

Un metodo multi criterio per la stima della portata di progetto di centrali idroelettriche ad acqua fluente

Massimo Alberti ¹, Alberto Montanari ², Micaela Montesi ¹, Cristian Severino ¹, Gessica Spada ¹ e Pierluigi Zanotti ¹

¹Ingegneri liberi professionisti, Studio SETA, Corso Europa 140, 48018 Faenza

²Facoltà di Ingegneria, Università di Bologna, Via del Risorgimento 2, 40136 Bologna

E-mail: malberti@racine.ra.it

SOMMARIO. La memoria propone l'applicazione di una analisi multi criterio, utilizzabile anche nella fase di progettazione preliminare, per la determinazione della portata di progetto di un impianto idroelettrico, valutando sia i benefici di natura economica sia gli impatti ambientali. Le caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate attraverso un insieme di 12 indicatori dipendenti dalla portata derivata, che sono successivamente normalizzati attraverso l'uso di funzioni di utilità (in genere non lineari). Queste ultime sono state stimate riferendosi a 15 impianti localizzati in Italia, per i quali sono a disposizione informazioni sufficienti per elaborare un'analisi dettagliata d'impatto ambientale. L'identificazione della alternativa ottimale si ottiene attraverso una media ponderata dei valori normalizzati forniti dalle funzioni di utilità per ogni indicatore, secondo pesi stimati utilizzando il metodo dell'analisi gerarchica proposto da Saaty (1980).

1 INTRODUZIONE

La determinazione della portata idrica di progetto di impianti idroelettrici ad acqua fluente è normalmente effettuata sulla base di criteri tecnici ed economici (Penche, 1998). Analisi approfondite sull'impatto ambientale dell'impianto sono spesso effettuate solamente in fase progettuale avanzata. D'altra parte, per presentare la domanda di concessione alla derivazione di acqua, è necessaria la stima della portata idrica derivabile già in fase di progetto preliminare.

Nonostante l'entità della portata massima derivabile sia uno dei principali fattori che influiscono sull'impatto ambientale dell'impianto, normalmente in fase di progettazione preliminare l'analisi degli effetti ambientali è spesso limitata alla individuazione di eventuali vincoli normativi ed al calcolo del Deflusso Minimo Vitale (*DMV*).

Il presente studio intende proporre l'applicazione di un'analisi multi criterio, applicabile anche nella fase di progettazione preliminare, per la determinazione della portata di progetto di un impianto idroelettrico, tenendo in adeguata considerazione i molteplici presupposti, sia di tipo economico che ambientale, che possono influenzare tale valutazione. Questi sono sintetizzati attraverso un insieme di

12 indicatori, il cui valore è espresso in dipendenza dalla portata derivata ed è successivamente normalizzato attraverso l'uso di funzioni di utilità, definite riferendosi a 15 impianti esistenti. L'identificazione dell'alternativa ottimale si ottiene mediante una media ponderata dei valori normalizzati degli indicatori, utilizzando opportuni pesi stimati mediante il metodo dell'analisi gerarchica Saaty (1980).

2 DEFINIZIONE DEGLI INDICATORI

L'analisi dei benefici di tipo economico e dell'impatto ambientale di un impianto idroelettrico è stata effettuata, come in precedenza accennato, introducendo 12 indicatori. In primo luogo sono stati individuati quelli di tipo ambientale, considerando gli impatti dell'impianto connessi alle fasi di costruzione, esercizio e dismissione. Utilizzando in parte le indicazioni fornite da studi precedenti (Studio Frosio, 2000), si sono identificati gli effetti di tipo ambientale che dipendono dal valore della portata derivata, individuando così i seguenti indicatori di impatto, le cui unità di misura saranno di seguito specificate.

1) Disturbo alla collettività locale – D_u ;

- 2) Disturbo alla fauna locale – D_f ;
- 3) Impatto visivo totale di cantiere – Iv_c ;
- 4) Impatto visivo delle nuove opere – Iv_{no} ;
- 5) Variazione del volume di habitat – I_{Ha} ;
- 6) Variazione del regime idrologico – $T(DMV)$;
- 7) Diminuzione delle emissioni di anidride carbonica – CO_{2A} ;
- 8) Energia rinnovabile prodotta – E .

Sono successivamente stati considerati anche indicatori di tipo economico, alcuni dei quali sono finalizzati a quantificare il rischio di impresa in caso di incertezze nelle valutazioni sulle quali si basa il progetto preliminare.

- 9) Beneficio economico per la collettività – ITa ;
- 10) Valore attuale netto dell'investimento – VAN ;
- 11) Tasso interno di rendimento – TIR ;
- 12) Funzionamento a piena potenza – $T(Q_{max})$.

Per definire il valore degli indicatori, sono state individuate procedure di valutazione con l'obiettivo di consentire una stima il più possibile oggettiva, in dipendenza di impatti ben definibili e valutabili con facilità. Tali procedure sono di seguito descritte.

