE per la catena CMV.
4. L'implementazione, all'interno dei nodi SEIS, di funzioni per gestire dinamicamente la combinazione delle quattro frazioni di potenza elettrica prodotte dai BP.

¹³ Una stima grossolana indica che l'assorbimento medio di potenza elettrica di una pompa di calore con sonda atmosferica con COP=3 che debba riscaldare un appartamento di 100 m² con isolamento termico di classe A (cioè tale da richiedere meno di 30 kWh_T/anno·m²) non supererebbe i 250 W se il periodo di riscaldamento richiesto fosse di circa 6 mesi. Al crescere dei valori di COP, ovviamente, diminuirebbe l'assorbimento medio di potenza elettrica. Le migliori pompe di calore raggiungono ormai agevolmente valori COP=4.

In parallelo alla implementazione delle nuove funzionalità delle due catene del SEIS, lato utente vengono messe sul mercato pompe di calore ad alta efficienza (con sonde atmosferiche o geotermiche) e vengono posti in obsolescenza programmata i corrispondenti dispositivi alimentati a CF.

Già all'inizio della fase I viene inoltre attivato un piano di incentivazione delle misure di risparmio di energia termica (produzione di "negajoule") e di autoproduzione di energia termica ed elettrica nell'area dell'utenza. Il piano incentiva gli utenti del SEIS ad adottare misure per la produzione di "negajoule", cioè per ridurre il fabbisogno di energia elettrica che il SEIS dovrebbe soddisfare.

Più in dettaglio, il piano prevede incentivi affinché gli utenti del SEIS provvedano, gradualmente, a:

1. Isolare termicamente, con standard avanzati, gli edifici di nuova costruzione e gli edifici esistenti¹⁴;
2. Sostituire le lampade a incandescenza con lampade fluorescenti compatte (CFL);
3. Sostituire il parco di elettrodomestici e di apparati elettrici industriali con prodotti ad alta efficienza;
4. Dispiegare impianti solari termici per la produzione di acqua calda per uso sanitario;
5. Dispiegare impianti fotovoltaici su tetti e facciate.

Al termine della Fase II (40-60 anni dall'inizio della transizione):

1. Tutte le catene energetiche del dominio CF e del dominio nucleare da fissione sono dismesse e la loro utenza viene completamente servita dal SEIS¹⁵;
2. Le emissioni dell'intero sistema energetico non hanno più impatti sulla concentrazione atmosferica della CO₂;
3. I cicli della CO₂ e dell'H₂O sono chiusi, per cui l'intero SEIS è privo di impatti sulla biosfera;
4. La domanda di combustibili ricavati da CF per la mobilità veicolare, per la produzione di energia elettrica e per quella di energia termica è azzerata, scongiurando il rischio di crisi politica indotta dal picco di produzione del petrolio e del gas naturale;
5. I paesi privi di giacimenti di CF ma con adeguato potenziale di FER non sono più dipendenti dalle importazioni energetiche e possono finalmente cancellare dai loro bilanci i flussi monetari per l'acquisto all'estero di energia e per finanziare le avventure militari associate all'accaparramento dei residui giacimenti di CF.

¹⁴ Quella del "cappotto" applicato all'esterno degli edifici esistenti è una tecnica già ben sviluppata. Essa consente il ricondizionamento efficace degli edifici con costi contenuti.

¹⁵ Se l'estensione del territorio sul quale il SEIS viene dispiegato non fosse sufficientemente grande, per cui anche la migliore distribuzione delle infrastrutture di captazione non fosse in grado di assicurare con certezza che le condizioni (8) e (9) siano soddisfatte, un sottoinsieme di centrali termoelettriche alimentate con CF (preferibilmente gas naturale) dovrà essere mantenuto in attività anche al termine della Fase II, allo scopo di coprire deficit (saltuari) della catena CEE (vedi paragrafo 13.1.2.2 di [2]). L'allargamento progressivo del territorio del SEIS, tuttavia, ad un certo punto renderà possibile la dismissione completa delle catene energetiche del dominio CF.

7.3 Aspetti economici della transizione al SEIS.

Nel paragrafo 13.2 di [2] sono trattati gli aspetti economici della transizione, prendendo come riferimento il piano di transizione in due fasi descritto nel paragrafo 13.1 di [2].

