

# LA COGENERAZIONE NELLA PIANIFICAZIONE ENERGETICA: VALUTAZIONE SISTEMICA ED INDICATORI PRESTAZIONALI.

B. Monaco, G. Nardin

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE – DIPARTIMENTO DI ENERGETICA E MACCHINE  
via delle Scienze 208, 33100 Udine

## SOMMARIO

Le nuove direttive europee in termini di sviluppo sostenibile pongono la valutazione ambientale strategica come uno strumento di analisi delle conseguenze ambientali, economiche e sociali delle azioni di politica energetica.

Gli studi di fattibilità considerano generalmente solo aspetti di natura tecnica, economica ed ambientale relativi all'intervento da attuare, limitatamente ai fabbisogni termici ed elettrici di un determinato dominio territoriale. Questo tipo di approccio, se da un lato è utile ai fini della realizzazione dell'impianto, dall'altro è carente sotto l'aspetto della pianificazione energetica.

Nel presente lavoro si vuole proporre un metodo di valutazione sistemica, applicato alla cogenerazione e al teleriscaldamento. Esso consente di stimare non solo l'intervento in sé, vale a dire l'aspetto endogeno, ma anche i margini di potenzialità e i vantaggi indotti sul territorio circostante, cioè l'aspetto esogeno. Solo un approccio di analisi che considera sia gli aspetti tecnici che quelli economici ed ambientali può fornire utili elementi di valutazione nell'ambito dei sistemi di cogenerazione diffusa, dei quali spesso è difficile stimare i margini di virtuosità.

In quest'ottica si propone una schematizzazione teorica di variabili e di indicatori utilizzabili nella progettazione cogenerativa in un determinato dominio territoriale. Il metodo è stato applicato ad uno studio di fattibilità tecnico economica.

## 1 INTRODUZIONE

Nella società moderna la pianificazione territoriale risulta essere uno strumento sempre più importante per determinare le configurazioni energetiche più virtuose dettate dalla struttura tecnica, economica e sociale del dominio considerato [1]. In generale quando s'individua un progetto attuabile in un contesto (ad esempio di cogenerazione) ci si limita alla virtuosità dell'intervento in se senza prendere in considerazione la possibilità di interventi diversi con prestazioni che potrebbero essere superiori: ci si accontenta e si è soddisfatti della virtuosità individuata. Esistono ovviamente difficoltà nel valutare le opportunità possibili, in altri termini tali opportunità non sono palesi. La presente memoria intende impostare un criterio di valutazione e di rappresentazione in termini sintetici e comprensibili, al fine di fornire all'ente proposto alle operazioni di pianificazione uno strumento di supporto alle scelte [2]. Con tale strumento si è in grado di valutare l'intervento individuato in un'ottica di contesto più generale.

### 1.1 Analisi del sistema energetico

L'attuazione di un intervento cogenerativo su un territorio è, generalmente, conseguenza di una certa inefficienza energetica, intesa come un flusso di energia primaria eccessivo rispetto alla struttura dei fabbisogni energetici, alla luce di sistemi tecnologici di efficienza maggiore. In altri termini, l'indice d'inefficienza della struttura considerata (di tipo territoriale o a poli energetici) è esprimibile come la differenza tra i flussi di energia primaria – annuali o stagionali – riferiti alla situazione attuale e quelli teoricamente ottenibili in seguito all'adozione del sistema più virtuoso, applicabile economicamente e dal punto di vista impiantistico. Una prima domanda che ci si può porre è come misurare

quest'inefficienza energetica. Un sistema energetico è un insieme complesso avente una sua specifica struttura e può essere caratterizzato in più modi, secondo il problema che si vuole considerare. Esso è definito da variabili endogene e da altre esogene: le prime identificano la struttura interna del sistema e dei suoi processi, dando utili indicazioni sulla funzionalità dell'impianto; le seconde sono definite dai confini del sistema, che può interagire con altri complessi circostanti. Partendo da questi presupposti è chiara l'utilità di strumenti in supporto alla progettazione di impianti energetici, che fondamentalmente si basano sull'utilizzo di indicatori di prestazione delle variabili che si vogliono considerare [3]. Con il termine "indicatore" s'identifica uno strumento in grado di fornire informazioni in forma sintetica di un fenomeno più complesso e con significato più ampio, in grado di rendere visibile un andamento o un fenomeno non immediatamente percepibile. Il significato dell'indicatore si estende, quindi, oltre ciò che esso direttamente misura [4].

L'utilizzo di indicatori come strumento a supporto delle politiche è ormai oggetto di elaborazioni e decisioni importanti assunte da organismi internazionali ed europei.

Nella valutazione preliminare di un intervento impiantistico di particolare rilievo, è interessante riuscire a mettere in relazione i diversi indicatori utilizzati, al fine di creare degli scenari di confronto utili alla progettazione.

### 1.2 Definizione del dominio territoriale e della struttura dei fabbisogni energetici

Nel contesto in cui s'intende operare la struttura dei fabbisogni energetici è quella riferita alla situazione attuale. L'individuazione esatta del dominio territoriale risulta fondamentale: i fabbisogni energetici, in base ai quali si stima la progettazione dell'intervento cogenerativo (fabbisogno primario), dipendono soprattutto dall'utenza finale. La

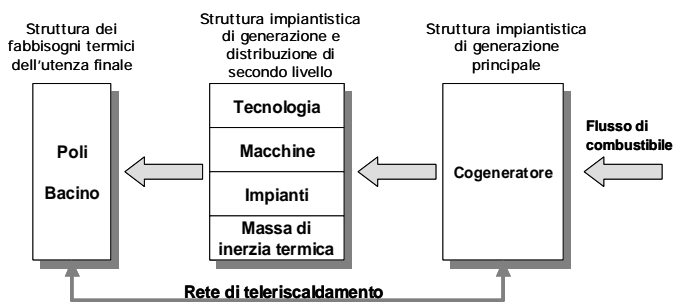


Figura 1: Schema di un sistema cogenerativo con teleriscaldamento

struttura impiantistica di generazione e distribuzione (cosiddetta di secondo livello) può invece modificarsi per saldare in maniera più virtuosa la struttura dei fabbisogni termici dell'utenza con la generazione principale.