- 1) Disturbo alla collettività locale – D_u [$m^2 \cdot$ mese].

$$D_u = u \cdot s_u \cdot \frac{A_c}{10^4} \cdot T \quad (1)$$

ove u [adim] è un coefficiente relativo al numero di persone che subiscono le alterazioni prodotte dal cantiere, variabile da 1 a 10 (quest'ultimo valore è assunto per disagio arrecato a più di 1000 persone); s_u [adim] è il coefficiente di sensitività al disturbo della zona, espresso in funzione del tipo di insediamento presente, anch'esso variabile da 1 a 10 (il valore massimo è assunto nel caso in cui siano presenti ospedali e scuole nel raggio di 200 m dal cantiere); A_c [m^2] e T [mesi] sono l'area e la durata del cantiere.

- 2) Disturbo alla fauna locale – D_f [$m^2 \cdot$ mese].

$$D_f = s_f \cdot \frac{A_c}{10^4} \cdot T \quad (2)$$

nella quale s_f [adim] indica un coefficiente di sensitività, che assume valore pari a 10 per parchi nazionali e zone protette, 5 per zone di pregio non protette e 1 per zone di scarso pregio faunistico.

- 3) Impatto paesaggistico temporaneo del cantiere – Iv_c [$m^2 \cdot$ km · mese].

$$Iv_c = \frac{A_c}{10^3} \cdot \alpha \cdot FV \cdot T \quad (3)$$

dove α [adim] è un coefficiente di armonia estetica fra il cantiere e il luogo circostante, che assume valore variabile da 1 (cantiere non in armonia con l'ambiente) a 3 (cantiere in armonia con l'ambiente)

e poco riconoscibile); FV [km] è un fattore di visibilità, che può essere espresso mediante la relazione

$$FV = 3L_A + 2L_B + L_C \quad (4)$$

nella quale L_A , L_B e L_C indicano le lunghezze, rispettivamente, di strada statale o provinciale, strada comunale e sentieri (o carraie) dalle quali il cantiere è visibile.

- 4) Impatto paesaggistico permanente – Iv_{no} [$m^2 \cdot$ km].

$$Iv_{no} = \sum_i Iv_i = \sum_i \frac{A_i}{10^3} \cdot \frac{\lambda_{hi}}{K_i} \cdot \alpha_i \cdot FV_i \quad (5)$$

ove Iv_i rappresenta l'impatto di ogni singola opera costituente l'impianto finito, quali ad esempio briglia di intercettazione, condotta forzata e centrale, mentre A_i [m^2] è l'area effettivamente occupata dall'opera stessa, sia per le opere puntuali che per quelle lineari; λ_{hi} [adim] è un fattore moltiplicatore che assume valori variabili da 1 per opere interraste fino a 10 per opere con altezza superiore a 8 m; K_i [adim] assume valore unitario per le opere puntuali (centrale, vasca di carico, etc.), oppure valore pari alla lunghezza totale dell'opera nel caso di manufatti lineari (canale di derivazione, condotta forzata, etc.).

- 5) Variazione del volume di habitat fluviale nel tratto sotteso dalla derivazione – I_{Ha} [adim].

$$I_{Ha} = \frac{Ha'_R}{Ha'_N} \quad (6)$$

dove a denominatore e numeratore compaiono, rispettivamente, il valore medio annuale del volume di habitat fluviale nel tratto sotteso in condizioni naturali (senza derivazione) e il volume di habitat residuo qualora la derivazione sia attiva. Indicando con $Q(t)$ la curva di durata della portata nella sezione fluviale alla quale è ubicata la derivazione, Ha'_N può essere ricavato con l'espressione:

$$Ha'_N = \frac{1}{365} \cdot \sum_{t=0}^{365} Ha(Q_N(t)) \quad (7)$$

Per motivi di semplicità di calcolo (si ricorda che il metodo deve essere applicabile nella fase preliminare di progetto) $Ha(Q_N(t))$ può essere calcolato nell'ipotesi di alveo prismatico con sezione rettangolare, ottenendo

$$Ha(QN(t)) = V_0 + B \cdot h(Q(t)) \cdot L \quad (8)$$

dove L [m] è la lunghezza dell'alveo sotteso dalla derivazione; V_0 [m^3] è il volume di habitat fluviale con portata nulla, ovvero il volume degli accumuli che permangono anche qualora non ci sia deflusso in alveo e B [m] è la larghezza del pelo libero; infine

l'altezza d'acqua h [m] è stata calcolata con la formula di Chezy nell'ipotesi di sezione rettangolare larga:

$$h(Q_N(t)) = \left(\frac{Q_N(t)}{B \cdot k_s \cdot \sqrt{i}} \right)^{3/5}, \quad (9)$$

ove k_s [$m^{1/3}s^{-1}$] è il coefficiente di scabrezza secondo Gauckler Strickler ed i è la pendenza d'alveo. Con procedura analoga è possibile calcolare pure il volume di habitat residuo Ha_R . Qualora la geometria d'alveo sia nota con elevato dettaglio, è possibile esprimere il volume di habitat con formulazioni più complesse.

6) Variazione del regime idrologico - $T(DMV)$ [giorni].

La permanenza per lunghi periodi di una portata fluviale ridotta e costante (pari al DMV) può avere effetti di disturbo sull'ambiente ittico. Quale indicatore si è utilizzato il numero di giorni all'anno $T(DMV)$ in cui nell'alveo sotteso fluisce solo il DMV medesimo.