La trattazione è basata sull'impatto che le dinamiche economiche sono destinate ad avere, in prospettiva, sull'attuale sistema energetico e sul SEIS. I due sistemi, infatti, sono dominati da dinamiche economiche divergenti:

1. L'attuale sistema energetico è intrinsecamente caratterizzato dalla tendenza all'aumento dei costi di produzione per unità di energia netta, per effetto dei seguenti fattori:
 - i costi di acquisizione dei CF in testa alle catene energetiche sono destinati a subire incrementi progressivi, a causa dell'inevitabile approssimarsi del picco di produzione dei combustibili fossili;
 - le immobilizzazioni richieste per ridurre l'impatto dell'uso dei CF sull'ambiente (pre-trattamento dei combustibili, cattura/sequestro della CO₂, smaltimento dei residui inquinanti, ecc.) e per la sicurezza dei reattori nucleari sono destinate ad aumentare;
 - i costi di esercizio e manutenzione sono destinati ad aumentare per effetto dell'aumento della complessità degli impianti (nucleare, cattura/sequestro della CO₂).
2. Lo scenario SEIS, al contrario, è intrinsecamente caratterizzato dalla tendenza alla diminuzione dei costi di produzione per unità di energia netta, per effetto dei seguenti fattori:
 - non vi sono costi significativi di acquisizione delle energie primarie (irraggiamento solare, energia del vento, ecc.) in testa alle catene energetiche;
 - l'entità delle immobilizzazioni per unità di potenziale energetico è destinata a diminuire nel tempo (per effetto dei miglioramenti tecnologici, dell'industrializzazione degli impianti di captazione e delle economie di scala);
 - i costi di esercizio e manutenzione degli impianti sono destinati a diminuire nel tempo, per effetto di economie di scala e dell'automazione progressiva delle procedure di esercizio e manutenzione.

Ne consegue che nel lungo termine, a parità di unità di energia utile per l'utente, i prezzi dell'energia che il SEIS potrà offrire sono destinati a diventare sempre più competitivi rispetto ai prezzi che l'attuale sistema energetico potrà offrire¹⁶.

Tenendo conto di queste dinamiche, la trattazione del paragrafo 13.2 di [2] mostra che, in uno "scenario ottimale", il livello di prezzi (per unità di energia netta all'utente) che assicurerebbe la sostenibilità economica del SEIS:

- per gli utenti della catena CMV sarebbe assai prossimo ai prezzi già sperimentati nello scenario CF¹⁷ in gran parte dei paesi europei e diventerebbe nettamente più vantaggioso (rispetto allo scenario CF) prima della fine della Fase I;
- per gran parte degli utenti della catena CEE sarebbe vantaggioso (rispetto allo scenario CF) già dall'inizio della Fase II.

¹⁶ Se si considerassero tutte le esternalità che, nell'attuale sistema energetico, i prezzi non incorporano (costi del disinquinamento, costi militari prevedibili per l'accaparramento delle riserve residue di CF, costi delle crisi politiche che i picchi di produzione dei CF innescheranno, impatti del caos climatico, effetti depressivi del drenaggio delle ricchezze nazionali per l'acquisto di CF, ecc.), già oggi il sistema energetico attuale non sarebbe in grado di offrire, a parità di energia utile, prezzi migliori di quelli che potrebbe offrire il SEIS.

¹⁷ Ricordiamo che la Fase I della transizione interesserebbe soltanto la catena CMV e che le infrastrutture di captazione del SEIS, nella Fase I, sarebbero esclusivamente eoliche.

7.3.1 Immobilizzazioni richieste dal SEIS

Nel paragrafo 12.2.6.10 di [2] si stima l'entità delle immobilizzazioni richieste per implementare l'insieme delle catene energetiche di un SEIS in una configurazione ottimale "onerosa", cioè tale da comportare il massimo delle immobilizzazioni per una configurazione ottimale.

