

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria

Dipartimento di elettronica e informazione

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



BBN NELLA PROGETTAZIONE E
GESTIONE DI UN SISTEMA IDRICO

Relatore: **Prof. Rodolfo SONCINI SESSA**

Tesi di Laurea di:

Filippo LOSI matr. 636426

Paolo VIGANONI matr. 635777

Anno Accademico 2002-2003

Indice

Introduzione	7
1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA	12
1.1 Il sistema fisico	13
1.1.1 Il bacino del Vomano	13
1.1.2 Regime climatico e pluviometrico	18
1.2 I portatori d'interesse	19
1.2.1 Settore Ambiente	19
1.2.2 Fornitura idropotabile	21
1.2.3 Produzione idroelettrica	21
1.2.4 Irrigazione	22
1.3 Conflittualità nell'utilizzo plurimo della risorsa idrica.	27
2 METODOLOGIA DI PROGETTO	31
2.1 Gli elementi del problema	31
2.1.1 Molteplicità di soggetti	31
2.1.2 Interessi conflittuali	32
2.1.3 Dinamica del sistema	32
2.1.4 Infinite alternative	33
2.2 Gli approcci alla soluzione	33
2.2.1 Analisi Costi-Benefici	34
2.2.2 Metodi a Molti Criteri	35

2.3	I livelli decisionali	37
2.4	La procedura	39
2.5	Le fasi della procedura	40
2.6	Il sistema di supporto alla decisione (DSS)	44
3	I POSSIBILI INTERVENTI	45
3.1	Interventi normativi	46
3.1.1	Introduzione del DMV	46
3.1.2	Incremento del prelievo idropotabile	48
3.1.3	Incentivi all'adozione di tecniche irrigue efficienti	49
3.2	Interventi strutturali	49
3.2.1	Ampliamento del Consorzio irriguo	50
3.3	Interventi gestionali	54
3.3.1	Riprogettazione della regolazione	54
4	GLI INDICATORI	56
4.1	Ambiente	57
4.2	Fornitura idropotabile	58
4.3	Produzione idroelettrica	59
4.3.1	Rete elettrica nazionale	59
4.3.2	Indicatore	61
4.4	Irrigazione	63
5	DAL SISTEMA AL MODELLO	66
5.1	Aggregazione degli afflussi	66
5.2	Serbatoi minori come traverse	68
5.3	Centrali logiche di pompaggio	73
5.4	Prelievo dell'acquedotto del Ruzzo	75
5.5	Modello implementato in TwoLe	75
5.6	Implementazione degli interventi sul modello	79

5.6.1	Fornitura Ruzzo e DMV a valle di Montorio	79
5.6.2	DMV sulle gronde	82
5.6.3	Incentivi a tecniche irrigue piu' efficienti	82
5.6.4	Raddoppio del distretto irriguo	82
6	IL MODELLO DELLE COMPONENTI DEL SISTEMA	83
6.1	Il serbatoio di Campotosto	85
6.1.1	Dinamica dell'invaso	85
6.1.2	Ipotesi d'invaso cilindrico	86
6.1.3	Relazione quote invasi	87
6.1.4	La scala di deflusso	88
6.1.5	Il rilascio	89
6.2	Le traverse	95
6.2.1	Provvidenza (1) e Piaganini (2)	96
6.2.2	DMV Vomano (3) e DMV Rio Fucino (4)	98
6.2.3	Ruzzo (5)	98
6.2.4	Villa Vomano (6)	98
6.2.5	CBN (7)	99
6.3	Le centrali	99
6.3.1	Provvidenza	101
6.3.2	San Giacomo	103
6.3.3	Montorio	105
6.3.4	Santa Lucia	107
6.4	Le confluenze	107
6.5	I canali	108
7	IL MODELLO DEI BACINI IMBRIFERI	111
7.1	Le serie storiche di afflusso	113
7.1.1	Dati disponibili	114

7.1.2	Buchi nelle serie storiche e loro riempimento	116
7.1.3	Stima degli afflussi attraverso l'equazione di bilancio del serbatoio	117
7.1.4	Il bacino proprio di Campotosto	122
7.2	Analisi statistiche degli afflussi	125
7.2.1	Distribuzioni di probabilità degli afflussi	125
7.2.2	Carte probabilistiche degli afflussi al sistema	127
7.3	Individuazione dei modelli	132
7.3.1	Il modello del bacino delle gronde 1350 m	133
7.3.2	Il modello del bacino della gronda 1100 m	133
7.3.3	Il modello del bacino delle gronde 400 m	135
8	IL MODELLO DEL DISTRETTO IRRIGUO	136
8.1	Modelli teorici di utenza irrigua e loro limiti	136
8.2	Le reti Bayesiane	138
8.3	La rete Bayesiana del distretto irriguo: il grafo	139
8.3.1	Le BBN dei settori e loro interazione: Comportamento degli agri- coltori	140
8.3.2	Le BBN dei settori e loro interazione: Evapotraspirazione delle colture	143
8.3.3	Le BBN dei settori e loro interazione: Distribuzione della risorsa .	149
8.3.4	Le BBN dei settori e loro interazione: Crescita delle colture . . .	152
8.4	Lo riempimento delle CPT	155
8.4.1	Come abbiamo proceduto	158
8.5	Utilizzo della rete e suo inserimento in TwoLe	164
8.5.1	Validazione della rete	166
9	IDENTIFICAZIONE DELLE ALTERNATIVE	168
9.1	La politica di regolazione	169
9.2	Il problema di controllo	173
9.2.1	Criteri	173

9.2.2	Indicatori	174
9.2.3	Obiettivi	176
9.2.4	Formalizzazione	177
9.3	Individuazione delle alternative	178
10	RISULTATI	180
10.1	Incertezza e stocasticità	181
10.1.1	Incertezza	182
10.1.2	Stocasticità	183
10.2	Scelta della serie degli afflussi	184
10.3	Alternative considerate	185
10.4	Stima degli effetti	187
10.4.1	Scenario Attuale	188
10.4.2	Scenari Prelievo Ruzzo	203
10.4.3	Scenari DMV su Fucino	204
10.4.4	Scenario misto	204
10.4.5	Scenari DMV su gronde	206
10.4.6	Scenario Raddoppio Distretto Irriguo	208
	Conclusioni e sviluppi futuri	218
I	APPENDICI	223
A	Le Reti Bayesiane	224
A.1	Fondamenti teorici	226
A.1.1	Richiami di teoria sulla probabilità condizionata	226
A.1.2	Reti causali	227
A.1.3	Reti Bayesiane	230
A.2	Elementi strutturali di una rete	237

A.3	Applicazione delle reti Bayesiane a sistemi ambientali	239
B	La Programmazione Dinamica Stocastica	243
B.1	L'algoritmo di soluzione	243
B.1.1	Implementazione dell'algoritmo	248
B.2	Discretizzazione del sistema e tempo di calcolo	250
B.2.1	Classi di stato	250
B.2.2	Il sistema discretizzato	252
C	Eliminazione dello stato del suolo	260
C.1	Il modello del suolo	260
C.2	Eliminazione della variabile di stato del suolo	261

Introduzione

Negli ultimi 50 anni la domanda idrica mondiale è triplicata e continua ogni anno ad aumentare; le cause di questo fenomeno sono molteplici e variano di paese in paese a seconda del livello di sviluppo. Nei paesi ricchi l'aumento è soprattutto dovuto all'elevato benessere della popolazione che porta ad un crescente consumo domestico pro capite, legato in buona parte a sprechi. Nei paesi poveri la causa principale è invece la crescita demografica a cui corrisponde un aumento della domanda di acqua sia per uso civile sia per uso irriguo; quest'ultimo uso è fondamentale per poter incrementare la produzione agricola e quindi soddisfare la domanda di prodotti alimentari; ricordiamo che attualmente nel mondo il 70% dell'acqua di superficie e di falda è utilizzata nell'agricoltura irrigua per produrre il 40% del cibo che consumiamo (Brown, 2001[5]).

La maggior parte delle nazioni deve far fronte ad una domanda crescente con una disponibilità di acqua pulita che è invece decrescente: ciò è dovuto da un lato all'inquinamento che compromette la qualità delle acque di falde e fiumi, dall'altro al riscaldamento globale che ne riduce la quantità.

Si delinea perciò uno scenario futuro in cui l'acqua diverrà un bene scarso e quindi prezioso, la cui disponibilità costituirà un elemento limitante per lo sviluppo sociale ed economico delle nazioni. Per evitare che ciò accada bisogna giungere ad una migliore gestione della risorsa idrica, che porti ad un suo utilizzo più efficiente ed equo.

In questo contesto l'Unione Europea investe risorse nella ricerca di strumenti per la gestione integrata dei sistemi idrici, strumenti che si basino sulla partecipazione attiva dei molteplici soggetti coinvolti; si ritiene infatti che la partecipazione sia un elemento

fondamentale nel raggiungimento tanto dell'efficienza quanto dell'equità.

Sono questi i presupposti su cui nasce il progetto M.E.R.I.T. (Management of the Environment and Resources using Integrated Techniques), promosso dalla U.E., che ha come obiettivo l'utilizzo delle Bayesian Belief Networks (BBN) per costruire un sistema di supporto alle decisioni (DSS) per la progettazione e gestione integrata e partecipata di sistemi idrici.

Le BBN sono modelli descritti qualitativamente da un grafo orientato in cui ogni nodo rappresenta una variabile casuale ed ogni arco una relazione di causa-effetto. Quantitativamente una BBN è descritta da tabelle di probabilità condizionata, una per ogni suo nodo, che quantifica le relazioni causa-effetto individuate dagli archi.

Il Politecnico di Milano partecipa a questo progetto con uno studio sul bacino idrico del Vomano in Abruzzo, in cui la risorsa idrica costituisce un importante elemento conteso fra diverse utenze.

Enel utilizza le acque del bacino del Vomano per produzione idroelettrica attraverso un sistema costituito da tre serbatoi artificiali e da tre impianti collegati in cascata. Il gestore idroelettrico detiene le concessioni di sfruttamento della risorsa, ma non è l'unico soggetto interessato al suo utilizzo: le acque del fiume Vomano sono infatti sfruttate anche per l'irrigazione del distretto agricolo di valle, per alimentare gli acquedotti dei centri urbani del teramano e costituiscono un bene fondamentale per la salvaguardia degli ecosistemi fluviali della valle del Vomano, che è compresa in ben due Parchi: il primo e più importante è il "Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga", il secondo, di rilevanza Regionale, è il "Parco territoriale attrezzato del fiume Vomano". Si configura quindi una situazione di sfruttamento conflittuale della risorsa.

L'approccio classico Markoviano (vedi Gilbert e Shane (1982)[11], Read (1989)[19], Yakowitz (1982)[27], Yeh (1985)[28]) a questo tipo di problema consiste nel descrivere il sistema con un modello dinamico soggetto a disturbo stocastico e formulare su questo un problema di controllo ottimo la cui soluzione fornisce politiche di gestione efficienti. Questo approccio tuttavia presenta forti limiti quando si debbano modellizzare fenomeni socio-economici di cui si ha una conoscenza limitata o scarsamente strutturata e per i quali

le relazioni di causa effetto non sono immediatamente identificabili perchè legate all'incertezza intrinseca del comportamento umano; è questo il caso, ad esempio, della reazione degli agricoltori ad un intervento progettuale (estensione del distretto, cambiamento della tariffazione) che modifichi la loro condizione di utenti irrigui.

In casi come questo un approccio Bayesiano risulta più appropriato poichè permette di descrivere le componenti di cui abbiamo una conoscenza povera o non strutturata tramite un grafo, che rappresenta in maniera facilmente intellegibile le relazioni causa-effetto, e tabelle di probabilità condizionata, che quantificano tali relazioni mantenendone la stocasticità; le BBN rendono allora possibile la partecipazione dei soggetti direttamente interessati, ovvero i portatori d'interesse, alla concettualizzazione prima ed alla quantificazione poi del modello che deve rappresentare il loro stesso comportamento, garantendo quindi che tale modello rappresenti effettivamente la loro visione del problema e quindi le loro possibili reazioni.

Risulterebbe d'altro canto concettualmente ridondante e computazionalmente oneroso descrivere tramite reti Bayesiane quelle componenti del sistema di cui abbiamo una conoscenza completa e ben strutturata (ad esempio la parte idraulica ed idrologica), specie in un sistema complesso come quello considerato. L'idea su cui si basa questo lavoro è quella di integrare nell'approccio Markoviano classico le Reti Bayesiane, utilizzando quest'ultime per la descrizione del distretto irriguo. Possiamo così modellizzare la reazione degli agricoltori di fronte ad alcuni interventi che andrebbero a modificare lo stato attuale del sistema; il vantaggio derivante dall'uso delle reti Bayesiane consiste in questo caso nella possibilità di far partecipare gli stessi agricoltori alla costruzione del modello del proprio comportamento.

Abbiamo inserito il processo di costruzione e taratura della rete Bayesiana all'interno di una procedura decisionale (vedi Fig.0-1) che è stata da noi portata fino alla fase di valutazione delle alternative.

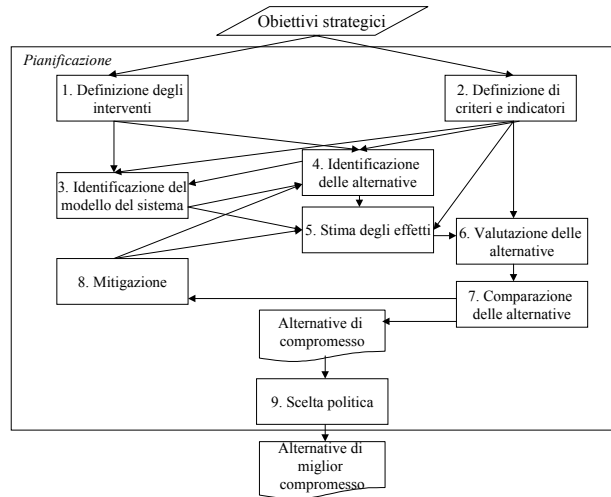


Figura 0-1:

Struttura della tesi

Il testo è così organizzato:

- Il Cap.1 descrive il sistema fisico del Vomano, le sue utenze e le condizioni che portano ad un utilizzo conflittuale della risorsa idrica.
- Il Cap.2 delinea la metodologia che adotteremo all'interno della tesi specificandone le fasi principale ed analizzando le interrelazioni tra esse.
- Il Cap.3 descrive gli interventi strutturali, normativi e gestionali che definiscono le alternative di cui valuteremo gli effetti sul sistema.
- Il Cap.4 descrive gli indicatori utilizzati per quantificare gli effetti degli interventi sui diversi settori del sistema.
- Il Cap.5 descrive e giustifica il passaggio dallo schema fisico del sistema ad un suo modello matematico.
- Il Cap.6 definisce i modelli utilizzati per rappresentare serbatoi, traverse, centrali, confluenze e canali.

- Il Cap.7 definisce i modelli utilizzati per rappresentare le componenti di afflusso e descrive i problemi incontrati nell'utilizzo dei dati disponibili.
- Il Cap.8 descrive il processo che ha portato alla costruzione di un modello dell'utente irriguo tramite le reti bayesiane.
- Il Cap.9 presenta e formalizza il problema di controllo ottimo a più obiettivi la cui soluzione permette l'identificazione delle alternative efficienti
- Il Cap.10 presenta i risultati ottenuti.

Alcuni approfondimenti tecnici sono infine raccolti in appendice, in particolare:

- L'appendice A tratta gli aspetti teorici legati alle reti Bayesiane.
- L'appendice B approfondisce gli aspetti teorici della Programmazione Dinamica Stocastica (PDS), l'algoritmo utilizzato per la risoluzione del problema di controllo ottimo.
- L'appendice C riporta i calcoli matematici che hanno portato all'eliminazione dello stato del suolo dal modello del distretto irriguo.

Capitolo 1

DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Il bacino idrografico del fiume Vomano ha un'estensione di 785 Km²; la maggior parte di questa superficie è compresa nel territorio della provincia di Teramo, solo l'estremo margine occidentale si trova nella provincia de L'Aquila. In quest'ultima zona sono localizzate le sorgenti del fiume Vomano, sulle pendici del versante nord-orientale del Gran Sasso a quota 2155 m.s.l.m., all'interno del Parco Nazionale del Gran Sasso. L'asta fluviale, lunga 75 Km, attraversa le gole dell'Appennino Abruzzese, l'ampia fascia collinare del teramano, la fascia costiera e sfocia nel mare Adriatico. Il bacino idrografico del fiume Vomano è rappresentato nella Fig.1-1.

Si registra un certo divario nella distribuzione di beni, risorse ed infrastrutture tra le aree interne e l'area litoranea della provincia di Teramo. Le zone montuose hanno infatti vissuto negli ultimi decenni un periodo di crisi che ha portato ad una situazione di diffusa povertà rurale. Un valido elemento di rilancio per quest'area potrebbe essere il turismo legato alla presenza di centri montani attrezzati per gli sport invernali ed al Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga. Il terreno fertile e la disponibilità di acqua hanno invece favorito un buon sviluppo dell'economia agricola nella bassa valle del fiume Vomano, generando il benessere della zona.

Enel utilizza le acque del bacino del Vomano per produzione idroelettrica attraverso un sistema costituito da tre serbatoi artificiali (Campotosto, Provvidenza e Piaganini) e

da tre impianti collegati in cascata (Provvidenza, S.Giacomo e Montorio), di cui i primi due sono invertibili. Il gestore idroelettrico detiene le concessioni di sfruttamento della risorsa fino al 2029, ma non è l'unico soggetto all'interno del sistema ad utilizzarla; le acque del fiume Vomano sono infatti sfruttate anche per irrigazione del distretto agricolo di valle, per alimentare gli acquedotti dei centri urbani nel teramano e costituiscono un bene fondamentale per la salvaguardia degli ecosistemi fluviali. Si configura quindi una situazione di sfruttamento competitivo della medesima risorsa.

In questo capitolo daremo dapprima una descrizione approfondita degli elementi del sistema fisico che consideriamo all'interno del nostro studio, successivamente descriveremo i soggetti interessati allo sfruttamento della risorsa, ovvero i *portatori d'interesse*; infine analizzeremo le cause della conflittualità nell'uso della risorsa.

1.1 Il sistema fisico

1.1.1 Il bacino del Vomano

Il sistema del Vomano racchiude un'area che va dal Lago di Campotosto (vedi Fig.1-2) fino al Mare Adriatico per una lunghezza di circa 75 Km, comprendendo i bacini imbriferi del fiume Vomano, di gran parte dei corsi d'acqua minori delle valli laterali, le cui acque vengono raccolte tramite tre sistemi di canali di gronda (rappresentati in colore nero in Fig.1-3).

Il lago di Campotosto è un serbatoio artificiale (invaso utile di 217 milioni di m^3) ricavato negli anni Sessanta dall'allagamento di una vasta regione torbiera¹ situata in corrispondenza dello spartiacque tra i bacini del fiume Tronto e del Rio Fucino. I lavori furono avviati durante il secondo conflitto mondiale e terminarono solo nel dopoguerra.

¹L'estrazione della torba veniva effettuata nei pressi dello spartiacque attraverso una galleria che, all'atto dell'allagamento dell'invaso, è stata ostruita tramite iniezione di cemento. Il traforo, che attraversa il Gran Sasso, ha di fatto sconnesso idraulicamente i sistemi dell'Aterno e del Vomano che si ricaricano così indipendentemente sfruttando le caratteristiche geolitologiche della zona. La prevalenza di materiale calcareo e il generale fenomeno carsico che si evidenzia all'interno del massiccio individua in questo una grande vasca di captazione delle precipitazioni meteoriche.

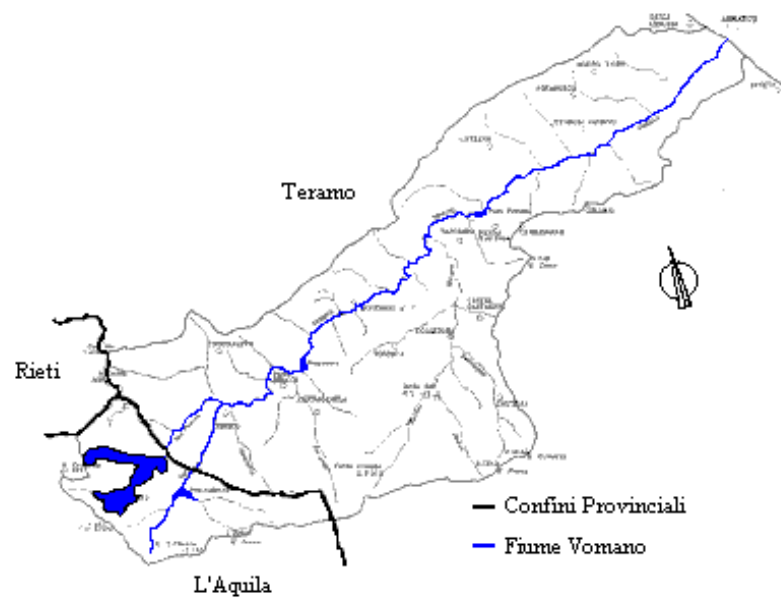


Figura 1-1: Il bacino idrografico del fiume Vomano

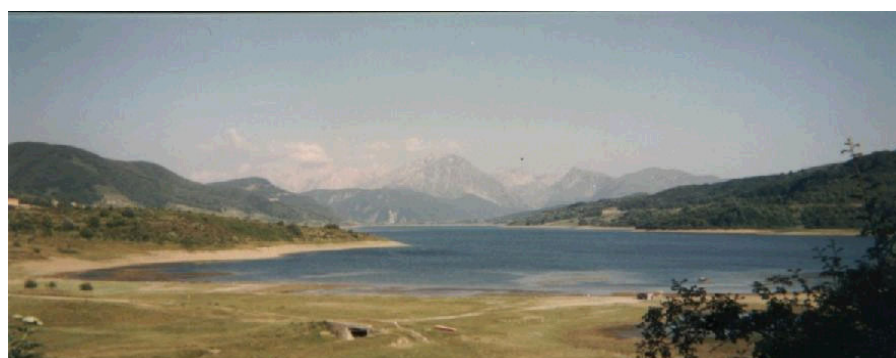


Figura 1-2: Il lago di Campotosto

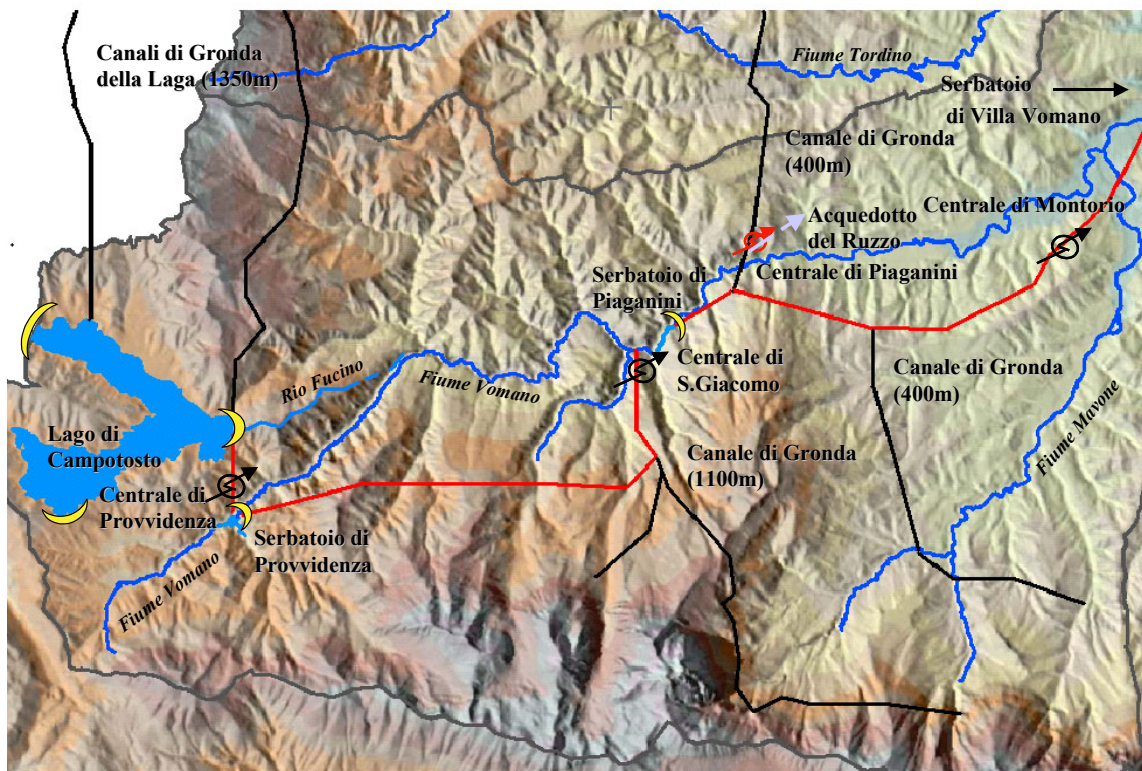


Figura 1-3: Carta rappresentante la dislocazione degli impianti idroelettrici Enel e la rete idrografica principale.

Nel 1939-40 iniziò la costruzione degli sbarramenti artificiali: la Diga di Rio Fucino (a gravità in calcestruzzo e ferro), la Diga di Poggio Cancelli (a gravità in terra battuta) e la Diga di Sella Pedicate (a gravità in terra battuta con uno strato di ferro e cemento). Contemporaneamente all'innalzamento delle dighe veniva riempito il bacino, bloccando le acque del Rio Fucino, degli affluenti del Vomano e del Tordino. I lavori vennero ultimati nel 1956-57. Dei tre sbarramenti costruiti per creare il serbatoio (vedi Fig.1-3) solo quello del Fucino risulta regolato ed interessa direttamente il nostro problema.

L'apporto idrico principale al lago di Campotosto è dato da due canali di gronda (*gronde 1350*) che intercettano le acque dei torrenti presenti sui versanti occidentale ed orientale del sistema montuoso della Laga: quello occidentale adduce le acque di sette bacini montani del Tronto; analogamente quello orientale adduce le acque di sei bacini montani del Castellano, affluente del Tronto, e del Tordino. La superficie dei bacini intercettati misura complessivamente 97 km^2 , quasi il doppio dell'estensione del bacino proprio del lago.

Enel sfrutta le acque del serbatoio di Campotosto su un salto di quasi 1200 metri diviso in tre tratti relativi a tre diverse centrali. Dal lago l'acqua viene convogliata, tramite condotta forzata interrata, alla centrale di Provvidenza che la scarica nell'omonimo serbatoio. Questo è stato ricavato da uno sbarramento del corso del Vomano ed è di capacità nettamente inferiore (1,6 milioni di m^3). Ad esso affluiscono oltre alle acque del Vomano, che ha le sue sorgenti poco più a monte, quelle del fiume Chiarino (non evidente in Fig.1-3 date le modeste dimensioni). A valle dello sbarramento di Provvidenza il corso del Vomano intercetta il Rio Fucino in uscita dal lago di Campotosto. L'apporto di entrambi i corsi d'acqua è al momento insignificante poichè Enel non è obbligata a rilasciare alcun *deflusso minimo vitale* (DMV).

Un canale di gronda posto sulla destra idrografica del Vomano (*gronda 1100*) intercetta, alla quota di circa 1100m, i torrenti del versante settentrionale del massiccio del Gran Sasso, convogliandone le acque o direttamente nella galleria forzata che alimenta la centrale di San Giacomo o, per gravità, nel serbatoio di Provvidenza. Il canale di gronda deriva l'acqua dei torrenti mediante traverse fisse tali da non garantire alcun DMV.

Le acque del serbatoio di Provvidenza possono essere turbinate nella centrale Enel di San Giacomo oppure essere sollevate tramite pompaggio al serbatoio di Campotosto.

Le acque turbinate dalla centrale di San Giacomo confluiscono nel bacino di Piaganini, ottenuto da un secondo sbarramento del fiume Vomano. Come nel caso del Fucino nessun DMV è imposto nel tratto di Vomano compreso tra gli sbarramenti di Provvidenza e Piaganini, cosicchè il fiume è quasi sempre completamente in secca.

Con una capacità pari a circa 0,9 milioni di m^3 il serbatoio di Piaganini riceve anche le acque captate da due canali di gronda (*gronde 400*) posti a quota 400 m rispettivamente sulle sponde sinistra e destra del Vomano (vedi Fig.1-3). Anche in questo caso l'acqua delle gronde può essere convogliata direttamente alla centrale di Montorio oppure invasata nel serbatoio e successivamente sollevata verso il bacino di Provvidenza.

Sulla gronda 400 in sponda sinistra, immediatamente a monte della centrale di Montorio, si trova la presa dell'acquedotto del Ruzzo che rifornisce il teramano di acqua per uso idropotabile. Quando la portata del canale di gronda è insufficiente a garantire la fornitura concessa all'acquedotto, questa viene integrata prelevando acqua dal serbatoio di Piaganini.

A valle dell'abitato di Montorio Enel è obbligata a garantire un deflusso minimo vitale ($1.35 m^3/sec$) in modo da ripristinare la portata naturale del Vomano.

L'ultimo prelievo di acqua si ha nei pressi di Villa Vomano. Qui il fiume viene nuovamente sbarrato tramite un piccolo serbatoio della capacità di $380000 m^3$ che ha la funzione di fornire l'approvvigionamento idrico al comprensorio irriguo del Consorzio di Bonifica Nord (CBN). Attualmente esiste un'unica derivazione in sponda sinistra che serve un comprensorio irriguo di superficie agricola utile (*SAU*) pari a circa $7000 ha$, il quale si estende verso il Teramo nella valle del Tordino. La concessione rilasciata al CBN limita la portata massima derivabile a $4.1 m^3/s$.

Su questo canale è presente una piccola vasca di carico (Pagliare) della capacità di $75000 m^3$. Essa alimenta la centrale di S. Lucia di proprietà del CBN utilizzando l'acqua non sfruttata per l'irrigazione; l'energia prodotta da questa centrale viene utilizzata per alimentare gli impianti di sollevamento necessari per far fluire l'acqua lungo le

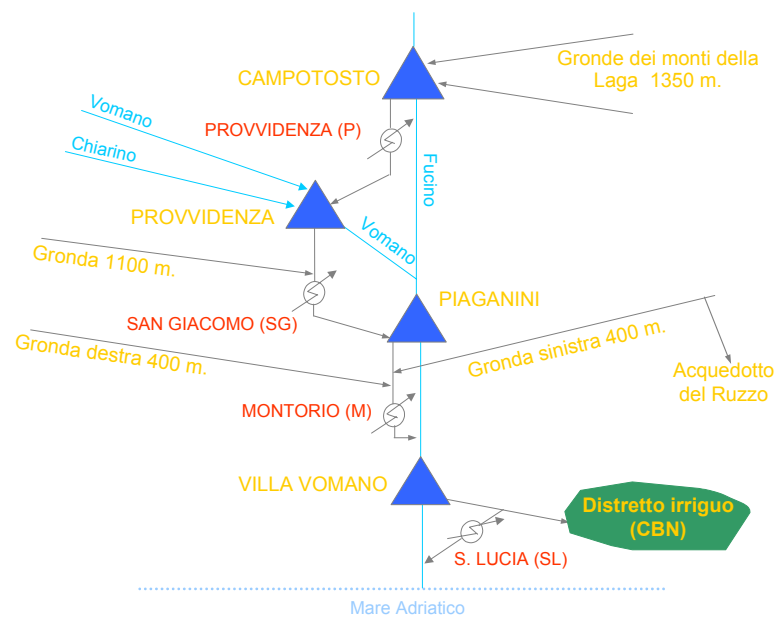


Figura 1-4: Schema del sistema fisico

infrastrutture di distribuzione esistenti.

Nella Fig. 1-4 forniamo una rappresentazione schematica del sistema appena descritto.

1.1.2 Regime climatico e pluviometrico

La valle del Vomano è caratterizzata da due regimi climatici differenti: nella fascia collinare costiera un clima tipicamente mediterraneo, con estati calde ed inverni in genere miti (temperatura media $8^{\circ}C$), nella fascia montana estati altrettanto calde ma temperature invernali decisamente basse (temperatura media a 1000 m di $0^{\circ}C$).

I fenomeni meteorici sono influenzati prevalentemente dal fattore idrometrico e quindi dalla distanza dalla linea di costa. Le stazioni di misura ubicate nelle fascia interna, più montuosa, presentano infatti le maggiori precipitazioni (la media è superiore a 1.000 mm/anno fino ad arrivare a punte massime di 1500 mm/anno in corrispondenza del Gran Sasso) a fronte di precipitazioni scarse nella fascia costiera (media compresa tra 500 e

700 mm/anno). Le precipitazioni ad elevate altitudini sono frequentemente a carattere nevoso e danno luogo ad un innevamento prolungato.

Il regime pluviometrico può pertanto essere assimilato al tipo sub-litoraneo appenninico.

1.2 I portatori d'interesse

1.2.1 Settore Ambiente

La regione Abruzzo riveste una particolare importanza ambientale dal momento che il 38% del territorio regionale (10794 km²) è costituito da aree protette. La valle del Vomano è compresa in ben due Parchi; il primo e più importante è il “Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga”, che comprende la parte montuosa del nostro sistema; il secondo, di rilevanza Regionale, è il “Parco territoriale attrezzato del fiume Vomano”, di estensione molto ridotta (335 ha), situato lungo le sponde del fiume, nei pressi di Montorio al Vomano.

I principali portatori d'interesse relativi a questo settore sono:

- Ente Parco.
- Pubbliche amministrazioni (Regione, Provincia).
- Gruppi ambientalisti, particolarmente attivi sul territorio (WWF, Legambiente).

Gli interessi di questi soggetti rispetto alla modalità di gestione delle acque coincidono e consistono nella richiesta di imporre dei DMV sul fiume Vomano, sul Rio Fucino e sui torrenti intercettati dalle diverse gronde, al fine di preservare gli ecosistemi fluviali; possiamo quindi aggregare questi soggetti ed identificarli in un macro portatore d'interesse che chiameremo *portatore d'interesse ambientale*.