7) Diminuzione della emissione di anidride carbonica - CO_{2A} [ton].

Si quantificano le emissioni evitate di anidride carbonica assumendo un rapporto con l'energia elettrica prodotta di 800 g_{CO_2}/kWh (diverse pubblicazioni propongono valori compresi fra 531 e 998 g_{CO_2}/kWh).

8) Energia rinnovabile prodotta - E [MWh].

I benefici legati alla diminuzione della importazione, trasporto ed uso di combustibili fossili, alla diminuzione di uso di energia nucleare ed i conseguenti benefici strategici e di sicurezza sono quantificati mediante un indicatore E , pari alla quantità di energia rinnovabile prodotta annualmente.

9) Beneficio economico alla collettività - IT_a [€]

Per considerare i benefici economici per la collettività connessi ad un investimento industriale (commesse sul territorio nazionale per le parti specialistiche, occupazione di mano d'opera locale) si introduce l'investimento totale attualizzato IT_a , calcolato come somma dell'investimento iniziale e di tutti i successivi costi di gestione, manutenzione e concessione attualizzati:

$$IT_a = I_0 + (G + M + T) \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n}, \quad (10)$$

dove I_0 rappresenta il costo iniziale di investimento, mentre G , M e T sono gli oneri annuali per gestione, manutenzione e concessione; r è il tasso di sconto e n è il numero di anni del periodo di valutazione.

10) Remuneratività dell'investimento - VAN [€].

Il vantaggio economico associato alla realizzazione dell'impianto è quantificato mediante il valore attuale netto

$$VAN = (R - G - M - T) \cdot \frac{(1+r)^n - 1}{r \cdot (1+r)^n} - I_0 \quad (11)$$

Nella (11) R rappresenta il beneficio lordo annuale per la vendita della energia e la cessione dei certificati verdi.

11) Rendimento del capitale investito - TIR [-]

Fra gli indicatori proposti dalla letteratura per la quantificazione del vantaggio economico in relazione all'investimento iniziale richiesto si è scelto il tasso interno di rendimento, cioè il tasso di sconto che rende nullo il VAN ,

$$(R - G - M - T) \cdot \frac{(1+TIR)^n - 1}{TIR \cdot (1+TIR)^n} - I_0 = 0 \quad (12)$$

12) Funzionamento a portata massima - $T(Q_{max})$ [gg].

Infine si è introdotto un parametro che rappresenta il rischio che l'imprenditore affronta implicitamente a causa delle incertezze (a volte notevoli) insite nella valutazione della portata derivabile. Se l'impianto viene dimensionato per una portata di progetto alta, ne consegue che tale portata è effettivamente turbinata per un numero di giorni $T(Q_{max})$ ridotto. In tal caso, qualora si compiano errori di stima della curva di durata delle portate, i conseguenti errori nella valutazione dei parametri economici sono più significativi rispetto al caso nel quale l'impianto è dimensionato per una portata minore.

3 MATRICE DEGLI INDICATORI

Utilizzando i classici metodi previsti per la procedura di Valutazione d'Impatto Ambientale (VIA), ad un progetto di centrale si associa una matrice le cui righe riportano gli indicatori prescelti, mentre nelle colonne sono visualizzate varie alternative di progetto, che nel caso in esame differiscono solo nel valore della portata massima derivata. La Tabella 1 riporta un esempio di tale matrice per una centrale localizzata in Piemonte.

Come si nota gli indicatori hanno valori che non permettono un giudizio in merito alla entità dell'impatto e inoltre non sono confrontabili fra loro, poiché espressi con unità di misura diverse. Occorre pertanto trasformare tali indicatori in modo che assumano valori adimensionali e variabili nell'intervallo [0,1]. Tale trasformazione viene fatta utilizzando funzioni di utilità.

Tabella 1. Matrice rappresentativa degli impatti.

	Alternativa				
	2	4	6	8	10
D_u	84,89	86,17	87,31	88,35	89,31
D_f	67,91	68,93	69,85	70,68	71,45
Iv_c	28.863	29.296	29.684	30.038	30.365
Iv_{no}	16,87	17,86	18,79	19,69	20,55
Ha_r/Ha_n	0,821	0,801	0,785	0,772	0,762
$T(DMV)$	181	188	194	198	201
CO_{2A}	1.783	1.987	2.153	2.288	2.394
$E(MWh)$	2.228	2.484	2.692	2.859	2.992
$Ita(k€)$	843	907	967	1.031	1.102
$VAN(k€)$	261	316	352	363	350
TIR	0,132	0,141	0,144	0,142	0,134
$T(Q_{max})$	125	105	87	72	59

4 FUNZIONI DI UTILITÀ

Le funzioni di utilità consentono di adimensionalizzare i valori assunti da ciascun indicatore. In questo modo è possibile confrontare i valori assunti da indicatori diversi.