Il sistema di cogenerazione (fig. 1), può essere definito su due principali ambiti di dominio territoriale. Ci si può, infatti, trovare in una situazione di:

- polo*: è una struttura che non contiene al suo interno alcun aspetto di conurbazione, ma s'interessa solamente dei propri fabbisogni termici ed elettrici;
- bacino*: include almeno un polo e la conurbazione esterna relativa; a seconda della grandezza dell'area di conurbazione, interessata dalla rete di teleriscaldamento, è possibile individuare:
  - un *bacino locale*: interno al comune di applicazione del progetto;
  - un *bacino comunale*: interessa tutto il territorio comunale in questione;
  - un *bacino sovra-comunale*: eventuale ampliamento della linea cogenerativa con legami tra diversi comuni adiacenti.

Nell'identificazione del dominio è necessario considerare i seguenti aspetti chiave:

- la *popolazione*, definita come numero di abitanti presenti;
- la *superficie di azione* (mettendo in relazione la superficie e la popolazione si ottiene un dato rappresentativo unico dalla densità di superficie);
- la *struttura socio-economica*, utile per una prima indicazione sull'intensità energetica richiesta e sui fabbisogni termici.

## 2 INDICATORI DI PRESTAZIONE

La metodologia di valutazione dell'intervento è tesa ad un approccio di analisi basato su tre indicatori prestazionali, riferiti rispettivamente a variabili ambientali, a variabili energetiche e a variabili riferite alla struttura socio-territoriale.

Per misurare le prestazioni del sistema impiantistico si sono scelti come indicatori:

- l'*impatto ambientale* (IA), con particolare riferimento ai gas ad effetto serra (obiettivi protocollo Kyoto), espresso in tonnellate di anidride carbonica equivalenti (tonCO<sub>2</sub>eq);
- i *consumi energetici* (EN) ed il relativo problema della riduzione delle fonti energetiche, nell'ottica del raggiungimento dell'indipendenza della fornitura di energia, espressi in tonnellate di petrolio equivalenti (tep);
- il *costo del servizio all'utente* (CS), aspetto questo molto importante soprattutto in relazione ai trend degli ultimi anni che evidenziano un continuo aumento del prezzo dei vettori energetici, espresso in euro all'anno (€/anno).

I tre indicatori di prestazione considerati per la valutazione dell'intervento possono essere legati fra loro attraverso parametri che valutino:

- le *tecnologie adottate* e quindi i rendimenti termico ed elettrico, nonché l'indice di risparmio energetico;
- le *modalità di gestione* del sistema impiantistico;
- le *caratteristiche strutturali dei fabbisogni* termici (la tipologia – termica o frigorifera – ed il valore nel tempo) ed elettrici alla luce di possibili interazioni futuri con altri sistemi cogenerativi;
- il *tipo di combustibile* utilizzato.

In base a queste logiche si definiscono tre parametri di relazione:

- $\alpha$  relativo alle scelte tecnologiche adottate: nel caso di un sistema di cogenerazione, ad esempio, tale tecnologia potrebbe essere un motore cogenerativo endotermico (con rendimento di produzione di energia elettrica del 40-45%) oppure una turbina a gas a recupero, con un rendimento che si assesta intorno al 30%. La scelta della tecnologia impiantistica è legata alla struttura dei fabbisogni energetici. Il parametro  $\alpha$  assumerà il valore unitario nel caso in cui l'impianto lavori a regime, altrimenti assumerà un valore inferiore ad uno;
- $\beta$  relativo alle caratteristiche strutturali dei fabbisogni energetici: il suo valore sarà tanto maggiore tanto più l'energia prodotta si avvicinerà alla struttura dei fabbisogni energetici (uguale a 1 quando i fabbisogni energetici sono maggiori, od uguali, a quanto prodotto dalla cogenerazione; minore di 1 altrimenti). Il prodotto  $\alpha \cdot \beta$  – o *parametro della struttura tecnica* – è rappresentativo dello scenario tecnico caratterizzato dalla configurazione del sistema impiantistico e dalla struttura finale dei fabbisogni energetici;
- $\gamma$  relativo alle modalità di gestione: rappresenta la qualità gestionale e assume il valore unitario solamente nel caso di gestione a regime, altrimenti è sempre inferiore ad uno.

È possibile introdurre due ulteriori parametri relativi all'aspetto economico:

- $\rho$  riferito alla *parte tecnica di determinazione del prezzo*;
- $\sigma$  relativo alle *politiche economiche*.

Tutti i coefficienti definiti assumono valori mai superiori a quello unitario.

Gli indicatori prestazionali scelti sono necessariamente funzioni dei parametri di relazione; più in dettaglio si avrà:

$$IA = f_1(\alpha, \beta, \gamma) \quad (1)$$

$$EN = f_2(\alpha, \beta, \gamma) \quad (2)$$

$$CS = f_3(\alpha, \beta, \gamma, \rho, \sigma) \quad (3)$$

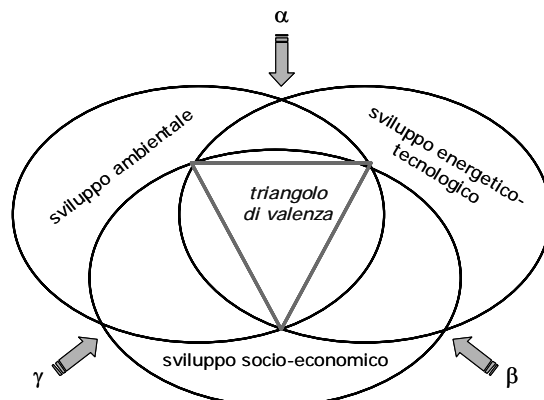


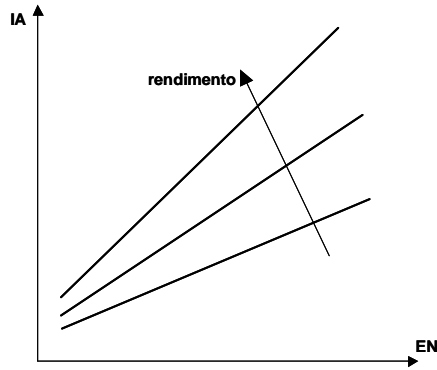
Figura 2: Relazione tra gli indicatori prestazionali e i parametri di relazione

