

# VIA, VAS E ANALISI MULTICRITERIALE IL CASO DI CENTRALI TERMOELETTICHE

Franco Cotana, Michele Goretti

Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via G. Duranti, 67 – 06125 PERUGIA

## SOMMARIO

Nella Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e ancor più nella Valutazione Ambientale Strategica (VAS) le diverse ipotesi di progetto devono essere selezionate e classificate, tenendo conto di tutti gli elementi che il decisore ritiene importanti. Il risultato del processo di valutazione dipende dai differenti criteri adottati, spesso conflittuali, che pertanto devono essere scelti con cura e con metodologie, per quanto possibile, oggettive.

Il presente lavoro si propone di confrontare diversi approcci, applicabili a differenti tipologie di opere, per la scelta di alternative progettuali, tutte realizzabili, con l'obiettivo di individuare la soluzione che minimizza gli impatti ambientali e nel contempo risulta ottimizzata sotto il profilo tecnico-economico. Un saggio di analisi a molti criteri è stato quindi applicato nell'ambito più esteso di una VAS, mettendo a confronto tre progetti di centrali termoelettriche che hanno ottenuto il giudizio di compatibilità ambientale in sede di VIA. È stato inoltre approfondito lo studio dei parametri giudicati più rilevanti ai fini del processo decisionale, con particolare attenzione agli effetti sull'ambiente e sulla salute pubblica e alle ricadute socio-economiche.

## INTRODUZIONE

Confrontare e scegliere tra diverse alternative in presenza di differenti criteri di valutazione, spesso inconciliabili, è un compito delicato dal quale non può esimersi chi si occupa di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA). Per selezionare le soluzioni tecnicamente ed economicamente realizzabili e classificarle secondo un ordine che tenga conto di tutti i criteri considerati dal decisore, sono stati elaborati diversi metodi, ognuno dei quali è applicabile a determinati contesti.

Qualunque sia il metodo adottato, il risultato finale dipende sensibilmente dai criteri di valutazione assunti, che pertanto devono essere scelti accuratamente, cercando di esaminare tutti i fattori significativi e di evitare "doppi conteggi".

Il presente lavoro affronta il problema della scelta dell'alternativa "migliore" con un approccio multicriteriale. Nella prima parte sono descritti i principali metodi utilizzati per affrontare il problema decisionale: tali metodi, di carattere generale, possono essere adottati sia nella procedura di VIA, sia in quella di VAS (Valutazione Ambientale Strategica). Successivamente è illustrato il quadro normativo vigente in materia di VAS. Infine è presentato un saggio applicativo, che indica una metodologia di approccio allo scenario di pianificazione e programmazione della VAS. Il saggio è un'analisi comparativa limitata a soli tre progetti di centrali termoelettriche, che hanno superato con giudizio positivo l'iter procedurale della VIA, e vuole essere una dimostrazione di come l'analisi a molti criteri possa essere estesa dall'ambito particolare della VIA a quello più generale della VAS.

## METODI DI VALUTAZIONE

I principali approcci al problema decisionale, utilizzati in

sede di VIA, sono l'analisi a molti criteri classica, l'analisi gerarchica e la famiglia dei metodi ELECTRE. Di ognuno di tali metodi di valutazione sono approfonditi la logica secondo la quale è impostato il problema, il significato dei passi da compiere, i vantaggi e i limiti (sia concettuali, sia operativi), le fasi e le tipologie di progetto a cui sono più adatti.

### Analisi a molti criteri classica

L'analisi a molti criteri "classica" (Keeney e Raiffa, 1976) è una metodologia di approccio al problema decisionale che consente di generare un ordinamento delle alternative: ad ogni soluzione esaminata è attribuito un punteggio, che ne misura la prestazione rispetto a tutti i criteri considerati.

Il procedimento si basa sulla costruzione della *matrice di valutazione* (Matrice 1), avente tante righe quanti sono i criteri e tante colonne quante sono le alternative, i cui elementi  $g_i(k)$  (riga  $i$ -esima, colonna  $k$ -esima) rappresentano gli indicatori o gli impatti dell'alternativa  $A_k$  (colonna  $k$ -esima) rispetto al criterio  $C_i$  (riga  $i$ -esima). L'indicatore di un'alternativa rispetto ad un criterio è la stima di quel criterio una volta realizzata l'alternativa, mentre l'impatto è la differenza tra tale stima e il valore che si avrebbe se l'alternativa non fosse realizzata. Generalmente si preferisce utilizzare gli indicatori, perché forniscono maggiori informazioni.

Matrice 1 – Struttura di una matrice di valutazione

	$A_1$	$A_2$	...	$A_k$	...
$C_1$	$g_1(1)$	$g_1(2)$	...	$g_1(k)$	...
$C_2$	$g_2(1)$	$g_2(2)$	...	$g_2(k)$	...
...	...	...	...	...	...
$C_i$	$g_i(1)$	$g_i(2)$	...	$g_i(k)$	...
...	...	...	...	...	...

Data una matrice di valutazione, a ciascun criterio  $C_i$  deve essere associata una specifica *funzione di utilità*  $v_i$ , la cui applicazione consente di ottenere, da ogni elemento della riga  $i$ -esima, un valore di solito compreso tra 0 e 1, dove 1 indica la massima "soddisfazione" e 0 la massima "insoddisfazione" per il comportamento della corrispondente alternativa rispetto al criterio considerato. Per ogni alternativa  $A_k$ , i valori  $g_i(k)$  assunti dagli indicatori relativamente a ciascun criterio vengono così trasformati in valori  $v_i g_i(k)$ , che misurano la prestazione dell'alternativa rispetto ai singoli criteri e vengono abitualmente ordinati in una seconda matrice (Matrice 2), delle stesse dimensioni della matrice di valutazione.

Matrice 2 – Matrice di valutazione dopo l'applicazione delle funzioni-valore

	$A_1$	$A_2$	...	$A_k$	...
$C_1$	$v_1 g_1(1)$	$v_1 g_1(2)$	...	$v_1 g_1(k)$	...
$C_2$	$v_2 g_2(1)$	$v_2 g_2(2)$	...	$v_2 g_2(k)$	...
...	...	...	...	...	...
$C_i$	$v_i g_i(1)$	$v_i g_i(2)$	...	$v_i g_i(k)$	...
...	...	...	...	...	...