Sovente nei procedimenti di VIA si definiscono funzioni di utilità lineari, ottenute assegnando valore nullo alla alternativa di progetto peggiore e valore unitario a quella migliore. Tale approccio, pur presentando il vantaggio della semplicità, comporta rilevanti approssimazioni, che possono tradursi in classificazioni significativamente diverse per ipotesi di progetto che hanno sostanzialmente lo stesso impatto. Infatti, in tal modo gli impatti delle varie alternative progettuali prese in considerazione non vengono confrontati con quelli di altre soluzioni possibili, non considerate dal progettista. In pratica si attua una classificazione relativa fra le sole alternative previste dal tecnico.

Nel presente studio, ad eccezione degli indicatori Ita , CO_{2A} e VAN , si è ritenuto opportuno cercare di definire funzioni di utilità valutate su base oggettiva, quindi indipendentemente dalle alternative progettuali prese in considerazione. A tal scopo si sono reperite informazioni di dettaglio sulle caratteristiche tecniche, nonché relativi impatti, di quindici centrali idroelettriche realizzate nel nostro Paese, precisamente dieci in Calabria, tre in Emilia-Romagna, una in Piemonte e una in Toscana. Per ciascun impianto si sono stimati i valori che gli indicatori hanno assunto, ottenendo quindi quindici matrici simili a quella riportata in Tabella 1.

Tramite interviste individuali a soggetti coinvolti a diverso titolo nella valutazione degli effetti sull'ambiente di ogni centrale, si è chiesto ad ognuno di essi di associare un giudizio sull'entità

dell'impatto che l'impianto produce, valutato in base agli indicatori presi in considerazione. La richiesta di giudizio è stata formulata in accordo alla definizione di funzione di utilità (Loucks et al., 1981), quindi il giudizio medesimo è stato espresso numericamente, mediante attribuzione di un'utilità compresa fra 0 e 1; il valore unitario è assunto dalla configurazione indisturbata. Con metodi di regressione matematica sono quindi state determinate, per ogni indicatore, funzioni analitiche che assegnano, alle centrali esaminate, valori di utilità prossimi ai giudizi raccolti nelle interviste.

Nel seguito sono visualizzati alcuni dei grafici ottenuti per ogni indicatore, nonché le formulazioni analitiche di ognuna delle funzioni di utilità. Ciascuna di queste è indicata con il simbolo $Fu(\cdot)$, dove tra parentesi è indicato l'acronimo del relativo indicatore.

1) Disturbo alla collettività locale.

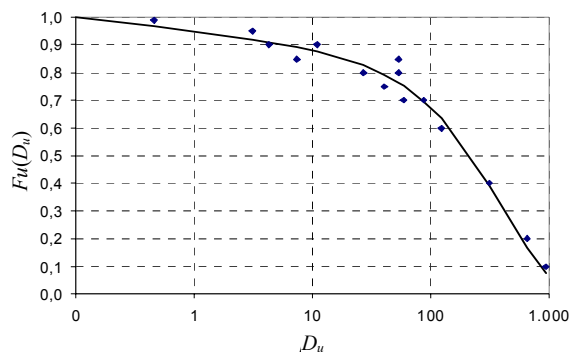


Figura 1. Funzione di utilità per l'indicatore D_u

L'indicatore assume utilità nulla per $D_u \geq 1600$, mentre per $D_u < 1600$ si è stimata la relazione

$$Fu(D_u) = 0.8 \cdot e^{-0.25 \cdot 10^{-2} D_u} + 0.05 \cdot \log_{10}(D_u) + 0.15 \quad (13)$$

2) Disturbo alla fauna locale.

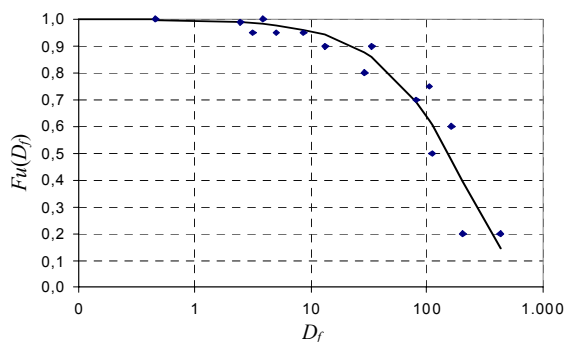


Figura 2. Funzione di utilità per l'indicatore D_f

$$Fu(D_f) = e^{-0.455 \cdot 10^{-2} \cdot D_f} \quad (14)$$

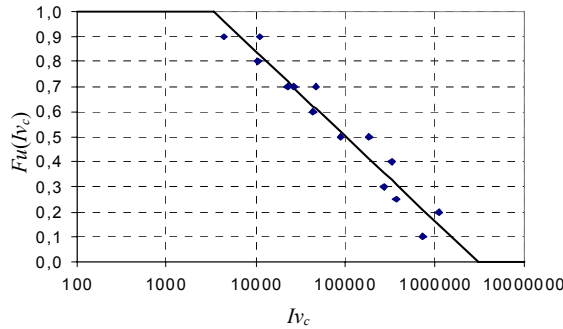


Figura 3. Funzione di utilità per l'indicatore Iv_c

3) Impatto paesaggistico temporaneo del cantiere.