Nella configurazione ottimale "onerosa" adottata nel calcolo, il mix di FER sfruttate è dimensionato in modo che, sul totale del fabbisogno medio di potenza elettrica primaria, $\left[\bar{P}_{FE.P_1}\right]_T$:

1. la frazione solare incida per il 25%;
2. la frazione eolica incida per circa il 65%;
3. la frazione accumulabile, cioè idraulico a bacino e frazione ECN (RUI e scarti di biomasse), incida per il 5%;
4. la frazione NAC (geotermico e idraulico ad acqua fluente) incida per il 5%.

In questo scenario, l'immobilizzazione pro-capite richiesta sarebbe non superiore a 15,5 k€/abitante. Una stima grossolana indica, inoltre, che le immobilizzazioni pro-capite necessarie nell'area dell'utenza (pompe di calore, mezzi di trasporto con motori elettrochimici) non potrebbero incidere per più di 10 k€/abitante.

Pertanto, se l'insieme delle immobilizzazioni richieste (non più di 25 k€/abitante nello scenario peggiore, cioè nello scenario ottimale "oneroso") fosse diluito sull'arco di alcuni decenni, la frazione del PIL annuo che esso assorbirebbe sarebbe nettamente inferiore a quella che la maggior parte delle economie industrializzate dovrà sopportare nei prossimi decenni (e senza soluzione di continuità) per effetto dei costi di approvvigionamento di CF¹⁸ e per effetto delle immobilizzazioni richieste per tenere in vita il dominio CF e nucleare dell'attuale sistema energetico¹⁹.

Una stima grossolana indica che, sotto opportune condizioni, il massimo sforzo finanziario non supererebbe l'importo di circa 10 k€/abitante, perché, nonostante l'entità delle immobilizzazioni, il SEIS non comporta tempi di implementazione particolarmente lunghi (le infrastrutture messe in opera possono produrre rapidamente ricavi). Raggiunto questo livello di immobilizzazioni (non più tardi della fine della fase I), il sistema assicurerebbe margini adeguati per il rientro degli investimenti effettuati e per il finanziamento delle successive immobilizzazioni (fase II).

Lo sforzo finanziario richiesto dal SEIS sarebbe ampiamente giustificato dai risultati nel medio e nel lungo termine: entro pochi decenni le economie che avviassero una transizione al SEIS cancellerebbero definitivamente dai loro bilanci gli esborsi monetari richiesti per l'approvvigionamento dei CF e creerebbero moderne filiere industriali intrinsecamente a base locale, in grado di soddisfare la domanda di energia (in tutte le sue forme) virtualmente senza limiti di tempo e di offrire impieghi stabili a un grande numero di professionalità.

¹⁸ In un tipico paese di prima industrializzazione: non meno di 1,5 k€/anno·abitante.

¹⁹ Si stima che le immobilizzazioni per mantenere in vita l'attuale sistema energetico nei prossimi 20 anni non potranno essere inferiori a 4.600 €/abitante (cioè, in media, 320 €/anno·abitante), e tali immobilizzazioni non potranno che diminuire l'efficienza delle catene energetiche.

7.4 Aspetti politici della transizione al SEIS.

Il paragrafo 13.3 di [2] tratta delle politiche che consentirebbero il decollo ed il consolidamento della transizione al SEIS. In estrema sintesi, gli obiettivi di queste politiche dovrebbero essere:

1. allargare l'area territoriale del SEIS (perché questo, come si è visto, aumenterebbe l'efficienza con la quale l'energia primaria verrebbe utilizzata dall'utenza CEE);
2. assicurare il coordinamento delle tecnologie²⁰ nelle diverse fasi della transizione (l'offerta dei servizi del SEIS deve essere strettamente coordinata con l'offerta delle tecnologie da offrire agli utenti affinché essi possano utilizzare nel modo più efficiente l'energia fornita dal SEIS);
3. assicurare la sostenibilità economica e sociale della transizione, sia per quanto riguarda le immobilizzazioni lato SEIS che quelle lato utente.