Ad ogni criterio  $C_i$  è necessario attribuire un proprio *peso*  $w_i$ , che ne indichi l'importanza relativa rispetto agli altri criteri. Il corrispondente *vettore dei pesi*  $W$  dovrebbe essere definito dal decisore, per rispecchiarne la struttura delle preferenze; la procedura per ottenere il vettore dei pesi in modo rigoroso risulta spesso laboriosa.

Una volta definiti i pesi, la *prestazione complessiva*  $V(k)$  di ogni alternativa  $A_k$  è calcolata come somma pesata delle sue prestazioni rispetto ai singoli criteri  $C_i$ :

$$V(k) = w_1 v_1 g_1(k) + w_2 v_2 g_2(k) + \dots + w_i v_i g_i(k) + \dots \quad (1)$$

Nella Matrice 3 le prestazioni complessive sono riportate, per ogni alternativa, nella rispettiva colonna (ultima riga), insieme alle prestazioni parziali, indicate nella stessa colonna, e ai pesi associati ai criteri, riportati nella colonna dei pesi.

Matrice 3 – Matrice di valutazione delle prestazioni complessive

	$A_1$	$A_2$	...	$A_k$	...	$W$
$C_1$	$v_1 g_1(1)$	$v_1 g_1(2)$	...	$v_1 g_1(k)$	...	$w_1$
$C_2$	$v_2 g_2(1)$	$v_2 g_2(2)$	...	$v_2 g_2(k)$	...	$w_2$
...	...	...	...	...	...	...
$C_i$	$v_i g_i(1)$	$v_i g_i(2)$	...	$v_i g_i(k)$	...	$w_i$
...	...	...	...	...	...	...
$V$	$V(1)$	$V(2)$	...	$V(k)$	...	

Note infine le prestazioni complessive, è possibile costruire un ordinamento delle alternative, nel quale la prima ha il punteggio più alto e le successive punteggi via via decrescenti. Il risultato dipende dal vettore dei pesi assegnato e riflette perciò la soggettività del decisore. A tale riguardo risulta molto utile un'analisi di sensibilità, che valuti come cambia la soluzione al variare dei pesi e determini quindi la solidità dell'ordinamento trovato con uno specifico vettore dei pesi.

L'analisi a molti criteri classica è l'unico metodo rigoroso da un punto di vista formale e fornisce un ordinamento completo delle alternative. Tuttavia tale approccio si basa su ipotesi (separabilità e additività) non facilmente verificate nei casi reali e richiede un'interazione complessa tra chi esegue l'analisi dal punto di vista tecnico e il decisore (stima delle funzioni-valore e del vettore dei pesi).

L'analisi a molti criteri classica è adatta ad affrontare problemi ben strutturati, in una fase del processo decisionale in cui la maggior parte delle stime possono essere effettuate in modo quantitativo.

## Analisi gerarchica

Anche l'analisi gerarchica (AHP) (Saaty, 1986; Vargas e Kats, 1990) è una metodologia che esprime la prestazione complessiva di differenti alternative, attribuendo a ciascuna di esse un punteggio ottenuto come somma pesata delle prestazioni dei singoli criteri.

Il metodo si articola in tre fasi:

- 1) decomposizione;
- 2) confronti a coppie;
- 3) ricomposizione gerarchica.

La decomposizione consiste nella definizione di una struttura gerarchica, comprendente:

- a) un livello iniziale, che è l'obiettivo generale (ad esempio, selezionare l'alternativa "migliore");
- b) un livello finale, che esprime le alternative;
- c) una serie di livelli intermedi, che rappresentano i vari criteri e sotto-criteri.

Nel caso più semplice la gerarchia ha tre livelli (Figura 1):

- 1) obiettivo generale (OG);
- 2) criteri ( $C_i$ );
- 3) alternative ( $A_k$ ).

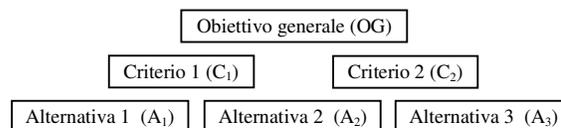


Figura 1 – Gerarchia a tre livelli: obiettivo generale, criteri e alternative

Gli elementi della gerarchia sono sottoposti a confronti a coppie: ogni elemento di ciascun livello è confrontato con gli altri elementi dello stesso livello rispetto ad ogni criterio del livello superiore. Il decisore deve rispondere a domande del tipo: "di quanto è preferibile l'alternativa  $i$  all'alternativa  $j$  dal punto di vista del criterio  $k$ ?", oppure: "di quanto è più importante il criterio  $l$  del criterio  $m$  rispetto all'obiettivo generale?". La risposta può essere quantitativa, ma poiché non sempre ciò è possibile, la scala di importanza relativa di Saaty (Tabella 1) prevede che possano essere date anche risposte qualitative, traducibili in valori numerici.

Tabella 1 – Scala di importanza relativa di Saaty per i confronti a coppie

Intensità di preferenza di $i$ su $j$	Traduzione numerica
uguale	1
debole	3
significativa	5
forte	7
assoluta	9
valori intermedi	2, 4, 6, 8

Le risposte  $m_{ij}$  del decisore sono riportate in *matrici di confronti a coppie* (Matrice 4), nelle quali la preferenza di  $j$  rispetto ad  $i$  è il reciproco di quella di  $i$  rispetto a  $j$ . Tali matrici sono quadrate e hanno dimensioni pari al numero di elementi del livello gerarchico che si sta considerando.

Matrice 4 – Struttura di una matrice dei confronti a coppie

$C_i$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	$m_{12}$	$m_{13}$
$A_2$	$1/m_{12}$	1	$m_{23}$
$A_3$	$1/m_{13}$	$1/m_{23}$	1

Per ogni livello gerarchico si devono generare tante matrici dei confronti a coppie quanti sono gli elementi del livello

superiore. Da ognuna di tali matrici si ricava un ordinamento degli elementi del livello gerarchico considerato rispetto al singolo criterio coinvolto, che appartiene al livello superiore.

La matrice dei confronti a coppie è consistente se, dati tre elementi qualunque  $m_{ij}$ ,  $m_{ik}$ ,  $m_{jk}$ , risulta:

$$m_{ik} = m_{ij} \cdot m_{jk} \quad (2)$$

Se la matrice considerata è consistente, riflette un'esatta modellazione delle preferenze del decisore e il vettore di ordinamento è l'autovettore dominante della matrice (proporzionale a ciascuna colonna). A causa dell'inevitabile approssimazione delle risposte del decisore, spesso la matrice dei confronti a coppie non è consistente. L'inconsistenza è quasi inevitabile se il decisore utilizza la scala di importanza relativa di Saaty, dato che questa ha un limite superiore. Se l'errore di consistenza è abbastanza piccolo, Saaty propone metodi approssimati per avvicinarsi all'autovettore dominante.