Per $Iv_c \leq 3350$ $Fu(Iv_c) = 1$. Per $Iv_c \geq 3000000$ $Fu(Iv_c) = 0$. Nel campo dei valori intermedi l'utilità si calcola mediante la relazione

$$Fu(Iv_c) = -0.1467 \cdot \ln(Iv_c) + 2.1906 \quad (15)$$

4) Impatto paesaggistico permanente.

Per $Iv_{no} \leq 0.85$ $Fu(Iv_{no}) = 1$. Per $Iv_{no} \geq 3800$ $Fu(Iv_{no}) = 0$. Nel campo dei valori intermedi vale la relazione riportata in Figura 4,

$$Fu(Iv_{no}) = 0.925 \cdot e^{-0.2 \cdot 10^{-2} \cdot Iv_{no}} - 0.21 \cdot 10^{-1} \cdot \log_{10}(Iv_{no}) + 0.75 \cdot 10^{-1} \quad (16)$$

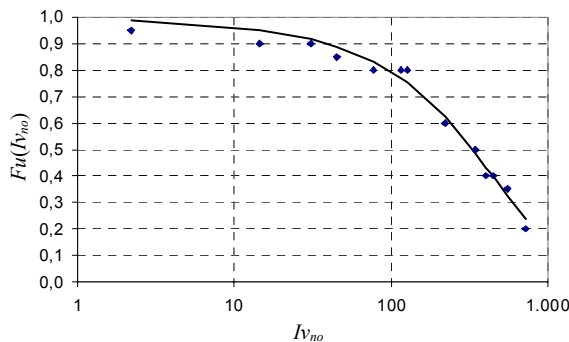


Figura 4. Funzione di utilità per l'indicatore Iv_{no}

5) Variazione del volume di habitat fluviale nel tratto sotteso dalla derivazione.

Tale indicatore assume per definizione valore adimensionale compreso fra 0 e 1 e di conseguenza si ipotizza che il valore da esso assunto sia indicativo della relativa utilità.

6) Variazione del regime idrologico.

In questo caso si è posto $Fu(T(DMV)) = 1$ per permanenze nell'alveo sotteso del solo Deflusso Minimo Vitale inferiori a 60 gg; $Fu(T(DMV)) = 0$ per $T(DMV)$ superiori a 300 gg. Nel tratto intermedio si è utilizzata una interpolazione lineare:

$$Fu(T(DMV)) = \frac{5}{4} - \frac{1}{240} \cdot T(DMV) \quad (17)$$

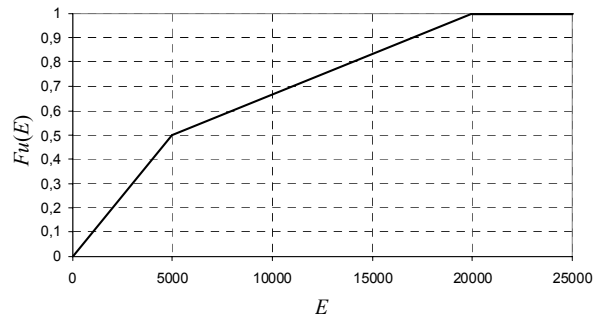


Figura 5. Funzione di utilità per l'indicatore E

7) Diminuzione della emissione di CO₂.

$$Fu(CO_{2A}) = \frac{CO_{2A}}{\max(CO_{2A})} \quad (18)$$

Nella (18) $\max(CO_{2A})$ rappresenta il massimo fra i valori di CO_{2A} delle alternative considerate.

8) Produzione di energia rinnovabile.

In questo caso ci si è riferiti alle indicazioni per le VIA definite dalla regione Lombardia ponendo $Fu(E) = 1$ per $E > 20000$ MWh, nonché

$$Fu(E) = \frac{E}{10000} \quad (19)$$

per $E < 5.000$, mentre nel tratto intermedio $5000 < E < 20000$

$$Fu(E) = \frac{E}{30000} + \frac{1}{3} \quad (20)$$

9) Beneficio economico per la collettività.

$$Fu(ITa) = \frac{ITa}{\max(ITa)} \quad (21)$$

Nella (21) $\max(ITa)$ rappresenta il massimo fra i valori di ITa delle alternative considerate.

10) Remuneratività dell'investimento.

La funzione di utilità è definita in soluzione analoga a quella dell'indicatore ITa ,

$$Fu(VAN) = \frac{VAN}{\max(VAN)} \quad (22)$$

11) Rendimento del capitale investito.

La funzione utilità per l'indicatore TIR , a seguito di indagine fra esperti del settore sul grado di soddisfazione relativo ai vari valori del TIR medesimo, è espressa dalle seguenti condizioni. Per $TIR \leq 0.06$ $Fu(TIR) = 0$. Per $TIR \geq 0.3$ $Fu(TIR) = 1$. Nel campo dei valori intermedi vale la relazione

$$Fu(TIR) = -15.4760 \cdot TIR^2 + 9.7381 \cdot TIR - 0.5286 \quad (23)$$

12) Funzionamento a portata massima.