Il Parco Nazionale del Gran Sasso e Monti della Laga viene istituito con il D.P.R. 5 Giugno 1995, con le finalità di tutela e salvaguardia del patrimonio ambientale, faunistico

e naturalistico del complesso Appenninico Abruzzese. Esso si estende per circa 20000 ettari a cavallo tra tre Regioni (Abruzzo, Lazio, Marche) occupando le Provincie de L'Aquila, Teramo, Rieti ed Ascoli Piceno. Per la tutela della risorsa ambientale è prevista dall'art.1 del D.P.R 5 Giugno 1995 una divisione del territorio in due zone. La zona-1, di rilevante interesse naturalistico, paesaggistico e culturale con limitato o inesistente grado di antropizzazione, la zona-2 di valore naturalistico, paesaggistico e culturale con maggior grado di antropizzazione.

La valle del Vomano ricade parzialmente nella zona più settentrionale del Parco: in esso rientra la parte che va dal Lago di Campotosto fino al serbatoio artificiale di Piagnani che risulta proprio sul confine del Parco. Tale area ricade nella normativa di "zona-2" ove la regolamentazione risulta più tollerante nei confronti delle attività antropiche, confondendo spesso la finalità di salvaguardia ambientale con quella di attrazione turistica. Il "Parco territoriale attrezzato del fiume Vomano", solo di interesse regionale, viene istituito dalla L.R. 9 Maggio 1995 N.109 con lo scopo principale di tutelare l'ambiente fluviale ed è gestito dal Comune di Montorio al Vomano. Tutto questo fa dell'intero bacino del Vomano un'ampia e ricca area protetta che rappresenta una delle principali risorse del territorio abruzzese.

Oltre agli interessi propri dell'Ente Parco e delle amministrazioni (Regione e Provincia) si possono classificare come "utenze ambientali" i diversi gruppi ambientalisti che operano sul territorio. Ampi consensi, a livello locale, sono accordati ad istituzioni quali WWF e LegaAmbiente soprattutto per i diversi studi approntati per individuare gli habitat di numerose specie ittiche autoctone.

Poichè gran parte dei trasferimenti d'acqua operati da Enel all'interno del sistema avvengono in condotta forzata (tra un serbatoio e l'altro) o per captazione in galleria (sui canali di gronda) il Vomano, il Fucino ed i loro affluenti risultano per la maggior parte dell'anno addirittura in secca. I relativi ecosistemi fluviali sono fortemente danneggiati da questa situazione.

1.2.2 Fornitura idropotabile

L'Acquedotto del Ruzzo soddisfa con la sua attuale concessione (700 l/sec) le esigenze idropotabili di buona parte del teramano. Questa struttura è attualmente gestita dall'ATO Teramo che costituisce il portatore d'interesse del settore. Attualmente la portata di concessione viene garantita dall'acqua affluente dal canale di gronda sinistro a quota 400 m oppure, quando necessario, dal serbatoio di Piaganini. In quest'ultimo caso l'acqua fornita è di scarsa qualità a causa della permanenza in serbatoio.

Poichè la concessione dell'ATO Teramo è tuttora subordinata al monopolio Enel sull'acqua del sistema, l'approvvigionamento risulta attualmente retribuito. Come si può facilmente notare si è piuttosto lontani da quanto stabilito dal legislatore: "L'uso dell'acqua per il consumo umano è prioritario rispetto agli altri usi del medesimo corpo idrico superficiale o sotterraneo. Gli altri usi sono ammessi quando la risorsa è sufficiente e a condizione che non ledano la qualità dell'acqua per il consumo umano."²

Da non sottovalutare è la componente destinata all'industria agro-alimentare che necessita, subordinatamente ai consumi umani, di acqua della medesima qualità. Attualmente è al vaglio del gestore del Servizio Idrico Integrato uno studio inerente la futura variazione della concessione per adeguare la rete alle previsioni demografiche al 2030.³ Gli studi condotti prevedono entro questa data di triplicare le presenti concessioni, portandole a 2100 l/sec e di potenziare l'impianto di potabilizzazione attualmente esistente.

1.2.3 Produzione idroelettrica

Il fiume Vomano viene sfruttato da Enel per produzione idroelettrica dal 1960 (anno di entrata in funzione della centrale di Montorio) attraverso i tre impianti di Provvidenza, S.Giacomo e Montorio. La potenza complessivamente installata nel sistema è di oltre 800 MW, con una producibilità annua approssimabile a 680 GWh, al netto dell'energia spesa per il sollevamento.

²Estratto dal CAPO I "Principi generali" della Legge. 5 gennaio 1994, n. 36 (Legge Galli)

³Studio sulla qualità delle acque e previsione dei futuri scenari di utilizzo redatto dall'ATO Teramo.

I tre impianti sono gestiti dalla U.B.I. dell'Enel di Montorio che li utilizza, come avviene per i maggiori impianti idroelettrici, per sopperire ai picchi ed alle micro-fluttuazioni di domanda energetica sulla rete nazionale. Questo tipo di funzionamento è possibile grazie ad un tempo di reazione delle macchine dell'ordine del secondo, il quale permette di connettere e disconnettere velocemente l'impianto alla rete. Una funzione di questo tipo non può essere svolta dalle centrali termoelettriche le quali presentano tempi di attivazione e spegnimento molto lunghi, dell'ordine di giorni. Questa inerzia comporta l'impossibilità di fermare completamente gli impianti termoelettrici nelle ore notturne, quando la domanda è minore. Si produce in tale fascia oraria dell'energia con un basso valore commerciale che può essere immagazzinata dagli impianti di Provvidenza e San Giacomo sotto forma di energia potenziale pompando acqua verso i serbatoi di monte.

Pur essendo di gran lunga il più importante, Enel non è l'unico produttore di energia idroelettrica all'interno del sistema. Il CBN è proprietario di una piccola centrale, Santa Lucia, situata a breve distanza dalla costa adriatica e capace di una produzione di oltre 10 milioni di kWh. L'impianto turbinava su un salto di 85 m l'acqua non sfruttata dal CBN per fini irrigui. Per questo motivo considereremo all'interno del nostro studio il CBN come portatore d'interesse del solo settore irriguo ed Enel come unico portatore d'interesse del settore idroelettrico.

1.2.4 Irrigazione

Prima di entrare nel dettaglio della valle del Vomano riteniamo interessante fornire un inquadramento generale dello stato dell'agricoltura nell'intera regione Abruzzo.

L'area soggetta a irrigazione nella regione Abruzzo, secondo le previsioni del progetto speciale schemi idrici dell'ex Cassa per il Mezzogiorno, avrebbe dovuto riguardare, al 2000, una superficie di circa 126.000 ha (23% della SAU⁴). "Ad oggi (2000 n.d.r.), in base all'indagine INEA sono risultati irrigati circa 122.000 ha. Le aree irrigue si trovano per il 55% nella fascia costiera e per il 45% nelle zone interne. Considerando

⁴SAU: Superficie Agricola Utilizzabile

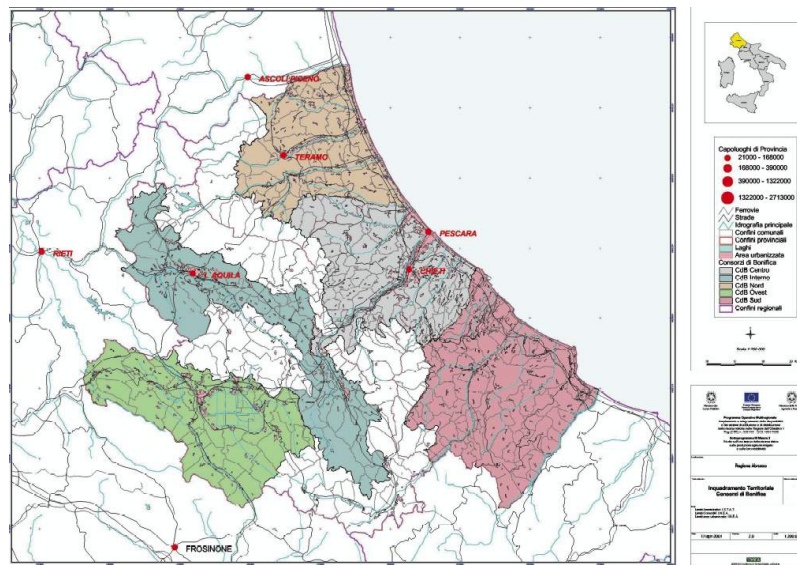


Figura 1-5: Estensione dei 5 consorzi di bonifica della regione Abruzzo

le caratteristiche climatiche regionali (80% del territorio regionale soggetto ad aridità primaverile-estiva), l'irrigazione è d'importanza fondamentale nell'utilizzazione del suolo e nella stabilizzazione delle produzioni".⁵[12]

L'acqua utilizzata nell'agricoltura irrigua è generalmente gestita in forma privatistica e collettiva. Nel territorio regionale esistono cinque Consorzi di Bonifica e d'Irrigazione, a ciascuno dei quali afferiscono più comprensori irrigui. I comprensori più estesi si trovano nella zona collinare e sono gestiti dai tre Consorzi che si affacciano sulla costa adriatica. Partendo dai confini con le Marche, procedendo verso sud: il Consorzio Nord con i comprensori irrigui del Vomano e del Tordino, il Consorzio Centro con i comprensori del Tavo-Saline, della sinistra e destra Pescara, della Val di Foro e dell'Arielli, il Consorzio Sud con i comprensori della Frentana, dell'Osento e del Trigno-Sinello (vedi Fig.1-5).

Noi identifichiamo come portatore d'interesse del settore irrigazione il Consorzio di

⁵Lo studio citato è parte della documentazione relativa ai finanziamenti FESR (Fondo Europeo di Sviluppo Regionale 2000-2006) per le aree classificate di Obiettivo 1, cioè quelle aree in ritardo di sviluppo per cui sono programmati interventi a livello infrastrutturale nei settori produttivi già esistenti per promuoverne il rilancio.

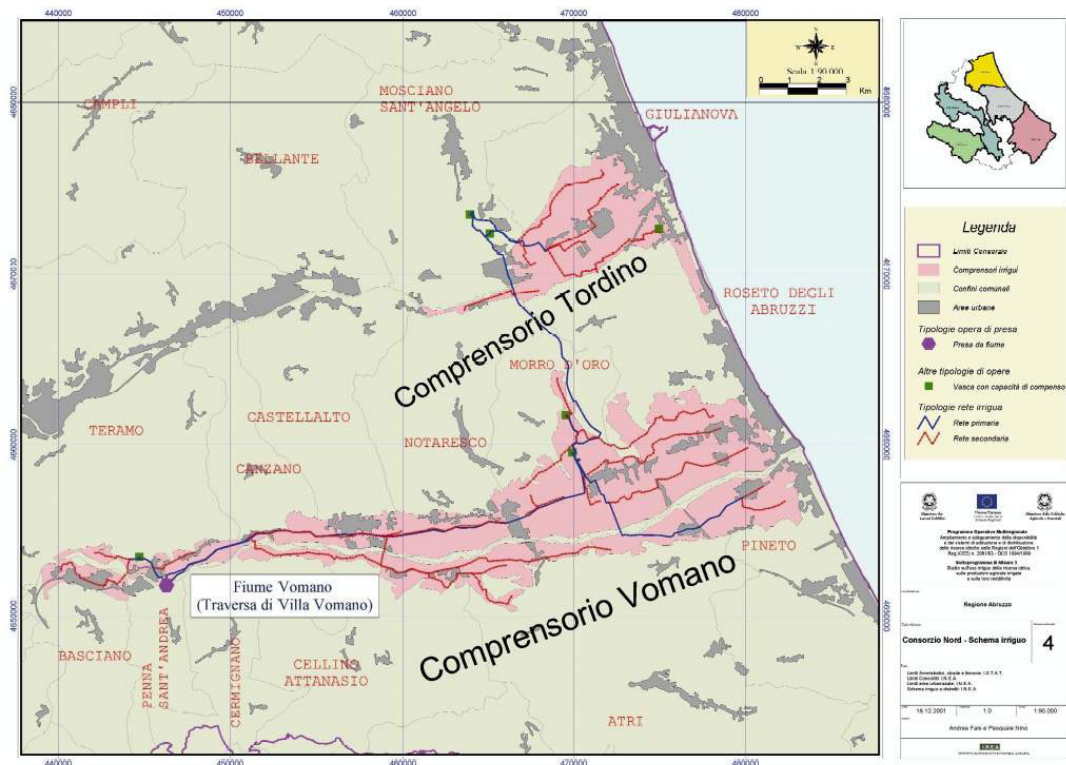


Figura 1-6: I compensori irrigui del Vomano-Tordino aderenti al CBN

Bonifica Nord (*CBN*).

Il Consorzio di Bonifica Nord

Il CBN gestisce il sistema irriguo dei compensori Vomano e Tordino (Fig.1-6) che si estendono complessivamente per circa 8400 *ha* . L'attuale estensione dell'area consortile deriva dal piano di riordino previsto dalla legislazione Regionale e attuato con la delibera n 541 del 7/03/1997, con cui la Giunta ha provveduto a classificare e delimitare i Consorzi di Bonifica.

Il comprensorio del Vomano, posto a sud, è alimentato da un'opera di presa posta all'altezza dell'abitato di Villa Vomano. La presa è effettuata tramite una traversa mobile capace di derivare fino a 4.1 m^3/sec per l'intero anno. Il sistema di adduzione è costituito

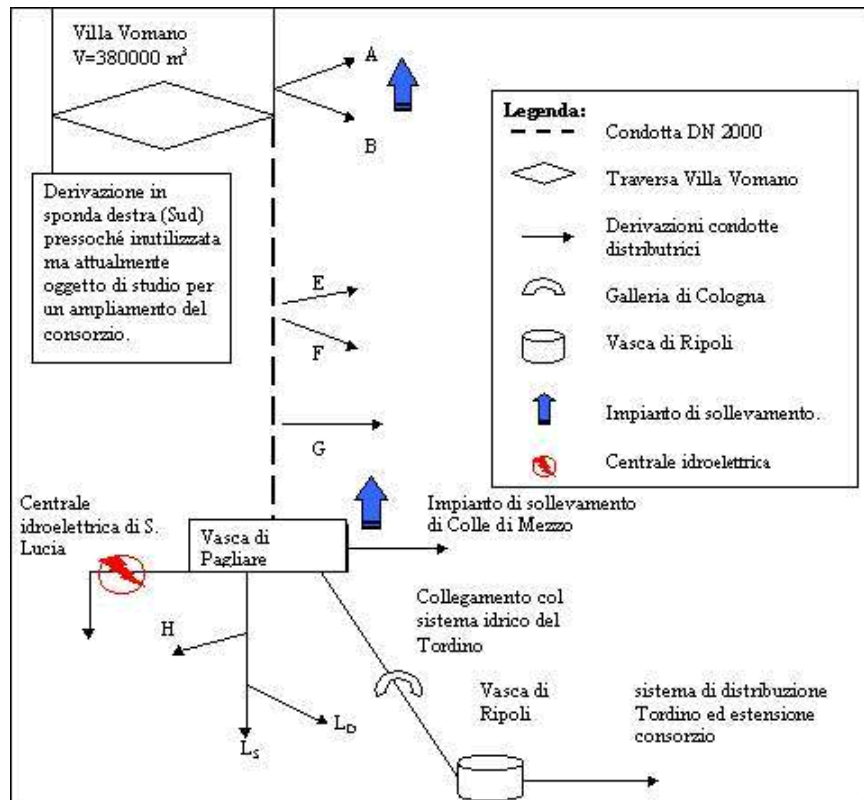


Figura 1-7: Schema dell'impianto di adduzione esistente nei comprensori gestiti dal CBN

da una grossa condotta DN 2000 che percorre un lungo tratto fino alla vasca di Pagliare. Lungo questo adduttore si incontrano tre derivazioni indicate in Fig.1-7 come E, F e G che tramite condotte secondarie alimentano per gravità alcuni comprensori irrigui del distretto del Vomano. Dalla Vasca di Pagliare, che ha una capacità utile di invaso di 75000 m³ si deriva l'acqua per i restanti comprensori o per produzione idroelettrica. Una prima derivazione della vasca, progettata per 0.24 m³/sec, alimenta la vasca di Colle di Mezzo con capacità di 15000 m³, che serve il relativo distretto. Una seconda derivazione, per circa 2.2 m³/sec, alimenta la condotta L. Una terza derivazione, per circa 1.5 m³/sec, è a servizio del comprensorio del Tordino. La quarta derivazione, con capacità di prelievo di 4.1 m³/sec, è a servizio dell'impianto elettrico della centrale di Santa Lucia (vedi Fig.1-7).

Il Consorzio, nell'ambito del progetto di estendimento dell'area servita alle vallate a sud del sistema Vomano-Tordino che porterebbe la SAU irrigabile a circa 14.000 *ha*, prevede il potenziamento della produzione di energia elettrica ad ulteriori 14 milioni di kWh anno con i quali poter alimentare le utenze industriali delle vallate del Vomano e del Tordino nei comuni di Teramo, Notaresco, Castellalto, Atri, Roseto e Giulianova [7].

Per quanto riguarda le colture praticate, fra i seminativi irrigui a ciclo estivo sono da evidenziare il pomodoro e il peperone (con superfici limitate a 1400 *ha*). I vigneti irrigui ammontano a circa 400 *ha* mentre gli oliveti irrigui a circa 160 *ha*. Fra i frutteti minori predominano il pesco e il susino. Dall'interpretazione di altri dati di produzione ortofrutticola PEA⁶ è possibile evidenziare anche le colture irrigue primaverili ed autunnali. Fra i seminativi irrigui a ciclo primaverile-estivo predominano rispettivamente per ordine di importanza il mais, il girasole e la barbabietola (complessivamente per più di 4000 *ha*), mentre fra quelli a ciclo autunnale i cavoli (cavolfiore, cavolo, verza) e l'insalata

Le reti irrigue utilizzate distribuiscono l'acqua tramite un sistema di canali a pelo libero o intubata. Quest'ultimo sistema è sempre più diffuso in seguito alle ristrutturazioni ed agli ammodernamenti degli impianti. I metodi irrigui più diffusi sono l'irrigazione a pioggia (nelle varianti che si possono avere sia nell'irrigazione ordinaria sia di soccorso), la microirrigazione (sempre più interessante in quanto sostituisce man mano gli impianti ad aspersione o a solchi) e infine l'irrigazione laterale da solchi. L'incidenza di ciascuno dei metodi è funzione delle colture praticate, della pressione disponibile al punto di presa, delle portate destinate alle utenze e di altre variabili, ma è soprattutto determinata dalla tradizione della pratica irrigua. Il CBN rileva che più dell'80% della superficie agricola del comprensorio è irrigata per aspersione, mentre la microirrigazione è adottata per circa il 10%[12].

A fronte della diffusione di metodi che richiedono moduli molto piccoli ma ad elevata efficienza, come la microirrigazione, non si riscontra una corrispondente innovazione nella gestione della pratica irrigua: la maggior parte degli agricoltori gestisce l'intervento

⁶PEA: produzione agricola nei periodi di Primavera Estate Autunno fornita dal COTIR.

irriguo in funzione della propria esperienza o in base alla disponibilità di acqua.

La tariffazione è ad ettaro irrigato e non a consumo, non vi è perciò alcun incentivo ad un uso razionale ed efficiente della risorsa da parte dell'agricoltore. La disponibilità idrica reale non è però tale da giustificare un uso indiscriminato dell'acqua.

1.3 Conflittualità nell'utilizzo plurimo della risorsa idrica.

Abbiamo individuato quattro portatori d'interesse, ognuno relativo ad uno dei settori considerati

- Portatori d'interesse ambientali: settore ambiente.
- ATO Teramo: settore fornitura idropotabile.
- Enel: settore produzione idroelettrica.
- CBN: settore irrigazione.

In Fig.1-8 si può osservare la differenza di andamento e lo sfasamento temporale delle domande idriche tipiche dei settori considerati.

Portatori d'interesse ambientali

Hanno come esigenza primaria quella di garantire un deflusso minimo vitale nei corsi d'acqua tale da non creare squilibri durante l'anno all'interno degli ecosistemi fluviali. Questa esigenza è ancora formulata puramente in linea teorica, poichè da poco tempo si è giunti alla consapevolezza dell'opportunità di introdurre un DMV sia per le aste principali del Vomano e del Rio Fucino che per quelle secondarie captate dai canali di gronda. Questo obbligo causerebbe una diminuzione delle portate turbinabili e pompabili tra le tre centrali in cascata (DMV sul Vomano e sul Fucino) ed un obbligo di ridurre gli

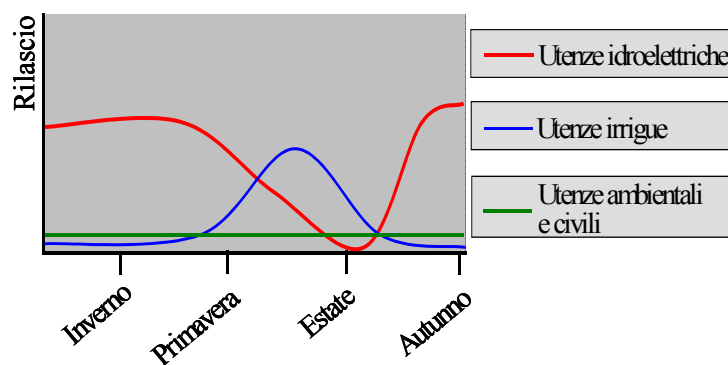


Figura 1-8: Le conflittualità nell'utilizzo della risorsa idrica.

afflussi al sistema gestito da Enel (con un DMV su tutti i corsi della valle diminuirebbero le portate captate da ogni singolo affluente ai canali di gronda).

Attualmente sono all'esame della Regione Abruzzo degli studi condotti dall'Ente Parco e WWF sulla conservazione dell'ambiente ripario-fluviale e sulla conservazione di alcune specie ittiche autoctone, cosa che contribuirà ad accelerare i tempi di decisione sull'aspetto normativo.

E' indubbia quindi la conflittualità tra Enel e Ambiente che si renderà manifesta nel momento in cui dovranno essere discusse le scelte di progettazione dei DMV.

ATO Teramo

L'acquedotto presenta una domanda pressochè costante durante l'anno pari all'attuale concessione (700 l/ sec). Il problema che viene sollevato non riguarda quindi un deficit di fornitura, soprattutto in virtù del fatto che l'acquedotto del Ruzzo paga all'Enel l'acqua derivata dal canale di gronda, ma piuttosto la qualità dell'acqua che viene addotta. Infatti quando la portata del canale di gronda non basta a soddisfare la domanda del Ruzzo, Enel provvede a sopperire al deficit prelevando l'acqua dal serbatoio di Piaganini. Il ristagno prolungato dell'acqua nel serbatoio e l'eccessivo trasporto solido causato in certe ore dallo scarico della centrale di S.Giacomo (la portata elevata manda in sospensione il materiale

fangoso deposto sul fondo del serbatoio) compromettono significativamente la qualità di tale acqua.

Questi fenomeni impongono un trattamento sicuramente più complesso e prolungato, quindi costoso, di quest'acqua per garantirne la potabilità. Quindi è intenzione dell'ATO di Teramo cercare di ridurre al minimo la frequenza di questo tipo di approvvigionamento. Ciò sarebbe possibile solo diminuendo le intercettazioni dei canali di gronda posti a monte del canale di gronda che alimenta l'acquedotto (canale orientale della Laga a quota 1350 m.s.l.m.).

La proposta di triplicare il prelievo idropotabile entro il 2030 non potrà che rendere ancora più forte il conflitto già esistente riducendo l'acqua a disposizione del gestore idroelettrico.

Enel

Enel ha interesse a turbinare l'acqua nel periodo invernale, quando la richiesta di energia della rete e quindi il prezzo di vendita sono più alti. La pratica adottata è quella di utilizzare Campotosto come un serbatoio stagionale accumulandovi acqua durante il periodo primaverile-estivo per poi produrre energia in inverno. Nei mesi di Luglio ed Agosto, quando la domanda per uso irriguo è massima, i rilasci di Enel sono minimi.

CBN

Presenta una domanda d'acqua simile a quella che abitualmente presentano tutte le utenze irrigue: una domanda elevata durante la stagione colturale, cioè da tarda primavera ad inizio autunno, bassa o anche nulla nel periodo invernale. Possiamo calcolare un andamento indicativo di questa domanda sottraendo alla portata derivata da Valle Vomano la portata turbinata dalla centrale di Santa Lucia ottenendo la portata effettivamente fornita dal CBN al distretto irriguo (vedi Fig.1-9). La domanda idrica reale sarà superiore in certi periodi dell'anno alla massima portata derivabile da Villa Vomano ($4.1 \text{ m}^3/\text{sec}$).

L'impossibilità di immagazzinare acqua da parte della vasca di Villa Vomano e le

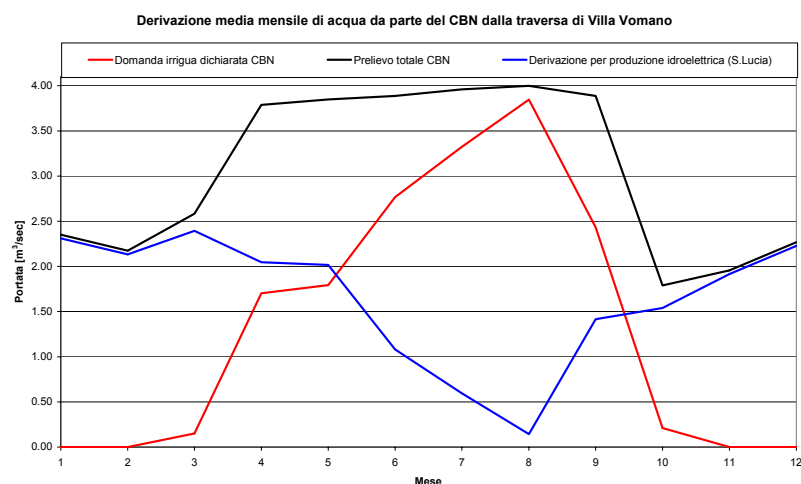


Figura 1-9: Ricostruzione della domanda irrigua del CBN a partire dai dati di derivazione da Villa Vomano (medie mensili)

diverse esigenze gestionali di Enel rendono inevitabili i deficit di fornitura, soprattutto nel mese di agosto.

Per supplire a tali carenze, potenzialmente disastrose per le colture, il CBN ha negli anni raggiunto un'intesa con Enel la quale vende acqua durante il fine settimana, in estate e nei periodi di siccità. Questo meccanismo costituisce una sorta di misura di mitigazione interna al sistema e maschera parzialmente i reali conflitti tra le due utenze. Tali conflitti sono però riemersi nel momento in cui si è deciso di affrontare uno studio di fattibilità per l'ampliamento del CBN, in relazione anche alla difficoltà nel reperire fondi sufficienti per la costruzione di serbatoi con maggior capacità di invaso.[7]

Capitolo 2

METODOLOGIA DI PROGETTO

Nel primo capitolo abbiamo introdotto il problema del Vomano e accennato agli interventi che i diversi portatori di interesse vorrebbero apportare al sistema per aumentare la propria soddisfazione. Una combinazione di tali interventi unita ad una politica di gestione delle acque costituisce quella che chiamiamo *alternativa*. Per individuare l'alternativa da realizzare occorre definire un *metodo* che permetta di strutturare il processo della sua ricerca, cioè il *processo decisionale*. Questa procedura deve consentire, dapprima di identificare tutte le alternative, poi, con l'aiuto dei portatori d'interesse, di valutarne gli *effetti*, infine d'individuare l'alternativa più “opportuna” per i decisori, cioè quella che “maggiormente li soddisfa”.

2.1 Gli elementi del problema

La scelta della procedura dipende strettamente dagli elementi che caratterizzano il problema ed è pertanto dall'esame di questi che è opportuno iniziare.

2.1.1 Molteplicità di soggetti

Appare evidente che un ruolo chiave è giocato dalla presenza di diversi portatori d'interesse, ognuno dei quali ha specifiche esigenze e preferenze. Alcuni di essi hanno di fatto,

anche se non formalmente, un ruolo attivo nel processo decisionale, in quanto possono influenzare la scelta politica con i loro pareri, sia direttamente, sia indirettamente attraverso l'influenza che hanno sulla formazione dell'opinione pubblica e la pressione sociale che possono generare.

Uno degli scopi del presente studio è valutare la possibilità di utilizzare le Reti Bayesiane per allargare la partecipazione attiva anche a soggetti non istituzionali.

2.1.2 Interessi conflittuali

I portatori d'interesse hanno necessità diverse di utilizzo della risorsa idrica, di conseguenza esprimono *interessi differenti e spesso tra loro conflittuali*. In primo luogo c'è un conflitto fra idroelettrici e irrigui. Ci sono poi ulteriori conflitti fra i portatori d'interesse idroelettrici e gli ambientali. La presenza di questi conflitti rappresenta indubbiamente una complicazione, di cui è necessario tenere conto nella definizione della procedura.

2.1.3 Dinamica del sistema

Un'alternativa è formata da una combinazione di interventi: scegliere quella più soddisfacente significa quindi assumere un insieme di decisioni. Alcune di queste sono prese una volta per sempre, come la decisione di raddoppiare l'area servita dal CBN. Sono dunque *decisioni di pianificazione*. Altre, invece, sono per loro natura recursive: è questo il caso della regolazione. Infatti ogni giorno bisogna stabilire i volumi da erogare dal serbatoio di Campotosto, di Provvidenza e di Piaganini. Il *passo decisionale* del *regolatore* è quindi giornaliero e la decisione di oggi influenza la decisione di domani¹. Sono queste *decisioni di gestione*, che possono essere definite in modo razionale specificando una *politica di regolazione* (vedi Cap.9), la scelta della quale è di fatto una decisione di pianificazione. La presenza di decisioni di tipo gestionale impone di tener ben presente la dinamica del sistema.

¹Se oggi si decide di erogare un volume elevato per soddisfare le domande delle utenze si diminuisce il volume immagazzinato nel lago. Domani si potrebbe non essere più in grado di soddisfare la domanda.

2.1.4 Infinite alternative

Soffermiamoci infine sulle alternative. Dobbiamo definire una procedura che permetta di identificarle, ovvero di individuare tutti i possibili interventi (vedi Cap.3) e di combinarli opportunamente tra loro. Ovviamente questi interventi dovranno essere quantificati: solo così le alternative risulteranno univocamente definite. La situazione è però più complessa di quanto, a prima vista, potrebbe apparire: i singoli interventi non sono in numero finito. Alcuni, come la decisione di raddoppiare l'area servita dal CBN, sono per loro natura discreti. Altri, come la definizione dei minimi vitali da applicare alle aste fluviali, possono essere facilmente discretizzati. Lo stesso non può essere detto per la regolazione. Vedremo più avanti (Cap.9) che definire una modalità di regolazione significa scegliere una politica, ovvero una funzione che, per ogni giorno e per ogni condizione in cui si trova il sistema, fornisca un insieme di decisioni di erogazione dai serbatoi e di ripartizione tra i canali a valle. Queste decisioni devono essere *efficienti* rispetto a un determinato insieme di obiettivi. Si capisce quindi come l'insieme delle politiche di regolazione sia costituito da infiniti elementi; di conseguenza anche il *numero di alternative è infinito*.

Riassumendo, ci troviamo di fronte a un sistema complesso, del quale è essenziale considerare la dinamica, su cui insistono interessi conflittuali di una molteplicità di soggetti e per il quale si possono considerare infinite alternative di intervento.

2.2 Gli approcci alla soluzione

Definire la procedura decisionale significa scegliere un metodo per individuare, tra le alternative generate, quella che soddisfa maggiormente i decisori politici. La scelta va effettuata tra i metodi validi per *decisioni in ambito pubblico*, tenendo conto degli elementi che abbiamo ora enumerato.

2.2.1 Analisi Costi-Benefici

Sino a pochi anni fa, il metodo maggiormente utilizzato, soprattutto nei paesi anglosassoni, per le decisioni in ambito pubblico era l'*Analisi Costi-Benefici* (ACB). Essa richiede che di ogni alternativa si monetizzino i benefici e i costi sociali che essa induce; considera un'alternativa accettabile solo se il suo beneficio, al netto dei costi, è positivo e suggerisce ai decisori politici di adottare quell'alternativa cui corrisponde il massimo beneficio netto. Si fonda quindi su un criterio di pura *efficienza economica*.

Applicare l'ACB a casi come quello che stiamo studiando pone una serie di problemi. Innanzitutto, essa richiede di monetizzare tutti gli effetti indotti da un'alternativa, ma ciò non è sempre possibile. Ad esempio nel nostro caso sono presenti beni, come gli ambienti fluviali, privi di un valore monetario, in quanto per essi non esiste un mercato. Sono stati proposti metodi che dovrebbero permettere di aggirare questa difficoltà, ma purtroppo le ipotesi su cui si fondano possono essere ritenute arbitrarie da qualcuno, così che le valutazioni da essi prodotte non necessariamente appaiono oggettive a tutti. La prima difficoltà dell'Analisi Costi-Benefici è quindi nel trattamento dei benefici intangibili.