Dalle precedenti formulazioni è possibile esprimere direttamente il legame che intercorre fra il consumo energetico e l'impatto ambientale:

$$IA = k \cdot EN \quad (4)$$

$$EN = \frac{1}{k} \cdot IA \quad (5)$$

Figura 3:  
Andamento dell'impatto ambientale in funzione dei consumi energetici



con  $k > 0$  una volta fissati  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  e quindi stabilita la tecnologia impiantistica; naturalmente anche  $k$  sarà funzione dei tre parametri tecnici e quindi:

$$k = f_4(\alpha, \beta, \gamma) \quad (6)$$

Come si vede dalla figura 3, si ottengono gli andamenti del legame IA-EN in funzione della tecnologia adottata (tali andamenti subiscono una modifica qualora s'intervenga con la collocazione dell'energia termica tramite rete di teleriscaldamento, caso in cui si ha una riduzione del valore della variabile  $k$ ).

Si ritiene utile dare un'ulteriore caratterizzazione della relazione che lega gli aspetti d'impatto ambientale e consumo energetico, andando ad analizzare i risparmi – in termini di CO<sub>2</sub> evitata – conseguibili in seguito ad un intervento cogenerativo.

Grazie all'intervento cogenerativo si ha la produzione di una quantità  $A$  di energia elettrica e di una quantità  $B$  di energia termica. Queste quantità dipenderanno dal tipo di tecnologia particolare usata. È possibile definire il loro rapporto attraverso la variabile  $K$  nel seguente modo:

$$K = \frac{A}{B} \quad (7)$$

con  $A = f(\alpha)$ ,  $B = f(\alpha)$ ,  $K = f(\alpha)$ . Tale valore dipenderà dal rendimento della struttura impiantistica.

Il valore di CO<sub>2</sub> equivalente risparmiata a seguito dell'intervento cogenerativo può essere quantificato nel seguente modo:

- per ogni MW di energia elettrica prodotta si ottiene un valore  $a$  di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente evitata;
- per ogni tep di energia termica prodotta si ottiene un valore  $b$  di tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente evitata.

Risulta quindi, in termini "specifici":

$$c = \text{CO}_2 \text{ evitata} = a + b \quad (8)$$

Ipotizzando  $a > b$  è possibile scrivere:

$$b = 0, x \cdot a \quad (\text{con } x > 0) \quad (9)$$

Di conseguenza si ottiene:

$$c = a + b = a + (0, x \cdot a) = a \cdot (1 + 0, x) = 1, x \cdot a \quad (10)$$

Generalizzando tali valori e considerando tutte le unità di energia elettrica e termica interessate si ottiene una quantità di anidride carbonica risparmiata  $C$  data da:

$$C = A \cdot a + B \cdot b = A \cdot a + B \cdot (0, x \cdot a) = a \cdot (A + 0, x \cdot B) \quad (11)$$

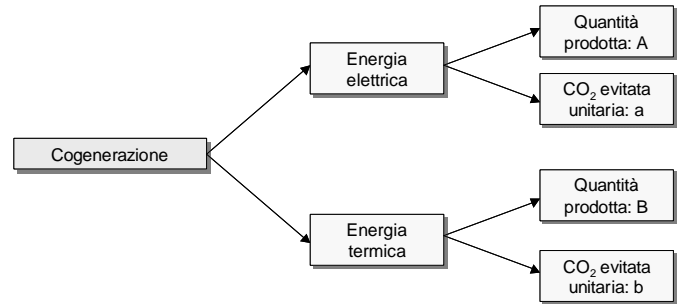


Figura 4: ripartizione dei flussi energetici e dei risparmi ambientali

Sostituendo la variabile  $K$  così come definita in precedenza:

$$C = a \cdot \left( A + 0, x \cdot \frac{A}{K} \right) = a \cdot A \cdot \left( 1 + \frac{0, x}{K} \right) \quad (12)$$

Poiché sia  $x$  che  $K$  sono funzioni della tecnologia applicata nell'intervento è possibile introdurre un *fattore cogenerativo*  $F$  che tenga conto di quest'aspetto, definito come:

$$F = \frac{0, x}{K} \quad (13)$$

e sostituendolo nella formula (12) precedente si ha:

$$C = a \cdot A \cdot (1 + F) \quad (14)$$

### 3 IL TRIANGOLO DELLA VALENZA

L'equazione 14 fornisce uno strumento di sensibilità ulteriore in merito al legame che intercorre tra l'indice di impatto ambientale e quello concernente il consumo energetico. Una volta considerato anche l'indice relativo all'aspetto economico, è possibile raffigurare le relazioni tra gli indicatori prestazionali attraverso un diagramma radar a tre dimensioni che denomineremo *triangolo di valenza*: esso è uno strumento grafico utile alla rappresentazione sintetica della situazione globale di un sistema energetico. In altri termini esso è il *triangolo energetico-ambientale-economico della struttura dei fabbisogni energetici del bacino territoriale considerato*.

La configurazione impiantistica post-intervento dovrà tendere ad un triangolo che risulti incluso all'interno di quello di riferimento iniziale: tutti gli interventi considerati devono portare ad una diminuzione delle condizioni limite di partenza.