Si ipotizza che l'indice di rischio sia elevato qualora il funzionamento a portata massima si verifichi per un periodo inferiore a 50 giorni; sia invece basso qualora tale periodo sia mediamente superiore a 120 giorni. Assumendo un indice di rischio medio-basso per dimensionamenti effettuati seguendo indicazioni di letteratura, che suggeriscono di adottare quale portata di progetto quella di durata pari a 90 giorni, la funzione utilità risultante può essere espressa dalle seguenti condizioni. Per $T(Q_{max}) \leq 50$ $Fu(T(Q_{max})) = 0$. Per $T(Q_{max}) \geq 120$ $Fu(T(Q_{max})) = 1$. Nel campo dei valori intermedi vale la relazione

$$Fu(T(Q_{max})) = -0.191 \cdot 10^{-3} \cdot T^2(Q_{max}) + 0.467 \cdot 10^{-1} \cdot T(Q_{max}) - 1.857 \quad (24)$$

5 MATRICE DI UTILITÀ

Le $Fu(\cdot)$ precedentemente descritte consentono di derivare una matrice di utilità, i cui elementi U_{ij} esprimono l'utilità dell'alternativa j secondo l'indicatore i . Tale matrice permette di individuare facilmente le alternative che presentano utilità maggiore, in riferimento a ciascuno degli indicatori prescelti. Al fine di identificare la soluzione globalmente preferibile, è a questo punto necessario definire l'utilità complessiva UC_j di ciascuna di esse. Questa può essere individuata facendo una media pesata delle utilità relative a ciascun indicatore,

$$UC_j = \sum_{i=1}^n w_i U_{i,j} \quad (20)$$

nella quale n è il numero degli indicatori, in questo caso pari a 12 e i w_i sono i pesi nell'operazione di media ponderata, che sono determinati applicando metodi di analisi gerarchica.

6 DEFINIZIONE DEI PESI

La definizione del vettore dei pesi w_j è una delle fasi più critiche del processo di valutazione con analisi multi criterio, a causa dell'elevata soggettività che può caratterizzarla. Un approccio che può consentire una valutazione obiettiva è quello dell'analisi gerarchica proposto da Saaty (1980). Tale procedura prevede di chiedere, al soggetto interessato alla valutazione di impatto ambientale, di stabilire l'importanza di ciascun indicatore rispetto agli altri, effettuando una serie di confronti a coppie. Al soggetto è richiesto di quantificare l'importanza dell'indicatore i rispetto all'indicatore j , con i e j variabili da 1 a n , scegliendo fra le seguenti opzioni,

proposte da Saaty (1980), alle quali è associato il valore numerico indicato fra parentesi: uguale importanza (1); debole importanza (3); importanza significativa (5); forte importanza (7); importanza assoluta (9).

Al termine del sondaggio di opinione si ottiene una matrice quadrata positiva, i cui elementi sono tali per cui $s_{ij} = 1/s_{ji}$. Teoricamente la matrice del confronto a coppie dovrebbe essere anche consistente; ovvero, dati tre elementi qualunque s_{ij} , s_{ik} , s_{jk} , dovrebbe risultare (Shiraishi et al., 1998)

$$s_{i,k} = s_{ij} \cdot s_{j,k} \quad (21)$$

Se l'ipotesi di consistenza è verificata, è possibile procedere alla determinazione dei pesi risolvendo il sistema di n equazioni

$$s_{ij} = w_i/w_j \quad (22)$$

Tuttavia la consistenza delle risposte difficilmente si verifica nella realtà. Pertanto per determinare il vettore dei pesi si è utilizzato il metodo proposto da Laniado (1998), che prevede la minimizzazione della quantità

$$E_q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(s_{i,j} - \frac{w_i}{w_j} \right)^2 \quad (23)$$

imponendo che

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1 \quad e \quad w_k > 0 \quad (24)$$

Per lo svolgimento dei calcoli si è utilizzato il software VISPA, sviluppato presso il Politecnico di Milano (Laniado, 1988).

Nelle prime applicazioni del metodo innanzi descritto si è riscontrato che gli intervistati avevano difficoltà a paragonare indicatori di tipo diverso (economico, tecnico o ambientale) poiché le loro competenze non sempre erano a carattere multidisciplinare. Per limitare tale inconveniente si sono suddivisi gli indicatori in tre gruppi affini (Studio Frosio, 2000). Il confronto a coppie è stato prima condotto all'interno di ogni raggruppamento con il metodo in precedenza descritto; successivamente è stato applicato nuovamente fra i raggruppamenti, esprimendo quindi l'importanza di ciascun gruppo rispetto agli altri. Nota la matrice delle importanze relative dei tre raggruppamenti (3x3), dalle tre matrici del confronto a coppie interno a ciascun raggruppamento è possibile ricavare la matrice generale s_{ij} . Tale procedimento presenta il vantaggio di evitare la comparazione fra indicatori di natura diversa e difficili da comprendere per soggetti non dotati di competenza specifica.

Sono state considerate due diverse suddivisioni, ciascuna formata da 3 raggruppamenti.