Una seconda difficoltà sorge dal fatto che l'ACB considera solo l'efficienza economica complessiva, senza interessarsi di come gli effetti delle alternative si distribuiscano tra i portatori d'interesse. Essa assume infatti a priori che la società disponga di *misure di compensazione interne*, che permettano di riequilibrare tra i portatori di interesse la distribuzione dei vantaggi e degli svantaggi indotti dall'alternativa scelta, qualora essa fosse giudicata non equa dalla società. È proprio grazie a questa ipotesi basilare che le alternative possono essere ordinate rispetto ad un unico criterio (il beneficio netto) per valori decrescenti e la prima alternativa essere considerata “la migliore”. L'ACB è quindi un *metodo monodimensionale*. Così facendo nella scelta dell'alternativa non si tiene conto dei conflitti che essa farà sorgere e pertanto essi dovranno essere gestiti solo *ex post*, a scelta fatta, con il grave rischio che la realizzazione del progetto venga bloccata, magari a lavori avviati. Il sorgere di conflitti e di opposizioni è molto frequente quando si opera su sistemi sfruttati, in cui è difficile, se non impossibile, migliorare le prestazioni per tutti i

portatori d'interesse. È quindi opportuno individuare e gestire conflitti e opposizioni *ex ante*.

Un terzo fattore di debolezza dell'ACB deriva dal fatto che benefici e costi totali sono calcolati assumendo che effetti economici di uguale valore, imposti a soggetti diversi, siano esattamente equivalenti, senza considerare che in realtà soggetti diversi possono avere una diversa utilità marginale del danaro.

Infine l'ACB propone come unica alternativa razionalmente perseguibile quella cui corrisponde il massimo beneficio netto. Ai decisori è quindi lasciata solo la possibilità di accettarla o rifiutarla. Molte volte essi saranno propensi a rifiutarla perché non riescono a riconoscersi nel processo con cui essa è stata individuata: l'ACB è infatti un metodo di decisione che si sostituisce di fatto ai decisori reali. Ciò che noi desideriamo è invece un metodo di supporto alla decisione che affianchi e aiuti i decisori, senza sostituirsi ad essi.

Quella che abbiamo tratteggiato è la forma originale dell'ACB, in un certo senso la sua forma paradigmatica. Con il passare del tempo vi sono state apportate delle modifiche, per superare alcune delle difficoltà citate: ad esempio sono state proposte forme di partecipazione, per superare la seconda difficoltà, o coefficienti correttivi, per tener conto della terza. Così facendo si perde però la monodimensionalità del metodo, cioè il suo voler ridurre tutto a valori monetari (che è il suo grande limite), e ci si avvia di fatto sulla strada dei Metodi a Molti Criteri.

2.2.2 Metodi a Molti Criteri

I Metodi a Molti Criteri si basano sull'idea che la valutazione degli effetti di un'alternativa non sia esprimibile con un unico criterio (il beneficio netto dell'ACB), ma attraverso un insieme di *criteri*, che riflette la pluralità di interessi dei portatori. Così facendo è possibile mantenere separati vantaggi e svantaggi dei diversi portatori nella fase della scelta dell'alternativa² e trattare esplicitamente, sin dalle prime fasi di analisi, i conflitti che possono

²Anche con l'ACB è ovviamente possibile individuare, per ogni alternativa, chi “ci guadagna” e chi “ci perde”, ma questa informazione non è considerata nella scelta dell'alternativa.

insorgere. Per questa ragione i metodi di questo tipo sono detti *multidimensionali*.

Rappresentare gli effetti delle alternative mediante una pluralità di criteri significa anche affermare che in generale non è più individuabile *la* soluzione ottima. Infatti, in questo caso, il confronto tra due alternative non conduce inevitabilmente a classificarne una migliore e l'altra peggiore, ma dà origine ai seguenti due casi:

- se un'alternativa è migliore dell'altra rispetto ad almeno un criterio e non peggiore rispetto a tutti gli altri, è preferibile alla seconda da tutti i punti di vista, perché soddisfa maggiormente qualche portatore, lasciando gli altri ugualmente soddisfatti. Si dice che la prima alternativa *domina* la seconda o, equivalentemente, che è più *efficiente*. Un'alternativa dominata non verrà scelta da nessuno e pertanto le alternative dominate possono essere escluse dal processo decisionale appena sono riconosciute tali.
- se un'alternativa è migliore dell'altra rispetto ad alcuni criteri, ma peggiore rispetto ad altri, non è né preferibile, né peggiore della seconda: alcuni portatori preferiranno l'una, altri l'altra. Scegliere tra di esse non è più, come nel caso precedente, un fatto puramente tecnico, ma implica l'assunzione di un giudizio di valore relativo (come tale politico e soggettivo) tra i criteri.

I Metodi a Molti Criteri classici producono un ordinamento delle alternative, rispetto alle preferenze dei decisori, con una analisi che si svolge in due fasi. Nella prima si individua l'insieme delle alternative efficienti, che è chiamato *frontiera di Pareto*, dal nome dell'economista che per primo definì il concetto di dominanza. Nella seconda è compito dei decisori politici ordinarle³, ottenendo così l'*alternativa di miglior compromesso*, cioè quell'alternativa che, a loro parere, meglio contempla le esigenze conflittuali dei portatori di interesse. Rispetto all'Analisi Costi-Benefici si ha quindi un importante cambio di prospettiva: l'idea di alternativa ottima è sostituita da quella di alternativa di miglior compromesso.

³Quando, come nel caso dell'ACB, la frontiera di Pareto contiene una sola alternativa (ossia esiste una sola alternativa dominante) il problema della scelta politica non si pone neppure.

È importante notare che gli effetti sui diversi criteri non devono necessariamente essere tutti espressi in termini monetari: è possibile adottare le grandezze di volta in volta più opportune, superando così un'altra delle difficoltà che avevamo rilevato nei confronti dell'Analisi Costi-Benefici.

È dunque evidente che, per il nostro studio, l'approccio a Molti Criteri è più adatto dell'Analisi Costi-Benefici. Pertanto è quello che adotteremo.

2.3 I livelli decisionali

Nel primo paragrafo di questo capitolo abbiamo notato che il problema del Vomano concerne due diversi tipi di decisioni: decisioni di pianificazione e decisioni di gestione. Più in generale, tre sono i livelli a cui si assumono decisioni (Fig. 2-1):

- il livello di *pianificazione*;
- il livello di *gestione*;
- il livello del *controllo operativo*.

Passando dall'uno all'altro non cambia solo l'oggetto della decisione ma anche l'orizzonte temporale che essa concerne e quindi quello su cui il sistema viene osservato.

A livello di pianificazione, fissati gli obiettivi strategici, si scelgono gli strumenti (es. opere) e le direttive (es. politiche di regolazione, leggi) atti a perseguirli. L'*orizzonte temporale* con cui si osserva il sistema è quindi un orizzonte di lungo periodo. Nell'ambito di questo studio ci riferiremo a questo livello.

A livello di gestione si assumono le decisioni (es. erogazione, riparto) atte a perseguire un'utilizzazione efficiente delle risorse, sia nel breve che nel medio periodo, adottando gli strumenti e seguendo le direttive assunte a livello di pianificazione.

A livello del controllo operativo si stabilisce con quali azioni attuare le decisioni prese al livello di gestione. Per esempio, si dovrà stabilire come manovrare gli organi di controllo

nel corso della giornata, in modo che al termine della stessa si sia erogato il volume stabilito a livello gestionale.

Il livello di pianificazione comprende necessariamente la scelta di una politica di regolazione. Infatti, un problema di pianificazione di un *sistema dinamico* include sempre un problema di gestione e quindi di progetto della sua politica di regolazione. Questo non significa però che il livello di gestione venga compreso ed esaurito in quello di pianificazione. Le *decisioni di erogazione e di riparto*, che giorno per giorno vengono prese, devono essere conformi alle direttive definite dalla pianificazione, ma si devono anche adattare alle situazioni contingenti e imprevedibili che si presentano; ad esempio, la chiusura di un canale per manutenzione straordinaria è un evento che non può e non deve essere inserito nella pianificazione, ma del quale, a livello di gestione, bisogna tenere conto nel momento in cui si presenta.

Da quanto detto emerge come il livello decisionale a cui ci si pone, e quindi le scelte che devono essere effettuate, influenzino il modello utilizzato per descrivere il sistema e le ipotesi semplificative assunte nella sua realizzazione. Di questo aspetto ci occuperemo nel Cap. 5.

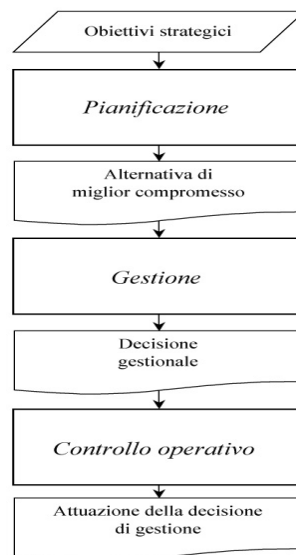


Figura 2-1: I livelli decisionali in un sistema idrico.

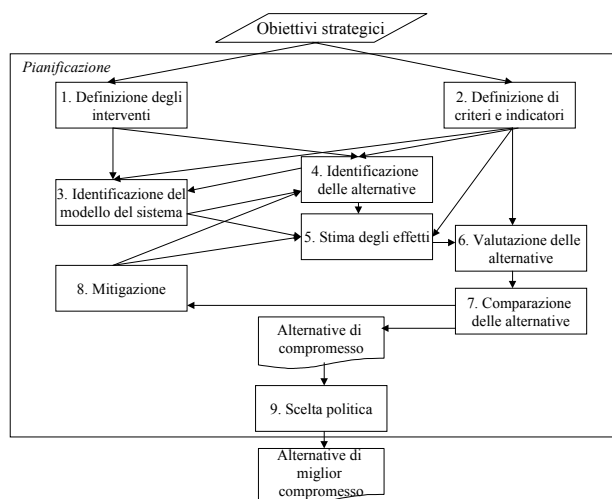


Figura 2-2: Le fasi della procedura

È infine utile ricordare come tutti e tre i livelli debbano essere serviti da un sistema di monitoraggio e raccolta dati, che includa anche i processi di validazione e pre-trattamento di questi ultimi. In particolare, la disponibilità dei dati è cruciale al livello di gestione, per assumere le decisioni giornaliere mediante la politica di regolazione.

2.4 La procedura

In Fig. 2-2 è rappresentato il diagramma di flusso della procedura con cui affrontare il progetto a livello di pianificazione: sono evidenziate le *fasi* in cui si articola e le relazioni che tra esse sussistono. La suddivisione in fasi permette di affrontare la complessità del problema scomponendolo in un insieme di sottoproblemi più semplici.

Prima di descrivere le singole fasi, cosa che faremo nel prossimo paragrafo, vediamo le caratteristiche generali dello schema. Due elementi appaiono subito evidenti:

- i risultati di una singola fase influenzano più fasi, determinando così una struttura non seriale;

- è presente recursione tra le fasi di Identificazione delle alternative, Stima degli effetti, Valutazione, Comparazione e Mitigazione.

La presenza di recursioni deriva dal fatto che nello svolgimento del processo decisionale si producono nuove informazioni. Alla luce di queste occorre riesaminare le conclusioni di fasi già affrontate e, quando se ne ravvisi la necessità, modificarle. Uno degli scopi di un progetto è accrescere la comprensione che i diversi soggetti hanno del problema, per consentire loro di formulare richieste sempre più precise e produrre pareri più motivati.

Lo schema della procedura (Fig.2-2) costituisce la mappa concettuale utilizzata per affrontare il caso di studio del Vomano. Nell'introduzione di ogni capitolo tale schema verrà replicato, evidenziando di volta in volta la fase considerata.

2.5 Le fasi della procedura

Descriviamo ora le singole fasi dello schema di Fig. 2-2.

1. **Definizione degli interventi** (Cap.3). A partire dalla configurazione del *sistema* e tenendo conto degli *obiettivi strategici* che lo studio si pone vengono individuati gli elementi su cui è possibile intervenire.
2. **Definizione di criteri e indicatori** (Cap. 4). Per valutare gli effetti delle alternative sul sistema è necessario individuare, interagendo con i portatori d'interesse, un insieme di *criteri di valutazione*, che riflettano le caratteristiche del problema e i valori che stanno alla base dei giudizi che i portatori esprimono. Ai criteri vengono associati *indicatori*, ovvero funzioni che, note le serie temporali (dei livelli lacuali, delle portate erogate) prodotte da un'alternativa, forniscano una misura di quanto quell'alternativa soddisfi i criteri. Individuare i criteri e definire gli indicatori sono problemi a carattere tecnico, in quanto presuppongono di entrare nei meccanismi di funzionamento dei vari settori: sono quindi compiti che devono essere svolti dall'analista e dagli esperti di settore.

3. **Identificazione del modello del sistema idrico** (Cap. 5, 6, 7, 8). La definizione del problema di controllo richiede di disporre di un *modello* che descriva la dinamica delle variabili significative del sistema idrico. La scelta della rappresentazione concettuale del sistema fisico e del livello di dettaglio con cui rappresentarlo è strettamente dipendente sia dagli indicatori identificati, sia dal tipo di alternative che devono essere progettate. Tecnicamente il modello viene realizzato scomponendo il sistema in *componenti* elementari, identificando un modello per ciascuno di essi e assemblando i modelli così ottenuti a costituire il modello dell'intero sistema. Ecco dunque un'altra recursione: l'identificazione delle alternative richiede un modello, ma questo non può essere sviluppato se non è noto quali alternative si desidera analizzare.
4. **Identificazione delle alternative** (Cap.9). Identificare le alternative significa quantificare gli *interventi*, ovvero definire le *azioni*, e combinarli in tutti i modi possibili. Per farlo bisogna scegliere, d'intesa con i decisori e i portatori d'interesse e partendo dai criteri e dagli indicatori individuati nella fase 2, un insieme di *obiettivi di controllo* e impostare quindi un *problema di controllo ottimo*. La soluzione di questo problema, ottenuta con un opportuno *algoritmo*, permette di ricavare tutte e sole le politiche efficienti rispetto all'insieme degli obiettivi di gestione. Ogni politica viene ricavata una volta definite le azioni strutturali e quelle normative. Non si dimentichi, infine, che tra le alternative si deve considerare anche l'*alternativa zero* (A_0), cioè quell'alternativa che assume che nulla venga fatto e tutto resti com'è.
5. **Stima degli effetti** (Cap. 10). Identificate le alternative bisogna stimarne gli *effetti*, ovvero calcolare i valori assunti dagli indicatori in corrispondenza di ognuna di esse. La stima si ottiene *simulando* ogni alternativa su di un orizzonte temporale sufficientemente lungo. La lunghezza dell'orizzonte (per il teorema dei grandi numeri) deve rendere probabile il manifestarsi anche degli eventi estremi (periodi estremamente siccitosi o, al contrario, estremamente piovosi), così che il

comportamento dell'alternativa non sia valutato solo nelle “condizioni normali”. Per simulare è necessario alimentare il modello con una serie storica di afflussi.

6. **Valutazione delle alternative** (Cap.10). Occorre trasformare gli effetti delle alternative, espressi nelle unità fisiche, nel livello di *utilità* ad essi associato. La trasformazione di effetti in utilità è lo scopo della valutazione, che può essere effettuata con diverse tecniche. L'analisi viene eseguita settore per settore e permette di ricavare gli *indici di settore*, ovvero indici che esprimono il grado di soddisfacimento dei diversi criteri di settore.
7. **Comparazione delle alternative** (Cap.10). Lo scopo della comparazione è quello di individuare un insieme di alternative (dette di *compromesso*) che raccolgano un ampio *consenso* da parte dei portatori d'interesse. Questo viene ottenuto esplorando l'insieme delle alternative, sulla base delle valutazioni effettuate settore per settore. La tecnica che si utilizza è una variante della *Pareto Race* [14], che prevede, data un'alternativa, di individuare i portatori che se ne dichiarano soddisfatti e il settore da essa “più svantaggiato”. Si ricerca quindi una nuova alternativa che porti a un incremento dell'utilità per il settore selezionato e sia accettata a tutti i portatori che erano soddisfatti dall'alternativa da cui si è partiti. Procedendo in questo modo, le alternative che man mano vengono individuate allargano progressivamente il consenso, allargano cioè l'insieme dei portatori d'interesse che si ritengono soddisfatti. Il processo termina quando non è possibile trovare un'alternativa che allarghi ulteriormente il consenso. Le alternative così individuate sono dette *alternative di attrazione*, perché su di esse si concentra l'attenzione dei portatori. Si comprende come proprio in questa fase possano emergere i *conflitti* tra i diversi portatori d'interesse: è infatti probabile che questi non concordino tra loro su quale sia il settore “più svantaggiato”.
8. **Mitigazione**. Se un'alternativa gode del consenso della maggioranza dei portatori d'interesse, ma non di tutti, è importante studiare se mediante *misure*, cioè azioni,

di mitigazione non sia possibile allargare ulteriormente il consenso, soddisfacendo alcuni dei portatori insoddisfatti. Per questo occorre individuare nuove tipologie di azioni, da includere nell'alternativa, che agiscano in modo specifico sui settori insoddisfatti. Una volta individuate le tipologie occorre quantificare le azioni (fase 3), stimarne gli effetti (5), valutarli (6) e comparare (7) le alternative così ottenute con le alternative di attrazione precedentemente individuate, per capire se esse producono il consenso sperato. Si ottiene così un nuovo insieme di alternative di attrazione, che possono, eventualmente, essere esaminate alla ricerca di nuove azioni di mitigazione. Si instaura così una recursione tra le fasi 3-5-6-7-8 (Fig. 2-2), che termina quando non si riesce più ad individuare azioni di mitigazione che permettano di allargare il consenso. Le alternative di attrazione ottenute a quel punto sono dette *alternative di compromesso* e ciascuna di esse gode del consenso di un gruppo di portatori d'interesse

9. **Scelta politica** . Ai decisori politici spetta individuare, tra le alternative di compromesso, quella di *miglior compromesso*, quella cioè che meglio contempera i diversi interessi, o quella su cui essi riescono ad accordarsi. Questa alternativa costituisce il risultato della pianificazione.

Una volta selezionata l'alternativa di miglior compromesso, è necessario implementarla, realizzando le opere strutturali, promulgando la normativa e applicando giorno per giorno la politica di regolazione che essa prevede. Spesso può essere conveniente sostituire questa politica con una politica di regolazione *in linea*⁴ e in *tempo reale*⁵ per accrescere ulteriormente i benefici che l'alternativa produce.

All'interno della nostra tesi abbiamo sviluppato questa procedura fino alla fase sesta: Valutazione delle alternative. Le fasi successive non fanno parte delle finalità attuali dello studio (vedi Introduzione) che ha carattere principalmente teorico poichè non si è ancora attivata una reale volontà politica di procedere alla negoziazione.

⁴cioè calcolata al momento stesso della decisione.

⁵cioè calcolata così rapidamente da non rendere superata la decisione fornita, in pratica ciò significa calcolata in non più di una decina di minuti se il passo decisionale è di un giorno.

2.6 Il sistema di supporto alla decisione (dss)

Nel descrivere le fasi della procedura si è accennato più volte alla necessità di interagire con soggetti diversi e di utilizzare in ogni fase le informazioni ottenute e prodotte in quelle precedenti. In particolare l'informazione deve essere:

1. *completa e condivisa*: da tutti i soggetti coinvolti nel processo decisionale. È importante che le valutazioni effettuate nei singoli settori vengano condivise tra tutti i portatori d'interesse, perché è sulla condivisione che si fonda la ricerca del consenso.
2. *trasparente*: i procedimenti e le modalità con cui si producono le diverse informazioni devono essere ben codificate, note e comprese da tutti.
3. *ripercorribile*: in ogni momento del processo decisionale deve essere possibile riesaminare le fasi già svolte e verificare le operazioni compiute.
4. *semplice da interrogare*: quindi ben strutturata.
5. *flessibile*: nel senso che possa essere utilizzata anche in ambiti differenti da quelli che l'hanno prodotta.

Emerge quindi la necessità di realizzare uno strumento informatico con cui si possano effettuare le operazioni previste dalle diverse fasi e che garantisca queste proprietà dell'informazione. Questo strumento è comunemente denotato con l'acronimo inglese DSS da *Decision Support System*, cioè *Sistema di Supporto alla Decisione* in italiano.

Uno strumento di questo tipo, che copra tutte le fasi della procedura, non è ancor oggi disponibile. Il Dipartimento di Elettronica e Informazione del Politecnico di Milano ha sviluppato un prototipo operativo di una parte di tale sistema, con cui si possono realizzare le fasi 3, 4 e 5, cioè quelle di tipo modellistico. Il sistema si chiama TWOLE [21]. Le fasi 6 e 7 potrebbero essere assistite dai classici strumenti utilizzati nella Valutazione di Impatto Ambientale (vedi ad esempio [Laniado et al., 2002]).

Capitolo 3

I POSSIBILI INTERVENTI

Nel presente capitolo definiamo e descriviamo estesamente gli interventi che i diversi portatori di interesse vorrebbero apportare al sistema per aumentare la propria soddisfazione (Fig.3-1).

Distinguiamo tre diverse tipologie d'intervento: *interventi normativi*, *interventi strutturali* e *interventi gestionali*.

Interventi normativi: consistono in modifiche dei vincoli legali che devono essere rispettati nella regolazione dei serbatoi e nella distribuzione delle portate. In questo tipo di interventi rientra l'introduzione di un DMV sulle aste fluviali e l'obbligo per Enel di rilasciare un certo quantitativo d'acqua per soddisfare le esigenze civili e/o industriali della valle del Vomano.

Interventi strutturali: si intende un intervento volto alla modifica della struttura fisica del sistema. L'unico intervento strutturale del nostro studio è l'ampliamento dell'area ad uso agricolo gestita dal Consorzio di Bonifica Nord.

Interventi gestionali: riguardano le regole e i modi in cui si gestisce l'erogazione delle acque contenute nei serbatoi e la distribuzione delle portate transitanti nel sistema.

La ricerca di una soluzione che soddisfi le esigenze dei portatori d'interesse non può tuttavia essere condotta analizzando singolarmente ognuna di queste proposte, poichè ogni intervento su un sistema complesso ed i cui elementi sono interdipendenti ha effet-

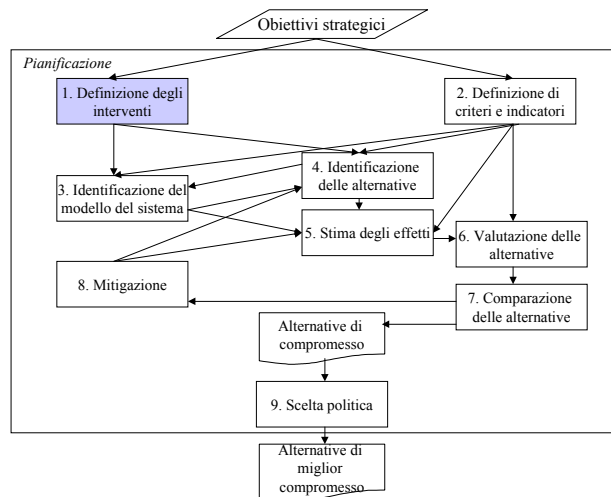


Figura 3-1: Fase 1: definizione degli interventi.

ti sull'interità di esso e può vanificare o contrastare interventi precedenti. La soluzione del problema va cercata in una opportuna combinazione degli interventi ovvero un' *alternativa*. Per individuarla struttureremo un processo di ricerca seguendo la metodologia esposta nel Cap.2.

3.1 Interventi normativi

3.1.1 Introduzione del DMV

Il DMV costituisce la minima quantità d'acqua che deve essere presente in un fiume per garantire la sopravvivenza dell'ecosistema fluviale, assicurando le condizioni necessarie per un normale svolgimento dei processi biologici vitali degli organismi acquatici.

Nel quadro giuridico italiano il concetto di Deflusso Minimo Vitale è stato introdotto per la prima volta dalla legge 183/89 ("Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo"), la quale prescrive tra gli obiettivi dell'attività di programmazione, pianificazione ed attuazione, la "razionale utilizzazione delle risorse idriche superficiali e

profonde garantendo, comunque, che l'insieme delle derivazioni non pregiudichi il minimo deflusso costante vitale negli alvei sottesi".

Il concetto di DMV è stato successivamente ripreso dalla legge 36/94 ("Disposizioni in materia di risorse idriche"), nella quale all'articolo 3 punto 3 si legge: "Nei bacini idrografici caratterizzati da consistenti prelievi o da trasferimenti, sia a valle che oltre la linea di displuvio, le derivazioni sono regolate in modo da garantire il livello di deflusso necessario alla vita negli alvei sottesi e tale da non danneggiare gli equilibri degli ecosistemi interessati".

La normativa pone l'attenzione sui molteplici interessi relativi alla risorsa idrica, sottolineando la necessità da un lato di garantire un deflusso minimo vitale, il cui obiettivo è la conservazione degli ecosistemi acquatici, dall'altro di non pregiudicare altri utilizzi della risorsa.

Con il nuovo Testo Unico sulle Acque (DLgs 152/99) il DMV è menzionato chiaramente quale fattore imprescindibile nella stesura dei piani di tutela dei corsi d'acqua.

Esistono diversi criteri di definizione del DMV (Metodo Valtellina, Strasburgo, delle curve di durata....) che, sfruttando diversi approcci, tentano di valutare gli effetti della quantità d'acqua a disposizione dell'ecosistema fluviale.

Il DMV può essere un valore costante oppure tempo variante e, orientativamente, prendendo ad esempio il parametro stabilito in Francia e in Svizzera, potrebbe essere pari al 10% della portata media annua, valore considerato appena sufficiente a consentire la riproduzione della fauna ittica.

In merito a ciò ricordiamo che è in corso di redazione il Piano per la tutela delle acque, la cui adozione è prevista entro il 2004. E' allo studio inoltre il progetto per la definizione del deflusso minimo vitale mentre è stato condotto dall'Università dell'Aquila, per conto della Regione Abruzzo, uno studio pilota per la definizione del DMV nel bacino Aterno-Pescara, contenente una metodologia applicabile alla realtà abruzzese.

Ancora oggi manca però un'indicazione precisa sui valori e sui tipi di DMV da imporre all'interno della zona di studio, ovvero sui torrenti intercettati dai canali di gronda, sul Rio Fucino a valle di Campotosto e sul Vomano. L'unica eccezione è relativa a un breve

tratto del Vomano, a partire da valle dell'abitato di Montorio fino a Villa Vomano, in cui Enel è tenuta a garantire una portata minima $1.35 \text{ m}^3/\text{sec}$.

Riteniamo però importante inserire ugualmente all'interno del nostro studio questo tipo d'intervento ipotizzando, oltre a quello già attivo, i seguenti valori di DMV:

- Rio Fucino: 10% della propria portata media annua naturale.
- Rio Fucino: 30% della propria portata media annua naturale.
- Gronda a quota 1100: riduzione del 30% delle portate intercettate.
- Gronde a quota 400: riduzione del 30% delle portate intercettate.

Gli ultimi due interventi sono finalizzati a garantire un deflusso minimo vitale anche ai corsi d'acqua che scorrono lungo le pendici dei Monti della Laga e sul versante Nord del Massiccio del Gran Sasso. Attualmente, questi corsi d'acqua, sono prosciugati nei tratti a valle dai canali di gronda, dato che queste intercettano la quasi totalità delle acque superficiali, impoverendo una zona ad elevato interesse ambientale.

3.1.2 Incremento del prelievo idropotabile

Il servizio idrico di acqua potabile della Provincia di Teramo (ATO Teramo) ha la funzione di garantire il soddisfacimento della domanda relativa al consumo domestico, pubblico e del settore economico-produttivo. Quest'ultimo è costituito in prevalenza da numerose industrie agroalimentari che non possono utilizzare acqua non potabile per i processi produttivi.

In seguito alle analisi demografiche effettuate dal gestore del servizio idrico sono già stati pianificati ed approvati i futuri interventi per adeguare la fornitura potabile alla domanda prevista. Il piano di sviluppo dell'Acquedotto del Ruzzo prevede che la derivazione per uso potabile venga portata a 1400 l/sec entro il 2005, a 2100 l/sec entro il 2015 per poi arrivare a 3500 l/sec nel 2030.

Noi prenderemo in considerazione come interventi valori di derivazione pari a 1400 l/sec e a 2100 l/sec .

3.1.3 Incentivi all'adozione di tecniche irrigue efficienti

Nell'ottica di un più efficiente sfruttamento della risorsa idrica ci è parso interessante ipotizzare la predisposizione, a livello politico regionale, statale o Europeo, d'incentivi economici di varia natura (deducibilità delle spese, finanziamenti a tassi agevolati) volti a promuovere l'adozione di tecniche irrigue efficienti, come ad esempio la microirrigazione. Anche il passaggio dalla tariffazione ad ettaro, attualmente applicata dal CBN, ad una tariffazione a consumo può essere vista come intervento finalizzato ad incentivare tecniche irrigue più efficienti. Definiremo meglio le modalità e gli effetti dell'introduzione di questo intervento all'interno del sistema nel Cap. 8.

3.2 Interventi strutturali

Nel settore agricolo l'approvvigionamento idrico per l'irrigazione è un fattore di fondamentale importanza. I vantaggi derivanti in termini di reddito e di ricadute occupazionali, dalla coltivazione di un ettaro di superficie irrigua sono rilevanti.

Pur determinando tali benefici, la superficie irrigata nella valle del Vomano resta ancora bassa se rapportata alla disponibilità potenziale di acqua. Allo stato attuale l'uso agricolo del suolo vede una netta prevalenza di seminativo non irrigabile (circa 80%), mentre la pratica irrigua rimane una piccola percentuale.

Il Consorzio di Bonifica Nord propone di ampliare l'area consortile portandola da 7000 ha a 13900 ha, rinnovando lo schema di adduzione del distretto irriguo. Questo aprirebbe nuovi scenari produttivi e porterebbe ad un uso del suolo in cui le colture irrigue diventerebbero predominanti, aumentando notevolmente la produzione agricola.

Ovviamente questo intervento deve comprendere un aumento della portata massima derivabile dal CBN attualmente pari a $4.1 \text{ m}^3/\text{sec}$.

L'espansione, attualmente in fase di studio, risulta tuttavia problematica.

L'utilizzo concorrenziale della risorsa idrica fa sì che la massima disponibilità idrica del Consorzio ricada in periodi diversi da quello di massima domanda delle coltivazioni,

dando potenzialmente luogo a gravi deficit che vengono evitati comprando acqua da Enel. A causa delle ridotte dimensioni della vasca di Villa Vomano infatti il gestore irriguo non è in grado di accumulare acqua per poi ridistribuirla nei giorni successivi ai propri cosorziati.

3.2.1 Ampliamento del Consorzio irriguo

Per descrivere gli interventi strutturali di ampliamento del distretto irriguo della valle del Vomano faremo riferimento allo Studio di fattibilità per "L'estendimento del sistema irriguo Vomano-Tordino e recupero energetico delle acque del fiume Vomano" commissionato dal CBN. [7]

Il territorio oggetto dello studio è quello della Provincia di Teramo che si estende a Nord dalla sponda destra del fiume Tronto fino alla sponda sinistra del Torrente Piomba a Sud. Procedendo da Nord verso Sud le valli interessate sono quelle del Tronto, Vibrata, Salinello, Tordino, Vomano, Cerrano, Calvano e Piomba.

Lo studio di fattibilità prevede la riorganizzazione dello schema di adduzione del distretto irriguo, con la realizzazione di una nuova condotta in sponda destra del fiume Vomano che, partendo dalla vasca di Villa Vomano, serva i terreni irrigui della vallata nonché quelli delle valli del Calvano, Cerrano e Piomba, cioè la parte del territorio consortile che in seguito verrà denominata Compensorio Sud. Lo schema del distretto irriguo allargato è rappresentato nella Fig.3-2.

Il Compensorio Nord, costituito dalle valli del Tordino, Salinello, Vibrata e Tronto, utilizzerà l'esistente condotta tra la traversa di Villa Vomano e la vasca di Pagliare. Da qui dovrebbe essere realizzata una condotta pluridiametro a portata decrescente per l'alimentazione dei serbatoi di Giulianova, Terrabianca e Colonnelle, a servizio delle reti di distribuzione Saliniello, Vibrata e Tronto.

La derivazione per il Compensorio Sud, in sponda destra del fiume Vomano, dovrebbe utilizzare le esistenti opere della traversa di Villa Vomano e del relativo impianto idroelettrico, con portata massima turbinabile pari a $16.5 \text{ m}^3/\text{sec}$, già realizzato ma non anco-

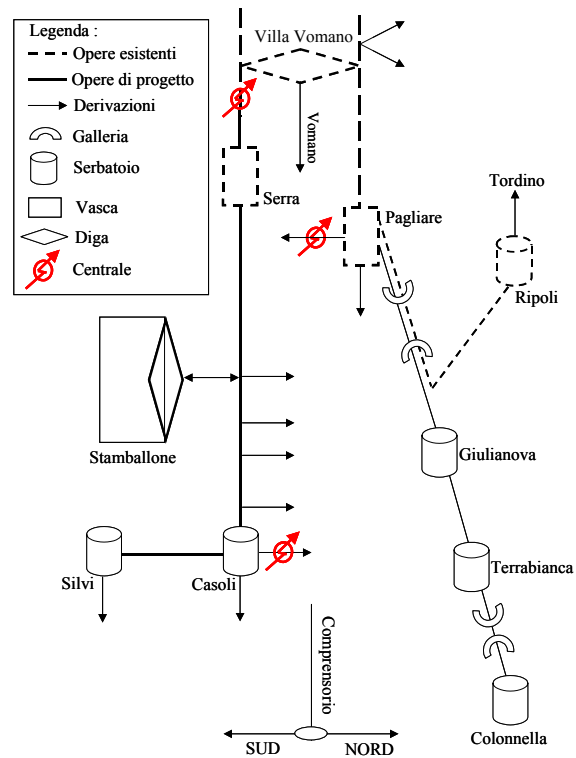


Figura 3-2: Schema idrico di progetto per l'ampliamento del Consorzio di Bonifica Nord.
(fonte: Studio di fattibilità, Ecoter, 2001)

Tabella 3.1: Produzione energetica delle centrali del Consorzio di Bonifica Nord

Centrale	Energia [Kwh/anno]
Villa Vomano	3.671.098
S. Lucia	11.076.863
Il Casone	17.163.576
TOTALE	31.911.538

ra attivo. Per la modulazione delle portate scaricate dalla centrale di Villa Vomano è prevista la realizzazione di una vasca della capacità di 260000 m³ ubicata in località Serra.