I valori minimi di  $IA$  e  $EN$ , sotto i quali non si può scendere, a meno di cambiamenti di tipo impiantistico o di considerazioni extraterritoriali (come, ad esempio, la vendita di energia elettrica), caratterizzano il *triangolo minimo di sistema*, una volta correlati con il costo del servizio, e cioè la configurazione più virtuosa per una data tecnologia impiantistica e per un dato tipo di combustibile. Il triangolo minimo sarà determinato in funzione dei valori di  $IA$  e  $EN$  dell'impianto di cogenerazione adottato (fattore endogeno), mentre per il valore di  $CS$  si fa riferimento al costo del combustibile utilizzato (fattore esogeno). Il triangolo minimo endogeno risulta quindi funzione solamente di  $\alpha$ , in quanto  $\beta$  e  $\gamma$  avranno valore unitario. La possibilità di scendere al di sotto dei valori minimi di riferimento permane, per l'indicatore  $CS$ , nell'eventualità di logiche politiche volte ad incentivare l'intervento attraverso strumenti di natura economica quali, ad esempio, i titoli di efficienza energetica (o certificati bianchi).

Si può ragionevolmente ipotizzare che per tutto l'arco temporale di funzionamento del sistema, successivo all'intervento cogenerativo, i costi di servizio risultino non superiori agli attuali costi di mercato.

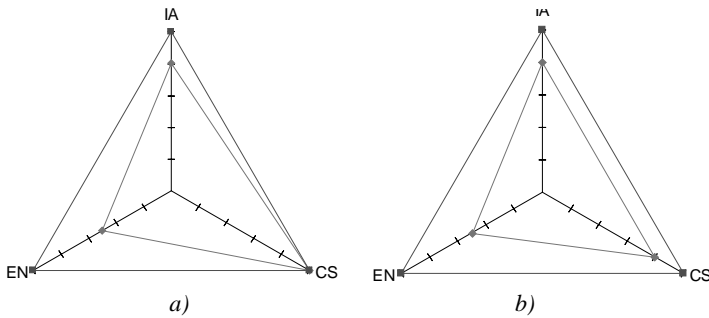


Figura 5: Configurazioni del triangolo di valenza: a) situazione neutra; b) condizione virtuosa

Pertanto la condizione limite accettabile è quella riportata in figura 5a, con CS che mantiene la stessa valenza della situazione antecedente l'intervento. La situazione ideale risulta, dal punto di vista economico, quella in cui si ha una riduzione di tale valore (fig. 5b). Da queste prime considerazioni è possibile quindi considerare virtuoso un intervento per cui la variazione di CS sia positiva, neutro un intervento per cui la variazione sia nulla, e non virtuoso, o negativo, un intervento per cui la variazione di CS sia negativa.

Dal momento che si analizzano tre indicatori i cui valori assoluti sono riferiti a diverse unità di misura – tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente per l'impatto ambientale, tep per il consumo energetico e milioni di euro per il costo del servizio all'utente – risulta

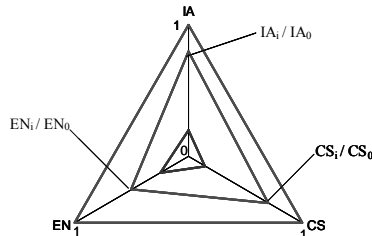


Figura 6: triangolo di valenza con i valori delle coordinate rapportati con quelli iniziali

decisamente utile avere un raffronto visivo e numerico attraverso un valore rapportato in termini di frazione (fig. 6). La conseguenza di un approccio di questo tipo, è quella di avere i valori delle coordinate allo stato attuale pari ad uno, per ogni singolo indicatore, mentre per le configurazioni successive si ottengono dei valori generalmente inferiori a quello unitario. Qualora interessasse, invece, conoscere la variazione positiva effettiva dell'intervento, sarebbe sufficiente moltiplicare il valore iniziale – espresso attraverso la specifica unità di misura – per la differenza tra i due rispettivi valori di ogni indicatore.

Il triangolo di valenza può essere caratterizzato in funzione del dominio territoriale: più in particolare i valori degli indicatori prestazionali possono essere espressi in relazione all'unità di abitante e all'unità di superficie. Quest'aspetto ha una forte valenza, per esempio nell'ottica di confrontare altre situazioni in cui l'intervento ha già avuto effetto. Si possono, quindi, ottenere tre diversi tipi di triangoli:

- il *triangolo globale* G<sub>i</sub> in cui gli indicatori sono riferiti alla situazione globale del bacino territoriale considerato;
- il *triangolo specifico-antropico* sA<sub>i</sub> che si riferisce ai dati rapportati per unità di abitante;
- il *triangolo specifico-territoriale* sT<sub>i</sub> riferito all'unità di superficie.

### 3.1 Configurazioni fondamentali del triangolo di valenza

Attraverso il triangolo di valenza è possibile rappresentare lo stato di fatto di un sistema impiantistico-energetico attraverso diverse configurazioni, ottenibili individuando

opportunamente i parametri che pesano la rilevanza di un indicatore prestazionale rispetto agli altri.

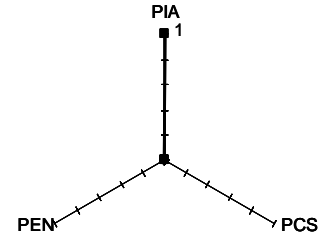
È possibile ricavare sei configurazioni fondamentali, tre denominate di *valenza pura* e tre di *valenza pesata*. È importante sottolineare che, in ogni configurazione utilizzata, la sommatoria dei pesi P dati agli indicatori IA, EN e CS deve sempre essere uguale a uno:

$$P_{IA} + P_{EN} + P_{CS} = 1 \quad (14).$$

#### 3.1.1 Configurazioni di valenza pura

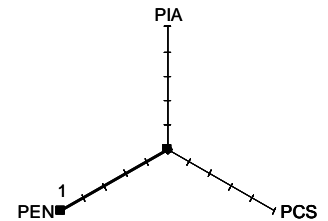
*Valenza ambiente-centrica* (A<sub>m</sub>): l'aspetto ambientale è predominante nella finalità dell'intervento.

- P<sub>IA</sub> = 1;
- P<sub>EN</sub> = 0;
- P<sub>CS</sub> = 0.



*Valenza ergo-centrica* (E<sub>n</sub>): l'aspetto relativo ai consumi energetici ha importanza prioritaria.