7.4.1 Politiche per l'estensione territoriale del SEIS.

Per quanto riguarda l'obiettivo 1 (allargamento progressivo dell'area territoriale del SEIS), la trattazione sviluppata nei paragrafi 13.3.1, 13.3.2 e 13.3.3 di [2] mostra che il mix di vantaggi/svantaggi che la transizione prospetta ai potenziali contraenti di un "patto per la transizione" è intrinsecamente strutturato in modo che:

- nel breve-medio periodo, sono premiate le strategie "parassitarie" (le regioni che non aderiscono alla transizione ne godono comunque i vantaggi "indivisibili");
- nel medio-lungo periodo sono fortemente premiate le strategie cooperative (le regioni che aderiscono alla transizione si assumono oneri a breve-medio termine, ma, oltre ai vantaggi "indivisibili", ne avranno anche eccezionali ed esclusivi vantaggi, di carattere economico e politico, nel lungo termine).

In un'arena in cui agiscono queste "regole del gioco" un accordo globale preventivo a favore della transizione ha una probabilità di successo piuttosto scarsa. Se si tiene conto del limitato tempo disponibile per avviare la transizione (prima che il picco di produzione del petrolio inneschi una crisi politica dagli esiti imprevedibili), la probabilità di successo tende a zero.

Tuttavia estenuarsi nel tentativo di raggiungere un accordo preventivo globale non sembra essere l'unica opzione. Proprio per effetto delle "regole del gioco", se una coalizione di nazioni (coalizione SEIS) che dispongano, nel loro insieme, di un territorio di sufficiente estensione e caratterizzato da continuità territoriale (come ad esempio l'Europa), avviasse la transizione sul proprio territorio e adottasse opportune politiche²¹, le dinamiche che si metterebbero in moto favorirebbero l'allargamento progressivo della coalizione, cioè l'integrazione nel SEIS di territori contigui, dando origine, in prospettiva, a un SEIS a scala continentale.

L'adesione alla coalizione SEIS sarebbe vantaggiosa anche per i paesi produttori di CF, perché ridurrebbe la loro dipendenza da prodotti (i CF) destinati comunque all'esaurimento²², e

²⁰ Come ricorda l'esperienza del dispiegamento delle moderne reti radiomobili (GSM e UMTS), non ha molto senso offrire un servizio di connettività universale all'utenza mobile se l'industria non è in grado di offrire terminali che permettano agli utenti l'accesso ai servizi della rete. Similmente, non avrebbe senso offrire agli utenti del SEIS metanolo per la mobilità veicolare se, nel contempo, l'industria non fosse posta nelle condizioni di offrire, a prezzi abbordabili, mezzi di trasporto efficienti alimentabili a metanolo.

²¹ Di queste politiche dovranno far parte tariffe doganali che disincentivino la circolazione, all'interno dei mercati della coalizione SEIS, di merci prodotte in violazione degli imperativi di riduzione delle emissioni di CO₂, cioè prodotte dai paesi che non aderiscono alla transizione. Questo vincolo non dovrebbe suscitare scandalo, se pensiamo al punto di vista espresso, in proposito, dal premio Nobel per l'Economia Joseph Stiglitz (Il volto positivo della globalizzazione, *Le Scienze*, n. 447, nov. 2005, pag. 16-17): «... nel caso del riscaldamento globale le prove sono così schiaccianti che per i paesi che non si attengono alle decisioni internazionali che prescrivono una riduzione delle emissioni di gas serra, come gli Stati Uniti, dovrebbero essere presi provvedimenti nel campo delle sanzioni commerciali».

²² A transizione completata, il consumo di CF sarebbe limitato agli usi che non presentino alternative tecnologiche (es. alcune filiere della chimica organica, la riduzione dei minerali ferrosi, ecc.).

consentirebbe loro di diventare esportatori permanenti (e privilegiati, in ragione della elevata producibilità di energia solare e/o eolica associata ai territori sui quali esercitano la loro sovranità), di energia elettrica e/o di metanolo di sintesi (vedi punto 9 del paragrafo 13.3.4.1 e la nota 87 di [2]).

7.4.2 Politiche per il coordinamento delle tecnologie e per assicurare la sostenibilità economica

Per quanto riguarda gli obiettivi 2 e 3 (coordinamento delle tecnologie e sostenibilità economica), la trattazione sviluppata nel paragrafo 13.3.4 di [2] mostra che questi due obiettivi possono essere perseguiti adottando in modo generalizzato, all'interno della coalizione SEIS, politiche di "tax shifting" sul modello indicato sommariamente in figura 8 per la catena CMV (fase I della transizione).