Ottenuti i vettori di ordinamento di ogni livello rispetto agli elementi del livello superiore, si può risalire la gerarchia per determinare il vettore di ordinamento globale delle alternative rispetto all'obiettivo generale. Nel caso di una gerarchia a tre livelli, i vettori di ordinamento che si ottengono sono quelli delle alternative rispetto a ciascun criterio e dei criteri rispetto all'obiettivo generale. Data un'alternativa, il punteggio che le viene attribuito nel vettore di ordinamento globale è la somma pesata degli elementi del suo vettore di ordinamento rispetto ai criteri, dove i pesi sono gli elementi del vettore di ordinamento dei criteri rispetto all'obiettivo generale.

Dal punto di vista matematico, l'analisi gerarchica è più complessa dell'analisi a molti criteri classica, ma tende a semplificare l'interazione con il decisore, che risponde a domande più semplici e dello stesso tipo (confronti a coppie), e permette di esprimere le preferenze in modo qualitativo. Un limite dell'analisi gerarchica è l'introduzione di elementi soggettivi non gestibili dal decisore, quali la scelta della scala di importanza relativa, nel caso di valutazioni qualitative, o la definizione della soglia di inconsistenza accettabile e dei vettori di ordinamento, nel caso di inconsistenza. Inoltre l'ordinamento finale dipende dai progetti presi in considerazione e può variare ("rank reversal") con l'introduzione di alternative anche irrilevanti.

L'analisi gerarchica consente anche stime qualitative ed è quindi adatta alle fasi preliminari, nelle quali il giudizio degli esperti è più frequente dell'uso di modelli quantitativi.

## Metodi ELECTRE

I metodi ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité; Roy, 1993; Maystre et al., 1994) nascono dalla constatazione che i rigorosi assiomi matematici sono inadatti a descrivere una realtà complessa come quella dei processi decisionali. L'obiettivo è di realizzare un approccio il più possibile aderente al buon senso delle scelte reali, anche a costo di mantenere incoerenze dal punto di vista matematico.

L'analisi a molti criteri classica e l'analisi gerarchica sono metodi compensativi, per i quali è sempre possibile supplire un deficit in un certo criterio con un adeguato beneficio in un altro. I metodi ELECTRE prevedono invece che possa esistere incomparabilità, ossia impossibilità di stabilire una relazione di preferenza o di indifferenza in un confronto. La scelta si effettua tra opzioni confrontabili, appartenenti alla stessa categoria. Inoltre ELECTRE considera esplicitamente il fatto che la capacità di discriminazione possa essere finita. Queste ipotesi fanno venir meno la transitività delle preferenze.

I metodi ELECTRE si basano sull'ipotesi di surclassamento. L'alternativa  $A_i$  surclassa la  $A_j$  quando ci sono validi motivi per preferirla ad essa. Per l'esistenza della relazione di surclassamento si considerano sia le ragioni a favore o che non si oppongono (concordanza), le quali devono essere sufficientemente forti affinché l'area di non conflitto sia elevata, sia le ragioni contrarie (discordanza), le quali devono essere sufficientemente deboli affinché il rammarico dovuto all'eventuale eliminazione di  $A_j$  da parte di  $A_i$  sia limitato. Per calcolare la concordanza e la discordanza è necessario disporre di una matrice di valutazione monotona (ciascun indicatore è da massimizzare o da minimizzare per ottenere il massimo di soddisfazione) e di un vettore dei pesi che esprima l'importanza relativa dei criteri. Esiste una varietà di sfumature su come calcolare e integrare tra loro concordanza e discordanza e cosa ricavare come risultato finale dell'analisi.

Poiché non sempre esiste una relazione di surclassamento, data una coppia di alternative, ELECTRE genera un grafo di surclassamenti incompleto. A causa dell'incomparabilità e dell'intransitività, non è possibile ricavare un ordinamento, bensì un "nucleo" di alternative, tra loro incompatibili, che non è possibile scartare perché non surclassate da nessun'altra alternativa del nucleo. Pertanto non si parla di alternative "migliori", ma di alternative che si possono scartare e alternative che sono candidate alla scelta.

L'ordinamento finale dipende dalle alternative presenti, come nell'analisi gerarchica, e, a causa dell'incomparabilità, risulta differente a seconda che venga calcolato in modo ascendente, discendente o come sintesi dei due. Alcune semplificazioni introdotte dai metodi ELECTRE sono solo apparenti: si utilizzano pesi senza analizzarne le modalità di assegnazione e si eliminano le funzioni di utilità postulando matrici di valutazione monotone. Inoltre il risultato finale dipende fortemente da parametri che non hanno un preciso significato fisico e i cui valori vengono fissati arbitrariamente.

Tabella 2 – Caratteristiche principali dell'analisi a molti criteri classica (AMCC), dell'analisi gerarchica (AHP) e dei metodi ELECTRE

	AMC	AHP	ELECTRE
<b>Risultato</b>	Punteggio per ogni alternativa; Ordinamento completo	Punteggio per ogni alternativa; Ordinamento completo	Nucleo; Ordinamenti parziali
<b>Rigore matematico</b>	Sì	Pesi assegnati in modo non rigoroso; Arbitrarietà nella scelta della scala qualitativa	Arbitrarietà nell'assegnazione di alcune soglie
<b>Rank reversal</b>	No	Dipendenza da alternative irrilevanti	Dipendenza da alternative irrilevanti
<b>Aderenza al processo decisionale reale</b>	Prevale l'aspetto teorico	Prevale l'aspetto teorico, ma si ammette inconsistenza del decisore	Aderenza al buon senso; Ammette incomparabilità
<b>Semplicità per decisore</b>	Domande complesse	Domande abbastanza semplici, ma numerose	Semplice
<b>Trasparenza per decisore</b>	Possibilità di comprendere tutti i passaggi	Arbitrarietà nella scelta della scala qualitativa	Arbitrarietà nell'assegnazione di alcune soglie; Complessità dal punto di vista matematico
<b>Possibilità di trattare dati qualitativi</b>	Scarsa: i dati qualitativi devono essere tradotti in quantitativi	Ottima	Buona

## Sintesi delle caratteristiche dei diversi metodi

Le considerazioni effettuate sulle caratteristiche dei metodi di valutazione descritti sono riassunte nella precedente tabella di confronto (Tabella 2). Le voci considerate sono:

- 1) il tipo di risultato ottenuto;
- 2) il rigore dal punto di vista matematico;
- 3) la dipendenza del risultato dalla presenza di alternative irrilevanti e la conseguente possibilità di “rank reversal”;
- 4) l’aderenza del metodo al processo decisionale reale;
- 5) la semplicità o la complessità dei passi del decisore;
- 6) la possibilità per il decisore di comprendere tutto il processo decisionale e le implicazioni di ogni scelta;
- 7) la flessibilità del metodo per quanto riguarda la possibilità di trattare dati anche non quantitativi.