L'adduttore Sud dovrebbe essere costituito da una condotta pluridiametro a portata decrescente, in grado di alimentare le distributrici della vallata del Vomano e i serbatoi di Casoli e Silvi. La realizzazione di questi serbatoi è prevista per alimentare le reti di distribuzione Calvano-Cerrano e Piomba-Gallo.

Al fine di disporre di un'ulteriore fornitura d'acqua, era prevista la realizzazione del serbatoio Stamballone, già progettato dal Consorzio lungo il corso d'acqua omonimo; per mancanza di risorse finanziarie tale progetto è stato abbandonato.

Lo schema, inoltre, prevede il trasferimento, durante il periodo non irriguo, dell'intera portata derivata dall'adduttore Sud fino al serbatoio di Casoli che, utilizzato come vasca di carico dell'impianto idroelettrico "Il Casone" (con portata massima turbinabile pari a 4.5 m³/sec), consentirebbe di disporre di un salto netto di 90 m.

In questo modo il Consorzio di Bonifica disporrebbe di tre centrali idroelettriche, la cui produzione energetica è riportata nella Tab.3.1¹.

In questo studio prenderemo in considerazione la possibilità che il Consorzio rimanga nella configurazione attuale, oppure che si estenda secondo le modalità descritte sopra e con l'aumento della portata massima derivabile a 8 m³/sec. Nel secondo caso, per semplificare il modello del comprensorio irriguo si assumerà un sistema grossomodo speculare a quello esistente (vedi Fig.3-3). Tale ipotesi è giustificata dalle dimensioni della vasca

¹La produzione energetica è considerata conseguibile in un periodo di circa 7 mesi all'anno (periodo invernale-primaverile).

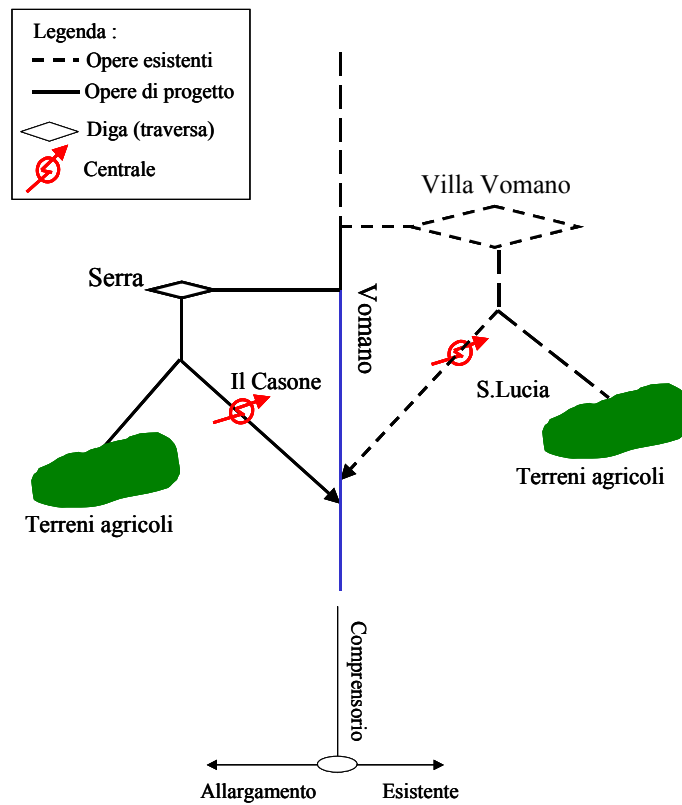


Figura 3-3: Schema idrico semplificato per l'ampliamento del Consorzio di Bonifica Nord.

Serra e dall'estensione dei nuovi terreni servibili dagli impianti di approvvigionamento. Non considereremo invece soluzioni intermedie di espansione.

3.3 Interventi gestionali

3.3.1 Riprogettazione della regolazione

Attualmente Enel detiene le concessioni di sfruttamento della risorsa idrica, di conseguenza l'utilizzo dell'acqua da parte delle altre utenze è subordinato alla portata che essa decide ogni giorno di rilasciare. Chiaramente gli interventi precedentemente proposti risultano efficienti solo se associati ad una diversa modalità di gestione, la quale non abbia come unico obiettivo la produzione idroelettrica.

Enel gestisce la risorsa idrica prendendo quotidianamente un insieme di decisioni sull'erogazione delle seguenti portate:

- da Campotosto verso la centrale di Provvidenza;
- da Provvidenza verso la centrale di San Giacomo;
- da Provvidenza verso Campotosto;
- da San Giacomo verso la centrale di Montorio;
- da San Giacomo verso Provvidenza;
- da Montorio verso Villa Vomano.

Nel seguito della tesi ci riferiremo a queste decisioni utilizzando il termine *controlli*.

Enel definisce il valore di questi controlli osservando il livello dei serbatoi, la richiesta di energia della rete nazionale ed eventualmente altre informazioni riguardanti il bacino imbrifero (quali il volume del manto nevoso, le previsioni atmosferiche, etc.). Nel complesso si può ritenere che il comportamento del regolatore, in ciascun giorno dell'anno,

possa essere ben descritto da una regola che associ al valore assunto da queste variabili un insieme di controlli.

L'intervento gestionale consiste in una modifica di queste regole.

Capitolo 4

GLI INDICATORI

Abbiamo visto nel precedente capitolo come un insieme d'interventi concorra a definire un'alternativa. Per poter valutare gli effetti di un'alternativa sul sistema è necessario individuare i *criteri di valutazione*, ovvero gli attributi, o i fattori, attraverso cui poterne giudicare le prestazioni rispetto ad un *settore*. Il criterio di per sé non è quantitativo, non definisce cioè un modo per misurare gli effetti di un'alternativa su di un settore (cioè, rispetto ad un interesse): per farlo occorre definire un *indicatore*, cioè una *procedura* con cui associare al criterio un valore, mediante il quale sia possibile stabilire quanto il criterio sia soddisfatto da una data alternativa.

Noi costruiremo degli indicatori con una particolare struttura, ovvero esprimibili come la combinazione, tramite un opportuno operatore Ψ (ad esempio la somma), di h funzioni $g_t(\cdot)$, $t = 1 \dots h$, dette *costi per passo*, ciascuna delle quali esprime il “costo” associato alla transizione del sistema dalla sua condizione all'istante t a quella all'istante $t + 1$; gli argomenti delle funzioni di costo sono variabili idrologiche (portate transistanti nel sistema, invasi dei serbatoi) relative all'intervallo di tempo $[t, t + 1)$. Indicatori così strutturati sono definiti *separabili*. La separabilità è una caratteristica necessaria per poter utilizzare gli indicatori come *funzioni obiettivo* all'interno dell'algoritmo di Programmazione Dinamica Stocastica che utilizzeremo per la risoluzione del problema di controllo ottimo (vedi Cap. 9).

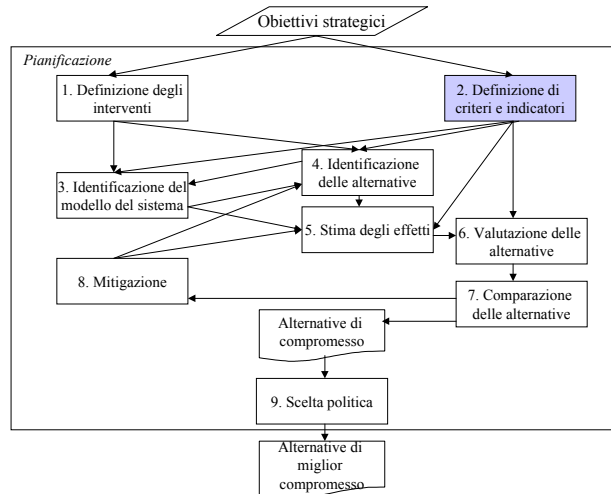


Figura 4-1: Seconda fase della procedura: definizione di criteri e indicatori

Definiremo ora i criteri e gli indicatori per ognuno dei settori descritti nel Cap. 1

4.1 Ambiente

Il criterio di settore che abbiamo adottato è la *salvaguardia degli ecosistemi fluviali*. Per costruire un indicatore atto a quantificare questo criterio è indispensabile definire qual'è la condizione ottima di un ecosistema fluviale. Alcuni esperti del settore, facenti parte del gruppo di portatori d'interesse, affermano che la condizione di un ecosistema è tanto migliore quanto più esso è lasciato libero di evolvere in condizioni naturali. Partendo da questo presupposto si può affermare che la migliore qualità ambientale si ottiene sospendendo ogni forma di regolazione delle acque. Cerchiamo di costruire un indicatore che valuti quanto la situazione attuale si discosti da quella ottimale in cui non è presente nè il serbatoio di Campotosto nè alcuna forma di regolazione delle acque. A tale scopo abbiamo definito l'indicatore di settore *Portata media sottratta al Rio Fucino rispetto al regime naturale* [m^3/s]:

$$Am = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} (a_t^n - q_t^{Fucino}) \quad (4.1)$$

a_t^n rappresenta la portata che il Rio Fucino avrebbe all'istante t in condizioni naturali. Per calcolarla ipotizziamo una distribuzione spazialmente uniforme degli afflussi all'interno dell'area del bacino proprio di Campotosto (50 km²) e consideriamo che di quest'area circa un terzo costituirebbe il bacino imbrifero del Rio Fucino. Possiamo quindi assumere che la portata naturale del Rio Fucino sia pari ad un terzo della quota di afflusso al serbatoio di Campotosto dovuta al bacino proprio ($a_t^{proprio}$).

$$a_t^n = \frac{1}{3} a_t^{proprio}$$

q_t^{Fucino} è invece la portata fluente all'istante t nella situazione considerata; H è l'intervallo temporale su cui viene calcolato l'indicatore.

L'indicatore così definito è separabile e l'argomento della sommatoria ($a_t^n - q_t$) rappresenta la funzione di costo per passo g_t .

4.2 Fornitura idropotabile

Il criterio di settore è *la qualità dell'acqua fornita da Enel*. Abbiamo visto infatti che, quando la portata del canale di gronda sinistro non basta a soddisfare la domanda del Ruzzo, Enel provvede a sopperire al deficit prelevando l'acqua dal serbatoio di Piaganini. Il ristagno prolungato dell'acqua nel serbatoio di Piaganini e l'eccessivo trasporto solido, causato in certe ore dallo scarico della centrale di S.Giacomo, compromettono significativamente la qualità di tale acqua. In questi casi l'ATO Teramo, che rappresenta il portatore d'interesse relativo al settore, è soggetta a costi di potabilizzazione più onerosi. Il criterio scelto è quindi la qualità dell'acqua fornita da Enel.

Come indicatore di questo settore si è considerata la *fornitura media proveniente da impianti di accumulo ENEL*

espressa in $Mm^3/anno$ data da:

$$Aq = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} \max(0; q^{ruzzo} - a_t^{sx400}) \quad (4.2)$$

a_t^{sx400} è la portata transitante all'istante t sulla gronda a 400 m sinistra. I dati giornalieri a nostra disposizione sono però relativi alle portate aggregate delle due gronde a_t^{400} . Analizzando però le medie mensili rilevate dal CESI¹ (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano) per le due gronde separatamente abbiamo concluso che a_t^{sx400} è pari a circa la metà del contributo totale delle due gronde. q^{ruzzo} è la portata da fornire all'acquedotto e H è l'intervallo temporale su cui viene valutato l'indicatore.

4.3 Produzione idroelettrica

4.3.1 Rete elettrica nazionale

Per riuscire a definire correttamente un indicatore è necessario comprendere quale sia l'obiettivo del portatore d'interesse di settore. Cerchiamo quindi d'individuare quale sia il ruolo di Enel all'interno del complesso meccanismo della gestione e distribuzione dell'energia elettrica.

Gli impianti del Vomano sono interlacciati con la rete nazionale della cui gestione si occupa esclusivamente un organismo che fa capo al ministero del Tesoro: il GRTN (*Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale*)

Il ruolo del GRTN è quello di assicurare la trasmissione di energia elettrica sulla rete, gestendo i flussi di energia attraverso il coordinamento degli impianti di produzione. Quest'ultima funzione, detta *sistema di dispacciamento*, è necessaria per contenere entro limiti prefissati le oscillazioni della frequenza di rete, causate da squilibri (guasti o impreviste variazioni giornaliere di carico) tra la potenza generata e la potenza assorbita.

¹Fonte: Studio CESI "impianti idroelettrici sul fiume Vomano - Canali di trasfluenza - tabelle dati idrici", 1994.

Possiamo quindi delineare l'attuale modalità di controllo delle centrali elettriche: ogni giorno il GRTN fornisce ad Enel una richiesta di produzione media giornaliera, calcolata in base alle previsioni del giorno precedente, e successive richieste sub-giornaliere (variabili con una frequenza dell'ordine di secondi) di energia necessaria ad attuare la funzione di regolazione di frequenza; solamente le centrali idroelettriche possono modulare così velocemente la produzione di energia, grazie alla rapidità con cui i gruppi di turbine possono essere attivati o disattivati (vedi Cap.1). La produzione media è invece in massima parte garantita dagli impianti termoelettrici.

Ricordiamo però che il nostro studio si pone ad un livello di pianificazione, non è quindi nostro obiettivo considerare in maniera dettagliata ed esaustiva il livello gestionale, e quindi i meccanismi di regolazione sopra esposti; quello a cui siamo interessati è fornire per ogni giorno delle direttive per le decisioni di erogazione e di riparto lasciando al regolatore la libertà di prendere le decisioni di controllo considerando i fattori contingenti.

Di conseguenza anche l'indicatore che definiremo dovrà essere riferito a questo livello di analisi.

Con la decisione 2002/358/CE, del 25 aprile 2002, la Comunità europea ha adottato il Protocollo di Kyoto con tutti l'impegni che ne derivano (Gazzetta ufficiale L 130, 15.05.2002): gli Stati membri dell'Unione devono ridurre entro il 2012 le proprie emissioni di gas serra dell'8% rispetto al valore del 1990. Per raggiungere tale obiettivo si sono redatti alcuni piani d'azione (fra essi i programmi SAVE e SAVEII), per indirizzare le nazioni aderenti all'adozione di politiche di riduzione delle emissioni che incentivino lo sfruttamento di fonti di energia rinnovabili.

L'obiettivo indicato per l'Italia è di alzare la quota percentuale di energia elettrica prodotta da impianti alimentati da fonti rinnovabili dal 19.7% (2001) al 25% entro il 2010. Nel 2001 in Italia la produzione lorda di energia elettrica da impianti alimentati da fonti rinnovabili ha raggiunto il valore di 55088 GWh, di cui l'85% è stato generato da impianti idroelettrici².

²Questi dati sono tratti dal sito internet del GRTN <http://www.grtn.it>

E' allora evidente che l'Italia, per rispettare l'impegno preso, dovrà necessariamente promuovere un aumento della quota di energia prodotta da questo tipo di impianti. Ci è quindi sembrato plausibile ipotizzare che in futuro l'obiettivo dei gestori relativamente agli impianti idroelettrici sarà la massimizzazione della produzione.

4.3.2 Indicatore

Assumiamo come criterio di settore la *produzione di energia*; definiamo due indicatori: *Ricavo medio annuo lordo* (4.3) e *Produzione media annua* (4.4). Il primo dà una valutazione del ritorno economico lordo ($M\text{€}/\text{anno}$), il secondo della quantità di energia prodotta (gWh/anno). Il pompaggio non è stato considerato nell'indicatore ricavo poichè il suo costo opportunità è per Enel praticamente nullo; questa funzione infatti utilizza l'energia in eccesso prodotta nelle ore notturne dalle centrali termoelettriche che non possono ridurre la generazione per via dell'inerzia degli impianti.

$$Idr1 = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} \sum_{c \in \text{centrali}} R_t(E_c(q_t^c)) \quad (4.3)$$

$$Idr2 = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} \sum_{c \in \text{centrali}} (E_c(q_t^c)) \quad (4.4)$$

q_t^c rappresenta la portata media turbinata il giorno t dalla centrale c .

H è l'intervallo temporale su cui si valuta l'indicatore.

$E_c(q_t^c)$ è una funzione che fornisce l'energia prodotta nelle 24 ore espressa in kWh :

$$E_c(q_t^c) = \psi g \eta \gamma q_t^{c\text{eff}} H_t^c \quad (4.5)$$

dove ψ è un coefficiente di conversione, che vale 0.024 [ore], g [m/s^2] l'accelerazione di gravità, η il rendimento della turbina, γ [kg/m^3] il peso specifico dell'acqua e H_t^c [m] il salto motore. Partendo dalla portata massima, Q_{\max}^c , e dalla portata minima turbinabile, Q_{\min}^c , definiamo per l'impianto c la portata efficiente $q_t^{c\text{eff}}$:

Tabella 4.1: Andamento dei prezzi [Euro/MWh] al variare della fascia oraria e della stagione (dati Enel 1999)

Fascia oraria	Inverno	Estate	Agosto Sabato e Domenica
00:00-06:30	25.3	25.3	25.3
06:30-8:30	46.7	46.7	25.3
08:30-10:30	116.3	46.7	25.3
10:30-12:00	46.7	46.7	25.3
12:00-16:30	46.7	46.7	25.3
16:30-18:30	116.3	46.7	25.3
18:30-21:30	46.7	46.7	25.3
21:30-24:00	25.3	25.3	25.3

Tabella 4.2: durata in ore e relativo ricavo per ognuna delle 3 fasce di produzione in un giorno infrasettimanale invernale

fascia	prezzo [€/MWh]	ore
1	116.3	4
2	46.7	11
3	25.3	9

$$q_t^{ceff} = \begin{cases} 0 & \text{se } q_t^c < Q_{\min}^c \\ q_t^c & Q_{\min}^c < q_t^c < Q_{\max}^c \\ Q_{\max}^c & \text{se } q_t^c > Q_{\max}^c \end{cases} \quad (4.6)$$

Per monetizzare l'energia prodotta si è fatto riferimento alla seguente tariffazione relativa al 1999

in cui i prezzi sono espressi in [€/MWh] Tab. 4.1.

Il periodo invernale va da ottobre a marzo, mentre quello estivo da aprile a settembre. Non possiamo però considerare in modo diretto la tariffazione oraria all'interno del nostro modello, che avrà (vedi Cap.5) un passo temporale giornaliero. Possiamo però fare l'ipotesi, del tutto plausibile, che Enel distribuisca le portate turbinate durante la giornata in modo da dare priorità alla produzione nelle fasce più convenienti che corrispondono ad una maggiore domanda sulla rete. Calcoliamo per ogni prezzo p^i il numero di ore h^i in cui esso viene applicato all'interno di una giornata. Poniamoci, per esempio, in inverno in un giorno t infrasettimanale e otteniamo la Tab. 4.2:

Successivamente calcoliamo la produzione massima generabile dall'impianto c per ognuna delle i fasce orarie (\tilde{E}_c^i) con la seguente equazione:

$$\tilde{E}_c^i = \left(\frac{h_i}{24} \right) \psi g \eta \gamma Q_{\max}^c H_t^c \quad (4.7)$$

Noto il valore della produzione giornaliera $E_c(q_t^c)$ possiamo risalire alla quotaparte generata dall'impianto c il giorno t per ognuna delle fasce i e venduta al prezzo p^i . Otteniamo l'equazione (4.8) che associa ad ogni valore di produzione $E_c(q_t^c)$ il corrispondente ricavo di Enel e permette di costruire l'indicatore *Ricavo medio annuo lordo* (4.3).

$$R_t(E_c(q_t^c)) = \begin{cases} E_c(q_t^c) \cdot p^1 & E_c(q_t^c) < \tilde{E}_c^1 \\ E_c^1 p^1 + (E_c(q_t^c) - E_c^1) p^2 & \tilde{E}_c^1 < E_c(q_t^c) < \tilde{E}_c^2 \\ E_c^1 p^1 + E_c^2 p^2 + (E_c(q_t^c) - E_c^2) p^3 & \tilde{E}_c^2 < E_c(q_t^c) \end{cases} \quad (4.8)$$

$R_t(E_c(q_t^c))$ è una funzione lineare a tratti in cui il variare dei coefficienti rappresenta il variare dei prezzi di vendita in relazione alla produzione giornaliera $E_c(q_t^c)$.

4.4 Irrigazione

Il CBN rappresenta gli interessi degli agricoltori, il criterio di settore è quindi il *profitto agricolo* che si accresce aumentando la produzione di biomassa vegetale. La biomassa delle colture al momento del raccolto potrebbe essere calcolata direttamente disponendo di un modello della crescita delle colture. In tal caso la *biomassa media annua prodotta* sarebbe l'indicatore associato al criterio di settore. Tuttavia, i modelli dinamici delle colture hanno uno *stato* di dimensione elevata, perché descrivono in dettaglio i processi fisiologici della pianta; sono dunque troppo complessi per poter essere adottati nel nostro studio giacché comporterebbero tempi di calcolo proibitivi nel progetto delle politiche. Nel capitolo Bayes vedremo come abbiamo risolto questo problema giungendo alla definizione del seguente indicatore (4.9).

Tabella 4.3: Prezzi medi giornalieri

	Inverno	Estate	Sabato e Domenica
prezzo [€/MWh]	48.82	38.68	25.3

Assumiamo come indicatore di settore il *deficit su domanda medio annuo*, espresso in m^3 e così definito:

$$Irr1 = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} \sum_{i \in colture} \left[(W_t^i - q_t^i)^+ \right] \quad (4.9)$$

Abbiamo pensato di aggiungere un secondo indicatore che permetta di valutare il deficit dovuto al mancato rilascio da parte di Enel e non ai limiti fisici delle infrastrutture di derivazione. Chiamiamo questo indicatore *deficit su capacità medio annuo* (4.10), calcolato ponendo a zero il deficit all'istante t quando la portata derivata alla traversa del CBN è quella massima strutturalmente possibile q^{CBN_max} .

$$Irr2 = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} \sum_{i \in colture} \left[g_t^{def_cap} \right] \quad (4.10)$$

$$g_t^{def_cap} = \begin{cases} 0 & q_t^i = q^{CBN_max} \\ (W_t^i - q_t^i)^+ & altrimenti \end{cases}$$

Il terzo indicatore di settore riguarda la produzione della centrale idroelettrica di S.Lucia; esso viene incluso in questo settore in quanto questa centrale è di proprietà del CBN che la utilizza per sollevare acqua ai fini della distribuzione di essa lungo le infrastrutture di irrigazione.

Abbiamo definito l'indicatore *Ricavo medio annuo S.Lucia* (4.11).

$$Irr3 = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} \sum_{c \in centrali} p_t (E^{sl} (q_t^{sl})) \quad (4.11)$$

$$E^{sl} (q_t^{sl}) = \psi g \eta \gamma q_t^{sleff} H_t^{sl} \quad (4.12)$$

Per questa centrale sono stati utilizzati prezzi medi giornalieri (vedi Tab.4.3), poichè non è verosimile ipotizzare che il CBN turbinì quando il valore dell'energia è massimo; esso turbinà esclusivamente l'acqua che eccede la domanda irrigua.

Capitolo 5

DAL SISTEMA AL MODELLO

In questo capitolo attuiamo alcune operazioni volte a passare dallo schema del sistema fisico (vedi fig. 5-2) ad un suo modello matematico su cui sia possibile effettuare degli esperimenti tramite i quali valutare gli effetti di ogni alternativa sul sistema e quantificarli attraverso gli indicatori definiti nel capitolo precedente.

Ovviamente un modello non può e non deve rappresentare tutti gli aspetti e fenomeni della realtà fisica ma solo quelli che sono di interesse rispetto al problema che stiamo studiando; il criterio che abbiamo adottato per effettuare le necessarie semplificazioni è quindi quello di rappresentare correttamente il funzionamento e la logica degli elementi del sistema fisico che ci interessano e non la sua topologia e struttura completa.

5.1 Aggregazione degli afflussi

Vediamo quali sono gli apporti idrici al sistema, dividendoli per il serbatoio che alimentano:

- Campotosto: gronde dei Monti della Laga e contributo del bacino proprio;
- Provvidenza: gronda 1100 e i fiumi Vomano e Chiarino;

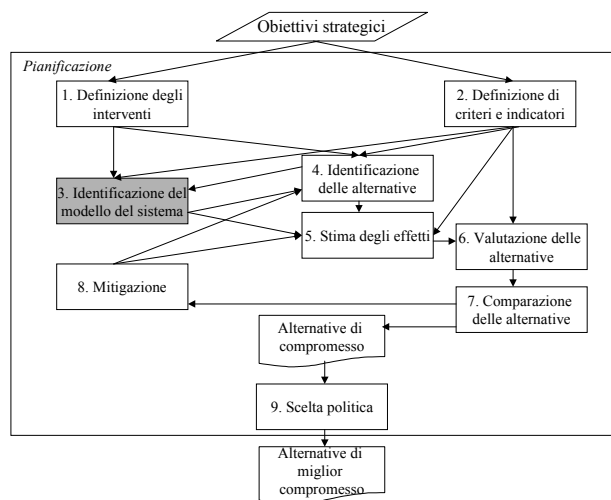


Figura 5-1: Fase 3: identificazione del modello del sistema

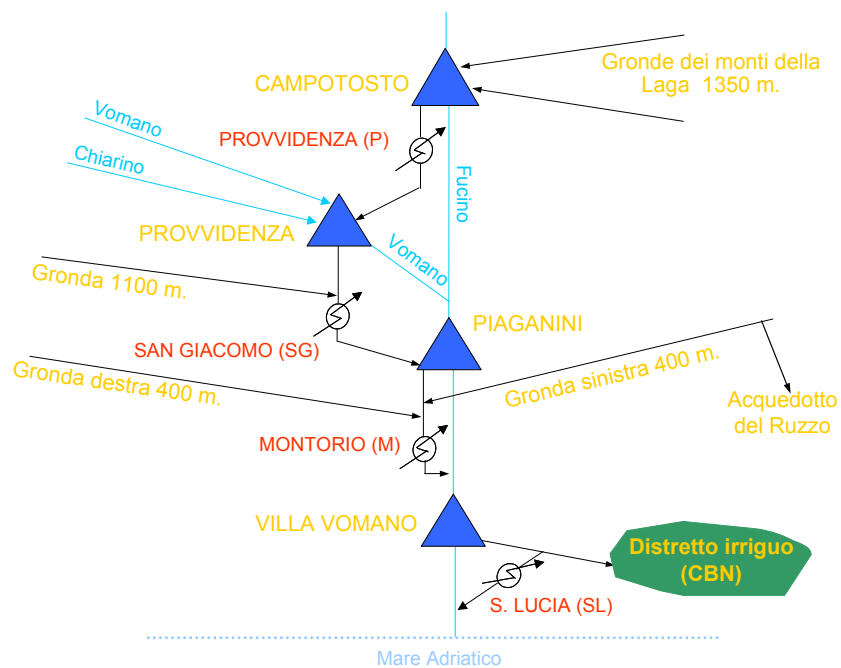


Figura 5-2: Schema fisico del sistema

- Piaganini: gronde in sponde sinistra e destra a quota 400 e fiume Vomano, il quale però è sempre in secca per l'assenza di DMV.

I dati che Enel ha fornito sono invece:

- Campotosto: portata media giornaliera aggregata delle due gronde dei Monti della Laga.
- Provvidenza e Piaganini: portata medie giornaliera in ingresso al serbatoio, calcolate chiudendo il bilancio al netto dei pompaggi (vedi Cap.7).

Con queste informazioni non è possibile tarare un modello distinto per ognuno degli apporti idrici al sistema, costruiamo quindi tre componenti che modelizzino le portate aggregate in ingresso rispettivamente ai tre serbatoi (vedi fig. 5-3). Colleghiamo i tre componenti direttamente ai serbatoi, sebbene nella realtà le gronde a 1100 e a 400 si connettano al sistema a valle rispettivamente di Provvidenza e Piaganini. Questa semplificazione è comunque coerente con il funzionamento reale del sistema poichè l'acqua che le gronde trasportano può essere sia direttamente turbinata sia trasportata per gravità nei relativi serbatoi a monte.

L'unico motivo per cui sarebbe utile disporre di un modello disaggregato degli afflussi è il calcolo dell'indicatore del settore Fornitura Irrigua (vedi Cap.4) in cui compare la portata derivata dalla sola gronda sinistra a quota 400 m. Tuttavia, poichè i bacini imbriferi delle gronde a quota 400 hanno le stesse dimensioni ipotizziamo che il contributo di ognuna di esse sia pari circa la metà della portata totale. I dati disponibili (vedi Cap.7) hanno confermato l'ipotesi.

5.2 Serbatoi minori come traverse

La scelta del tipo di modello con cui rappresentare i componeneti del sistema è fortemente legata alla definizione del passo temporale di modellizzazione Δt . Definiamo ora questa grandezza.

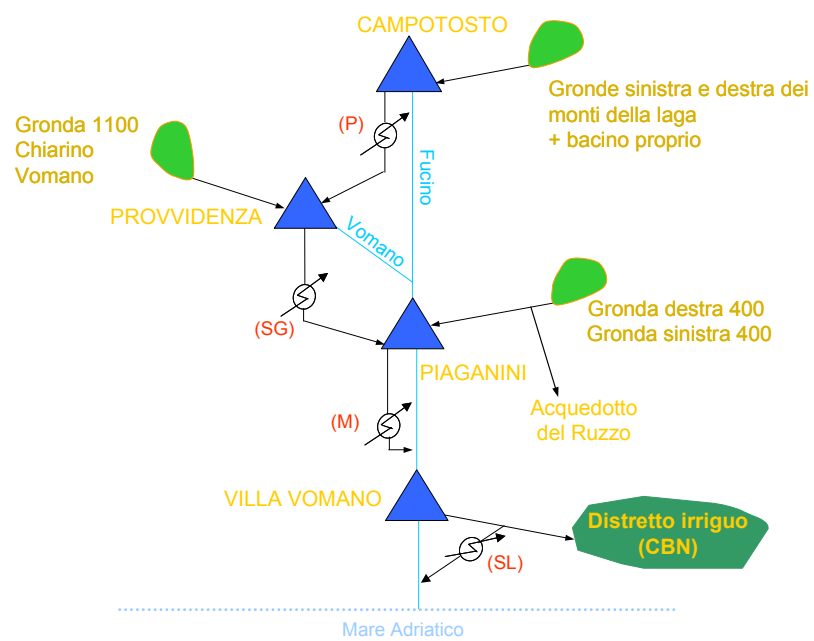


Figura 5-3: Prima semplificazione: Aggregazione degli afflussi.

Enel prende l'insieme delle decisioni relative alle portate da turbinare e da pompare una volta al giorno, quindi attualmente il passo decisionale è giornaliero. Non ci sembra sussista alcun motivo per modificarlo, soprattutto in relazione all'assenza nel sistema di problemi di esondazioni o di piene, gli unici che richiederebbero un passo decisionale più breve per affrontare con adeguata rapidità le situazioni critiche.

La scelta del passo decisionale influenza ovviamente quella del passo di modellizzazione Δt , poiché quest'ultimo dovrà essere o uguale al primo o un suo sottomultiplo. Poiché il primo è pari ad un giorno, sarà

$$\Delta t = \frac{1}{k} \text{ [g]} \quad \text{con } k \text{ intero}$$

Nella scelta del valore da attribuire a k si deve tenere presente:

- la frequenza con cui sono state misurate le variabili idrologiche, da utilizzarsi nella *taratura* e nella *validazione* dei modelli delle singole unità;
- che il tempo di calcolo per la soluzione dei problemi di controllo ottimo e per la valutazione delle alternative aumenta linearmente con k ;
- che la descrizione tempo discreta del sistema non deve produrre un'eccessiva perdita di informazione (si ricordi che in realtà il sistema è tempo continuo).

Le serie temporali di cui disponiamo hanno passo giornaliero e questo impone di assumere $k = 1$. Questa assunzione ha anche il vantaggio di ridurre al minimo il tempo di calcolo. Rimane da verificare che essa non comporti una eccessiva perdita di informazione.

Condizione sufficiente perché ciò non avvenga è che il passo di modellizzazione Δt sia più piccolo (di circa un ordine di grandezza) della più piccola fra le *costanti di tempo* delle componenti del sistema (*Teorema di Shannon* [Rinaldi e Piccardi, 1998]).

La costante di tempo è una misura della rapidità con cui l'uscita di un sistema asintoticamente stabile converge all'*uscita di equilibrio* quando l'ingresso venga mantenuto

costante. Essa è propriamente definita solo per sistemi lineari e tempo-invarianti [Rinaldi e Piccardi, 1998] descrivibili quindi tramite modelli le cui funzioni di transizioni e di uscita siano nella forma

$$\mathbf{x}_{t+1} = A\mathbf{x}_t + B\mathbf{w}_t \quad (5.1a)$$

$$\mathbf{y}_t = C\mathbf{x}_t + D\mathbf{w}_t \quad (5.1b)$$

dove A , B , C e D sono matrici. Detto λ^{\max} l'autovalore dominante della matrice A , ovvero l'*autovalore* di modulo massimo, la costante di tempo T_c del sistema è

$$T_c = \frac{1}{\text{Re}(\lambda^{\max})} \quad (5.2)$$

Se il sistema è non lineare possiamo far riferimento al *modello linearizzato* nell'intorno di un punto significativo, ad esempio in condizioni medie di esercizio.

In conclusione, adottando per Δt il valore di un giorno non si subisce nessuna significativa perdita di informazione se T_c risulta dell'ordine di una decina di giorni.