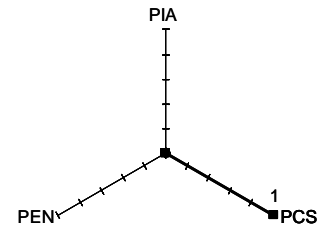
- P<sub>IA</sub> = 0;
- P<sub>EN</sub> = 1;
- P<sub>CS</sub> = 0.



*Valenza economico-centrica* (E<sub>c</sub>): l'aspetto relativo ai costi del servizio è predominante nella finalità dell'intervento (ad esempio, il cogeneratore potrebbe non essere operativo nelle ore notturne, dove il prezzo di vendita dell'energia elettrica non giustifica economicamente il funzionamento, anche se ambientalmente è virtuoso).

il

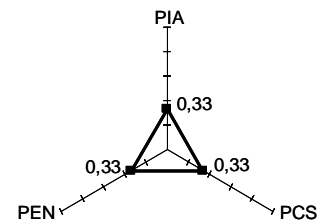
- P<sub>IA</sub> = 0;
- P<sub>EN</sub> = 0;
- P<sub>CS</sub> = 1.



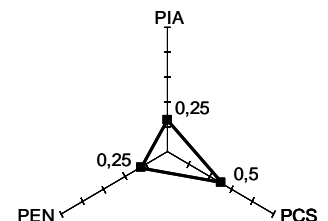
#### 3.1.2 Configurazioni di valenza pesata

*Isovalenza totale* (I<sub>tt</sub>): in questa situazione, la logica di intervento prevede una distribuzione equa dei pesi, per i tre aspetti in questione. Non viene quindi data un'importanza maggiore né verso la parte ambientale né verso la parte di interesse strettamente economico.

- P<sub>IA</sub> = 0,33;
- P<sub>EN</sub> = 0,33;
- P<sub>CS</sub> = 0,33.



*Isovalenza tecnico-economica* (I<sub>te</sub>): in questa situazione si propone, ai fini dell'intervento, una logica di lavoro in cui la parte tecnica-ambientale, data



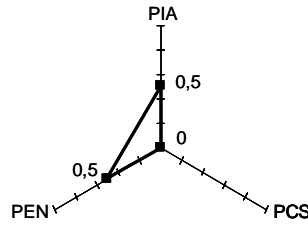
dalla somma dell'aspetto di impatto ambientale e dell'aspetto dei consumi energetici, equivalga, in termini di peso, la parte economica, data dall'aspetto dei costi del servizio all'utente.

- $P_{IA} = 0,25$ ;
- $P_{EN} = 0,25$ ;
- $P_{CS} = 0,50$ .

#### Isovalenza ecocentrica-radicala

( $I_{er}$ ): Questa situazione è rappresentativa del caso in cui, l'attenzione degli addetti all'intervento, sia focalizzata solamente verso gli aspetti di sviluppo sostenibile, tralasciando la convenienza economica del progetto.

- $P_{IA} = 0,50$ ;
- $P_{EN} = 0,50$ ;
- $P_{CS} = 0$ .



### 3.2 Il valore finale del triangolo di valenza

Il valore della configurazione finale del triangolo di valenza rappresenta lo strumento di confronto grafico da utilizzare e sarà dato dalla sommatoria dei prodotti tra i numeri puri, relativi al triangolo globale, ed i rispettivi pesi, relativi alla situazione ottimizzata prospettata. Si ottiene, cioè:

$$\text{Valore} = \left( \frac{IA_i}{IA_0} \right) \cdot P_{IA} + \left( \frac{EN_i}{EN_0} \right) \cdot P_{EN} + \left( \frac{CS_i}{CS_0} \right) \cdot P_{CS} \quad (15)$$

dove con lo 0 ci si riferisce alla situazione di partenza, o attuale, mentre con  $i$  ci si riferisce all' $i$ -esimo intervento attuato (nello stesso territorio si può avere una successione di interventi cogenerativi).

Per ogni intervento affrontato interessa esaminare solamente il tipo di ottimizzazione riferita alle valenze pesate: il concetto di valenza pura rimane, infatti, puramente teorico e, in generale, poco significativo. Si ottengono, quindi, le tre seguenti casistiche:

- isovalenza totale:

$$X_i = \left( \frac{IA_i}{IA_0} \right) \cdot 0,33 + \left( \frac{EN_i}{EN_0} \right) \cdot 0,33 + \left( \frac{CS_i}{CS_0} \right) \cdot 0,33 \quad (16)$$

- isovalenza tecnico-economica:

$$Y_i = \left( \frac{IA_i}{IA_0} \right) \cdot 0,25 + \left( \frac{EN_i}{EN_0} \right) \cdot 0,25 + \left( \frac{CS_i}{CS_0} \right) \cdot 0,50 \quad (17)$$

- isovalenza ecocentrica-radicala:

$$Z_i = \left( \frac{IA_i}{IA_0} \right) \cdot 0,50 + \left( \frac{EN_i}{EN_0} \right) \cdot 0,50 + \left( \frac{CS_i}{CS_0} \right) \cdot 0,00 \quad (18)$$

Mettendo assieme i tre valori trovati si ottiene un triangolo rappresentativo di ogni intervento  $i$ . Tali valori finali sono di supporto per effettuare scelte più commisurate sulla fattibilità dell'intervento; la valutazione è utile per un'eventuale analisi di secondo livello, effettuata essenzialmente sui dati operativi. Come già detto in precedenza è importante che i valori che si riferiscono alla situazione "zero" - ovvero di riferimento - siano inferiori o, al limite, uguali ad uno: ciò è utile per valutare la bontà o virtuosità delle scelte, impiantistiche e non, per le quali si è optato. Qualora una delle tre possibili valenze considerate superi, nella situazione di non virtuosità, il valore unitario allora l'intervento proposto risulterebbe inattivabile; si otterrebbe, infatti, una situazione di non virtuosità globale, per

la quale né l'utente né la società trarrebbero vantaggio dall'attuazione dell'intervento. L'intervento sarebbe probabilmente attivato da un singolo soggetto che troverebbe, invece, un guadagno nel cambiamento proposto. Tale situazione si può sviluppare solamente per l'isovalenza totale e per quella tecnico-economica, e ribadisce l'importanza dell'amministrazione pubblica nella salvaguardia degli interessi degli attori coinvolti, in particolar modo dell'utente.