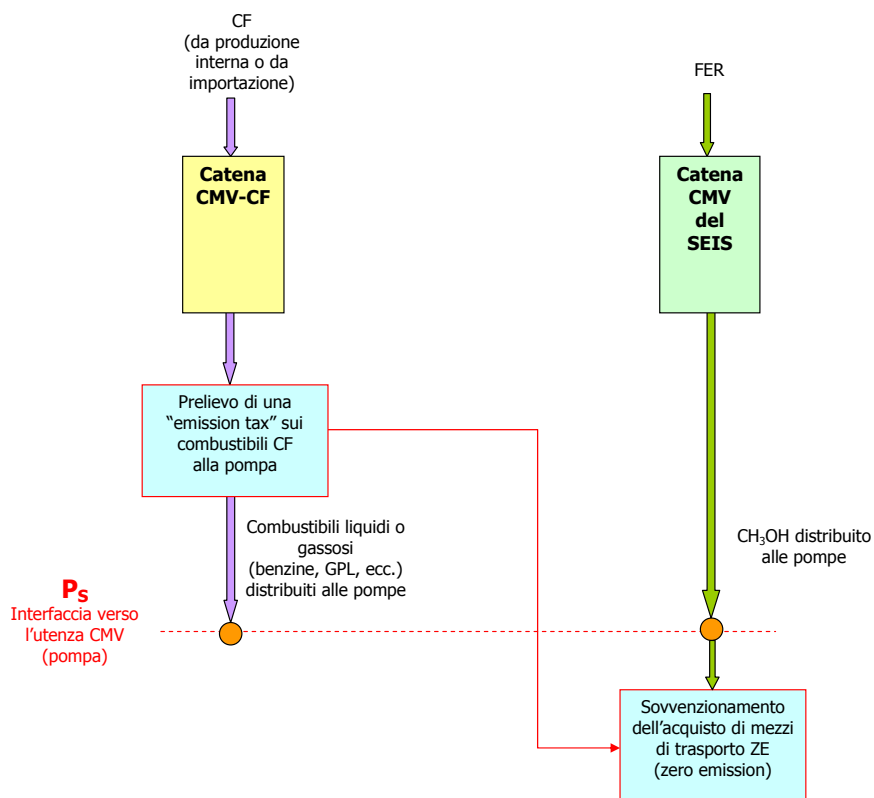


Figura 8. Fase I della transizione. Rappresentazione semplificata del meccanismo di "tax shifting" (applicato allo specifico caso della catena CMV).

Sui combustibili CF che vengono distribuiti dalla catena CMV-CF viene fatta gravare una "emission tax" che ha almeno i seguenti scopi:

- **Disincentivare l'uso di CF per la mobilità veicolare (per effetto della tassa e del prevedibile incremento dei costi di acquisizione dei combustibili CF, alla pompa il CH_3OH costerà nettamente meno, a parità di energia meccanica sviluppata alla ruota, dei combustibili ricavati da CF);**
- **Sovvenzionare la sostituzione dei mezzi di trasporto CF con mezzi di trasporto ZE (zero emission, perché alimentabili da CH_3OH -ZE);**
- **Favorire la riconversione dei produttori di mezzi di trasporto CF in produttori di mezzi di trasporto ZE;**
- **Favorire la riconversione delle società di raffinazione del petrolio in società di produzione di CH_3OH -ZE;**
- **Assicurare al gestore del SEIS un prezzo di vendita del CH_3OH -ZE adeguato ad assicurare il margine operativo netto per finanziare le immobilizzazioni richieste per l'implementazione della catena CMV del SEIS.**

Queste politiche agirebbero sui quattro fronti dell'arena della transizione (operatori e utenti delle catene CF, operatori e utenti delle catene SEIS), con la seguente impostazione generale:

1. Sul consumo dei CF verrebbe fatta gravare una tassa sulle emissioni (emission tax), che verrebbe gradualmente incrementata nel tempo, in modo che i prezzi dell'energia da CF per gli utenti:
 - siano, fin dall'inizio della transizione, meno convenienti, per unità di energia netta, dei prezzi di vendita offerti dal SEIS;
 - diventino sempre meno convenienti nel tempo, per effetto della progressiva accentuazione del differenziale dei costi di produzione dell'energia da CF rispetto a quelli dell'energia offerta dal FER.
2. L'effetto della "emission tax" sarebbe duplice:
 - a. indurrebbe un livello dei prezzi dell'energia abbastanza alto da rendere vantaggiosi, nell'area dell'utenza, investimenti nel risparmio energetico (isolamento avanzato degli edifici, apparecchiature utilizzatrici ad alta efficienza, ecc.);
 - b. indurrebbe "artificialmente" un differenziale di prezzo, crescente nel tempo, a vantaggio del consumo dell'energia offerta dal SEIS, in modo che gli utenti siano sempre più incentivati, sulla base dei loro consumi, a "passare al SEIS". Questa migrazione, come è naturale, sarebbe inizialmente vantaggiosa solo per gli utenti che presentano un elevato consumo energetico annuo, ma diventerebbe progressivamente vantaggiosa per una fascia sempre più estesa di utenti.
3. Gli introiti della "emission tax" andrebbero a sovvenzionare l'acquisto dei nuovi apparati per l'utilizzo ottimale dell'energia offerta dal SEIS (autoveicoli a FC alimentati a metanolo, pompe di calore per il riscaldamento/raffrescamento degli edifici, elettrodomestici ad alta efficienza, ecc.), in modo che il loro prezzo di mercato sia allineato a quello degli omologhi apparati CF.
4. In virtù della emission tax che grava sul consumo di CF:
 - a. il gestore del SEIS potrebbe offrire ai suoi utenti l'energia netta a prezzi che garantirebbero un margine operativo tale da assicurare il rientro dell'investimento richiesto per il dispiegamento del SEIS;
 - b. le industrie che hanno le competenze per progettare e realizzare le infrastrutture del SEIS considererebbero vantaggioso operare in un settore destinato a diventare rapidamente redditizio e ad estendersi a scala continentale;
5. Le sovvenzioni per l'acquisto di apparati ad alta efficienza nell'area dell'utenza favorirebbero lo sviluppo di una industria specializzata in questo settore.

Gli effetti di queste politiche sarebbero, dunque, molteplici. Esse favorirebbero:

1. Nell'area dell'utenza:
 - a. Gli investimenti in:
 - i. apparati per l'uso efficiente dell'energia offerta dal SEIS;
 - ii. isolamento avanzato degli edifici;
 - iii. sistemi per l'autoproduzione di energia;
 - b. La riconversione degli attuali fornitori di apparati utilizzatori di energia da CF in fornitori di efficienti apparati utilizzatori di energia da SEIS.
2. Nell'area del SEIS:
 - a. La sostenibilità delle immobilizzazioni per l'implementazione del SEIS e, per conseguenza, il drenaggio in questa direzione del risparmio privato;
 - b. La riconversione degli attuali fornitori e gestori delle reti energetiche in fornitori e gestori delle infrastrutture del SEIS.

8. Conclusioni

Lo studio qui sintetizzato descrive l'architettura di un nuovo sistema energetico, il SEIS, alimentato esclusivamente con FER. Esso mostra che un sistema energetico con questa architettura sarebbe in grado, sotto opportune condizioni, di:

1. sostituire completamente l'attuale sistema energetico;
2. assicurare standard affluenti di disponibilità energetica per tutti gli abitanti del pianeta;
3. conservare nel tempo la capacità di fornire energia ai suoi utenti (sostenibilità);
4. preservare gli equilibri che, sulla superficie del pianeta, assicurano la persistenza delle condizioni della vita.

Lo studio mostra inoltre che:

1. il SEIS offrirebbe vantaggi crescenti, di carattere economico e ambientale, al crescere dell'estensione del territorio che ospita le infrastrutture di captazione eoliche e solari;
2. la realizzazione e la gestione del SEIS su estesi territori presuppongono un progetto e una visione "multidisciplinare" (tecnica, ecologica, economica, politica) del sistema;
3. il successo della transizione al SEIS presuppone molteplici condizioni di carattere tecnico, economico e politico, che non potranno mai manifestarsi per effetto di fortunate coincidenze.