## QUADRO NORMATIVO IN MATERIA DI VAS

A differenza della VIA, che si applica a singoli progetti di opere, la VAS ha il compito di verificare la coerenza di proposte programmatiche e pianificatorie con gli obiettivi di sviluppo sostenibile.

La Direttiva 42/2001/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, concernente la valutazione degli effetti di determinati piani e programmi, stabilisce che l’ambito di applicazione della VAS riguarda tutti “i piani e i programmi che possono avere effetti significativi sull’ambiente” e “che sono elaborati per i settori agricolo, forestale, della pesca, energetico, industriale, dei trasporti, della gestione dei rifiuti e delle acque, delle telecomunicazioni, turistico, della pianificazione territoriale o della destinazione dei suoli, e che definiscono il quadro di riferimento per l’applicazione dei progetti elencati negli allegati I e II della Direttiva 85/337/CEE, o per i quali, in considerazione dei possibili effetti sui siti, si ritiene necessaria una valutazione ai sensi degli art. 6 e 7 della Direttiva 92/43/CEE” (art. 3, commi 1 e 2). Inoltre gli Stati membri possono determinare altre tipologie di piani o programmi aventi effetti significativi sull’ambiente (art. 3, commi 3, 4, 5).

La Direttiva prevede la redazione di un rapporto ambientale “in cui siano individuati, descritti e valutati gli effetti significativi che l’attuazione del piano o del programma potrebbe avere sull’ambiente nonché le ragionevoli alternative alla luce degli obiettivi e dell’ambito territoriale del piano o del programma” (art. 5, comma 1). Tali alternative progettuali devono essere sottoposte a consultazione delle Autorità e del pubblico, o a consultazione transfrontaliera nei casi previsti dall’art. 7. La redazione del piano o del programma si basa sulla scelta dell’alternativa derivante dalla consultazione.

Ai sensi della Legge 15 dicembre 2004, n. 308 (Gazzetta Ufficiale n. 302 del 27 dicembre 2004 – Supplemento Ordinario n. 187), il Governo italiano è delegato ad adottare, entro diciotto mesi dall’entrata in vigore della stessa legge, “uno o più decreti legislativi di riordino, coordinamento e integrazione delle disposizioni legislative in differenti settori e materie”, ivi comprese “le procedure per la Valutazione Ambientale Strategica (VAS)” (art. 1, comma 1, lettera f).

I suddetti decreti legislativi devono garantire il pieno recepimento della Direttiva 2001/42/CE in materia di VAS, introdurre meccanismi di coordinamento tra la procedura di VIA e quella di VAS e promuovere l’utilizzo della VAS nella stesura dei piani e dei programmi statali, regionali e sovracomunali (art. 1, comma 9, lettera f).

In vista dell’adozione di tali provvedimenti, il presente

lavoro si propone come un contributo utile ai fini dell’applicazione della VAS.

## ANALISI GERARCHICA APPLICATA A CENTRALI TERMOELETTRICHE A CICLO COMBINATO

Con gli strumenti dell’analisi a molti criteri è stato trattato il problema decisionale relativo alla scelta fra tre progetti alternativi di tipiche centrali termoelettriche a ciclo combinato.

La metodologia di valutazione adottata è l’analisi gerarchica di Saaty (AHP), la quale, oltre ad essere tra i metodi più operativi in casi che implicano molteplici azioni e criteri, consente di esplicitare in forma chiara e accessibile le basi di calcolo dei parametri considerati e permette di effettuare anche stime di carattere qualitativo.

Tale approccio può essere utile in una prospettiva di VAS.

### Alternative progettuali

Le centrali esaminate hanno ottenuto il giudizio di compatibilità ambientale, percorrendo l’iter ministeriale della VIA. Il loro confronto secondo il metodo dell’analisi gerarchica deve essere considerato come un esempio di indirizzo procedurale per un’analisi comparativa di progetti alternativi, localizzati in aree anche molto distanti tra loro.

I tre progetti sono:

- 1) centrale termoelettrica a ciclo combinato, di potenza complessiva pari a 750 MWe, alimentata a metano, da localizzare nel comune di Termoli (CB) – Progetto approvato con DM 03/09/2002;
- 2) centrale termoelettrica a ciclo combinato, di potenza complessiva pari a 385 MWe, alimentata a metano, da localizzare nel comune di Portogruaro (VE) – Progetto approvato con DM 22/10/2002;
- 3) centrale termoelettrica a ciclo combinato, di potenza complessiva pari a 750 MWe, alimentata a metano, da localizzare nel comune di Aprilia (LT) – Progetto approvato con DM 22/01/2004.

### Definizione delle azioni

Fondamentalmente si possono identificare due tipi di azioni: di carattere spaziale e di carattere temporale.

Dal punto di vista spaziale, nel presente lavoro ci limitiamo a considerare l’ambito di studio delle perturbazioni indotte dalle centrali. Per questa tipologia di opere in sede di VIA si richiede un’estensione di 5 km di raggio dal sito dell’impianto.

Molto più significativa è, almeno per il caso in esame, la definizione temporale delle azioni di progetto, riconducibili alle fasi di costruzione ed esercizio.

Per applicare il metodo AHP a tre centrali termoelettriche è indispensabile semplificare lo scenario di impatto: l’esame di tutti gli aspetti, anche di quelli poco significativi, condurrebbe a un’analisi eccessivamente macchinosa, che rischierebbe di essere poco aderente alla realtà nella scelta dei pesi. L’identificazione e la selezione degli obiettivi sono le basi per poter definire una gerarchia di subordinazione consistente.

La Tabella 3 è il risultato di una valutazione preliminare delle voci di impatto relative alla tipologia di opera in esame.