Nel nostro sistema le uniche componenti che richiedono un modello dinamico sono i serbatoi; possiamo valutare il loro T_c calcolandone il tempo di svuotamento T_s e considerando che la costante di tempo è pari a circa cinque volte il tempo di svuotamento.

$$T_c \simeq 5T_s \quad (5.3)$$

Definiamo il tempo di svuotamento di un serbatoio come:

$$T_s = \frac{V_u}{q_{\max}} \quad (5.4)$$

dove V_u è il volume utile di regolazione del serbatoio e q_{\max} la portata massima erogabile dal serbatoio.

Analizziamo il tempo di svuotamento dei serbatoi del nostro sistema riportati in tabella 5.1: solamente l'invaso di Campotosto ha un tempo di svuotamento che soddisfa

Tabella 5.1: Valori del Tempo di svuotamento T_s dei serbatoi del sistema

	$V_u(m^3)$	$q_{\max}(m^3/sec)$	T_s
Campotosto	217.000.000	61.8	975.4
Provvidenza	1.690.000	85	5.5
Piaganini	950.000	54	4.9
Villa Vomano	380.000	30	3.5

Tabella 5.2: Rapporto tra volumi invasabili e volumi transitabili nell'arco di 24 ore

	$V_u(m^3)$	$V_{transitabile}(m^3)$	$V_u/V_{transitabile}$
Campotosto	217.000.000	5.339.520	40.640
Provvidenza	1.690.000	7.344.000	0.230
Piaganini	950.000	4.665.600	0.204
Villa Vomano	380.000	2.592.000	0.147

la condizione (5.3) posta, ovvero che T_s sia almeno pari a due giorni

Si potrebbe decidere di assumere $k = 24$ (passo di modellizzazione orario) per poter descrivere le dinamiche di tutti i serbatoi del sistema; ciò non è fattibile in quanto renderebbe i tempi di calcolo estremamente lunghi, dell'ordine di mesi, e non sarebbe compatibile con la frequenza di rilevamento giornaliera delle serie storiche dei dati forniti. Dobbiamo quindi trascurare la dinamica dei serbatoi di Provvidenza, Piaganini e Villa Vomano. Cerchiamo di valutare se questa assunzione sia compatibile con il comportamento reale del sistema, oltre che necessaria da un punto di vista modellistico.

Osserviamo per esempio la traiettoria degli invasi di Provvidenza (vedi fig.5-4): notiamo come manchi qualsiasi regolarità nel loro andamento di lungo periodo e come le oscillazioni medie settimanali siano praticamente nulle. Da questo comportamento traiamo conferma che i serbatoi minori sono utilizzati di fatto come vasche di carico e scarico giornaliere: le variazioni di invaso che si verificano nell'arco delle 24 ore si compensano con quelle dei giorni contigui, rendendole trascurabili già su periodo settimanale.

Possiamo inoltre calcolare, per ognuno dei serbatoi, l'entità delle portate transitabili nell'arco delle 24 ore e rapportarle al volume invasabile (vedi tabella 5.2). E' evidente come solo per Campotosto tale rapporto sia ampiamente superiore all'unità.

In base a queste considerazioni possiamo ritenere accettabile l'ipotesi di modellizzare

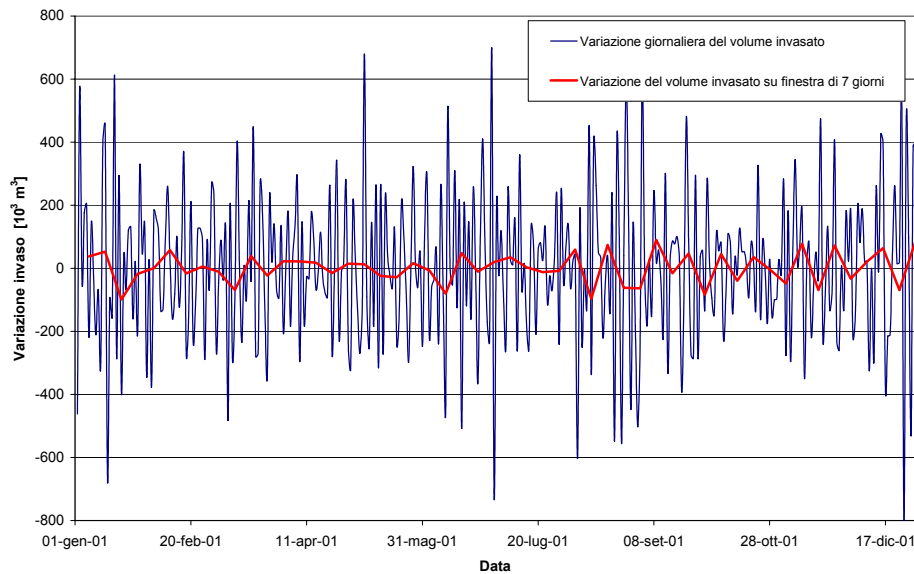


Figura 5-4: Variazione dei volumi settimanali a Provvidenza

i serbatoi di Provvidenza, Piaganini e Villa Vomano come traverse regolate (vedi fig.5-5).

Enel ha confermato di adottare anch'essa ipotesi simili per la gestione del sistema, confermando la bontà delle nostre deduzioni.

Tale semplificazione consente inoltre di mantenere basso il numero di variabili di stato, mantenendo ragionevolmente breve il tempo di calcolo; il modello di una traversa infatti non è dinamico e non ha quindi variabili di stato (vedi Cap.8).

5.3 Centrali logiche di pompaggio

La funzione di pompaggio è svolta dagli impianti di Provvidenza e San Giacomo invertendo il funzionamento dei gruppi reversibili o attivando gruppi specifici di pompaggio. Enel sfrutta questa funzione solo nelle ore notturne, quando è poco conveniente turbinare e c'è ampia disponibilità di energia a basso prezzo.

Poichè durante una giornata ogni centrale funziona per alcune ore in modalità di turbinamento e per le restanti in pompaggio non ci è possibile distinguere le due fasi di

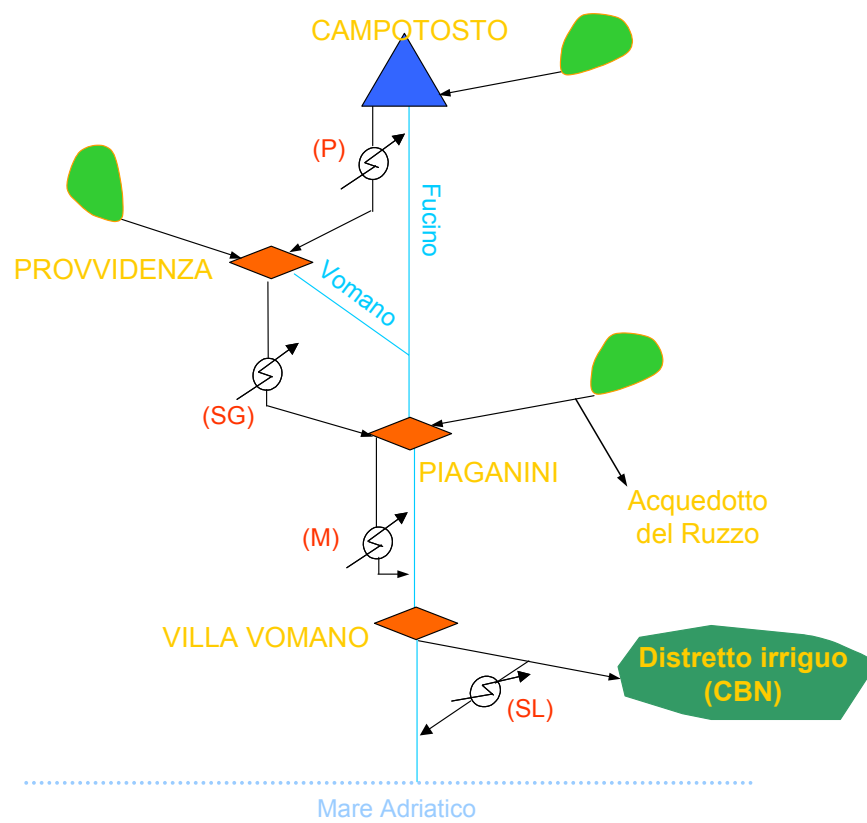


Figura 5-5: Seconda semplificazione: serbatoi minori come traverse

funzionamento all'interno del passo di modellizzazione adottato di 24 h; contemporaneamente non è possibile in TwoLe associare due differenti portate alla medesima centrale; dovremmo quindi considerare un'unica portata netta giornaliera, in cui la portata pompata è sottratta a quella turbinata. Alle due funzioni sono però associati costi ed efficienze notevolmente differenti; è dunque necessario trovare il modo di tenere separate le due portate.

Abbiamo risolto questo problema creando delle centrali logiche, distinte da quelle di turbinamento, che realizzano la sola funzione di pompaggio.

Dal momento che Provvidenza è stata modellizzata come una traversa, ed è quindi priva di capacità d'invaso, l'acqua pompata da San Giacomo deve essere necessariamente pompata anche verso Campotosto. Creiamo quindi due centrali logiche (vedi fig.5-6): Provvidenza Pompaggio, $P_{pompaggio}$, e la centrale che rappresenta l'aggregazione delle funzioni di pompaggio di Provvidenza e San Giacomo, $SG + P_{pompaggio}$.

5.4 Prelievo dell'acquedotto del Ruzzo

L'acqua necessaria ad alimentare l'acquedotto del Ruzzo viene prelevata dalla gronda sinistra a quota 400 e, qualora ciò non sia sufficiente, viene fornita dal serbatoio di Piaganini. Per implementare questo meccanismo all'interno del nostro modello poniamo che il prelievo del Ruzzo avvenga dalla traversa di Piaganini (vedi fig. 5-6). In questo modo possiamo garantire, attraverso una serie di vincoli imposti sui rilasci del sistema (vedi paragrafo successivo), che Enel fornisca la portata necessaria a soddisfare la domanda del Ruzzo, svasando eventualmente anche dal serbatoio di Campotosto.

5.5 Modello implementato in TwoLe

Per esigenze di calcolo il software TWOLE gestisce una sola tipologia di traverse, costituita da un ingresso e da due uscite. Di conseguenza il modello rappresentato in Fig. 5-6 non può essere implementato così come è: la traversa di Provvidenza ha due ingressi, quella

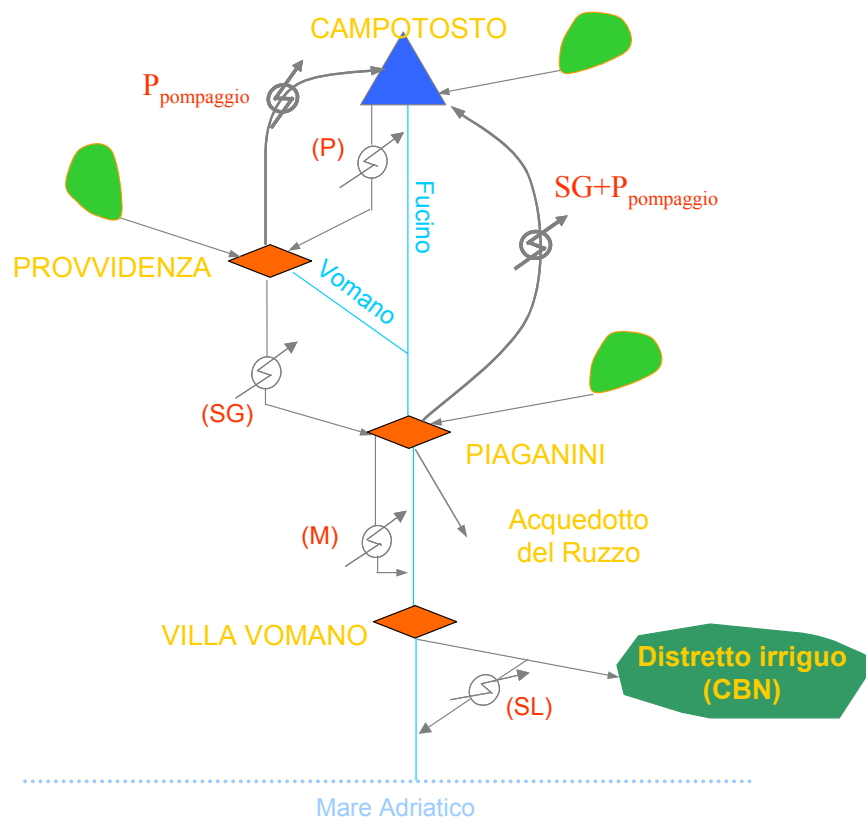


Figura 5-6: Terza semplificazione: centrali logiche di pompaggio; quarta semplificazione: prelievo del Ruzzo.

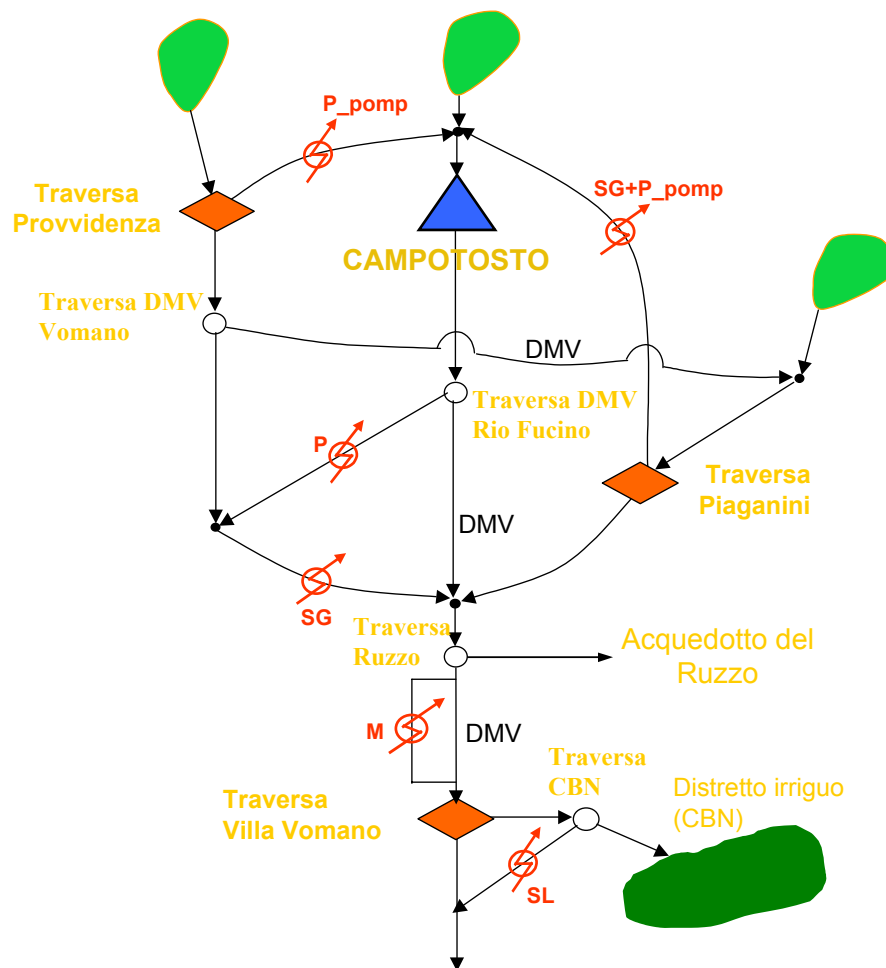


Figura 5-7: Schema del modello implementato in Trole; distinguiamo graficamente le traverse corrispondenti a serbatoi rappresentandole con rombi

di Piaganini ha quattro ingressi e tre uscite. Analizziamo allora il percorso delle portate in transito nel sistema fisico e cerchiamo di costruire una rappresentazione logica (vedi fig. 6-1) che ne fornisca una buona descrizione e sia al contempo compatibile con i vincoli imposti dal sistema informatico.

Partiamo dalle portate erogate dal serbatoio di Campotosto, una parte di esse dovrà garantire il DMV sul Rio Fucino, mentre la rimanente verrà turbinata a Provvidenza. Poniamo quindi a valle del serbatoio una traversa non regolata (*DMV Rio Fucino*) che attui questa ripartizione. Nel sistema reale la portata turbinata da Provvidenza può essere invasata nel serbatoio e successivamente pompata verso monte o turbinata. Nel nostro modello l'acqua turbinata durante il giorno da Provvidenza non può essere invasata nella rispettiva traversa: deve essere rilasciata verso valle o ripompata di notte verso Campotosto. In quest'ultimo caso però il lago di Campotosto avrebbe una componente di ingresso dipendente dalla portata rilasciata nel medesimo giorno, ma la portata rilasciata è a sua volta dipendente dagli ingressi al serbatoio: questo genererebbe una ricorsione non implementabile nel modello. Risolviamo questo problema ponendo che dalla traversa di Provvidenza sia possibile pompare verso Campotosto la sola acqua affluente dal bacino imbrifero e che l'acqua turbinata dalla centrale di Provvidenza prosegua verso valle e venga turbinata da San Giacomo. Con tale semplificazione ci poniamo in una situazione prudenziale, Enel avrà infatti la libertà di sfruttare cicli interni dell'acqua che noi non consideriamo aumentando il proprio guadagno rispetto a quanto da noi calcolato. Ricordiamo che l'obiettivo del nostro studio consiste nello studiare e possibilmente superare la conflittualità tra portatori di interesse nell'utilizzo della risorsa idrica, riteniamo quindi trascurabili le modalità di gestione della risorsa interne al singolo portatore di interesse.

Per quanto riguarda i deflussi minimi vitali sui corsi d'acqua facciamo riferimento alla legge in cui è previsto l'obbligo per il gestore idroelettrico di non intercettare la quota parte di acqua in arrivo dal bacino imbrifero che garantirebbe il DMV, non obbligandolo però a svasare acqua per garantirlo. Ciò giustifica che la portata rilasciata da Campotosto non concorra a fornire il DMV sul fiume Vomano.

Collochiamo a valle della traversa di Provvidenza una traversa non regolata (*DMV Vomano*)■

che permetta di deviare parte delle portate in arrivo per garantire il DMV sul fiume Vomano. La restante portata si ricongiunge con quella in uscita dalla centrale di Provi-
denza e viene turbinata da San Giacomo.

Analizziamo ora le portate che alimentano il serbatoio di Piaganini: il bacino imbrifero, il fiume Vomano e le portate turbate da San Giacomo. Per i motivi precedentemente esposti, non consideriamo nel nostro modello la possibilità che Enel utilizzi cicli interni di turbinamento e pompaggio. Permettiamo quindi che da Piaganini sia possibile pompare verso Campotosto le sole portate affluenti dal fiume Vomano e dal proprio bacino imbrifero. Le portate rilasciate verso valle si ricongiungono con quelle turbinante a San Giacomo e al DMV del Rio Fucino. A questo punto, coerentemente con quanto detto nel Par. 5.4, poniamo una traversa non regolata (*Ruzzo*) per sottrarre al sistema l'acqua necessaria ad alimentare l'acquedotto. A valle si colloca la centrale di Montorio e infine la traversa non regolata di *Villa Vomano*. Quest'ultima deriva la portata in concessione al CBN, successivamente ripartita da una traversa non regolata (*CBN*) fra il distretto irriguo e la centrale di Santa Lucia .

5.6 Implementazione degli interventi sul modello

Abbiamo descritto nel Cap.3 gli interventi proposti riferendoci al sistema fisico del Vomano. Vediamo di seguito come rappresentare tali interventi sulla realtà come interventi su variabili, relazioni e struttura del modello.

5.6.1 Fornitura Ruzzo e DMV a valle di Montorio

La fornitura all'acquedotto è realizzata nel modello attraverso una traversa (*Ruzzo*) che deriva la quantità d'acqua relativa all'intervento che si considera ($0.7, 1.4$ e $2.1 \text{ m}^3/\text{sec}$).

Enel è tenuta per concessione a garantire un deflusso minimo a valle della centrale di Montorio (attualmente pari a $1.35 \text{ m}^3/\text{sec}$ medi giornalieri) e per contratto con ATO a soddisfare la domanda idrica dell'acquedotto del Ruzzo (attualmente $0.7, 1.4$ e 2.1

m^3/sec come ipotesi di intervento). A differenza dei DMV sul fiume Vomano e sul rio Fucino, il gestore idroelettrico è tenuto, quando serve, anche a svasare dai propri serbatoi l'acqua necessaria. Nel nostro modello Provvidenza e Piaganini sono modellizzate come traverse perciò l'unico serbatoio da cui poter svasare è quello di Campotosto.

Abbiamo utilizzato il criterio di fornire l'acqua necessaria sfruttando prima le gronde piu' a bassa quota, dal momento che l'acqua ad alta quota ha un potenziale e quindi un valore economico maggiore, e di non considerare il contributo legato alla presenza di eventuali DMV sul rio Fucino e sul fiume Vomano a monte di Piaganini, mettendoci così in una situazione cautelativa. Cerchiamo dunque un metodo per implementare questo criterio nel modello.

In TwoLe ad ogni traversa i è associato un valore tempovariante di minima portata residua ($meff_t^i$), il cui soddisfacimento ha precedenza sulla portata deviata (vedi Cap.6). Abbiamo allora calcolato, per ogni giorno dell'anno, l'insieme di valori di $meff_t$ tali da soddisfare contemporaneamente la domanda del Ruzzo e il DMV a valle di Montorio.

Analizziamo ora il procedimento adottato; tutte le variabili a cui si farà riferimento sono portate medie giornaliere espresse in m^3/sec ; ci riferiamo al caso più generico in cui possano essere presenti anche DMV sul Rio Fucino e sul fiume Vomano.

Ci poniamo in un giorno t dell'anno e prendiamo il corrispondente valore minimo di afflussi, fra i cinque anni a disposizione, per ognuna delle tre gronde ($a_{t\min}^{400}$, $a_{t\min}^{1100}$ e $a_{t\min}^{1350}$). Chiamiamo q_t^{R+M} la somma delle portate necessarie a soddisfare la domanda del Ruzzo e a garantire il DMV a valle di Montorio il giorno. Se è soddisfatta la (5.5)

$$a_{t\min}^{400} \geq q_t^{R+M} \quad (5.5)$$

allora è sufficiente porre la condizione (5.6)

$$meff_t^{Piaganini} = \max(q_t^{R+M}, DMV_t^{vomano}) \quad (5.6)$$

In questo modo la richiesta è rispettata utilizzando solamente il contributo delle

gronde 400 e contemporaneamente impediamo al gestore idroelettrico di pompare verso monte le portate deviate per garantire il DMV sul fiume Vomano, come previsto per legge.

In caso la (5.5) non sia soddisfatta definiamo la portata aggiuntiva che sarebbe necessario avere a disposizione alla traversa Ruzzo (5.7)

$$\Delta q_t^{Piaganini} = q_t^{R+M} - a_{t\min}^{400} \quad (5.7)$$

Se è verificata la relazione (5.8)

$$a_{t\min}^{1100} \geq \Delta q_t^{Piaganini} \quad (5.8)$$

facciamo in modo che $\Delta q_t^{Piaganini}$ sia fornita dalla gronda a 1100 m. A tal fine poniamo le condizioni (5.9a e 5.9b):

$$meff_t^{Providenza} = \max(\Delta q_t^{Piaganini}, DMV_t^{vomano}) \quad (5.9a)$$

$$meff_t^{Piaganini} = \max(a_{t\min}^{400}, DMV_t^{vomano}) \quad (5.9b)$$

Se neppure gli afflussi delle gronde a 1100 sono sufficienti a garantire un opportuno prelievo (non è soddisfatta la 5.8), facciamo sì che il gestore idroelettrico rilasci la portata necessaria svasando dal serbatoio Campotosto. Definiamo questa portata come (5.10):

$$\Delta q_t^{Providenza} = q_t^{R+M} - (a_{t\min}^{400} + a_{t\min}^{1100}) \quad (5.10)$$

e poniamo le (5.11):

$$meff_t^{Campotosto} = \Delta q_t^{Provvidenza} + DMV_t^{Fucino} \quad (5.11a)$$

$$meff_t^{Provvidenza} = \max(a_{t\min}^{1100}, DMV_t^{vomano}) \quad (5.11b)$$

$$meff_t^{Piaganini} = \max(a_{t\min}^{400}, DMV_t^{vomano}) \quad (5.11c)$$

Con questo procedimento abbiamo garantito DMV a valle di Montorio e prelievo del Ruzzo in corrispondenza dei cinque anni di dati disponibili e quindi, con una buona probabilità, anche nel caso generale.

5.6.2 DMV sulle gronde

L'intervento consiste nel ridurre del 30% la portata attualmente intercettata dalle gronde a 1100 e a 400. Per implementarlo costruiremo dei modelli degli afflussi (vedi Cap.7) basandoci sulle serie storiche ridotte della stessa percentuale.

5.6.3 Incentivi a tecniche irrigue piu' efficienti

Considereremo quest'intervento all'interno della rete Bayesiana (vedi Cap.9).

5.6.4 Raddoppio del distretto irriguo

Nella realtà tale intervento consisterebbe nella predisposizione di un altro comprensorio irriguo, in sponda destra del Vomano, e nella costruzione di una centralina idroelettrica, equivalente a quella già presente in sponda sinistra. Noi lo modelleremo raddoppiando l'area e le strutture attualmente esistenti. Considereremo l'aumento di superficie servita dal CBN all'interno della rete Bayesiana (vedi Cap.9); contemporaneamente porteremo dagli attuali $4.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ a $8 \text{ m}^3/\text{sec}$ la portata massima derivabile dalla traversa di Villa Vomano e raddoppieremo la massima portata turbinabile dalla centrale di Santa Lucia. Questo approccio è giustificato dall'assenza di rilevanti differenze agronomiche fra i terreni delle due sponde del fiume Vomano.

Capitolo 6

IL MODELLO DELLE COMPONENTI DEL SISTEMA

Identificheremo in questo capitolo un modello per ogni componente che compare nello schema logico del sistema (Fig.6-1). Questo significa che per ognuna di esse dobbiamo individuare il vettore \mathbf{w} delle variabili di *ingresso* (le variabili esterne che ne influenzano il comportamento), il vettore \mathbf{y} delle variabili d'*uscita* (le variabili che vogliamo osservare) e definire la relazione che le lega. Il caso più semplice è quello in cui l'uscita \mathbf{y}_t al tempo t dipende solamente dall'ingresso \mathbf{w}_t nello stesso istante di tempo. In tal caso si dice che la *componente* è *non dinamica* e il suo modello sarà quindi definito da una relazione del tipo

$$\mathbf{y}_t = h_t(\mathbf{w}_t, \boldsymbol{\theta}_t) \quad (6.1)$$

dove $\boldsymbol{\theta}_t$ è un vettore di parametri e la relazione $h_t(\cdot)$ dipende in generale dal tempo.

Può accadere che l'uscita al tempo t non dipenda solo dal valore dell'ingresso nello stesso istante, ma anche dai valori dell'ingresso negli istanti precedenti, dipenda cioè dalla storia passata. Si dice in tal caso che la *componente* è *dinamica*. Ad esempio il livello del serbatoio di Campotosto all'istante t (uscita) non dipende dall'afflusso nella giornata odierna (ingresso), ma dall'afflusso di ieri e di tutti i giorni precedenti, sino all'infinito.

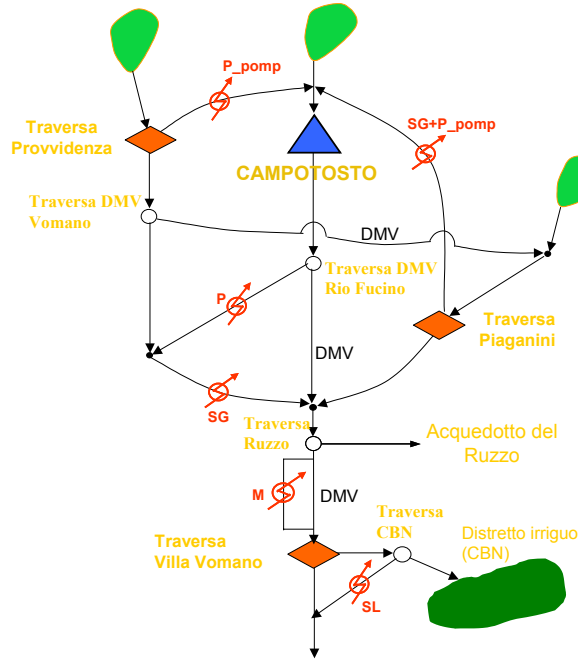


Figura 6-1: Schema del modello

Ovviamente l'afflusso di ieri influenzerà il livello attuale più di quanto lo influenzi quello dell'altro ieri, e analogamente per i giorni precedenti. Per descrivere la dinamica della componente non è di fatto necessario tener conto di tutti gli infiniti valori passati dell'ingresso, poiché questi hanno modificato la condizione della componente, cioè il suo *stato*, ed è questo che all'istante t influenza l'uscita. Tornando all'esempio del lago, il livello attuale dipende dal solo volume invasato (stato) ed è questo che viene recursivamente modificato dall'afflusso. Indichiamo con \mathbf{x}_t il vettore di tutte le variabili che è necessario conoscere all'istante t per poter calcolare non solo l'uscita all'istante t (il livello attuale nell'esempio), ma anche tutte le uscite future una volta noti gli ingressi futuri. Tale vettore è lo stato della componente. Il suo modello sarà allora composto da due parti: una, analoga alla (6.1), che lega lo stato ed (eventualmente) l'ingresso all'uscita, detta per questo *trasformazione d'uscita*, l'altra che descrive l'evoluzione temporale dello stato, dati lo stato all'istante precedente e l'ingresso, detta *funzione di transizione di stato*. Il

modello dell'unità avrà quindi la seguente forma

$$\mathbf{x}_{t+1} = f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t, \boldsymbol{\vartheta}_t) \quad (6.2a)$$

$$\mathbf{y}_t = h_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{w}_t, \boldsymbol{\vartheta}_t) \quad (6.2b)$$

dove $\boldsymbol{\vartheta}_t$ è un vettore di parametri.

6.1 Il serbatoio di Campotosto

Nei prossimi paragrafi individuiamo tutti gli elementi che ci permettono di definire il modello matematico del serbatoio di Campotosto.

6.1.1 Dinamica dell'invaso

La dinamica dell'invaso s_t del lago è descritta dall'equazione di bilancio di massa

$$s_{t+1} = s_t + a_{t+1}^{tot} - r_{t+1} - S(s_t) e_{t+1} \quad (6.3)$$

dove a_{t+1}^{tot} e r_{t+1} sono rispettivamente il volume totale affluito (*afflusso*) e il volume erogato (*rilascio*) nell'intervallo di tempo $[t, t+1)$; e_{t+1} è il volume evaporato per unità di superficie nello stesso intervallo di tempo e $S(\cdot)$ è la funzione che fornisce l'area lacuale al pelo libero in funzione dell'*invaso*. Il lago è quindi descritto da un modello dinamico, dove lo stato è l'invaso s_t .

Per definire i pedici delle variabili nelle equazioni si è adottata questa convenzione: il pedice denota l'istante di tempo in cui la corrispondente variabile assume un valore deterministico. Ad esempio, poiché lo stato di un serbatoio è univocamente definito e misurabile al tempo t , esso è denotato con s_t ; al contrario l'afflusso nell'intervallo $[t, t+1)$ non è deterministicamente noto all'istante t , poiché in quell'istante esso non si è ancora realizzato; lo sarà solo all'istante $t+1$, una volta terminato l'intervallo temporale. Pertanto l'afflusso viene denotato con il simbolo a_{t+1} , dato che all'istante t non è una variabile

deterministica, ma solo una variabile *incerta*, della quale potremmo dare solamente una descrizione di tipo *stocastico* o di tipo *set-membership*.

Per le funzioni si è invece adottata la convenzione di denotare con il pedice l'istante iniziale dell'intervallo temporale a cui fanno riferimento, anche se, all'istante iniziale, alcuni dei loro argomenti potrebbero non aver ancora un valore definito (in tal caso i pedici di questi corrisponderanno all'istante finale).

6.1.2 Ipotesi d'invaso cilindrico

Qualora il serbatoio sia cilindrico, cioè l'area S non vari con l'invaso, la (6.3) si riduce alla seguente espressione:

$$s_{t+1} = s_t + n_{t+1} - r_{t+1} \quad (6.4)$$

dove $n_{t+1} = a_{t+1} - S e_{t+1}$ è definito *afflusso netto*, cioè l'afflusso al netto dell'evaporazione. Adotteremo il termine e la simbologia dell'*afflusso* a_{t+1} sottintendendo con questo l'*afflusso netto* n_{t+1} .

La (6.4) permette una più facile implementazione in TwoLe del modello del serbatoio, cercheremo dunque di valutare se l'invaso di Campotosto possa essere considerato cilindrico.

Per verificare l'ipotesi di cilindricità ne verifichiamo una condizione necessaria e sufficiente, ovvero che sussista una relazione lineare fra quote e invasi.

Enel registra quotidianamente sulle schede di centrale il livello h_t [m.s.l.m.] e il volume V_t [$m^3 \cdot 10^3$] invasato nel serbatoio di Campotosto. La serie storica a nostra disposizione va dal 1-3-1988 al 31-12-2001. Calcoliamo dunque il coefficiente di correlazione lineare fra h_t e V_t ; otteniamo un valore pari a 0.9982 e osserviamo in Fig.(6-2) come nella fascia di regolazione, lontano dai livelli minimi e massimi, l'andamento della curva sia ben approssimato da quello della retta di regressione. Possiamo quindi ritenere valida l'ipotesi e descrivere la dinamica del serbatoio attraverso l'equazione (6.4).