### 4 LA VALENZA ESOGENA E L'EFFETTO VIRTUOSO

L'effetto virtuoso pesato  $\delta$  che si ottiene dall'intervento è dato, per ogni singola valenza pesata, dal complementare dei rispettivi  $X_i, Y_i, Z_i$ . Di conseguenza si ottiene:

$$\delta_{Itt} = I_{It0} - I_{It1} = 1 - I_{It1} \quad (19)$$

$$\delta_{Ite} = I_{Ite0} - I_{Ite1} = 1 - I_{Ite1} \quad (20)$$

$$\delta_{Ier} = I_{Ier0} - I_{Ier1} = 1 - I_{Ier1} \quad (21)$$

Il  $\delta$  endogeno trovato rappresenta, quindi, la forza iniziale che spinge alla realizzazione del progetto:

$$F = f(\delta) \quad (22)$$

Finora si è descritta la valenza implicita della realizzazione del progetto e cioè i vantaggi ambientali, energetici ed economici specifici dell'intervento limitato al solo bacino territoriale definito. L'intervento impiantistico conserva però una valenza strategica traducibile nei possibili vantaggi (energetici, ambientali, ed economici) conseguibili sul dominio complementare a quello considerato. Questa potenziale valenza positiva potrebbe consentire ulteriori interventi di cogenerazione diffusa attivando le sinergie possibili esistenti.

Successivamente per il  $\delta$  verrà usato il simbolo  $\delta_{Ij/stato/i}$  dove con  $I_j$  si indica il carattere della valenza scelta ( $I_{It}, I_{Ite}, I_{Ier}$ ), *stato* indica se è endogeno, oppure esogeno, e con  $i$  il bacino territoriale di riferimento. Tale  $\delta$  è dato, quindi, numericamente dal valore specifico calcolato nelle formule (19), (20), (21).

La connessione di un ulteriore cogeneratore al primo step di cogenerazione diffusa può risultare fattibile proprio grazie alla preesistenza di detta struttura impiantistica: può accadere, infatti, che l'intervento cogenerativo da attuare in un secondo momento non abbia i margini economici per realizzarsi da solo ( $\delta_{Ij/end/2}$  negativo); una volta connesso, invece, con lo step cogenerativo di primo livello, esso sfrutta la sua valenza esogena per trasformarla in valenza endogena propria.

La valenza strategica si caratterizza come un'opportunità di non facile esplicitazione: tale opportunità non è *palese*, ma risulta piuttosto *velata*, poiché difficilmente valutabile. La valenza dell'intervento è la somma della valenza endogena e della valenza esogena:

$$\delta_{totale/i} = \delta_{endogeno/i} + \delta_{esogeno/i} \quad (23)$$

Questo vale per ogni valenza pesata  $I_j$  considerata.

È possibile identificare diverse configurazioni:

- *configurazione attuale* (0) riferita alle condizioni di partenza;
- *configurazione autarchica* (1): la cogenerazione è utilizzata per soddisfare solamente i consumi endogeni specifici, senza ottenere alcun vantaggio esogeno:  $\delta_{Ij/esogeno/1} = 0$ ; essa racchiude delle forti potenzialità, che vanno sfruttate attraverso la connessione con il territorio complementare, per permettere alla struttura societaria esterna di sfruttarne la virtuosità;

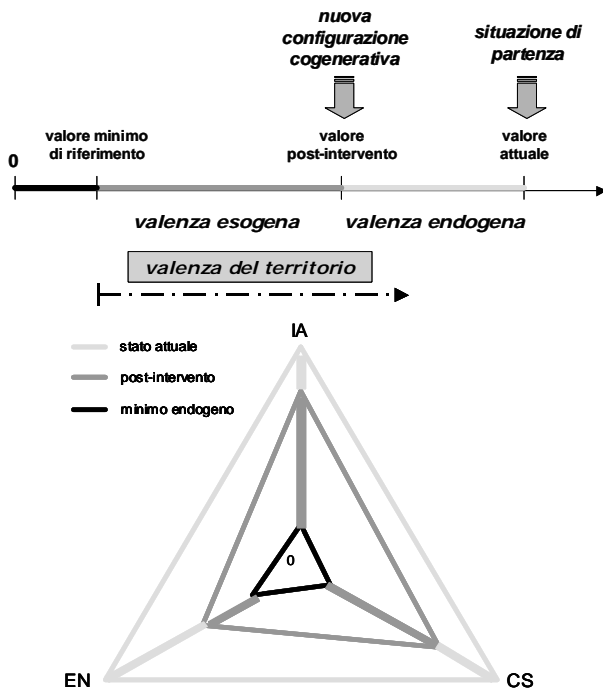


Figura 7: rappresentazione della valenza esogena e della valenza endogena attraverso il diagramma a triangolo

- *configurazione diffusa (2)*: la cogenerazione è utilizzata per vendere energia elettrica attraverso la rete nazionale (rete fisica indiretta); con tale configurazione si ottiene un vantaggio esogeno positivo:  $\delta_{Ij/esogeno/1} > 0$ .

L'intervento di connessione tra più impianti, come può essere quello della cogenerazione diffusa, permette un vantaggio endogeno per il territorio. Passando da uno stato iniziale attuale (0) ad una nuova configurazione cogenerativa (1), si ottiene una valenza endogena esplicita ed una conseguente valenza esogena teorica (potenziale) data dalla differenza tra il valore assunto nella nuova situazione e quello minimo di riferimento (fig. 7). La capacità di sfruttare tale potenziale dipenderà da un fattore interno, dato dalla valenza del bacino territoriale relativo alla configurazione autarchica, e da uno esterno, dato dall'inserimento dello stato 1 in una struttura di cogenerazione diffusa.