Nella gerarchia di subordinazione degli impatti ogni progetto è considerato nella sua totalità; per alcuni aspetti, tuttavia, si è scelto di scindere i contributi dell’impianto da quelli delle opere complementari (gasdotto di alimentazione, elettrodotto di cessione).

Tabella 3 – Sintesi degli impatti ambientali: NL=Negativo Lieve, NS=Negativo Significativo, PL=Positivo Lieve, PS=Positivo Significativo

Azioni rilevanti		FASE DI COSTRUZIONE										FASE DI ESERCIZIO										
		Occupazione suolo	Edifici e infrastrutture	Rumori e vibrazioni	Polveri	Opere viarie	Movimento materiali	Occupazione	Pendolarismo	Servizi di cantiere	Occupazione suolo	Edifici e infrastrutture	Rumori e vibrazioni	Linee elettriche	Prefiltri liquidi	Effluenti liquidi	Effluenti aeriformi	Residui solidi	Pendolarismo	Occupazione	Forniture e appalti	
AMBIENTE ANTROPICO	Fattori caratteristici del territorio	Qualità del suolo												NL								
		Viabilità																				
		Alloggi																				
		Uso del territorio	NL																			
		Valori paesag. cult.	NL																			
	Fattori demog.	Popolaz.																				
		Mercato del lavoro																				
		Reddito																				
	Fattori socio-economici	Servizi																				
		Attività agrarie																				
Attività industriali																						
Commercio																						
AMBIENTE NATURALE	Copi idrici	Idrologia	NL																			
		Qualità dell'acqua																				
	Ambiente atmosferico	Qualità dell'aria																				
		Micro-clima																				
		Formazione di nebbie																				
	Aspetti naturalistici	Flora	NL																			
		Fauna terrestre	NL																			
		Fauna acquatica	NL																			

Per quanto riguarda la caratterizzazione temporale degli impatti previsti, in molti casi si è scelto di trascurare la fase di cantiere (salvo, ad esempio, per la valutazione dei risvolti occupazionali), perché risulta molto limitata rispetto alla vita utile dell'impianto (circa 2 anni contro 25÷30 anni) ed è contraddistinta da effetti che di solito sono di modesta entità.

### Decomposizione gerarchica

La fase di decomposizione consiste nella definizione di una struttura gerarchica. Ciò significa identificare gli obiettivi che devono essere raggiunti allo scopo di minimizzare gli impatti esercitati dal progetto.

Nell'analisi gerarchica gli obiettivi sono articolati a partire da quello principale o "radice" (la scelta dell'impianto "migliore"), a sua volta frazionato in sotto-obiettivi più dettagliati ("rami" e "foglie") ad esso subordinati. La transitività della relazione di subordinazione garantisce che la soddisfazione degli obiettivi ai livelli inferiori soddisfi indirettamente quelli più in alto nella gerarchia. Mentre gli obiettivi vicini alla "radice" sono in genere di carattere più strategico, a mano a mano che si avvicinano alle "foglie" acquistano un carattere più tecnico, rappresentando aspetti relativi ad una o più componenti ambientali.

Normalmente la costruzione della gerarchia inizia da una lista di finalità, che viene ampliata in obiettivi sempre più specifici fino a raggiungere una struttura il più possibile

completa. Il procedimento deve considerare sia le analisi dei differenti specialisti, sia le preoccupazioni dei diversi soggetti.

Le tre centrali a ciclo combinato hanno seguito iter completamente indipendenti, affrontando il giudizio dei vari esperti in seno alla commissione VIA. Questo giudizio, orientato alla definizione dell'impianto "ambientalmente compatibile", potrebbe essere articolato in base a una struttura gerarchica tale da rendere oggettiva la procedura. Gli esperti dei vari settori potrebbero individuare le principali voci di impatto per ogni tipologia di opera e sfruttare la relativa gerarchia per indirizzare il proponente verso l'alternativa meno impattante. È in questo scenario che si inserisce la VAS.

Nel presente lavoro si è definita una gerarchia, ammettendo che questa sia il risultato (o il compromesso) delle indicazioni fornite dagli specialisti dei settori interessati (Figura 2).

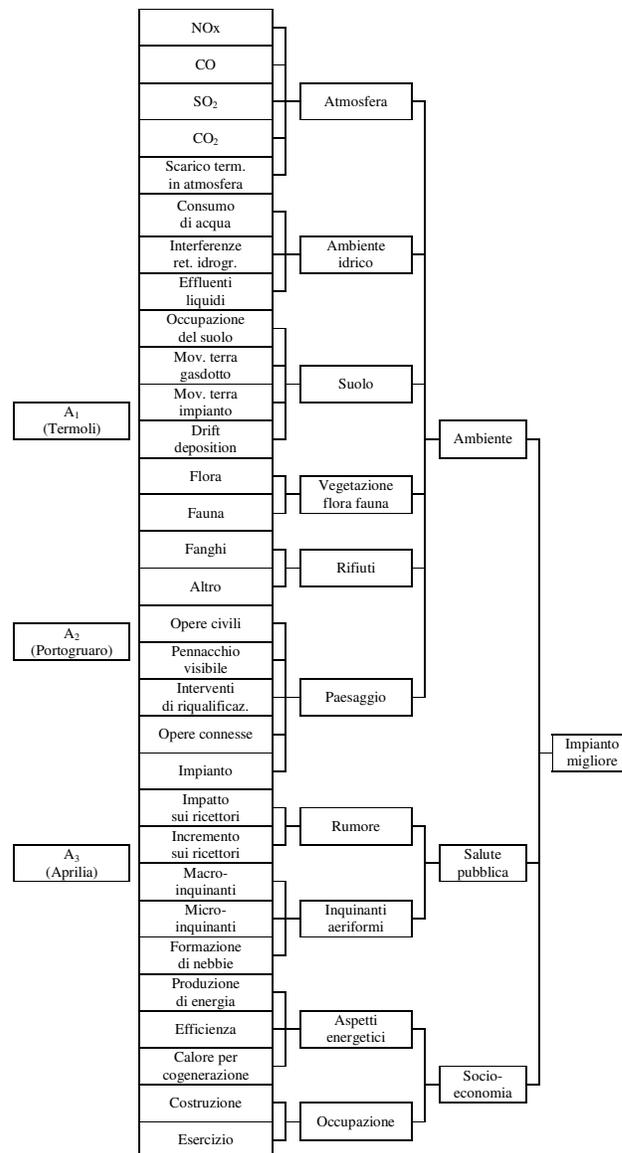


Figura 2 – Gerarchia degli obiettivi

Tale gerarchia si articola in quattro livelli:

- 1) il "super-obiettivo" (scelta dell'impianto "migliore");
- 2) l'obiettivo di minimizzare le interferenze sull'ambiente e la salute pubblica e di massimizzare i benefici socio-economici;
- 3) l'obiettivo di minimizzare gli impatti sull'atmosfera,

sull'ambiente idrico, etc. (sotto-obiettivi dell'ambiente), e gli effetti dovuti al rumore e agli inquinanti aeriformi (sotto-obiettivi della salute pubblica); di massimizzare gli aspetti energetici e l'occupazione (sotto-obiettivi della socio-economia);

- 4) l'obiettivo di minimizzare le emissioni di NOx, di CO, di SO<sub>2</sub>, di CO<sub>2</sub> e lo scarico termico in atmosfera (sotto-obiettivi della voce "atmosfera"), etc., fino all'obiettivo di massimizzare la produzione di energia, l'efficienza e il calore esportato in regime di cogenerazione (sotto-obiettivi della voce "aspetti energetici").

Ai quattro livelli elencati si aggiunge quello delle tre alternative di progetto (Termoli, Portogruaro ed Aprilia).

Una valutazione comparativa condotta sulla base di informazioni quantitative è preferibile, in quanto solleva gli esperti dall'attribuire giudizi sui quali grava una componente di soggettività. Analiticamente ciò significa avere a che fare con matrici consistenti, che riflettono perciò un'esatta modellazione delle preferenze del decisore.

Ai fini del presente lavoro si è fatto spesso ricorso ad indicatori, cioè parametri che individuano un fenomeno o una caratteristica ambientale in unità di misura fisiche, e, ove inevitabile, a confronti in termini qualitativi delle situazioni di interazione tra il progetto e l'ambiente.

La valutazione qualitativa è stata necessaria per interpretare i rapporti tra i quattro livelli gerarchici. Si è quindi costruita una funzione di valore per ciascun criterio terminale, richiedendo ad ogni esperto di settore di stimare le relazioni di importanza tra ogni coppia di criteri di sua competenza. Il confronto può essere realizzato usando il metodo di Saaty, seguito in questo saggio applicativo (Tabella 1).

Sono stati così esaminati 31 criteri di IV livello, rispondendo a domande, quali: "di quanto A<sub>1</sub> è preferibile ad A<sub>2</sub>, nell'ottica di minimizzare le emissioni di NOx?", etc., per arrivare a: "di quanto A<sub>2</sub> è preferibile ad A<sub>3</sub> nell'ottica di massimizzare l'occupazione durante la fase di esercizio?".

### Confronti a coppie di III livello

Al livello più basso di indagine si è cercato il più possibile di tenere conto delle diversità di scenario, inevitabili se si considerano alternative con diversa localizzazione.

Passando al III livello e ai rami superiori della gerarchia, i criteri di giudizio sono stati decontestualizzati. I confronti sono stati effettuati rispondendo alle seguenti domande: "quanto vale il generico criterio del III livello rispetto agli altri criteri dello stesso livello in relazione al raggiungimento dell'obiettivo di un criterio di II livello?". Questo comporta rispondere a domande, quali: "di quanto la minimizzazione degli NOx è più importante della minimizzazione del CO, nell'ottica di contenere l'impatto sull'atmosfera", etc., per finire con: "di quanto è più importante l'occupazione nella fase di costruzione rispetto a quella nella fase di esercizio, nell'ottica di massimizzare la forza lavoro impiegata?".

### Confronti a coppie di II livello

Risalendo l'albero gerarchico (Figura 2) nei confronti a coppie di II livello è necessario rispondere a domande, che vanno da: "di quanto l'atmosfera è più importante dell'ambiente idrico, nell'ottica di minimizzare l'impatto globale sull'ambiente?", fino a: "di quanto gli aspetti energetici sono più importanti di quelli occupazionali, nell'ottica di migliorare le condizioni socio-economiche?".

Ogni passo percorso verso il super-criterio (impianto

"migliore") presenta un grado di arbitrarietà più elevato. Con astrazione crescente ci si confronta con categorie sempre più ampie e difficilmente comparabili. Come per i confronti precedenti è indispensabile poter utilizzare una scala di preferenza relativa: per continuità di trattazione ci serviamo di quella di Saaty (Tabella 1).

### Confronti a coppie di I livello

Si sale infine l'ultimo gradino verso il super-criterio "impianto migliore". Questo livello è suddiviso in tre criteri:

- 1) minimizzazione dell'impatto sull'ambiente;
- 2) minimizzazione dell'impatto sulla salute pubblica;
- 3) massimizzazione delle ricadute socio-economiche.

Anche se il grado di astrazione a questo punto del procedimento è tale da rendere molto complesso qualsiasi tipo di comparazione, sono stati effettuati i confronti a coppie sintetizzati nella Matrice 5.

Matrice 5 – Matrice dei confronti a coppie dei criteri di I livello rispetto al super-criterio "impianto migliore"

IMPIANTO MIGLIORE	Ambiente	Salute pubblica	Socio-economia
Ambiente	1	1/4	1/3
Salute pubblica	4	1	2
Socio-economia	3	1/2	1

Di seguito è riportato il vettore dei pesi associati ai tre criteri (Matrice 6). La stima dell'errore, relativamente basso, indica che, pur in assenza di consistenza, il decisore è stato in grado di esprimere un giudizio non contraddittorio:

$$\min \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left( m_{ij} - \frac{w_i}{w_j} \right)^2 = 0.349 \quad (3)$$

Matrice 6 – Vettore dei pesi associati ai criteri di I livello rispetto al super-criterio "impianto migliore"

IMPIANTO MIGLIORE	W <sub>i</sub>
Ambiente	0.127
Salute pubblica	0.530
Socio-economia	0.343

### Ricomposizione gerarchica

Ottenuti i vettori di ordinamento di ciascun livello rispetto ai singoli elementi del livello superiore, la ricomposizione gerarchica attribuisce ad ogni progetto un punteggio, pari alla somma pesata delle prestazioni calcolata lungo ciascun percorso, per determinare l'ordinamento globale delle alternative rispetto al super-criterio.