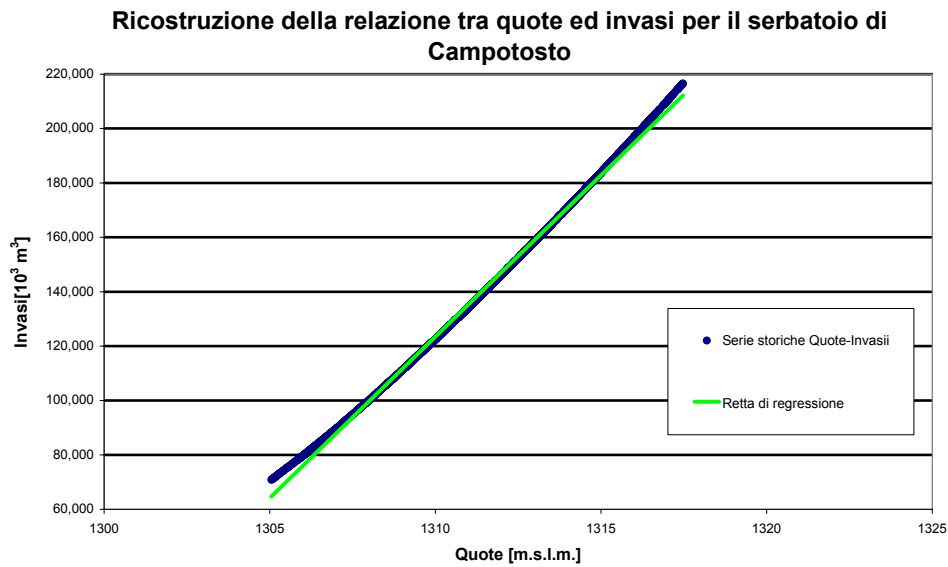


Figura 6-2:

6.1.3 Relazione quote invasi

Cerchiamo una relazione che leghi queste due variabili; sarà utile per calcolare il valore degli invasi a partire delle misure dei livelli.

Mettendo in relazioni le serie di $h_t[m.s.l.m.]$ e $V_t[m^3 \cdot 10^3]$ possiamo ricostruire la curva caratteristica del serbatoio di Campotosto, ovvero la curva che lega i livelli del serbatoio con gli invasi (vedi Fig.6-3). Facciamo una regressione quadratica e otteniamo l'equazione

$$V_t = 160.51h_t^2 + 409102.33h_t + 26059386562.62 \quad (6.5)$$

a cui è associato un coefficiente di correlazione pari a 0.999977. La (6.5) descrive correttamente la relazione che volevamo individuare.

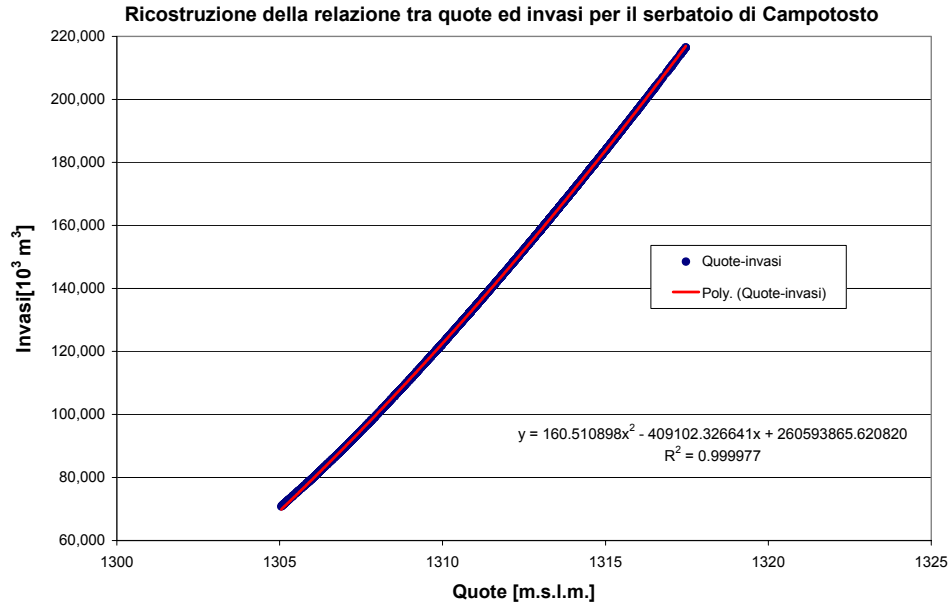


Figura 6-3: Curva quote-invasi per il serbatoio di Campotosto

6.1.4 La scala di deflusso

Per caratterizzare un lago è necessario individuare la scala di deflusso, ovvero la relazione che sussiste fra le portate rilasciate e i livelli dell'invaso. Poichè il lago di Campotosto è un serbatoio artificiale, risulta impossibile poter ricostruire una scala di deflusso in regime naturale. L'unica scala di deflusso che possiamo ricostruire è quella dello sfioratore superficiale del serbatoio, costruito negli anni 1997-1998, con la particolare forma a calice (vedi Fig.6-4).

Esso entra in funzione alla quota di massimo invaso $h_{s.l.m.}^{\max}$ (1317.5 m) e fa defluire la portata in eccesso secondo la seguente relazione:

$$Q = \mu_{stamazzo} \cdot h_0 \cdot l \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_0} \quad (6.6)$$

in cui:

$\mu_{stamazzo}$ = coefficiente di deflusso della luce a battente (per lo sfioratore a calice si



Figura 6-4: Sfiatore superficiale a calice del serbatoio di Campotosto.

assume $\mu_{stramazzo} = 0.49$);

l = larghezza dello stramazzo (in questo caso il perimetro dell'imboccatura);

h_0 = altezza del battente idraulico rispetto alla soglia dello stramazzo.

Riportiamo in Fig.6-5 l'andamento della scala di deflusso descritta dalla (6.6).

6.1.5 Il rilascio

Curve di minimo e massimo rilascio

Le curve di minimo rilascio, $N_t^{\min}(\cdot)$, e massimo rilascio, $N_t^{\max}(\cdot)$, hanno il ruolo di definire il limite superiore ed inferiore del rilascio in funzione dell'invaso del serbatoio. Esse sono definite in relazione ai vincoli idraulici, alle portate di scarichi e prese, e a imposizioni amministrative sulla gestione delle acque.

I vincoli idraulici che considereremo riguardano le opere di scarico del serbatoio, ovvero lo sfioratore superficiale e le opere di presa che consentono l'immissione dell'acqua dell'invaso direttamente nelle condotte forzate.

Per quanto riguarda le imposizioni amministrative, esistono varie tipologie di vincolo che possono limitare le reali possibilità del decisore di gestire le acque. Le principali sono le seguenti:

- **Concessione:** valore massimo di portata che può essere derivata in condotta;

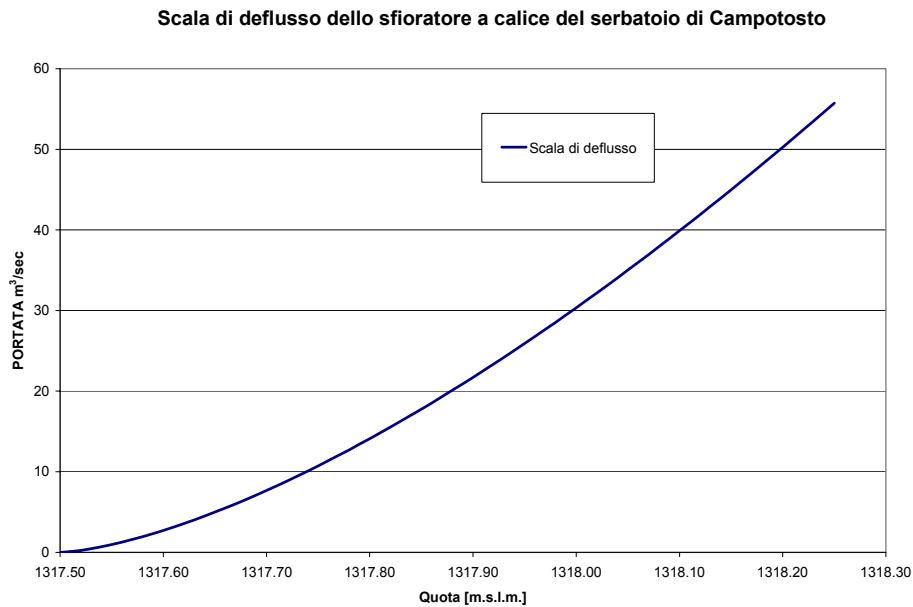


Figura 6-5: Scala di deflusso dello sfioratore a calice del serbatoio di Campotosto.

- **DMV:** valore minimo di portata che deve essere garantito a valle di un'opera di presa o di uno sbarramento, nel caso vi sia la disponibilità d'acqua;
- **Quota di minima regolazione:** quota al di sotto della quale le opere di deflusso devono restare chiuse perchè il livello del lago è troppo basso. Questo livello viene fissato al fine di limitare l'utilizzo dell'acqua quando questa scarseggia;
- **Quota di massima regolazione:** quota al di sopra della quale tutte le opere di gestione ordinaria dell'acqua devono restare aperte per garantire il massimo deflusso. Lo scopo è quello di limitare ulteriori accumuli di acqua per cautelarsi contro i rischi di crollo dello sbarramento e di esondazione delle zone più vicine alle sponde del lago.

Al momento non è imposto alcun DMV sul rilascio nel Rio Fucino.

E' invece presente un vincolo sulla massima derivazione imposto dalla capacità delle

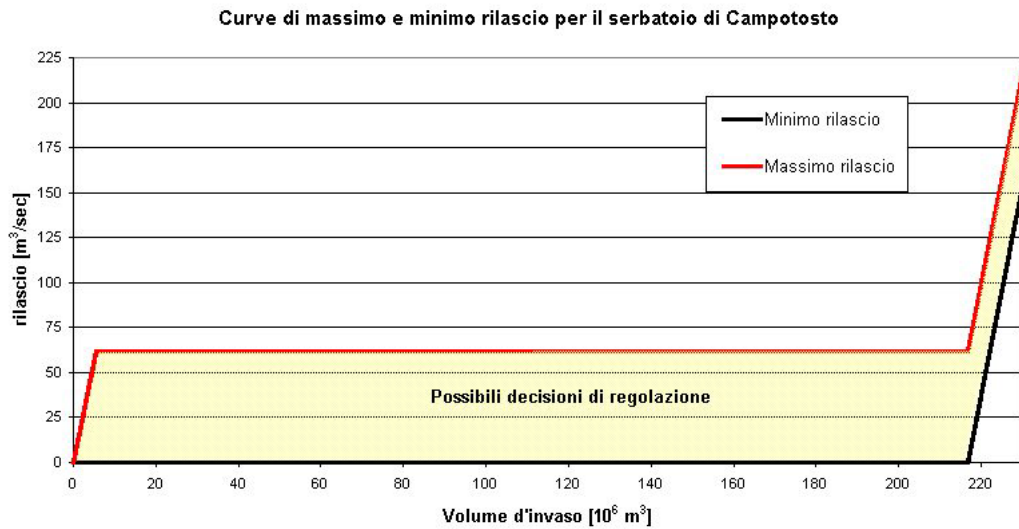


Figura 6-6: Scala di minimo e massimo rilascio per il serbatoio di Campotosto

turbine di Provvidenza, pari a $61.8 \text{ m}^3/\text{sec}$. Dal momento che non esiste pericolo di piene non sono presenti ulteriori vincoli sulla regolazione.

Le curve di minimo e massimo rilascio sono rappresentate nella Fig.6-6. La linea nera rappresenta la funzione di minimo rilascio $N_t^{\min}(\cdot)$ in un giorno t in cui $meff_t^{\text{Provvidenza}} = 0$. Qualora sia presente un valore di minimo rilascio ($meff_t^{\text{Provvidenza}} \neq 0$) la funzione $N_t^{\min}(\cdot)$ avrebbe un andamento orizzontale pari al valore $meff_t^{\text{Provvidenza}}$ fino ad intercettare la curva di massimo rilascio: da questo punto fino all'origine l'andamento di entrambe è pari a quello di massimo rilascio. Riferiamoci ora al caso rappresentato in Fig.6-6: il rilascio minimo è nullo fino a quando il serbatoio raggiunge il valore di massimo invaso (217000000 m^3). A partire da questo punto entrano in funzione gli sfioratori superficiali, e la funzione di minimo rilascio avrà un andamento lineare che approssima quello della scala di deflusso relativa allo sfioratore a calice (vedi Fig. 6-5). La linea rossa rappresenta invece l'andamento della funzione di massimo rilascio $N_t^{\max}(\cdot)$. Questo è stato ricavato ipotizzando che venga sempre turbinata tutta l'acqua disponibile. Il rilascio raggiunge la saturazione nel punto corrispondente a q_{MAX}^{Pr} (massima portata turbinabile

dall'impianto di Provvidenza, pari a $61.8 \text{ m}^3/\text{sec}$), in seguito rimane costante fino al valore di massimo invaso. Da questo punto entrerà in funzione lo sfioratore a calice e la scala di rilascio avrà un andamento parallelo a quello della scala di deflusso dello sfioratore a calice.

La decisione di rilascio

Campotosto è un serbatoio regolato, quindi il rilascio r_{t+1} nell'intervallo di tempo $[t, t+1)$ dipende dalla decisione di erogazione u_t . Non sempre però il rilascio può essere uguale alla decisione, esso dipende anche dall'andamento temporale dell'afflusso nel corso della giornata. Deve, infatti, essere fisicamente realizzabile, cioè deve essere compreso tra il *minimo* (v_t) e il *massimo* (V_t) *volume* erogabile nel corso della giornata.

Date le scale di massimo $N_t^{\max}(\cdot)$ e minimo rilascio $N_t^{\min}(\cdot)$, il massimo e il minimo volume erogabile nell'intervallo $[t, t+1)$ in corrispondenza di una coppia (s_t, a_{t+1}) possono essere stimati solo se è nota la traiettoria della portata d'afflusso $q_{[t,t+1)}^a(\cdot)$ in ogni istante ξ di tale intervallo. Purtroppo non disponiamo di tale informazione, ma conosciamo solo il volume a_{t+1} complessivamente affluito nell'intervallo. Per poter dunque stimare il massimo e il minimo volume erogabile dobbiamo necessariamente ipotizzare la traiettoria dell'afflusso nel corso della giornata. L'ipotesi più semplice è di assumere che esso sia costante, da cui consegue che

$$q_{[t,t+1)}^a(\xi) = \frac{a_{t+1}}{\Delta} \quad \forall \xi \in [t, t+1) \quad (6.7)$$

essendo Δ la durata della giornata (86 400 sec). Data la (6.7) possiamo calcolare il minimo volume erogabile v_t nell'intervallo $[t, t+1)$ in funzione dell'invaso iniziale s_t e del volume di afflusso a_{t+1} . Per questo dobbiamo calcolare innanzitutto la traiettoria $s_{[t,t+1)}(\cdot)$ seguita dall'invaso nel corso della giornata, quando l'erogazione avvenga con la scala $N_t^{\min}(\cdot)$. Ciò si ottiene integrando l'equazione differenziale che esprime il bilancio di massa del lago

$$\frac{ds}{d\xi} = \frac{a_{t+1}}{\Delta} - N_t^{\min}(s) \quad (6.8)$$

sull'intervallo $[t, t + 1)$, con condizione iniziale s_t . Ottenuta la traiettoria dell'invaso, il volume v_t è dato dal seguente integrale

$$v_t(s_t, a_{t+1}) = \int_t^{t+1} N_t^{\min}(s_{[t, t+1)}(\xi) d\xi \quad (6.9)$$

Si osservi che la funzione $v_t(s, a)$ risulta essere tempo variante e periodica, poiché tale è la scala $N_t^{\min}(s)$.

Il massimo volume erogabile V_t si ottiene con un calcolo analogo, in cui $N_t^{\max}(\cdot)$ sostituisce $N_t^{\min}(\cdot)$ nelle (6.8) e (6.9).

Note le funzioni $v_t(\cdot)$ e $V_t(\cdot)$ possiamo esprimere il rilascio in funzione della decisione di erogazione u_t assunta al tempo t , dell'invaso s_t all'inizio della giornata e del volume di afflusso a_{t+1}

$$r_{t+1} = \begin{cases} v_t(s_t, a_{t+1}) & \text{se } u_t < v_t(s_t, a_{t+1}) \\ V_t(s_t, a_{t+1}) & \text{se } u_t > V_t(s_t, a_{t+1}) \\ u_t & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (6.10)$$

Nel formulare la funzione $R_t(\cdot)$, detta *funzione di rilascio*, abbiamo supposto che il regolatore manovri le paratoie in modo tale che il valore di r_{t+1} sia uguale a u_t , quando quest'ultimo è realizzabile, e che sia il più possibile prossimo ad esso quando non è realizzabile (tale comportamento è noto in letteratura come *comportamento normale*). Non considereremo altre ipotesi di comportamento.

Possiamo utilizzare $R_t(\cdot)$ per riscrivere la (6.4) mettendo in evidenza la dipendenza del rilascio dagli afflussi e dal controllo

$$s_{t+1} = s_t + a_{t+1} - R_t(u_t, s_t, a_{t+1}) \quad (6.11)$$

Quindi in forma implicita la funzione dinamica degli invasi del serbatoio può essere scritta come:

$$s_{t+1} = f_t(s_t, a_{t+1}, u_t) \quad (6.12)$$

Limite superiore alla decisione di rilascio

Compito della gestione è stabilire ogni mattina il volume u_t che si desidera erogare dal lago nelle successive 24 ore. Sarà la politica, una volta determinata, a suggerire ogni giorno al regolatore i “migliori” valori da considerare, ma per progettartela occorre specificare l’insieme $U_t(s_t)$ dei valori tra cui si può scegliere. Questo insieme sarà certamente caratterizzato da un estremo inferiore pari a zero. L’estremo superiore potrebbe invece essere tranquillamente posto all’infinito, perché, anche se la decisione fosse così elevata da essere fisicamente irrealizzabile, la (6.10) produrrebbe comunque un rilascio fisicamente realizzabile. Tuttavia, così facendo, nella soluzione del problema di controllo ottimo ci troveremmo a dover valutare e comparare in ogni istante infinite possibilità (anche nel caso la decisione fosse, come sarà, *discretizzata*). Pertanto è necessario che $U_t(s_t)$ sia superiormente limitato. La scelta di tale limite potrebbe essere il massimo volume $V_t(s_t, a_{t+1})$ erogabile il giorno t , se non fosse che esso è una variabile stocastica a causa dell’incertezza dell’afflusso. Tuttavia la pratica risolubilità del problema di controllo ottimo ci imporrà di assumere che la distribuzione di probabilità di a_{t+1} sia limitata, che esista cioè un massimo afflusso \bar{a}_{t+1} oltre il quale la densità di probabilità è identicamente nulla. Quale estremo superiore di $U_t(s_t)$ possiamo allora assumere $V_t(s_t, \bar{a}_{t+1})$, cioè il massimo volume che potrebbe essere erogato il giorno t se si realizzasse il massimo afflusso \bar{a}_{t+1} , stante l’invaso s_t del lago. Poiché non esistono motivi per escludere decisioni tra questi due estremi, si può concludere che

$$U_t(s_t) = \{u_t : 0 \leq u_t \leq V_t(s_t, \bar{a}_{t+1})\} \quad (6.13)$$

Le quattro equazioni (6.5), (6.10), (6.11), e (6.13) forniscono una descrizione completa del serbatoio e costituiscono pertanto il modello che cercavamo.

6.2 Le traverse

Le traverse sono dei manufatti idraulici che consentono di suddividere una portata affluente in due portate uscenti: la *portata derivata* e la *portata residua*.

Una traversa *controllata* è dotata di organi mobili (paratoie) la cui regolazione permetterà di modificare ad ogni passo temporale il valore della portata derivata. In ogni caso il canale derivatore è dotato di uno sfioratore che limita ad un valore q_{\max} la massima portata transitabile rendendo quindi impossibile il verificarsi di fenomeni di esondazione.

Si assume che l'invaso che si forma a monte di una traversa abbia un volume trascurabile rispetto ai volumi transitanti nel passo temporale; in altre parole si suppone che la costante di tempo della traversa sia molto inferiore al passo temporale adottato per descrivere il sistema (vedi Par.5.2). Se così non fosse, infatti, la traversa dovrebbe essere descritta tramite un serbatoio, poiché tale sarebbe a tutti gli effetti. Ritenendo dunque valida questa ipotesi, una traversa controllata è descritta dalla seguente relazione:

$$q_{t+1}^d = \min [u_t^d, q_{t+1}^a, q_{\max}] \quad (6.14a)$$

$$q_{t+1}^r = q_{t+1}^a - q_{t+1}^d \quad (6.14b)$$

dove, in relazione all'intervallo di tempo $[t, t+1)$, q_{t+1}^a è il volume affluente, q_{t+1}^d il volume effettivamente derivato, q_{t+1}^r il volume che prosegue nel fiume, o nel canale, a valle della traversa e u_t^d il volume che si desidera derivare.

Analogamente una traversa non controllata è descritta dalla seguente relazione:

$$q_{t+1}^d = \min [q_{t+1}^a, q_{\max}] \quad (6.15a)$$

$$q_{t+1}^r = q_{t+1}^a - q_{t+1}^d \quad (6.15b)$$

Ogni traversa del nostro sistema sarà descritta anche da un valore minimo di portata

residua ($meff_t$). In tal caso s'impone che non venga deviata acqua sino a che il volume che defluisce a valle sia maggiore del valore $meff_t$. Le (6.14a) e (6.15a) vanno allora sostituite rispettivamente con le seguenti:

$$q_{t+1}^d = \min [u_t^d, (q_{t+1}^a - meff_t)^+, q_{\max}] \quad (6.16)$$

$$q_{t+1}^d = \min [(q_{t+1}^a - meff_t)^+, q_{\max}] \quad (6.17)$$

dove l'operatore $(\cdot)^+$ restituisce l'argomento quando questo è positivo, il valore zero in caso contrario.

Analizziamo le variabili relative alle traverse presenti nello schema logico del sistema (vedi fig.6-7), utilizzeremo degli apici per distinguere le variabili $(q_{\max}^i, q^{di}, q^{ai}, q^{ri}, u_t^{di}, meff_t^i)$ relative ad ogni traversa $i, i = 1...7$.

6.2.1 Provvidenza (1) e Piaganini (2)

Si è scelto di esprimere il controllo u_t^1 della traversa di Provvidenza nella direzione delle portate pompate verso Campotosto q_{t+1}^{d1} . Questa scelta è stata dettata da un'esigenza dipendente dalla stocasticità dell'afflusso, infatti in questo modo se gli afflussi a_{t+1}^{Pr} fossero particolarmente elevati la portata residua q_{t+1}^{r1} potrà in ogni caso procedere verso valle attraverso il by-pass dell'impianto di San Giacomo.

Se invece la variabile di controllo fosse posta sulla portata da turbinare a San Giacomo, potrebbe accadere che gli afflussi siano così elevati che la portata residua superi la capacità di pompaggio q_{\max}^1 della centrale di Provvidenza: in questo caso la portata in eccedenza non potrebbe essere by-passata dagli impianti di pompaggio (non è possibile definire un by-pass su quest'ultimi).

Anche a Piaganini, per motivi analoghi, si è espresso il controllo u_t^2 nella direzione delle portate pompate verso monte. Le due traverse sono descritte dall'equazione (6.16).

Abbiamo posto q_{\max}^1 e q_{\max}^2 pari alla massima capacità delle rispettive centrali di

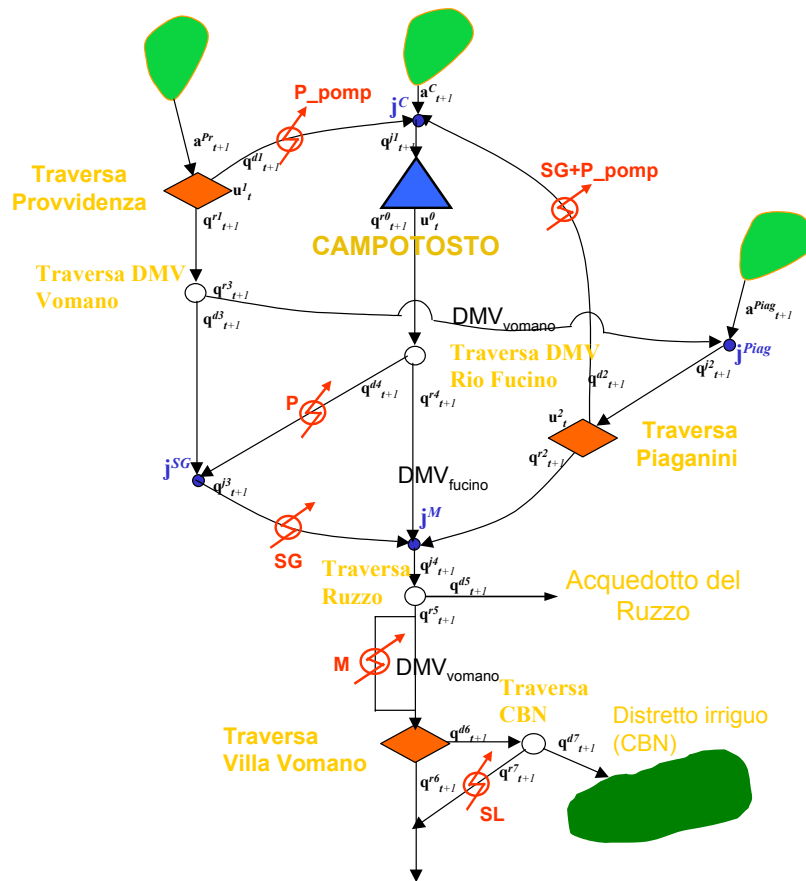


Figura 6-7: Componenti e variabili del modello

pompaggio: $11 \text{ m}^3/\text{sec}$ per Provvidenza e $4 \text{ m}^3/\text{sec}$ per la centrale logica di S.Giacomo aggregata con Provvidenza.

6.2.2 DMV Vomano (3) e DMV Rio Fucino (4)

Sono due traverse non controllate descritte quindi dall'equazione (6.17). La portata q_{t+1}^{d3} derivata da DMV Vomano è indirizzata verso la centrale di San Giacomo, mentre la portata residua q_{t+1}^{r3} alimenta il fiume Vomano. DMV Rio Fucino deriva una portata q_{t+1}^{d4} verso la centrale di Provvidenza e rilascia q_{t+1}^{r4} sul Rio Fucino.

Per le due traverse sono state poste le portate massime derivabili, q_{\max}^3 e q_{\max}^4 , pari al valore delle portate massime turbinabili dalle rispettive centrali di valle: $85 \text{ m}^3/\text{sec}$ per San Giacomo e $61.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ per Provvidenza.

6.2.3 Ruzzo (5)

E' una traversa non controllata la cui portata derivata, q_{t+1}^{d5} è sottratta al sistema e rappresenta il prelievo dell'acquedotto del Ruzzo. q_{\max}^5 è posto pari alla domanda dell'acquedotto (0.7, 1.4 e 2.1 in base all'intervento considerato). Il *mef* è invece posto uguale a zero, infatti ad ogni istante temporale t è garantito (vedi Par.5.6.1) che giunga in ingresso una portata tale da soddisfare la seguente condizione:

$$q_{t+1}^{a5} \geq q_{\max}^5 + DMV^{Montorio} \quad (6.18)$$

Per la (6.15a) e la (6.18), sarà comunque garantito un rilascio a valle di Montorio non inferiore al valore imposto per concessione.

6.2.4 Villa Vomano (6)

La traversa di Villa Vomano costituisce l'elemento di connessione tra il macro-sistema Enel e il macro-utente irriguo, rappresentato dal Consorzio di Bonifica Nord. Essa ha una portata massima derivabile q_{\max}^6 pari al valore della concessione idrica del CBN,

($4.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ attuale e $8 \text{ m}^3/\text{sec}$ in caso di allargamento). E' una traversa non regolata e senza *meff*, viene quindi descritta dall'equazione (6.15a).

6.2.5 CBN (7)

Il consorzio regola questa traversa decidendo ogni giorno t la quantità d'acqua da deviare verso il distretto irriguo (q_{t+1}^{d7}) in funzione dell'esigenza delle colture; la portata residua (q_{t+1}^{r7}) viene turbinata dalla centrale di Santa Lucia. L'obiettivo primario del consorzio è quello di soddisfare le esigenze degli agricoltori e di conseguenza sono destinate a Santa Lucia le sole portate in eccesso rispetto alla domanda irrigua. Non esistendo quindi una situazione di utilizzo conflittuale della risorsa idrica all'interno del consorzio (vedi Cap. 1) non abbiamo ritenuto necessario associare una variabile di controllo alla traversa; ciò avrebbe inutilmente aumentato i tempi di calcolo. Abbiamo modellizzato la traversa CBN come se fosse non regolata, ponendo però un valore tempovariante di $q_{t\max}^7$ pari alla domanda idrica del distretto, ovvero alla minima fra le portate che rendono nulla, o, nel caso ciò non sia possibile, che minimizzano la funzione di costo (6.19) definita nel Cap.4.

$$g_t(r_t) = \sum_{i \in \text{colture}} \left[(W_t^i - q_t^i)^+ \right] \quad (6.19)$$

La traversa è descritta dalle seguenti equazioni:

$$q_{t+1}^{d7} = \min [q_{t+1}^{a7}, q_{t\max}^7] \quad (6.20a)$$

$$q_{t+1}^{r7} = q_{t+1}^{a7} - q_{t+1}^{d7} \quad (6.20b)$$

6.3 Le centrali

Le centrali sono elementi del sistema cui, per ogni istante temporale t , viene associato un costo in funzione della portata transitante, dei parametri intrinseci alla centrale e

del prezzo di vendita dell'energia prodotta. Il costo sarà negativo, e rappresenterà un guadagno, per le centrali di turbinamento, sarà invece positivo per quelle di pompaggio. Il modello di una centrale di turbinamento prevede la possibilità di by-passare parzialmente o totalmente la portata in ingresso q_t per poter simulare i casi in cui sia necessario garantire un DMV sul tratto di fiume a cui essa sottrae acqua, sia la possibilità di far fluire la portata in eccesso rispetto alla massima turbinabile q_{\max} . Talvolta, soprattutto per le centrali di pompaggio, può essere definito anche un valore minimo di portata q_{\min} sotto il quale non risulta possibile attivare l'impianto. La portata turbinata (o pompata) q_t^e viene quindi definita dalla seguente equazione:

$$q_t^e = \begin{cases} 0 & \text{se } q_t < DMV \vee q_t < q_{\min} \\ q_t - DMV & \text{se } DMV < q_t < q_{\max} \\ q_{\max} & \text{se } \text{altrimenti} \end{cases} \quad (6.21)$$

Questa portata produce giornalmente una quantità E_t di energia, espressa in kWh , così definita:

$$E_t = \eta \cdot g \cdot \gamma \cdot q_t^e \cdot H \cdot \Delta t \quad (6.22)$$

g = accelerazione di gravità, pari a 9.81 m/sec^2 ;

γ = densità media dell'acqua, pari a 1000 Kg/m^3 ;

η = rendimento della turbina (o della pompa);

q_t^e = portata turbinata m^3/sec

$H = (H_m - H_v) = \text{salto motore } m$ (sarà $H(s_t)$ se il salto dipende dall'invaso del serbatoio);

Δt = passo temporale s adottato per descrivere il sistema.

In base al sistema di tariffazione utilizzato la (6.23) associa, come spiegato nel Par. 4.3.2, un costo, in € (se la tariffazione è in €/MWh), all'energia prodotta E_t .

$$R_t(E_t) \quad (6.23)$$

Nei seguenti paragrafi descriviamo le centrali del sistema ed individuiamo i parametri necessari per definirne il modello.

6.3.1 Provvidenza

L'impianto di Provvidenza è alimentato da una galleria forzata lunga 1100 m di diametro 4.5 m, che parte dal serbatoio di Campotosto e termina in un pozzo piezometrico di 8 m di diametro, cui segue la condotta scavata in un pozzo verticale, rivestita in lamiera. La sala macchine si trova a 30 metri sotto la quota di invaso massimo del serbatoio di Provvidenza (1030 *m.s.l.m.*).

La portata massima turbinabile q_{MAX}^{Pr} è di $61.8 \text{ m}^3/\text{sec}$, mentre il salto medio di cui dispone è di 255 m. Per salto medio si intende la differenza di quota tra i livelli medi dei serbatoi posti a monte e a valle della centrale, così come sono stati raffigurati in Fig.6-8. Questo è definito come un salto motore fisso, al quale va aggiunta anche una parte variabile, funzione del livello del serbatoio di Campotosto. Questo salto variabile non può essere trascurato visto che il livello di massimo invaso può raggiungere quota 1317.5 *m.s.l.m.*, ben 12 metri sopra il livello medio del serbatoio.

Nella centrale di Provvidenza sono installati due gruppi, ognuno dei quali è composto da una turbina Francis con alternatore-motore e una pompa a due stadi della potenza di 51800 *kW* ciascuno, e due trasformatori 15/230 *kV*. La producibilità media annua della centrale è di 75.8 milioni di *kWh*.

Le pompe, che all'epoca della costruzione erano le più grandi esistenti, possono sollevare fino a $16 \text{ m}^3/\text{sec}$ per un dislivello di più di 260 m.

E' recente l'installazione di una terza unità ad asse verticale da 52200 *kW*, equipaggiata con turbina-pompa reversibile di progettazione americana, la prima in Europa di tale potenza. La portata massima sollevabile da quest'impianto è di $12.5 \text{ m}^3/\text{sec}$. Enel dichiara di utilizzare la funzione di pompaggio per turni di una durata media di 8 ore.

La galleria di scarico è lunga 673 m, ha un diametro di 4.5 m e sbocca nel serbatoio

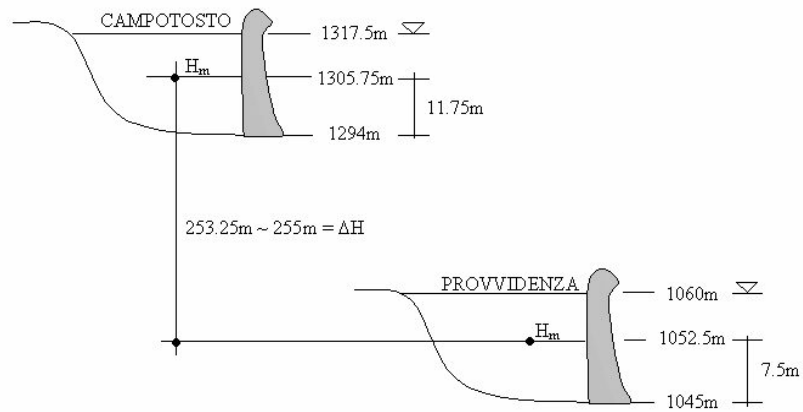


Figura 6-8: Salto motore medio della centrale di Provvidenza.