- a) Suddivisione TEMP-PERM-ECO, che prevede i seguenti gruppi: indicatori a carattere economico (VAN, TIR, T_{Qmax}); indicatori degli impatti ambientali temporanei (D_u, D_f, I_{vc}, IT_a); indicatori degli impatti ambientali permanenti ($I_{vno}, I_{Ha}, E, CO_{2A}, T(DMV)$).
- b) Suddivisione LOC-GLOB-ECO: indicatori a carattere economico (VAN, TIR, T_{Qmax} , gruppo identico a quello della suddivisione precedente); indicatori degli impatti locali ($D_u, D_f, I_{vc}, I_{vno}, I_{Ha}, T(DMV)$); indicatori degli impatti globali (E, CO_{2A}, IT_a).

Per definire il vettore dei pesi con soluzione il più possibile obiettiva, si è provveduto ad intervistare, mediante il metodo del confronto a coppie innanzi descritto, sei soggetti, interessati a diverso titolo alla valutazione di impatto ambientale di un impianto idroelettrico. Nel dettaglio, fra gli intervistati figurano: un committente, un ecologo, un progettista, un tecnico esterno, un rappresentante di un'associazione per la difesa dell'ambiente e un tecnico di un'azienda regionale per la protezione dell'ambiente (ARPA).

Ciascuna intervista è stata condotta in prima istanza non suddividendo gli indicatori in gruppi; in secondo luogo si è provveduto invece a suddividerli, secondo le due soluzioni di raggruppamento in precedenza descritte. Pertanto si sono ottenuti tre vettori dei pesi per ognuno dei sei intervistati. Il diagramma di Figura 6 riporta i vettori dei pesi, per ognuna delle tre ipotesi di raggruppamento, ottenuti facendo la media dei sei responsi ottenuti da ciascun intervistato. La Figura 7 riporta invece i vettori dei pesi, per ciascuno dei sei intervistati, ottenuti facendo la media dei responsi ottenuti per ognuna delle tre ipotesi di raggruppamento.

7 ALTERNATIVA OTTIMALE

L'alternativa di progetto ottimale viene identificata facendo il prodotto tra il vettore dei pesi w_i e la matrice di utilità $U_{i,j}$, ottenendo un vettore di ordinamento delle alternative. La soluzione caratterizzata dalla valutazione più elevata sarà quella ottimale.

Ovviamente ogni vettore dei pesi dà luogo ad una soluzione diversa. Per risolvere quest'ultima causa di conflitto è possibile procedere secondo due alternative:

- a) utilizzare il vettore dei pesi medio fra i vettori medi dei singoli intervistati ed eleggere come ottimale l'alternativa che ottiene il massimo valore nel vettore di ordinamento così ottenuto;

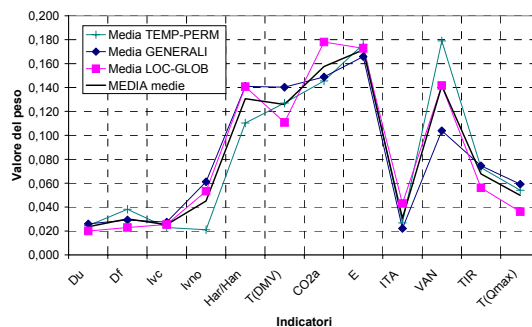


Figura 6. Vettore dei pesi per ciascuna delle 3 ipotesi di raggruppamento degli indicatori. Valori medi dei responsi ottenuti a seguito delle sei interviste.

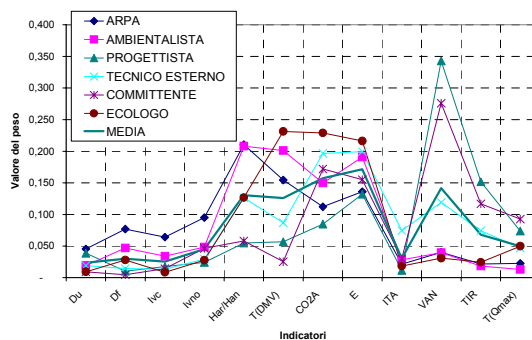


Figura 7. Vettore dei pesi per ognuno dei sei soggetti intervistati. Valori medi dei responsi ottenuti a seguito delle tre ipotesi di raggruppamento.

- b) ipotizzando che per ogni intervistato siano accettabili le alternative caratterizzate da una valutazione inferiore di una tolleranza x , espressa in percentuale, rispetto al valore massimo ottenuto secondo la sua opinione, si elegge come ottimale la soluzione accettabile da tutti gli intervistati con il minimo valore di tolleranza.

8 ESEMPI APPLICATIVI

Il metodo multi criterio di valutazione in precedenza descritto è stato applicato a ciascuna delle 15 centrali idroelettriche menzionate nella Sezione 4.