Considerando i criteri di IV livello della componente "atmosfera" e raggruppando per alternativa i vettori dei pesi rispetto ad ogni singolo criterio, si ottiene la corrispondente matrice di ordinamento delle alternative rispetto ai criteri considerati. Per risalire l'albero gerarchico e stabilire le prestazioni delle tre centrali rispetto all'atmosfera, è necessario moltiplicare la matrice per:

- a) il vettore di ordinamento rispetto al criterio di III livello "atmosfera";
- b) il peso dell'atmosfera nel vettore di ordinamento rispetto al criterio di II livello "ambiente";
- c) il peso dell'ambiente nel vettore di ordinamento rispetto al super-criterio.

Operando in modo simile per gli altri criteri ambientali di IV livello, i tre progetti ottengono i seguenti punteggi:

– prestazione “atmosfera”:

Atmosfera	NOx	CO	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Scarico termico in atmosfera	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.285	0.489	0.073	0.265	0.308	0.342	0.067	0.290	0.127
A <sub>2</sub>	0.459	0.303	0.663	0.485	0.527				
A <sub>3</sub>	0.256	0.208	0.265	0.249	0.165				
$\times 0.263 \times 0.209 \times 0.120 =$									
									<b>0.009</b>
									<b>0.019</b>
									<b>0.009</b>

– prestazione “ambiente idrico”:

Ambiente idrico	Consumo d'acqua	Interferenze reticolo sup.	Effluenti liquidi	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.041	0.265	0.308	0.530	0.110	0.216	0.127
A <sub>2</sub>	0.062	0.073	0.068				
A <sub>3</sub>	0.897	0.663	0.624				
$\times 0.360 =$							
							<b>0.004</b>
							<b>0.002</b>
							<b>0.021</b>

– prestazione “suolo”:

Suolo	Occupazione del suolo	Movimento terra gasdotto	Movimento terra gasdotto	Drift deposition	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.397	0.326	0.200	0.082	0.094	0.502	0.056	0.127
A <sub>2</sub>	0.257	0.155	0.600	0.165				
A <sub>3</sub>	0.346	0.519	0.200	0.753				
$\times 0.162 =$								
								<b>0.002</b>
								<b>0.002</b>
								<b>0.003</b>

– prestazione “vegetazione, flora e fauna”:

Vegetazione, flora e fauna	Flora	Fauna	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.143	0.091	0.167	0.833	0.174	0.127
A <sub>2</sub>	0.429	0.455				
A <sub>3</sub>	0.429	0.455				
$\times 0.010 =$						
						<b>0.002</b>
						<b>0.010</b>
						<b>0.010</b>

– prestazione “contenimento dei rifiuti”:

Contenimento dei rifiuti	Fanghi	Altro	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.034	0.233	0.750	0.250	0.105	0.127
A <sub>2</sub>	0.276	0.512				
A <sub>3</sub>	0.690	0.256				
$\times 0.008 =$						
						<b>0.001</b>
						<b>0.004</b>
						<b>0.008</b>

– prestazione “paesaggio”:

Paesaggio	Opere civili	Pennacchio visibile	Interventi di riqualificazione	Opere commesse	Impianto	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.318	0.079	0.239	0.091	0.200	0.068	0.357	0.159	0.127
A <sub>2</sub>	0.481	0.198	0.564	0.455	0.600				
A <sub>3</sub>	0.201	0.723	0.197	0.455	0.200				
$\times 0.121 \times 0.191 \times 0.263 =$									
									<b>0.003</b>
									<b>0.008</b>
									<b>0.009</b>

Dopo avere elaborato i dati relativi ai “rami” dell’albero che hanno origine dal criterio “ambiente”, siamo in grado di

calcolare la prestazione ambientale di ciascuna alternativa, data dalla somma dei punteggi ottenuti (Tabella 4).

Per quanto riguarda i sotto-criteri riferiti alla salute pubblica, le prestazioni delle tre centrali sono le seguenti:

– prestazione “rumore”:

Rumore	Impatto sui ricettori	Incremento sui ricettori	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.247	0.455	0.875	0.125	0.250	0.530
A <sub>2</sub>	0.660	0.091				
A <sub>3</sub>	0.093	0.455				
$\times 0.143 =$						
						<b>0.036</b>
						<b>0.078</b>
						<b>0.018</b>

– prestazione “inquinanti aeriformi”:

Inquinanti aeriformi	Macro-inquinanti	Micro-inquinanti	Formazione di nebbie	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.085	0.116	0.116	0.714	0.143	0.750	0.530
A <sub>2</sub>	0.294	0.268	0.268				
A <sub>3</sub>	0.621	0.616	0.616				
$\times 0.143 =$							
							<b>0.037</b>
							<b>0.144</b>
							<b>0.246</b>

Passando all’analisi dei dati socio-economici, per le prestazioni delle tre alternative si ricavano i seguenti punteggi:

– prestazione “aspetti energetici”:

Aspetti energetici	Produzione di energia	Efficienza	Calore per cogenerazione	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.403	0.337	0.858	0.228	0.697	0.250	0.343
A <sub>2</sub>	0.203	0.334	0.018				
A <sub>3</sub>	0.394	0.329	0.124				
$\times 0.075 =$							
							<b>0.034</b>
							<b>0.024</b>
							<b>0.028</b>

– prestazione “ricadute occupazionali”:

Ricadute occupazionali	Fase di esercizio	Fase di cantiere	Peso <sub>III</sub>	Peso <sub>II</sub>	Peso <sub>I</sub>	Prestazione
A <sub>1</sub>	0.494	0.385	0.750	0.250	0.750	0.343
A <sub>2</sub>	0.116	0.231				
A <sub>3</sub>	0.389	0.385				
$\times 0.100 =$						
						<b>0.120</b>
						<b>0.037</b>
						<b>0.100</b>

Infine, sommando i risultati ottenuti per ogni criterio di I livello, è possibile assegnare un punteggio relativo al super-criterio e quindi selezionare l’impianto “migliore” (Tabella 4).

Tabella 4 – Punteggio delle tre alternative rispetto alle prestazioni di I livello e al super-criterio

Alternativa	Sito	Prestazione ambientale	Prestazione salute pubblica	Prestazione socio-economica	Impianto migliore
A <sub>1</sub>	Termoli	0.021	0.074	0.154	<b>0.249</b>
A <sub>2</sub>	Portogruaro	0.045	0.192	0.061	<b>0.299</b>
A <sub>3</sub>	Aprilia	0.060	0.265	0.128	<b>0.453</b>

### Analisi dei risultati

Il metodo dell’analisi gerarchica (AHP) ha dimostrato che

non esiste un ampio divario fra le tre centrali termoelettriche sottoposte a valutazione comparativa.