È possibile ora "pesare" i valori della valenza esogena in riferimento al valore pre-intervento della configurazione impiantistica considerata; rapportando questo al valore esogeno trovato, e moltiplicando per i pesi relativi alle variabili di impatto ambientale, consumo energetico e costo del servizio, si ottiene il valore cercato dell'effetto virtuoso (fig. 8); il  $\delta_{esogeno}$  sarà la differenza tra il valore endogeno e quello esogeno dell'isovalenza, per un determinato territorio:

- isovalenza totale:

$$x_i = \left( \frac{ia_i}{IA_0} \right) \cdot 0,33 + \left( \frac{en_i}{EN_0} \right) \cdot 0,33 + \left( \frac{cs_i}{CS_0} \right) \cdot 0,33 \quad (24)$$

$$\delta_{Itt/esogeno/i} = X_i - x_i \quad (25);$$

- isovalenza tecnico-economica:

$$y_i = \left( \frac{ia_i}{IA_0} \right) \cdot 0,25 + \left( \frac{en_i}{EN_0} \right) \cdot 0,25 + \left( \frac{cs_i}{CS_0} \right) \cdot 0,50 \quad (26)$$

$$\delta_{Ite/esogeno/i} = Y_i - y_i \quad (27);$$

- isovalenza ecocentrica-radicala:

$$z_i = \left( \frac{ia_i}{IA_0} \right) \cdot 0,50 + \left( \frac{en_i}{EN_0} \right) \cdot 0,50 + \left( \frac{cs_i}{CS_0} \right) \cdot 0,00 \quad (28)$$

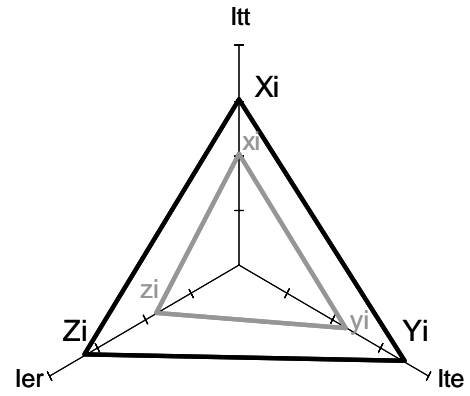


Figura 8: La configurazione finale: le lettere maiuscole indicano il triangolo endogeno, quelle minuscole il triangolo esogeno.

$$\delta_{Ier/esogeno/i} = Z_i - z_i \quad (29)$$

dove con la simbologia in carattere minuscolo si indicano i valori esogeni.

## 5 STUDIO DI COGENERAZIONE DI UDINE NORD

La cogenerazione con teleriscaldamento della zona nord di Udine è prevista dal Piano Energetico Comunale (PEC) della città. Lo studio preliminare è riferito ad un dominio territoriale che ricopre un'area di 2,3 km<sup>2</sup> (conurbazioni) e coinvolge circa 4500 residenti. Al suo interno si sono individuati 7 poli di particolare interesse energetico. Dal punto di vista tecnico, le varie utenze sono simili, in quanto utilizzano un'analogia impiantistica [5]. Successivamente vengono riportati solamente i risultati finali di tale studio di fattibilità: sono stati ipotizzati, tra gli altri, due principali scenari relativi a diverse configurazioni impiantistiche messi a confronto attraverso l'utilizzo dei triangoli di valenza (figure 9 e 10).

### 5.1 Primo scenario

Si suppone di realizzare una rete di teleriscaldamento che collega i vari poli energetici: si realizza una cogenerazione di energia elettrica ed energia termica tramite motori endotermici interni al polo "ospedale" (il più energivoro). L'impianto è dimensionato per la copertura dei fabbisogni elettrici, la vendita di energia elettrica e la vendita di energia termica: l'energia termica endogena in eccesso – rispetto ai fabbisogni termici del polo ospedaliero – viene distribuita tramite la rete di teleriscaldamento e ceduta alle utenze, cioè agli altri poli.

Tabella 1: Sintesi scenario 1: situazione attuale

	E.E.	E.T.	Gestione	Valore attuale totale
EN (tep/a)	5.473,04	5.854,34	0	11.327,38
IA (t/a)	14.000,80	15.088,90	0	29.089,70
CS (€/a)	2.143.705	2.932.578	74.329,54	5.510.613

Tabella 2: Sintesi scenario 1: triangolo minimo

	Valore minimo	Valore rapportato
EN (tep/a)	5.854,34	0,52
IA (ton CO <sub>2</sub> eq./a)	15.088,90	0,52
CS (€/a)	2.334.052	0,42

Tabella 3: Sintesi scenario 1: triangolo endogeno

	Valore dopo intervento senza C.B.	Valore rapportato	Valore dopo intervento con C.B.	Valore rapportato
EN (tep/a)	3754,45	0,33	3754,45	0,33
IA (ton CO <sub>2</sub> eq./a)	13002,68	0,45	13002,68	0,45
CS (€/a)	2255271,5	0,44	740671,5	0,14

Tabella 4: Sintesi scenario 1: triangolo delle valenze

	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$	$\delta_{Itt}$	$\delta_{Ite}$	$\delta_{Ier}$
con certificati bianchi	0,30	0,27	0,39	0,70	0,73	0,61
senza certificati bianchi	0,40	0,42	0,39	0,60	0,58	0,61

I principali risultati relativi a questa prima soluzione impiantistica sono riportati nelle tabelle 1, 2, 3, 4.

## 5.2 Secondo scenario

Nel secondo scenario di confronto si ipotizza che la centrale di cogenerazione sita nell'ospedale sia interconnessa con un cogeneratore esterno; inoltre si è considerato che l'ospedale applichi una cogenerazione autonoma e utilizzi la rete di teleriscaldamento solamente per il prelievo dell'energia termica d'integrazione. Sia per motivi geografici, che per ragioni gestionali si è deciso di posizionare la centrale di cogenerazione in posizione baricentrica rispetto al dominio territoriale considerato.