In conclusione, la prevenzione delle crisi politiche e ambientali che incombono sul nostro futuro a causa degli handicap del sistema CF è possibile ma richiede importanti e urgenti decisioni politiche e tecniche.

Affinché tali decisioni siano assunte al più presto, due questioni cruciali devono essere poste all'ordine del giorno:

1. La comunità scientifica e industriale deve quanto prima prendere atto che l'accanimento terapeutico sul sistema CF, così come il sogno di una improbabile rivoluzione tecnologica nel medio-lungo termine (fusione nucleare) sono opzioni assai rischiose, e dunque conviene concentrare tutti gli sforzi sull'unica opzione praticabile: elaborare e proporre alle leadership politiche mondiali un programma di transizione verso un sistema energetico che possa funzionare anche se alimentato esclusivamente con energie rinnovabili.
2. Nella sfera politica dovranno essere messe rapidamente ai margini le correnti politiche che confidano in qualche forma di provvidenzialità (la mano invisibile del mercato, processi storici ineluttabili, una benevola provvidenza metafisica) e dovranno essere incoraggiate ad emergere correnti politiche le quali, per cultura, competenza tecnica, sensibilità ambientale, indipendenza dai poteri delle lobby, siano profondamente consapevoli che il futuro dell'umanità potrà essere migliore solo se progettato:
 - a. nel rispetto degli interessi dell'umanità nel suo insieme, non solo quella di oggi, ma anche, e soprattutto, quella di domani;
 - b. in conformità con i vincoli ambientali.

9. RIFERIMENTI

- [1] "Un sistema energetico Integrato e sostenibile: un lusso o una possibilità concreta?".
Parte I
- [2] "Un sistema energetico Integrato e sostenibile: un lusso o una possibilità concreta?".
Parte II
- [3] "Un sistema energetico Integrato e sostenibile: un lusso o una possibilità concreta?".
Appendici
- [4] G. A. Olah, A. Goepfert, G.K. S. Prakash, Beyond Oil and Gas: the Methanol Economy, Wiley-VCH, 2006

10. ACRONIMI

ACRONIMO	SIGNIFICATO
BP	Bacino di Produzione (di energia)
BP-C	Bacino di Produzione di energia Chimica
BP-E	Bacino di Produzione di energia Elettrica
BU	Bacino di Utenza (di energia)
BU-C	Bacino di Utenza di energia Chimica
BU-E	Bacino di Utenza di energia Elettrica
CEE	Catena dell'Energia Elettrica del SEIS
CEE-CF	Catena dell'Energia Elettrica del dominio CF
CEE-N	Catena dell'Energia Elettrica del dominio Nucleare
CEE-CFN	Catena dell'Energia Elettrica dell'insieme dei due domini CF e N
CET	Catena dell'Energia Termica del SEIS
CET-CF	Catena dell'Energia Termica del sistema CF
CF	Combustibili Fossili
CFL	Compact Fluorescent Light
CMV	Catena della Mobilità Veicolare del SEIS (Metanolo)
CMV-CF	Catena della Mobilità Veicolare del sistema CF (prodotti raffinati ricavati da CF)
CO ₂ -ZE	CO ₂ "zero emission"
ECN	Energia Chimica Nativa
EEN	Energia Elettrica Nativa
EEN-A	Energia Elettrica Nativa da FER-A
EEN-NA	Energia Elettrica Nativa da FER NA
EEN-NAC	Energia Elettrica Nativa da FER NAC
FC	Fuel Cell
FCR	Fuel Cell Rigenerativa
FER	Fonte di Energia Rinnovabile
FER-A	Fonte di Energia Rinnovabile Accumulabile
FER-NA	Fonte di Energia Rinnovabile Non-Accumulabile
FER-NAC	Fonte di Energia Rinnovabile Non-Accumulabile, con regime di produzione Costante
NC	Nucleo Chimico
NEI	Nodo Energetico Integrato
PIL	Prodotto Interno Lordo
RUI	Rifiuti Urbani Indifferenziati
SB	Scarti di Biomasse
SEIS	Sistema Energetico Integrato e Sostenibile
SOFC	Fuel Cell agli Ossidi Solidi
TFE	Target di Fabbisogno Europeo
UE	Unione Europea