Pur non registrandosi differenze rilevanti nei punteggi ottenuti, dal punto di vista ambientale il progetto di Aprilia ( $A_3$ ) garantisce prestazioni migliori rispetto alle soluzioni alternative (Tabella 4). Tale dato può essere interpretato considerando che  $A_3$  non interferisce in alcun modo con il reticolo idrografico e non presenta il pennacchio visibile di vapore, grazie alla scelta del raffreddamento ad aria.

Anche per quanto concerne la salute pubblica, Termoli ( $A_1$ ) e Portogruaro ( $A_2$ ) hanno un punteggio leggermente inferiore ad Aprilia, che può contare su una maggiore dispersione degli inquinanti, per effetto dei venti dominanti.

Nell'ottica socio-economica, inoltre, Termoli ( $A_1$ ) garantisce prestazioni migliori in quanto beneficia della maggiore efficienza, della maggiore concretezza del piano di cessione del calore in cogenerazione e delle maggiori ricadute occupazionali. Per contro, Portogruaro ( $A_2$ ) risente del fatto di essere un impianto di taglia inferiore (385 MWe anziché 750) e di sorgere in un'area priva di criticità occupazionali. Ciò spiega i punteggi ricavati per la socio-economia (Tabella 4).

Infine, considerando tutto quanto sopra riportato, il responso fornito dal metodo dell'analisi gerarchica di Saaty è che la soluzione  $A_3$  (Aprilia) riesce complessivamente a minimizzare i costi ambientali e umani e a massimizzare i benefici energetico-economici, dimostrando così di essere l'alternativa preferibile sulla base del confronto effettuato.

Il risultato ottenuto è il frutto di un processo di analisi multicriteriale limitato al confronto di soli tre impianti. Un'analisi di sensibilità, che valuti la stabilità dell'ordinamento individuato rispetto agli elementi arbitrari introdotti, può contribuire alla validazione di tale approccio metodologico al problema decisionale.

## CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è cercato di individuare un approccio metodologico alla valutazione di progetti alternativi di centrali termoelettriche, che risulti applicabile ad un livello superiore a quello della Valutazione di Impatto Ambientale (VIA). Questa si limita ad individuare e minimizzare gli effetti sull'ambiente di una singola opera in una localizzazione precisa. La VIA è quindi uno strumento di controllo esterno alla progettazione; al contrario, la Valutazione Ambientale Strategica (VAS) ha una doppia valenza, di controllo e di programmazione.

L'analisi compiuta in questa sede è da intendere come un tentativo di avvicinare i due livelli (VIA e VAS) permettendo la valutazione alternativa di progetti, propria della VAS, con il livello di dettaglio della VIA. Il confronto delle alternative mediante analisi a molti criteri consentirebbe a un ipotetico decisore (regionale o nazionale) di programmare gli interventi "migliori" e rimandare o respingere quelli meno performanti.

Tra i diversi metodi di analisi multicriteriale si è scelta l'analisi gerarchica di Saaty (AHP), perché si presta molto bene alla trattazione di problemi nei quali intervengono dati qualitativi. Nell'eseguire i confronti a coppie, i valori numerici sono da considerare il compromesso della negoziazione all'interno del gruppo di tecnici chiamato a operare la scelta. Tale scelta è in buona misura depurata dai condizionamenti soggettivi derivanti dall'esame d'insieme. Suddividendo un problema complesso (scelta dell'impianto "migliore") in una sequenza di problemi più semplici e affrontandoli a due a due, si semplifica il processo decisionale e si ottiene un percorso

analitico trasparente, ripercorribile in ogni sua parte.

Le alternative progettuali esaminate sono tre centrali a ciclo combinato che hanno ottenuto il giudizio di compatibilità ambientale. Le precedenti considerazioni valgono in generale anche per il confronto tra progetti alternativi di altre opere (strade, dighe, aeroporti, etc.), purché si presti la massima attenzione alla definizione delle interazioni significative e alla contestualizzazione degli ambiti territoriali.

## NOMENCLATURA

$A_k$	alternativa k-esima
$C_i$	criterio i-esimo
$g_i(k)$	indicatore/impatto di $A_k$ rispetto a $C_i$
$v_i$	funzione di utilità o funzione-valore di $C_i$
$v_i g_i(k)$	prestazione di $A_k$ rispetto a $C_i$
$w_i$	peso associato a $C_i$
$W$	vettore dei pesi
$V(k)$	prestazione complessiva di $A_k$
$V$	vettore delle prestazioni complessive
$m_{ij}$	preferenza di $i$ su $j$ nei confronti a coppie

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Gustapane A., Sartor G., Verardi C.M., Valutazione di Impatto Ambientale. Profili normativi e metodologie informatiche, 1992, Giuffrè – Milano.
2. Jansser R., Multiobjective decision support for environmental problems, 1991, Instituut voor Milieuvraagstukken – Amsterdam.
3. Vargas L.G., J.M. Kats, An overview of the Analytic Hierarchy Process and its applications, 1990, European Journal of Operational Research.
4. Socco C., La Valutazione Ambientale dei Progetti, 1994, GEAM.
5. Zeppella A., M. Presso, G. Gamba, Valutazione ambientale e processi di decisione, 1992, La Nuova Italia Scientifica.
6. Saaty T.L., The Analytic Hierarchy Process, 1986, Mc Graw Hill – New York.
7. Saaty T.L., Axiomatic foundation of the Analytic Hierarchy Process, 1986, Management Science.
8. Cappellini R., E. Laniado, La valutazione di impatto ambientale come scelta tra progetti alternativi, 1987, Terra.
9. Colomi A., E. Laniado, SILVIA: a Decision Support System for environmental impact assessment, 1992, A.G. Colombo.
10. SIA della Centrale Termoelettrica di Termoli e successive integrazioni, 2000.
11. SIA della Centrale Termoelettrica di Portogruaro e successive integrazioni, 2001.
12. SIA della Centrale Termoelettrica di Aprilia e successive integrazioni, 2002.
13. Direttiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 27 giugno 2001, concernente la valutazione degli effetti di determinati piani e programmi sull'ambiente.
14. Legge 15 dicembre 2004, n. 308 - Delega al Governo per il riordino, il coordinamento e l'integrazione della legislazione in materia ambientale e misure di diretta applicazione.