Tabella 6.1: Parametri del modello della centrale di Provvidenza produzione

Salto medio	255	m
Portata massima turbinabile	61.8	m^3/sec
Rendimento medio	0.8274	

di Provvidenza. Questa galleria funziona tanto per lo scarico delle turbine quanto per l'alimentazione delle pompe.

Riportiamo i dati che abbiamo utilizzato per implementare il modello della centrale di produzione (Tab. 6.1) e pompaggio (Tab. 6.2).

Nella Tab.6.2 facciamo riferimento ad una portata media giornaliera sollevabile. Essa viene calcolata distribuendo la massima portata ($48 m^3/sec$) sollevata nei turni di pompaggio (8 ore) sulle 24 ore della giornata. Sottraiamo alla portata così ottenuta, pari a $15 m^3/sec$, la portata media giornaliera relativa all'impianto aggregato di San Giacomo e Provvidenza, ovvero $4 m^3/sec$. Otteniamo quindi il valore medio giornaliero di $11 m^3/sec$.

Tabella 6.2: Parametri del modello della centrale di Provvidenza pompaggio

Salto medio	255	m
Portata media giornaliera sollevabile	11	m^3/sec
Rendimento medio	1.3276	

I rendimenti riportati nelle due tabelle sono rendimenti medi, ricavati da una regressione lineare fra i dati medi mensili di portate turbinate (e pompate) e di energia prodotta (e utilizzata per il pompaggio).

6.3.2 San Giacomo

L'impianto di S.Giacomo è collegato al serbatoio di Provvidenza tramite una galleria lunga 14.3 km e del diametro di 3.5 m. Questa galleria raccoglie lungo il suo percorso anche le acque degli affluenti di destra del Vomano e dei principali corsi che scorrono lungo le pendici del Gran Sasso trasportate dal canale di gronda posto a quota 1100 m.s.l.m.

La condotta forzata della centrale, del diametro di 2.5 m, è posta in un pozzo verticale scavato in roccia per un'altezza di 658 metri. La centrale è sotterranea, accessibile tramite una galleria lunga 1800 m. Il salto medio è di 655 m (vedi Fig.6-9). Come si nota nella figura gli estremi considerati per calcolare il salto medio non sono le quote corrispondenti agli invasi medi dei serbatoi posti a monte e a valle della centrale. Come quota inferiore è stata presa quella corrispondente al livello massimo di Piaganini. Questo perché l'acqua turbinata dalla centrale viene scaricata da una galleria a pelo libero e perciò le turbine dell'impianto di S. Giacomo non sono in grado di lavorare in aspirazione, sfruttando anche l'acqua presente a quota inferiore rispetto a quella della girante della turbina. Nella sua configurazione originaria l'impianto possedeva tre gruppi turbina/alternatore da 73600 *kW* ciascuno, equipaggiati con due turbine Pelton, con una portata massima turbinabile di 37.5 m^3/sec : in questo modo la centrale rappresentava una sorta di collo di bottiglia per il resto del sistema idrico.

Per ottenere una più razionale utilizzazione dei deflussi e sfruttare l'intera portata potenziale dell'asta idroelettrica, sono stati recentemente realizzati dei lavori di ampliamento. I lavori hanno riguardato il rinnovamento di due dei gruppi esistenti, l'installazione di una nuova turbina Pelton/alternatore da 282 *MW* e di una nuova turbina-pompa reversibile da 56 *MW*. La portata massima utilizzabile in generazione dai nuovi

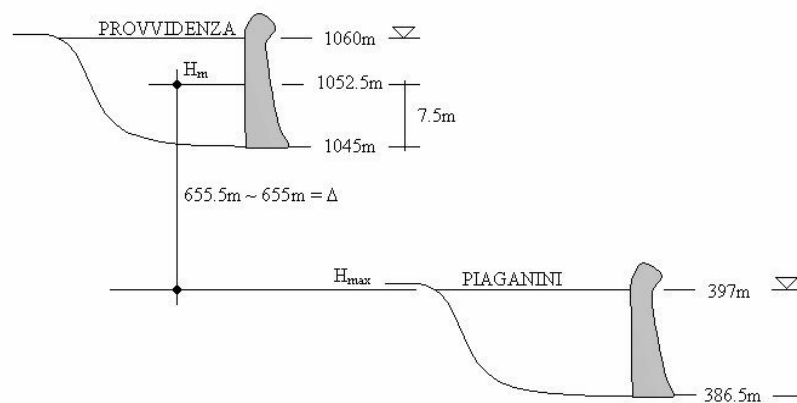


Figura 6-9: Salto motore medio della centrale di S.Giacomo.

Tabella 6.3: Dati caratteristici della nuova turbina Pelton installata a San Giacomo

	Massimo	Medio	Minimo
Salto motore $[m]$	636.22	627.81	613.36
Portata turbinabile $[m^3/sec]$	50.344	50	49.43
Potenza $[MW]$	282.47	277	267

gruppi è di $60 m^3/sec$, di cui $50 m^3/sec$ relativi alla sola turbina Pelton (i dati caratteristici della turbina sono riportati in Tab.6.3).

Con l'entrata in servizio del nuovo macchinario è stato disattivato uno dei tre gruppi esistenti, che rimane a disposizione come gruppo di riserva in caso di indisponibilità degli altri due. In questo modo la portata massima turbinabile dall'impianto raggiunge in totale $85 m^3/sec$.

Il gruppo reversibile, con funzionamento in pompaggio, consente inoltre di sollevare dal serbatoio di Piaganini a quello di Provvidenza una portata massima di $8 m^3/sec$, con una potenza assorbita di circa $61 MW$.

Le acque scaricate in centrale dalla turbina Pelton vengono restituite da una galleria a pelo libero, lunga 1850 m circa, nel bacino di Paganini.

A servizio della turbina-pompa reversibile è stata realizzata una galleria in pressione di scarico ed aspirazione, a sezione circolare con diametro di 2.6 m e lunghezza di 2750

Tabella 6.4: Parametri del modello della centrale di San Giacomo produzione

Salto medio	655	m
Portata massima turbinabile	85	m^3/sec
Rendimento	0.7917	

Tabella 6.5: Parametri del modello della centrale di San Giacomo e Provvidenza pompaggio

Salto medio	910	m
Portata media giornaliera sollevabile	4	m^3/sec
Rendimento	1.2578	

m circa. Essa termina in una nuova opera di presa e restituzione ubicata all'estremità di valle del serbatoio di Piaganini, poco a monte della diga e in prossimità dell'opera di presa dell'impianto di Montorio.

Riportiamo i parametri del modello della centrale di produzione (Tab. 6.4).e della centrale di pompaggio aggregata di San Giacomo e Provvidenza (Tab.6.5).

Il salto medio è la somma dei salti medi delle due centrali. Il rendimento è calcolato come media, pesata rispetto ai salti, dei rendimenti in pompaggio di San Giacomo e Provvidenza. Infine la portata media sollevabile è calcolata distribuendo la portata massima ($8 m^3/sec$) che la sola centrale di San Giacomo può sollevare nei turni di pompaggio, della durata di 12 ore, sull'arco dell'intera giornata.

6.3.3 Montorio

Questo impianto utilizza il dislivello disponibile fra il serbatoio di Piaganini e la località Val Vomano, poco a monte di Villa Vomano. Dall'opera di presa posta sulla destra del serbatoio ha inizio la galleria forzata lunga 13.85 Km con diametro di 4.4 m, che raccoglie lungo il suo percorso le acque delle gronde a quota 400 m.s.l.m. La gronda sinistra attraversa la vallata con un sifone in lamiera del diametro di 1.75 m e nella sua parte più bassa è disposta la centralina di Piaganini (non considerata nello studio) della potenza di 1400 KW la quale utilizza le acque che, secondo le attuali prescrizioni

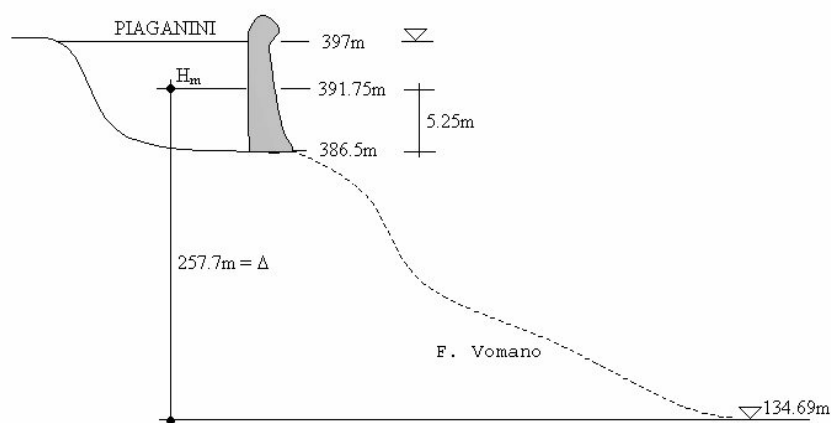


Figura 6-10: Salto motore medio della centrale di Montorio

legislative, devono essere lasciate scorrere nel fiume per garantire un deflusso minimo vitale lungo l'abitato di Montorio.

La portata massima turbinabile a Montorio q_{MAX}^M è di $54 \text{ m}^3/\text{sec}$, il salto medio è di 257.7 m e la producibilità è di 253.43 milioni di KWh . Il valore del salto motore si riferisce alla differenza di quota tra quella che corrisponde all'invaso medio di Piaganini e la quota del punto in cui la galleria di scarico della centrale confluisce nel fiume Vomano (vedi Fig.6-10).

La centrale è in caverna ed è costituita da sala macchine, sala trasformatori e sala quadro dislocati in locali distinti e collegati tra loro tramite gallerie.

Il macchinario installato è costituito da tre gruppi con turbine Francis ad asse verticale, della potenza di 38500 KW ciascuno e da due gruppi ausiliari, con turbine Pelton della potenza di 2710 KW ciascuno.

Anche i tre trasformatori, la cui potenza elettrica è di 46000 KVA ciascuno, sono installati in caverna e sono collegati alla stazione elettrica a 220 KV mediante cavi che corrono lungo le pareti di un pozzo verticale alto 242 metri. Questi cavi rappresentavano all'epoca, per il notevole dislivello fra le estremità, un'installazione unica al mondo.

Le acque turbinate dalla centrale di Montorio vengono rilasciate nel Vomano attra-

Tabella 6.6: Parametri del modello della centrale di Montorio

Salto medio	257.7	m
Portata massima turbinabile	54	m^3/sec
Rendimento	0.8274	

Tabella 6.7: Parametri del modello della centrale di S.Lucia.

Salto medio	81.9	m
Portata massima turbinabile	4.1	m^3/sec
Rendimento	0.9	

verso un canale di scarico lungo 5220 m di cui 4964 posti in galleria.

Riportiamo in Tab.6.6.i parametri del modello della centrale.

6.3.4 Santa Lucia

Questa centrale, collocata a valle della traversa di Villa Vomano, è di proprietà del CBN e viene utilizzata per turbinare le portate in eccesso rispetto alla domanda del distretto irriguo

Non abbiamo a disposizione una documentazione tecnica relativa alla centrale di Santa Lucia, il CBN ci ha fornito solo i dati strettamente necessari a definirne il modello. Li riportiamo in Tab.6.7:

6.4 Le confluenze

Una confluenza è un punto in cui n diverse portate q_t^i in ingresso vengono raggruppate in un'unica portata in uscita q_t^j .

La trasformazione in uscita, che rappresenta l'equazione del modello della confluenza, non è altro che l'equazione di conservazione della massa:

$$q_{t+1}^j = \sum_i q_{t+1}^i \quad (6.24)$$

Le confluenze hanno una funzione logica, e non corrispondono ad elementi realmente

Tabella 6.8: Variabili di ingresso e di uscita delle confluenze.

Nome Confluenza	Portate in ingresso	Portata in uscita
Campotosto (1)	$a_{t+1}^{Camp}, q_{t+1}^{d1}, q_{t+1}^{d2}$	q_{t+1}^{j1}
Piaganini (2)	$a_{t+1}^{Piag}, q_{t+1}^{r3}$	q_{t+1}^{j2}
S.Giacomo (3)	$q_{t+1}^{d3}, q_{t+1}^{d4}$	q_{t+1}^{j3}
Montorio (4)	$q_{t+1}^{j3}, q_{t+1}^{r2}, q_{t+1}^{r4}$	q_{t+1}^{j4}

presenti nel sistema fisico; si rendono necessarie dal momento che i modelli implementati in TwoLe prevedono un unico termine d'ingresso. Nel modello del sistema sono presenti 4 confluenze (vedi Fig.6-7); denoteremo con un apice la portata q_{t+1}^{ji} uscente dalla i-ma traversa.

1. confluenza di Campotosto (1): riceve in ingresso gli afflussi complessivi a Campotosto (a_{t+1}^{Camp}) e le portate pompate da Provvidenza e San Giacomo (q_{t+1}^{d1} e q_{t+1}^{d2}). L'uscita (q_{t+1}^{j1}) costituisce l'ingresso per il serbatoio di Campotosto.
2. confluenza di Piaganini (2): raccoglie gli afflussi a Piaganini (a_{t+1}^{Piag}) e la portata residua della traversa DMV Vomano (q_{t+1}^{r3}). L'uscita (q_{t+1}^{j2}) costituisce l'ingresso per la traversa Piaganini.
3. confluenza di S. Giacomo (3): riceve la portata turbinata da Provvidenza (q_{t+1}^{d4}), e la portata in arrivo dalla traversa DMV Vomano (q_{t+1}^{d3}). L'uscita (q_{t+1}^{j3}) costituisce un termine d'ingresso per la confluenza Montorio
4. confluenza di Montorio (4): riceve in ingresso la portata uscente dalla confluenza S.Giacomo (q_{t+1}^{j3}), la portata derivata dalla traversa Piaganini (q_{t+1}^{r2}) e la portata residua della traversa DMV Rio Fucino (q_{t+1}^{r4}). L'uscita (q_{t+1}^{j4}) costituisce l'ingresso per la traversa Ruzzo.

6.5 I canali

Definiamo canale ogni alveo naturale o artificiale dedicato al passaggio dei flussi idrici.

La trasformazione in uscita del modello generico del canale esprime l'equazione di conservazione della massa:

$$q_t^o = \alpha q_{t-\tau}^i - q_t^l \quad (6.25)$$

in cui q_t^o è la portata che defluisce alla sezione del canale all'istante t , q_t^i è la portata in ingresso, q_t^l sono gli eventuali afflussi laterali al canale, α è un fattore che rappresenta le perdite lungo il canale e τ è il tempo di ritardo del canale.

Nell'ipotesi in cui le perdite e gli apporti laterali siano trascurabili, la (6.25) diviene

$$q_t^o = q_{t-\tau}^i \quad (6.26)$$

Si noti che questa relazione afferma che il tronco fluviale è un sistema dinamico, il cui stato è dato da $q_{t-1}^a, q_{t-2}^a, \dots, q_{t-\tau}^a$, cioè da tutti i volumi che sono entrati nell'asta prima dell'istante t e non sono ancora usciti. L'uscita q_t^o è uguale alla componente ($q_{t-\tau}^i$) più antica dello stato.

Tuttavia, se il tempo di propagazione τ è sensibilmente inferiore all'ampiezza Δt dell'intervallo di tempo con cui descriviamo il sistema, la (6.26) può essere approssimata dalla seguente relazione:

$$q_t^o = q_t^i \quad (6.27)$$

che descrive il tronco fluviale come un sistema non dinamico.

Noi tratteremo come se fossero canali tutti gli archi che rappresentano legami tra le componenti del modello. Le lunghezze di questi elementi sono tali da rendere i tempi di percorrenza sensibilmente inferiore al passo di modellizzazione (24 ore) e quindi da permetterci di porre $\tau = 0$. Ci poniamo inoltre nell'ipotesi che le perdite e gli apporti laterali siano nulli. Ciò è vero per i canali rappresentanti le condotte sotterranee ed i canali artificiali. Sarebbe invece necessario verificare se quest'ipotesi rimane valida anche per i canali che descrivono tratti di fiume naturale. I dati a nostra disposizione non ci hanno permesso di effettuare in termini quantitativi tale verifica, tuttavia ci sembra

plausibile affermare che le perdite e gli apporti laterali non siano significativi se paragonati alle portate giornaliere transitanti nel sistema.

Capitolo 7

IL MODELLO DEI BACINI IMBRIFERI

Definire un modello del bacino imbrifero significa fornire una rappresentazione matematica del processo di afflusso, ovvero descrivere la dinamica della variabile di afflusso a_{t+1} . Per scegliere la tipologia del modello da utilizzare fra quelli presenti in letteratura (deterministici, concettuali, puramente stocastici, stocastici con ingresso esogeno) ci baseremo sulle seguenti considerazioni:

- Il modello non verrà utilizzato per effettuare previsioni di afflusso ma per progettare le politiche di regolazione, il che richiede, come vedremo nel Cap.9, di risolvere un opportuno problema di controllo ottimo stocastico. Affinché i tempi di calcolo della sua soluzione siano accettabili, è necessario utilizzare un modello semplice come un *modello empirico stocastico*, che non intende spiegare la formazione dell'afflusso con una rappresentazione dettagliata dei fenomeni fisici che lo inducono, ma semplicemente come una realizzazione di un opportuno *processo stocastico*, cioè di una successione di variabili stocastiche.
- L'algoritmo che adotteremo per la soluzione del problema di controllo ottimo (vedi Appendice B) impone che il modello sia privo di variabili esogene, eccezion fatta per *disturbi bianchi*. Nel nostro caso ciò significa che, ad ogni istante t , l'afflusso a_{t+1}

nel successivo intervallo temporale dovrà essere calcolato solo in base agli afflussi registrati nei precedenti intervalli di tempo.

Per queste ragioni scegliamo di utilizzare i modelli puramente stocastici $ARMA(p, q)$ descritti dalla seguente equazione:

$$y_{t+1} = \alpha_1 y_t + \alpha_2 y_{t-1} + \dots + \alpha_p y_{t-p+1} + \varepsilon_{t+1} + \gamma_1 \varepsilon_t + \gamma_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \gamma_q \varepsilon_{t-q+1} \quad (7.1)$$

Il valore y_{t+1} che la variabile y assume nell'intervallo $[t, t+1)$ è legato ai valori assunti dalla stessa variabile nei p istanti precedenti (componente autoregressiva AR) e agli ultimi q valori del disturbo (componente a media mobile MA). L'equazione (7.1) caratterizza quindi un modello dinamico con $(p+q)$ variabili di stato.

Partendo dai modelli ARMA si possono definire modelli tempovarianti ciclostazionari definiti modelli PARMA (Periodic ARMA), che implementano la ciclostazionarietà attraverso la periodicità del vettore dei parametri θ_t (7.2). Le due caratteristiche evidenziate ci portano ad adottare i modelli PARMA per descrivere i fenomeni idrologici, i quali hanno un andamento variabile durante l'anno (tempovariante) ma simile all'interno di una stessa stagione di anni diversi (ciclostazionario).

$$\theta_t = \theta_{t+kT} \quad (7.2)$$

$$T = 365 \quad (7.3)$$

I modelli puramente stocastici ipotizzano che le variabili y_t siano realizzazioni di processi gaussiani standardizzati $N(0, 1)$, aventi cioè media nulla e deviazione standard unitaria. Dovremo quindi applicare alcune operazioni sulle variabili a_t^i che costituiscono il nostro campione:

- Verificare che esse possano essere descritte da una distribuzione di probabilità nota ed individuare i parametri di tale distribuzione.

- Normalizzarle per ricondurle ad una distribuzione normale \tilde{a}_t^i .
- Standardizzarle per ricondurle a variabili y_t con distribuzione gaussiana standard $N(0, 1)$.

A questo punto sarà possibile *tarare* il modello, ovvero stimare il valore dei parametri (*parametrizzazione*) che meglio spiega i dati osservati secondo un particolare criterio. Noi utilizziamo il *criterio dei minimi quadrati*, in base al quale si sceglie la parametrizzazione che minimizza il quadrato della somma degli scarti (detti anche *residui* o errori) ε_t , definiti come differenza tra i valori osservati (\bar{y}_t) e i valori (\hat{y}_t) calcolati dal modello

$$\varepsilon_t = \bar{y}_t - \hat{y}_t$$

Un indice con cui è possibile valutare quanto il modello definito si adatti ad una serie di dati è la *varianza spiegata*:

$$\sigma_{spiegata}^2 = 1 - \frac{\sigma_\varepsilon^2}{\sigma_a^2} \quad (7.4)$$

dove σ_a^2 è la varianza della serie di afflusso e σ_ε^2 la varianza dei residui rispetto ad essa. Validare un modello significa definire questo indice rispetto ad una serie di dati non utilizzata in taratura.

7.1 Le serie storiche di afflusso

Nei prossimi paragrafi analizzeremo i dati di afflusso che abbiamo a disposizione cercando di risolvere i problemi legati alla loro scarsa qualità. Successivamente ricostruiremo il contributo del bacino proprio di Campotosto non rilevato direttamente da alcun sistema di misura.

7.1.1 Dati disponibili

Le analisi eseguite si basano sulla serie dei dati di portata media giornaliera [m^3/sec] affluente a ciascuno dei tre serbatoi calcolate per bilancio o rilevate da Enel tra il 1994 ed il 2001.

In dettaglio le schede Enel (vedi Fig.7-1) forniscono, per il generico giorno t , le seguenti informazioni per ogni impianto:

- Quota del serbatoio a monte h_t^i [$m.s.l.m.$] riferita alle ore 24.00 ovvero rilevata a fine giornata (dove $i = Camp, Provv, Piag$). Da questa è possibile ricavare il volume di invaso V_t^i tramite la funzione quote-invasi (vedi Cap.6);
- Portata derivata $q_t^{der_i}$ [m^3/sec] per la produzione idroelettrica fornita come valor medio calcolato sulle ventiquattro ore della portata turbinata dai vari gruppi di ogni centrale (dove $i = P, SG, M$);
- Portata pompata p_t^i [m^3/sec] dall'impianto verso il serbatoio di monte nelle ore notturne del generico giorno t , fornita come valor medio calcolato sulle ventiquattro ore (dato disponibile solo per le centrali di Provvidenza e S.Giacomo provviste di sistema di pompaggio quindi $i = P, SG$);
- Portata affluente a_t^i [m^3/sec] ai tre serbatoi dai rispettivi canali di gronda, rilevata o calcolata per bilancio nelle ore notturne a macchine ferme (dove $i = G1350, Provv, Piag$)¹.

La modalità di rilevazione delle portate affluenti adottata da Enel cambia a seconda del serbatoio considerato.

Gli afflussi al Lago di Campotosto, provenienti dalle due gronde poste a quota 1350 *m.s.l.m.*, vengono rilevati all'immissione nel lago attraverso un misuratore di porta-

¹Utilizziamo *Pr* e *Piag* per l'indice i del termine a_{t+1}^i di Provvidenza e Piaganini poichè il dato di afflusso dalle gronde 1100 e 400 comprende anche il bacino proprio dei serbatoi. Chiamiamo invece *G1350* la componente di afflusso a Campotosto proveniente dalle gronde 1350 poichè nella sua misurazione non viene rilevato il contributo del bacino proprio che determineremo in seguito.

ENEL - PT MONTORIO

GRUPPO 02/01/2001

PRIMA CAPO TURNO *Giorno*

DATI GIORNALIERI ESERCIZIO IMPIANTI N.1 MN. del DALLE ORE 0 ALLE 24

IMPIANTO	km/mc	SERBATOIO BACINO	MAX MN	QUOTA msn ore 24	PORT. DER. mcs	PORT. SCAR. mcs	SFIORI E. D. kWh	METROST. FLUIDI DER. mcs	PORTATA DER. mcs	AVVIAMENTI data 0 alle 24	GR	ORE MARCIA A VUOTO	RICHIESTI N°	MANCATE N°	ORE	GRUPPI DA SINCRONO	MIN
PROVVIDENZA	0.55	CAMPOTOSTO	1317.59 1294.00	11310.42	13.3				1.8		GR 1	1	1				
											GR 2	1	1				
											GR 3	1	1				
											PM 1	2	1				
											PM 2	1	1				
											PM 3	1	1				
S. GIACOMO	1.42	PROVVIDENZA	1080.00 1045.00	1051.55	4.3				3		GR 1	1	1				
	1.48				12.6						GR 2	1	1				
	1.51										GR 3	1	1				
	2.13										GR 4	2	1				
											GR 5	2	1				
											PM 1	2	1				
MONTORIO	0.54	PIAGANINI	357.00 354.40	393.04	22.9				7		GR 1	1	1				
											GR 2	1	1				
											GR 3	1	1				

CAUSA MANCATO AVVIAMENTO

MAX TRAF. DA INDEAD

ANOMALIA FAC.

NOTA: * RIFERITO ALLE PORTATE DEI CANALI DI GRONDA QUOTA 1350 CAMPOTOSTO

* TOTALI AFFLUSSI CALCOLATI - EFFETTUATO BILANCIO IDRICO

AFFLUSSI

Figura 7-1: Esempio di scheda di raccolta dati giornalieri dell'Enel

ta istantanea che fornisce automaticamente l'apporto giornaliero complessivo delle due gronde. Non essendo possibile distinguere il contributo dei due canali, li tratteremo come un unico affluente al serbatoio denominato come detto a_t^{G1350} .

Tale tecnica di misurazione non rileva il contributo agli afflussi fornito dal bacino imbrifero naturale del lago di Campotosto.

Gli afflussi al serbatoio di Provvidenza, provenienti dalla gronda a quota 1100 *m.s.l.m.*, oltre che dal fiume Vomano, vengono calcolati invece chiudendo l'equazione di bilancio del serbatoio stesso utilizzando la seguente equazione:

$$a_{t+1}^{Pr ovv} = \frac{(V_{t+\Delta t}^{Pr ovv} - V_t^{Pr ovv})}{\Delta t} \quad (7.5)$$

dove:

$a_{t+1}^{Pr ovv}$ è la portata media [m^3/sec] affluita al serbatoio nell'intervallo $[t, t+1)$ (24 h) al netto dell'evaporazione. In seguito con $a_{t+1}^{Pr ovv}$ indicheremo gli *afflussi rilevati*;

$(V_{t+\Delta t}^{Pr ovv} - V_t^{Pr ovv})$ è la variazione del volume invasato [m^3] dal serbatoio nell'intervallo

Δt

Δt è l'intervallo di tempo [sec] corrispondente al periodo di rilevazione (solitamente pari a 2 ore). Quotidianamente, a macchine ferme (e quindi nelle ore notturne), viene misurata la variazione dell'invaso del serbatoio in un intervallo di circa 2 ore. La portata della gronda così misurata viene assunta costante durante tutto l'arco della giornata. In questo modo si trascurano totalmente gli effetti del sole sullo scioglimento delle nevi a monte del serbatoio nel periodo invernale-primaverile sottostimando quindi gli afflussi in maniera imprecisata. Allo stesso tempo non si tiene in considerazione l'evaporazione diurna dalla superficie del lago, ciò porta invece a sovrastimare le portate entranti nel serbatoio.

Gli afflussi al serbatoio di Piaganini, dovuti agli apporti delle due gronde a quota 400 *m.s.l.m.*, vengono calcolati in maniera analoga a quelli di Provvidenza. Anche in questo caso, come in quello delle gronde dei Monti della Laga, non è possibile distinguere i contributi dei due canali, posti l'uno sulla sinistra l'altro sulla destra idrografica del fiume Vomano e provenienti quindi da due zone con caratteristiche idrogeologiche diverse.

7.1.2 Buchi nelle serie storiche e loro riempimento

Analizzando le 2557 schede di rilevazione giornaliera che costituiscono le serie storiche Enel abbiamo rilevato un'alta frequenza di dati mancanti. Questi sarebbero potuti essere interpretati come zeri; ritenendo però strano che dei canali di gronda che intercettano numerosi torrenti in un area comunque ricca di acqua andassero così frequentemente in secca abbiamo ripartito i dati mancanti per gronda e posto in evidenza quanti di essi si sono verificati durante i week end (vedi Tab.7.1). I risultati mostrano che per tutte le gronde più della metà dei dati mancanti si presentano nei fine settimana. In particolare per Campotosto i dati mancanti rappresentano il 35% del totale e risultano essere nell'85% dei casi distribuiti tra fine settimana e festivi. L'elevato numero di valori mancanti anche durante la settimana e per periodi prolungati (l'intero periodo Settembre Dicembre

Tabella 7.1: Distribuzione dei dati di afflusso nulli delle serie storiche per i tre canali di gronda

	a_t^{G1350}	a_t^{Prov}	a_t^{Piag}
Totale dati nulli	902	157	168
Percentuale dati nulli	35%	6%	7%
Dati nulli nei week end e festivi	504 (85%)	94 (60%)	94 (56%)

1996) può essere spiegato da guasti al sistema di rilevazione in continuo operante sui canali di gronda.

In generale la mancanza del dato non è quindi da imputare ad un afflusso realmente nullo ma piuttosto alla mancata rilevazione dello stesso.

7.1.3 Stima degli afflussi attraverso l'equazione di bilancio del serbatoio

Per sopperire ai buchi nel rilevamento dei dati appena evidenziati abbiamo pensato di effettuare un bilancio giornaliero delle portate entranti ed uscenti da ogni serbatoio.

La (7.5) è applicabile solamente a macchine ferme, non figurandovi i termini di pompaggio e di turbinamento.

Volendo effettuare un bilancio di massa giornaliero di serbatoio l'equazione di bilancio deve essere modificata per tenere conto dell'eventuale termine di uscita dovuto alla portata p_{t+1}^m pompata verso il serbatoio di monte (serbatoi di Provvidenza e Piaganini) e/o di un termine di ingresso dovuto alla portata p_{t+1}^v pompata dal serbatoio posto a valle (serbatoi di Campotosto e Provvidenza), oltre che al termine di uscita r_{t+1}^i dovuto alla portata turbinata:

$$\bar{a}_{t+1}^i = r_{t+1}^i + \frac{(V_{t+1}^i - V_t^i)}{86400} - p_{t+1}^v + p_{t+1}^m \quad (7.6)$$

In seguito con \bar{a}_{t+1}^i indicheremo gli *afflussi da bilancio* entranti nell'i-esimo serbatoio nell'intervallo $\Delta t = [t, t + 1)$, posto pari a 24 ore.

Se avessimo a disposizione dati affidabili delle portate turbinate e pompate da ogni centrale potremmo, applicando la (7.6), risolvere i problemi presentati in precedenza:

1. Saremmo in grado di calcolare gli afflussi medi giornalieri ai serbatoi per i giorni in cui il dato è mancante (vedi Par.7.1.2) riempiendo così i buchi delle serie storiche;
2. Effettuando la sottrazione $(\bar{a}_t^i - a_t^i)$ potremmo calcolare il contributo agli afflussi al serbatoio del bacino proprio di Campotosto (vedi Par.7.1.4);
3. Confrontando a_t^i e \bar{a}_t^i potremmo valutare le approssimazioni introdotte dal metodo utilizzato da Enel per stimare gli afflussi a Provvidenza e Piaganini (vedi Par.7.1.2).

Serbatoio di Piaganini

Abbiamo applicato l'equazione di bilancio (7.6) al serbatoio di Piaganini, considerando gli afflussi delle due gronde 400 come un unico afflusso, e basandoci sui dati di esercizio delle centrali forniti da Enel. Essendo presenti numerosi buchi anche nelle serie di pompaggio e turbinamento, oltre che nelle serie di afflusso, abbiamo considerato per il confronto $a_t^{piag} - \bar{a}_t^{piag}$ solo i giorni in cui sono presenti entrambi i valori. Il risultato per il periodo 1998-1999 è mostrato in Fig.7-2. Si può notare come \bar{a}_t^{piag} segua piuttosto fedelmente la traiettoria degli afflussi rilevati da Enel, distaccandosene solo nel periodo estivo, quando risulta costantemente minore. Questo fenomeno è spiegabile col fatto che a_t^{piag} non considera l'evaporazione dal serbatoio, poichè è calcolato effettuando un bilancio di massa nelle ore notturne.

La serie \bar{a}_t^{piag} sembrerebbe allora essere corretta ed atta a rappresentare gli afflussi reali al bacino di Piaganini. Resta, anche se meno critico, il problema dei buchi nella serie per i giorni in cui mancano sia dati di afflusso che dati di turbinamento e pompaggio; risolviamo il problema effettuando un'interpolazione di tipo matematico ottenendo così la serie \tilde{a}_t^{piag} .