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	1
2. VINCOLI DEL SEIS.....	3
2.1 VINCOLI DEL SEIS LATO SORGENTE	3
2.2 VINCOLI DEL SEIS LATO DESTINAZIONE (UTENZA).....	3
3. ARCHITETTURA GENERALE DEL SEIS.....	5
3.1 LE CATENE ENERGETICHE DEL SEIS: VINCOLI INDOTTI DALLA FORMA DELLE ENERGIE SORGENTI	6
3.2 ARCHITETTURA FUNZIONALE DELLE CATENE ENERGETICHE DEL SEIS	9
3.2.1 <i>Architettura funzionale della catena CEE</i>	10
3.2.2 <i>Architettura funzionale della catena CMV</i>	12
3.2.2.1 Il segmento chimico della catena CMV	12
4. IL SEIS: FABBISOGNO DI ENERGIA ELETTRICA PRIMARIA.....	17
5. IL SEIS: DINAMICA DELLE CATENE ENERGETICHE	19
5.1 DINAMICA DELLA DOMANDA (IN CODA ALLE CATENE ENERGETICHE).....	19
5.2 COPERTURA OTTIMALE DELLA DOMANDA DI POTENZA DELLE CATENE CEE E CMV	21
5.3 VARIABILITÀ DELLA POTENZA ELETTRICA INVILUPPO IN TESTA ALLE CATENE CEE E CMV.....	22
5.4 CONFIGURAZIONI OTTIMALI DEL SEIS	26
5.5 CRITERI DI GESTIONE DEL POTENZIALE PRODUTTIVO PRIMARIO.....	26
6. IL SEIS: SOSTENIBILITÀ, IMPATTO SUL TERRITORIO.....	29
6.1 SOSTENIBILITÀ DEL SEIS.....	29
6.1.1 <i>Sostenibilità del fabbisogno di CO₂-ZE della catena CMV</i>	29
6.1.2 <i>Sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica delle catene CMV e CEE</i>	30
6.1.2.1 Sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica da eolico	30
6.1.2.2 Sostenibilità del fabbisogno di energia elettrica da solare	31
6.1.3 <i>Sostenibilità del SEIS: conclusioni</i>	32
6.2 DENSITÀ DELLE INFRASTRUTTURE DI CAPTAZIONE	33
7. TRANSIZIONE AL SEIS	34
7.1 FASE I: DISMISSIONE DELLA CATENA CMV-CF	35
7.2 FASE II: DISMISSIONE DELLE CATENE CEE E CET DELL' ATTUALE SISTEMA ENERGETICO.....	37
7.3 ASPETTI ECONOMICI DELLA TRANSIZIONE AL SEIS.....	39
7.3.1 <i>Immobilizzazioni richieste dal SEIS</i>	40
7.4 ASPETTI POLITICI DELLA TRANSIZIONE AL SEIS	41
7.4.1 <i>Politiche per l'estensione territoriale del SEIS</i>	41
7.4.2 <i>Politiche per il coordinamento delle tecnologie e per assicurare la sostenibilità economica</i>	42
8. CONCLUSIONI.....	44
9. RIFERIMENTI.....	45
10. ACRONIMI.....	45

AVVERTENZA

Questo documento è reso disponibile dal sito Web <http://www.energiaescienza.org/>.

Ne è ammesso senza restrizioni l'utilizzo individuale.

La sua riproduzione e divulgazione è soggetta alle condizioni di licenza definite nel sito WEB:

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>

In caso di riproduzione e divulgazione, sui documenti riprodotti è richiesta l'indicazione della fonte (indirizzo WEB <http://www.energiaescienza.org/>²³).

Per entrare in contatto con gli autori del documento, compilare l'apposito form sul sito WEB <http://www.energiaescienza.org/>.

Data di prima pubblicazione: 1 gennaio 2009

Data di pubblicazione della presente edizione: 1 maggio 2011

²³ Questa forma di licenza di riproduzione e diffusione è stata scelta allo scopo di favorire la libera circolazione del documento. A termini di tale licenza, infatti, chiunque riproduca o diffonda il documento è tenuto a renderlo disponibile alle stesse condizioni di libertà con le quali lo ha ricevuto.