I principali risultati relativi alla seconda soluzione impiantistica sono riportati nelle tabelle 5, 6, 7, 8.

Tabella 5: Sintesi scenario 2: situazione attuale

	E.E.	E.T.	Gestione	Valore attuale totale
EN (tep/a)	5.473,04	5.854,34	0,00	11.327,38
IA (t/a)	14.000,80	15.088,90	0,00	29.089,70
CS (€/a)	2.143.705,00	2.932.578,00	74.329,54	5.510.613,00

Tabella 6: Sintesi scenario 2: triangolo minimo

	Valore minimo	Valore rapportato
EN (tep/a)	5.854,34	0,52
IA (ton CO <sub>2</sub> eq./a)	15.088,90	0,52
CS (€/a)	2.334.052,36	0,42

Tabella 7: Sintesi scenario 2: triangolo endogeno

	Valore dopo intervento senza C.B.	Valore rapportato	Valore dopo intervento con C.B.	Valore rapportato
EN (tep)	3.502,08	0,31	3.502,08	0,31
IA (ton CO <sub>2</sub> eq.)	12.924,63	0,44	12.924,63	0,44
CS (€)	2.457.927	0,47	892.927	0,17

Tabella 8: Sintesi scenario 2: triangolo delle valenze

	$X_i$	$Y_i$	$Z_i$	$\delta_{Itt}$	$\delta_{Ite}$	$\delta_{Ier}$
con certificati bianchi	0,30	0,28	0,37	0,70	0,72	0,63
senza certificati bianchi	0,40	0,43	0,37	0,60	0,57	0,63

## 5.3 Confronti

Entrambe gli interventi cogenerativi ipotizzati nel comprensorio di Udine nord rivelano prestazioni energetiche ed ambientali di rilevante importanza. I risparmi conseguibili in termini di recupero di energia si ripercuotono in maniera più che positiva sulla variabile ecologica. I vantaggi energetici e ambientali potranno rivelarsi anche superiori a quelli evidenziati in questo lavoro nel caso in cui saranno previsti gli allacciamenti delle piccole utenze civili della conurbazione del comprensorio territoriale cittadino considerato. Ciò potrebbe rappresentare uno strumento utile alla luce degli obiettivi previsti dal protocollo di Kyoto. Come risulta evidente dai due confronti, gli scenari impiantistici considerati si mantengono su livelli migliorativi molto prossimi (figure 9 e 10).

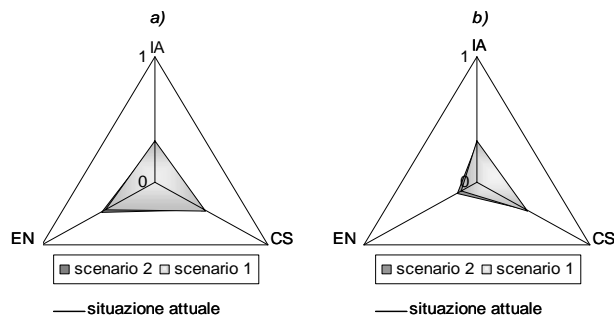


Figura 9: Confronto tra scenario 1 e scenario 2 attraverso i triangoli endogeni: a) valori post-intervento senza CB; b) valori post-intervento con CB

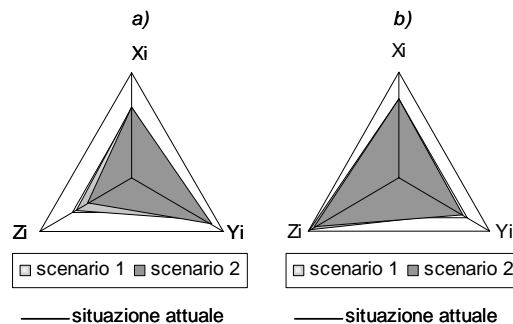


Figura 10: Confronto tra scenario 1 e scenario 2 attraverso i triangoli di valenza: a) valori post-intervento senza CB; b) valori post-intervento con CB

La scelta finale passerà, quindi, attraverso considerazioni di altro genere: in primo luogo si considererà l'utenza globale, con riferimento anche alla possibilità di vendita di energia elettrica; in secondo luogo bisognerà tener conto di valutazioni di carattere economico che coinvolgono aspetti d'investimento, ammortamento e VAN.

## 6 CONCLUSIONI

Le metodologie di valutazione della sostenibilità degli interventi impiantistici sono ormai diventate uno strumento consolidato a servizio della pianificazione energetica [6]. Il perseguimento degli obiettivi del protocollo di Kyoto e, in generale, della riduzione di costi e consumi energetici deve passare attraverso la pianificazione energetica territoriale: è quindi necessario adottare logiche di sistema. A tal fine si è ritenuto opportuno adottare un metodo di valutazione e rappresentazione degli interventi impiantistici, in particolar modo riferiti ai casi di cogenerazione con teleriscaldamento a servizio di un comprensorio cittadino, per poter descrivere in modo incisivo e completo le varie opportunità tecnologiche.

## 7 BIBLIOGRAFIA

1. P. Cagnoli, L'uso di sistemi esperti per la scelta di alternative, cap. XIII parte e, 2003.
2. M. Corriero, Lo sviluppo sostenibile-Agenda 21 locale, I quaderni dello sviluppo sostenibile.
3. M. Morosini, Sistemi di indicatori ambientali, Università di Pisa, 2004.
4. Cfr. Fondazione ENI Enrico Mattei, "Progetto Venezia 21 - Indicatori di sostenibilità: uno strumento per l'Agenda 21 a Venezia", 1998.
5. B. Monaco, G. Nardin, P. Simeoni, Aspetti energetici ed ambientali della cogenerazione in un comprensorio territoriale cittadino, I Congresso Seriale-Qualità dell'aria nelle aree industriali ed urbane, Udine, Italia, 16 dicembre 2004.
6. Afgan, Carvalho, Hovanov, Energy system assessment with sustainability indicators, Energy Policy 28(2000) 603-612.