Al fine di sintetizzare i risultati ottenuti e di mettere in evidenza le preferenze espresse da ciascuno dei sei intervistati, per ogni impianto si è costruito un diagramma che riporta in ascissa i valori di portata massima previsti dalle alternative progettuali considerate ed in ordinata la valutazione ottenuta da ciascuna alternativa. Si sono inoltre evidenziate le valutazioni ottenute applicando il vettore medio dei pesi e, con un tratto verticale, la soluzione accettabile da tutti gli intervistati con la minima tolleranza. Per consentire un confronto con metodi di dimensionamento classici, si sono sovrapposti ai dia-

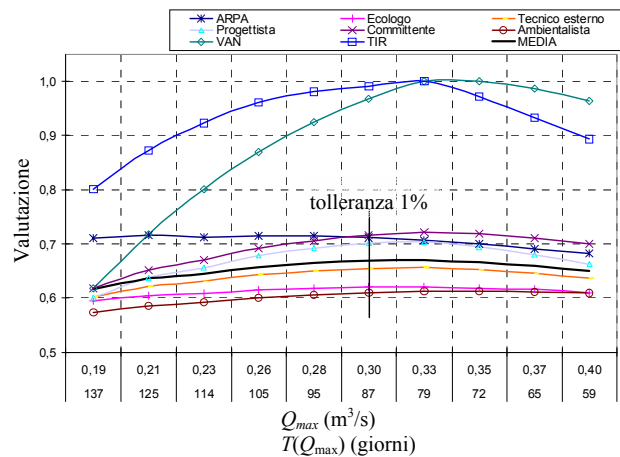


Figura 8. Centrale Valle Ianca. Diagramma delle valutazioni ottenute dalle alternative progettuali.

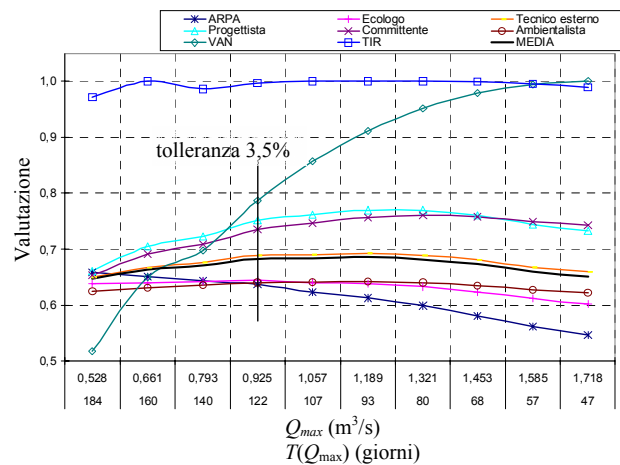


Figura 9. Centrale Scifà II. Diagramma delle valutazioni ottenute da ciascuna alternativa progettuale.

grammi i valori ottenuti dalle funzioni di utilità dei due indicatori economici *VAN* e *TIR*, e si sono indicate in ascissa le durate di ciascuna delle portate di derivazione considerate.

Per motivi di spazio si riportano solo i diagrammi relativi a due centrali, situate una in Piemonte e l'altra in Calabria. Come si può notare, in entrambi i casi una scelta unicamente dettata da criteri economici porterebbe a orientarsi su portate massime aventi durate $T(Q_{max})$ inferiori a 80 giorni. Considerando invece il valore medio fra le scelte dei sei decisori, si proporrebbe un dimensionamento corrispondente a durata di circa 80 e 90 giorni. Adottando invece il criterio della accettabilità generale (si veda la Sezione 7, soluzione (b)) si proporrebbero dimensionamenti corrispondenti a durate di circa 85 e 120 giorni con tolleranze di accettabilità veramente minime.

Risulta interessante notare che la riduzione del *VAN* connessa ad un dimensionamento secondo il

criterio della accettabilità generale è del 5% nel primo caso e del 22% nel secondo.

9 CONCLUSIONI

La memoria presenta un metodo di analisi multi criterio per la determinazione della portata di progetto di impianti idroelettrici ad acqua fluente, che può fornire un utile contributo per determinare la soluzione di miglior compromesso fra le diverse esigenze che condizionano la progettazione. Esempi di applicazione del metodo proposto a casi reali che si riferiscono ad impianti esistenti sul territorio del nostro Paese evidenziano che la soluzione identificata risulta comunque economicamente accettabile; il metodo proposto, infatti, pur contemperando esigenze di tipo economico e di salvaguardia dell'ambiente naturale, spesso non comporta riduzioni significative del tasso interno di rendimento.

I risultati evidenziano in soluzione trasparente la diversità fra i punti di vista di vari soggetti interessati ad esprimere un parere in merito alla stima della portata massima derivabile. Contemporaneamente, però, le analisi effettuate mostrano come la ricerca della soluzione di miglior compromesso porti in molti casi ad individuare effettivamente soluzioni soddisfacenti da ogni punto di vista.

BIBLIOGRAFIA

Studio Frosio. *Small Hydroelectric Plants, Guide to Environmental Approach and Impact Assessment*, produced by Studio Frosio with the support of European Commission. European Communities, Bruxelles, 2000.

E. Laniado. *Appunti di lezione per il Corso Silvia (Software Interattivo per la Valutazione di Impatto Ambientale)*. Politecnico di Milano, Milano, 2002.

S. Shiraishi, T. Obata e M. Daigo. Properties of a Positive Reciprocal Matrix and Their Application to AHP. *J. of the Operations Research Society of Japan*, 41:404 – 414, 1998.

D. P. Loucks, G. Stedinger e D. Haith. *Water Resources Systems Planning and Analysis*, Prentice-Hall, New York, 1981.

C. Penche. *Guida all'idroelettrico minore per un corretto approccio alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico*. ESHA, 1998.

T.L. Saaty. *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980