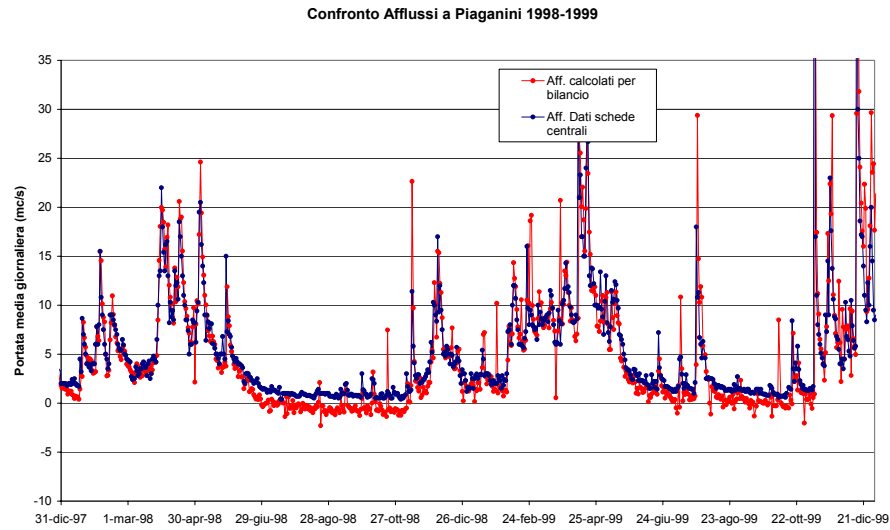


Figura 7-2: Confronto tra serie storica e serie da bilancio degli afflussi al serbatoio di Piaganini per gli anni 1998 e 1999

Serbatoio di Provvidenza

Applicando l'equazione (7.6) al serbatoio di Provvidenza abbiamo ottenuto i risultati riportati nel grafico in Fig.7-3, dove la serie storica degli afflussi a Provvidenza a_t^{Prov} viene confrontata con la serie \bar{a}_t^{Prov} ottenuta per bilancio.

Si può immediatamente notare come la serie \bar{a}_t^{Prov} presenti una fortissima variabilità, oltre a presentare valori negativi esagerati, non spiegabili solamente con la mancata considerazione dell'evaporazione diurna dal serbatoio. Ci sono evidentemente degli errori nelle serie utilizzate per eseguire il bilancio.

Tali errori sono probabilmente da attribuire alle serie di portata pompata e turbinata: questi valori sono infatti calcolati da Enel moltiplicando i MW prodotti ed assorbiti dalle turbine per un coefficiente energetico medio che non tiene conto del diverso rendimento dei gruppi motore e trascura la variabilità del salto motore lungo la giornata. Questo metodo di calcolo produce dei valori di portata non sempre corrispondenti alla realtà che non consentono di chiudere compiutamente il bilancio di massa.

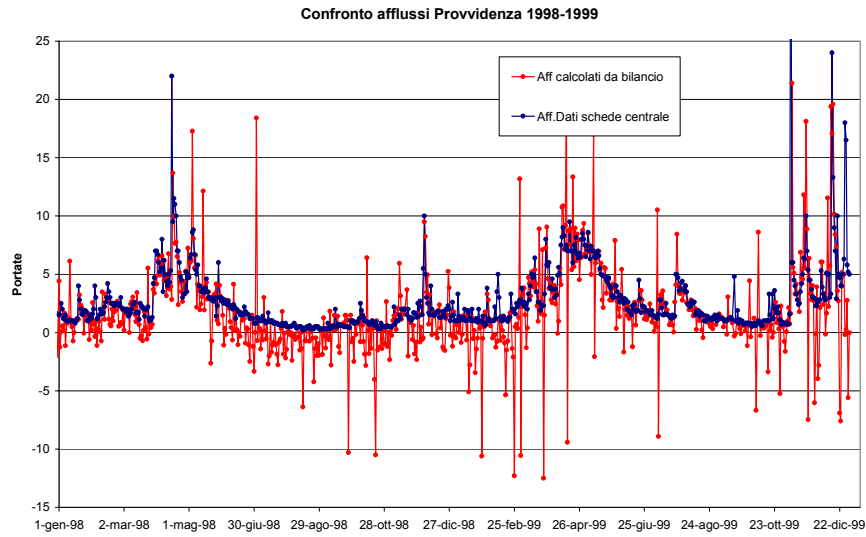


Figura 7-3: Confronto tra serie storica e serie da bilancio degli afflussi al serbatoio di Provvidenza per gli anni 1998 e 1999

La bontà degli afflussi calcolati per bilancio del serbatoio di Piaganini (vedi Fig.7-2) si spiega proprio con il fatto che, non avendo la centrale di S.Giacomo fino al 1999 gruppi di sollevamento attivi, non è presente alcun termine di pompaggio nel bilancio del serbatoio; probabilmente sono proprio le serie di pompaggio a contenere gli errori di calcolo più rilevanti, dato che Enel non è interessata a determinare con precisione l'energia spesa in pompaggio, la quale ha per l'azienda un costo opportunità praticamente nullo.

Viste le irrisolvibili problematiche emerse abbiamo deciso di interpolare semplicemente i buchi presenti nella serie in modo matematico, ottenendo la serie $\check{a}_t^{Pr ovv}$.

Serbatoio di Campotosto

Come si può vedere in Fig.7-4 nel bilancio del lago di Campotosto si presentano, addirittura accentuate, le problematiche presentatesi per il serbatoio di Provvidenza, con la differenza che in questo caso gli afflussi da bilancio risultano mediamente superiori a quelli rilevati da Enel, probabilmente proprio per via della mancata rilevazione del contributo del bacino proprio.

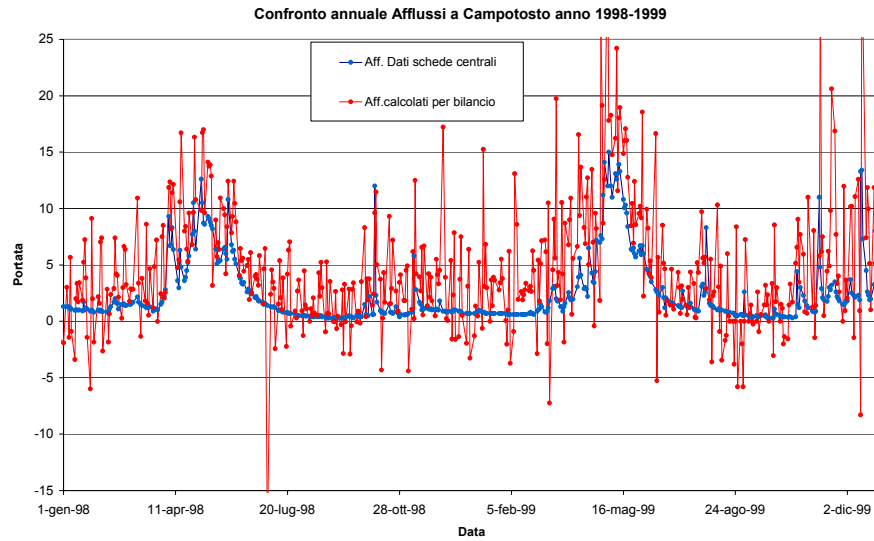


Figura 7-4: Confronto tra serie storica di afflussi dalle gronde (a_t^{G1350}) e serie da bilancio degli afflussi al serbatoio di Campotosto (\bar{a}_t^{G1350}) per gli anni 1998 e 1999

Si può osservare che l'andamento di \bar{a}_t^{G1350} oscilla marcatamente intorno alla traiettoria della serie storica, restandone mediamente al di sopra, scendendo poi in alcuni punti a valori fortemente negativi, superiori in valore assoluto alla massima evaporazione possibile sul lago (la massima evaporazione tabulata per Campotosto, alla massima quota di invaso e ad una temperatura di $40^\circ C$, è pari a circa $3.1 \text{ m}^3/\text{sec}$).

In questo caso gli errori sono dovuti, oltre che ai dati di pompaggio e turbinamento, anche ad errori sul calcolo della variazione di invaso giornaliera del serbatoio: data l'estensione della superficie lacuale (14 km^2), variazioni di livello al limite della precisione degli strumenti di misura comportano variazioni del volume invasato tutt'altro che trascurabili: ad un variazione di 1 cm del livello ad esempio corrisponde una variazione di 140000 m^3 dell'invaso.

A differenza dei casi precedenti non possiamo risolvere il problema interpolando matematicamente i dati disponibili, visto che tali dati non comprendono il contributo del bacino proprio di Campotosto.

Benchè Enel sostenga il contrario, tale contributo è certamente non trascurabile, dal

momento che deriva da un'area di raccolta di 45 Km², pari a circa la metà dell'area sottesa dalle gronde della Laga (97 Km²); non è trascurabile nemmeno l'evaporazione, favorita dall'elevata superficie del serbatoio e dalle caratteristiche climatologiche dell'area. Dai dati forniti sappiamo che, considerando la superficie del serbatoio pari a 14 Km² e una temperatura di 30°C, l'evaporazione è circa di 1.5 m³/sec, vale a dire dell'ordine di grandezza degli apporti estivi delle gronde.

Come determinare allora tale contributo?

7.1.4 Il bacino proprio di Campotosto

Dobbiamo cercare un metodo per ricostruire l'afflusso dovuto al bacino proprio del serbatoio senza utilizzare i dati di portate turbinate e pompate. Abbiamo deciso di fare un bilancio di massa annuale dell'intero sistema idroelettrico chiuso alla centrale di Montorio (vedi Fig.7-5). In tal modo possiamo trascurare le portate pompate, giacchè queste costituiscono solo un trasferimento di acqua interno al sistema, e trascurare l'errore dovuto alla sensibilità dello strumento di misura del livello lacuale: un errore di anche 140000 m³, rilevante a scala giornaliera, è del tutto trascurabile a scala annuale.

Applichiamo dunque l'equazione di continuità (7.7), in cui sono considerati come ingressi i volumi affluiti nell'anno i dalle gronde, come uscita il volume rilasciato a Montorio durante il medesimo anno e come variazione di stato la variazione d'invaso del serbatoio di Campotosto dall'anno i all'anno $i+1$ (trascurando invece le variazioni di Provvidenza e Piaganini). a_i^{manc} è l'afflusso mancante alla chiusura del bilancio.

$$\check{a}_i^{G1350} + a_i^{manc} + \check{a}_i^{Pr ovv} + \check{a}_i^{Piag} - q_i^M = \Delta s_{i+1}^{Camp} \quad (7.7)$$

In cui \check{a}_i^{G1350} risulta dalla serie \check{a}_t^{G1350} ottenuta per interpolazione dalla \bar{a}_t^{G1350} .

L'unico afflusso al bacino non misurato è il contributo del bacino proprio di Campotosto, assumiamo che proprio questo sia l'afflusso mancante. Poniamo allora

$$\check{a}_i^{Camp} = a_i^{manc} + \check{a}_i^{G1350} \quad (7.8)$$

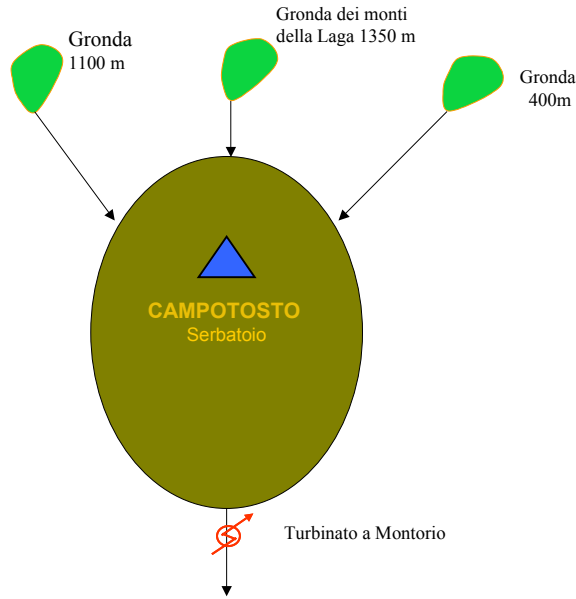


Figura 7-5:

con \check{a}_i^{Camp} indichiamo l'afflusso totale al lago.

L'anno 1996 non è stato considerato in quanto presenta una mancanza completa di dati per i mesi di Ottobre, Novembre e Dicembre; tale anno non verrà utilizzato nemmeno per la taratura del modello.

I risultati ottenuti sono mostrati in Tab.(7.2). Come si vede a_i^{manc} risulta significativamente diverso da zero, confermando la supposizione che il contributo del bacino proprio non fosse trascurabile.

Abbiamo infine messo in relazione gli afflussi totali a Campotosto \check{a}_i^{Camp} (vedi la 7.8) con gli afflussi dalle gronde dei Monti della Laga \check{a}_i^{G1350} . La retta di regressione mostrata in Fig.7-6, la cui formula è la (7.9), è stata ottenuta fissando l'evaporazione massima (e quindi l'intercetta per $x=0$) a $2.5 \text{ m}^3/\text{sec}$; il coefficiente di correlazione è pari a 0.8153.

$$\check{a}_i^{Camp} = 2.4351 \bullet \check{a}_i^{G1350} - 2.5 \quad (7.9)$$

L'equazione (7.9) è stata applicata all'intera serie di valori giornalieri \bar{a}_t^{G1350} generando

Tabella 7.2: Risultati del bilancio annuale degli afflussi all'intero sistema

	m^3	valori medi annuali (m^3/s)				
	Δs_{i+1}^C	\check{a}_i^{G1350}	$\check{a}_i^{G1350} + \check{a}_i^{Pr ovv} + \check{a}_i^{P iag}$	q_i^M	a_i^{manc}	\check{a}_i^{Camp}
1995	92'731'000	2.48	9.15	7.27	1.06	3.54
1996						
1997	-49'790'000	2.13	8.25	10.30	0.47	2.60
1998	-16'192'000	2.07	8.32	9.29	0.46	2.53
1999	52'245'000	2.65	11.57	11.83	1.92	4.57
2000	-56'459'000	1.8	7.34	9.54	0.41	2.22
2001	-16'087'000	1.98	6.94	7.04	-0.41	1.57

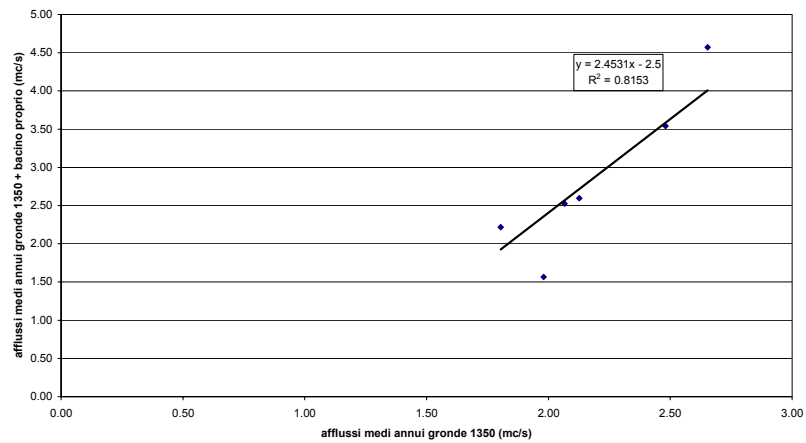


Figura 7-6: Regressione tra afflussi da gronde 1350 ed afflussi totali a Campotosto

una nuova serie \check{a}_t^{Camp} che rappresenta gli afflussi totali giornalieri a Campotosto (7.10).

$$\check{a}_t^{Camp} = 2.4351 \bullet \check{a}_t^{G1350} - 2.5 \quad (7.10)$$

La serie \check{a}_t^{Camp} minimizza l'errore di bilancio annuale sull'intero bacino, in maniera da non sottostimare (né sovrastimare) la quantità d'acqua disponibile ad Enel per la produzione di energia.

7.2 Analisi statistiche degli afflussi

7.2.1 Distribuzioni di probabilità degli afflussi

Prima di procedere all'individuazione del modello matematico degli afflussi al sistema bisogna identificare la funzione di distribuzione di probabilità che meglio rappresenta i dati.

Ricordiamo infatti che un insieme di osservazioni (o misure) indipendenti di una grandezza costituisce un campione di dati da cui risulta possibile estrapolare informazioni, quali ad esempio una previsione di realizzazioni future, solo se si considera tale campione come estratto dalla popolazione di una variabile casuale e quindi interpretabile per mezzo di un modello probabilistico.

La funzione di probabilità di una variabile casuale viene quindi determinata adattando al campione disponibile una distribuzione di probabilità di tipo noto (Normale, Lognormale, Gumbel, ecc.).

L'individuazione della funzione di probabilità adeguata si articola in tre fasi:

1. Nella prima fase si selezionano alcuni tipi di distribuzione, tra i quali sembra più ragionevole effettuare la ricerca.
2. Nella seconda fase si stimano i valori dei parametri caratteristici del tipo di distribuzione scelto che minimizzino la differenza tra frequenza cumulata dei val-

ori osservati e probabilità cumulata PDF, individuando così completamente la distribuzione stessa.

3. Nella terza fase si sceglie la distribuzione che meglio si presta ad interpretare le serie di dati.

Abbiamo considerato come possibili distribuzioni la **Normale** e la **Lognormale**, valutando poi tra queste quale si adattasse meglio a rappresentare i dati attraverso la costruzione delle *carte probabilistiche*.

Carta probabilistica

Una *carta probabilistica* è un diagramma cartesiano che riporta in ascissa una variabile x ed in ordinata la sua distribuzione di probabilità cumulata $PDF(x)$. La particolarità delle carte probabilistiche consiste nel fatto che i suoi assi non sono lineari ma scalati in maniera tale che le variabili stocastiche distribuite secondo la funzione di probabilità per cui la carta è stata costruita vi siano rappresentate come rette.

La principale qualità delle carte probabilistiche risiede nella facilità di calcolo e nell'immediatezza della loro interpretazione.

Infatti in un qualunque diagramma cartesiano, nel quale sono lineari sia la scala della variabile originaria x sia quella della probabilità di non superamento $PDF(x)$, tutte le distribuzioni risultano rappresentate da curve, che sono più o meno simili tra loro perchè generalmente hanno tutte il tipico andamento a S . Nella carta probabilistica di un dato tipo invece, le distribuzioni di quel preciso tipo sono rappresentate da rette mentre tutte le altre continuano a risultare rappresentate da curve. Si può allora valutare l'adattamento di un campione ad una distribuzione di probabilità riportandone gli elementi sulla relativa carta probabilistica e verificando che essi si dispongano all'incirca lungo una retta.

Naturalmente è molto più facile giudicare se un insieme di punti si disponga lungo una retta piuttosto che lungo una curva, permettendo quindi una valutazione anche grafica della validità della distribuzione.

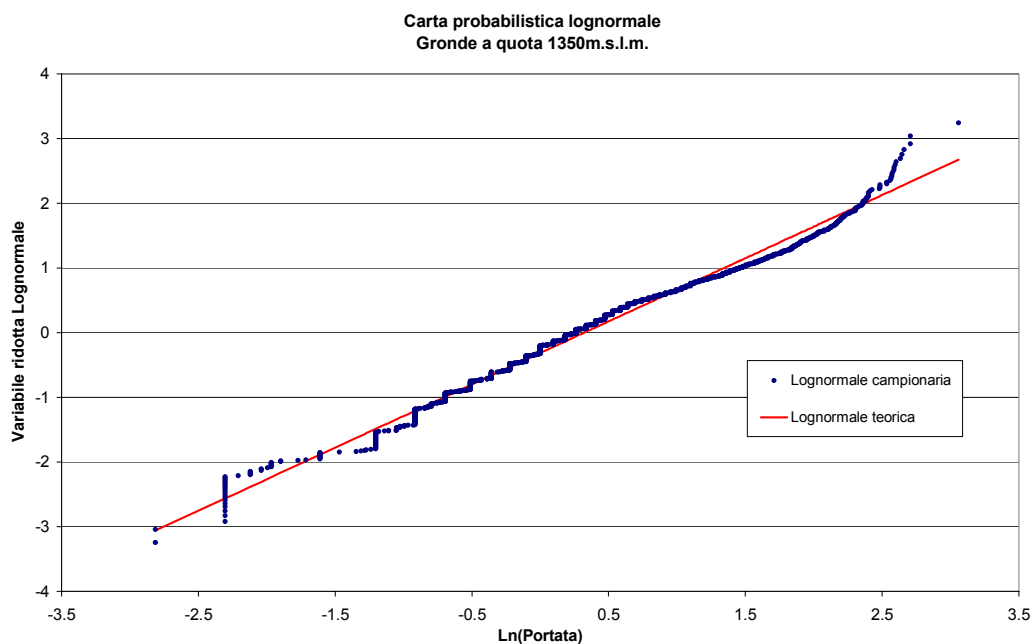


Figura 7-7: Carta probabilistica Lognormale per le gronde a quota 1350 m.s.l.m.

7.2.2 Carte probabilistiche degli afflussi al sistema

Gronde a quota 1350 m.s.l.m.

La carta probabilistica a cui meglio sembra adattarsi la serie di dati è quella di tipo Lognormale (vedi Fig.7-7), che è stata dunque preferita a quella Normale (Fig.7-8).

Gronda a quota 1100 m.s.l.m.

Anche in questo caso i dati si adattano meglio alla distribuzione di probabilità di tipo Lognormale (vedi Fig.7-9) piuttosto che a quella Normale (vedi Fig.7-10).

Gronde a quota 400 m.s.l.m.

Qui di seguito mostriamo i risultati ottenuti per le due gronde a quota 400 m, considerate come un'unico canale in cui defluisce la somma delle portate dei due canali.

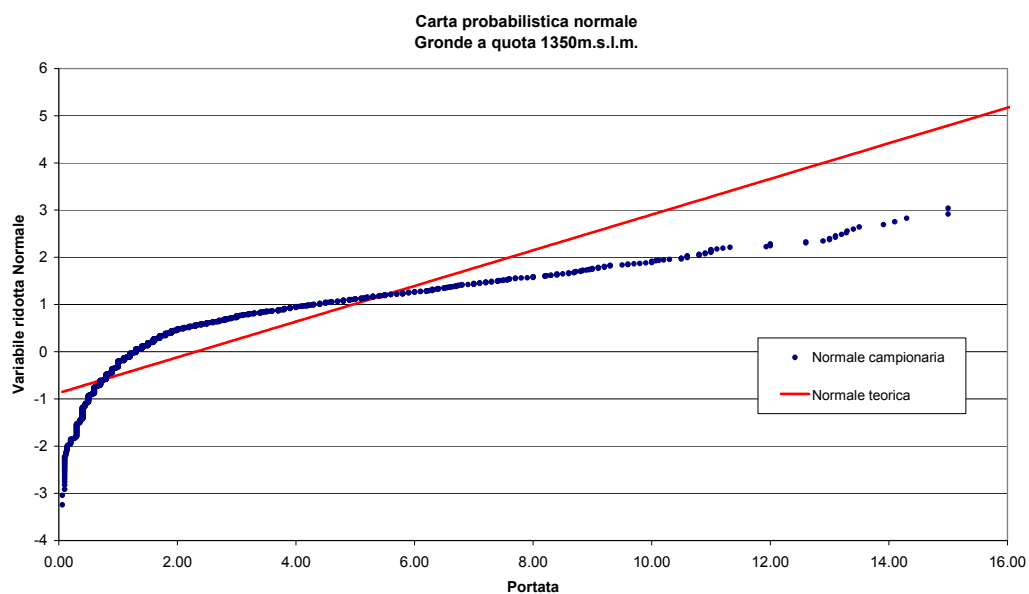


Figura 7-8: Carta probabilistica Normale per le gronde a quota 1350 m.s.l.m.

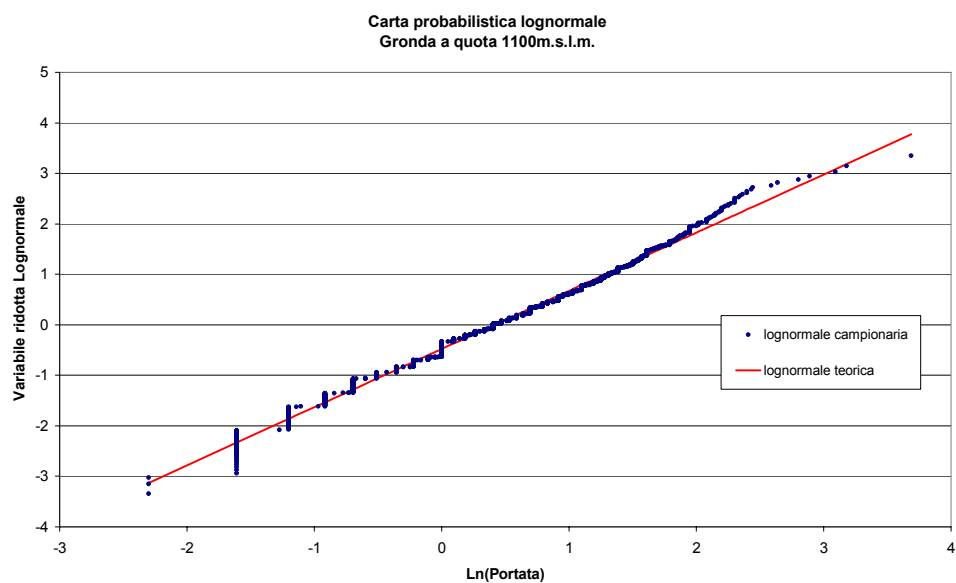


Figura 7-9: Carta probabilistica Lognormale per la gronda a quota 1100 m.

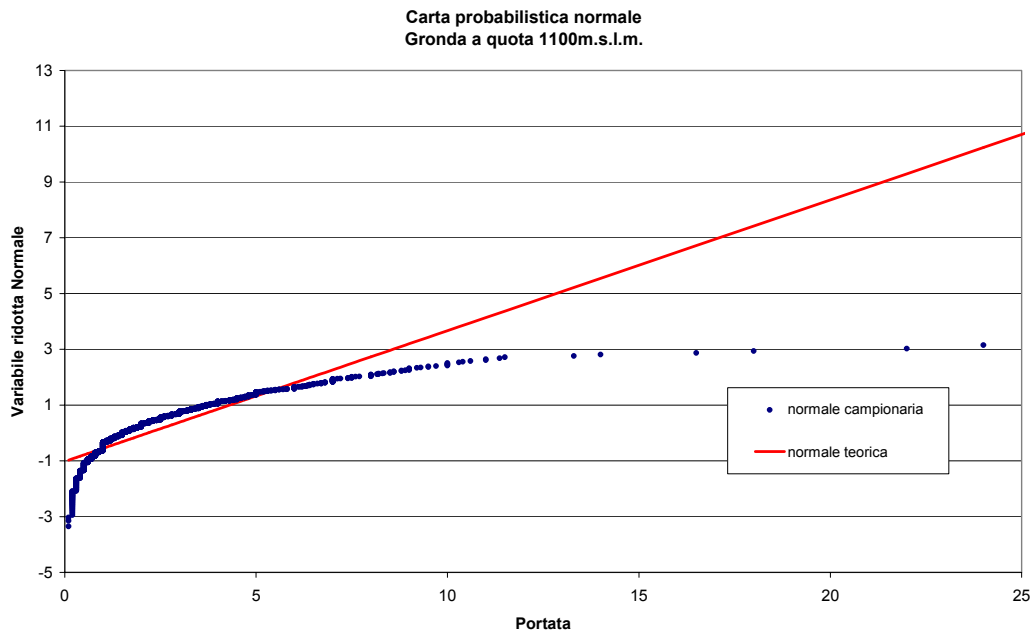


Figura 7-10: Carta probabilistica Normale per la gronda a quota 1100 m.

Dal confronto tra Fig.7-11 e Fig.7-12 si nota il miglior adattamento della serie di afflusso \tilde{a}_{t+1}^{Piag} alla distribuzione Lognormale

Commenti alle carte probabilistiche

Analizzando le tre carte probabilistiche (Fig.7-7, Fig.7-9 e Fig.7-11) si possono trarre alcune interessanti osservazioni.

Se poniamo attenzione in particolare alle code delle distribuzioni possiamo notare una netta differenza tra la gronda 1350 e le due più a valle. Nel primo caso infatti i valori di afflusso più bassi tendono ad allinearsi verticalmente su colonne distinte, ma intervallate da punti isolati, mentre negli altri due casi si presentano su colonne nettamente distinte e separate.

L'incolonnamento verticale dei dati di afflusso è giustificato dal fatto che la scala adottata nelle carte probabilistiche è di tipo logaritmico (ciò significa che un valore in ascissa ad esempio di -2 corrisponde ad una portata effettiva di $e^{-2} = 0.135 \text{ m}^3/\text{sec}$) la

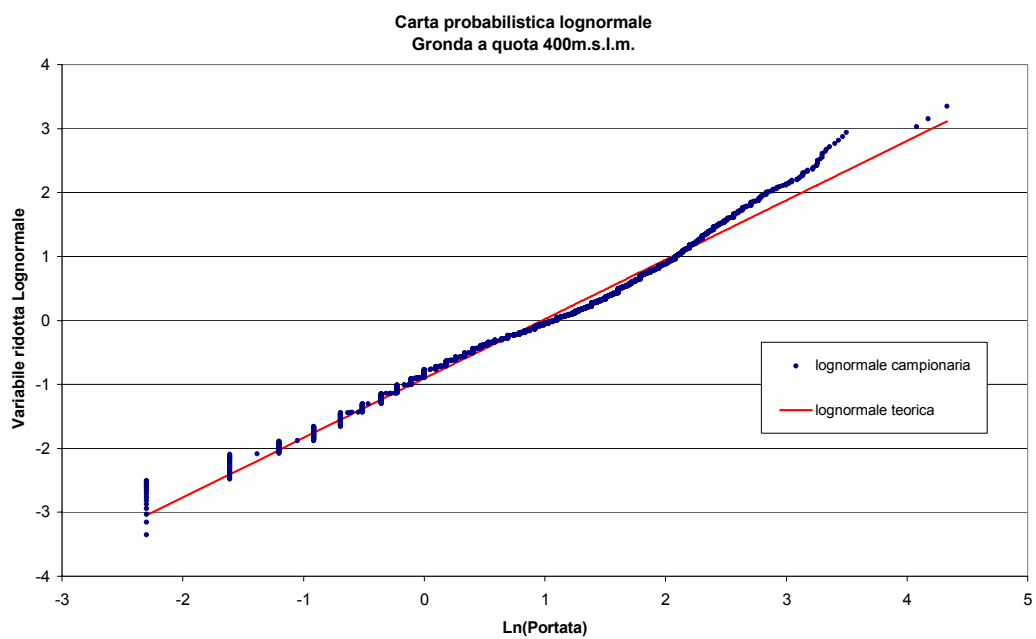


Figura 7-11: Carta probabilistica Lognormale per le gronde a quota 400.

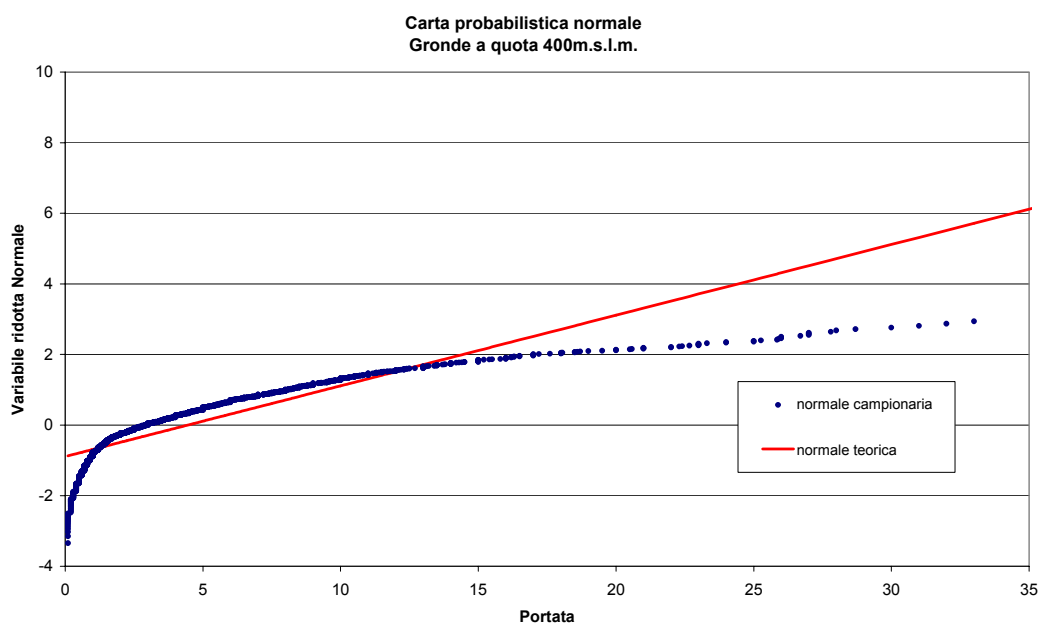


Figura 7-12: Carta probabilistica Normale per le gronde a quota 400.

quale tende ad avvicinare i valori di afflusso molto simili, soprattutto quelli di modesta entità.

La netta separazione tra le colonne verticali che si nota in Fig.7-9 e Fig.7-11 si può invece spiegare attraverso la differente modalità di rilevazione dell'afflusso utilizzata a Provvidenza e Piaganini (calcolo per bilancio dall'equazione 7.5). Questa è presumibilmente affetta da un errore sistematico δ relativo alla precisione dello strumento di misura del livello del serbatoio stimato attorno ad 1 *cm*.

Il fenomeno descritto è evidente per bassi valori di afflusso: se si ipotizza una portata pari a $a_{t+1}^{Pr ovv} = 0.2 \text{ m}^3/\text{sec}$, ed essendo la superficie media dell'invaso del serbatoio di Provvidenza pari a $S^{Pr ovv} = 0.157 \text{ km}^2$, si dovrebbe produrre una variazione di livello in 2 ore (come indicativamente suggerito da Enel) pari a:

$$\delta = \frac{a_{t+1}^{Pr ovv} \cdot 7200}{S^{Pr}} = 0.92 \text{ [cm]} \quad (7.11)$$

Il metodo di stima dell'afflusso rende quindi impossibile apprezzare differenze di portata inferiori a $0.2 \text{ m}^3/\text{sec}$. Un discorso analogo può infine essere fatto per il serbatoio di Piaganini e le due rispettive gronde a quota 400 m. Infatti la stessa portata a_{t+1}^{Piag} affluente nell'arco di 2 ore produrrebbe una variazione di livello pari a:

$$\delta = \frac{a_{t+1}^{Piag} \cdot 7200}{S^{Piag}} = 1.31 \text{ [cm]} \quad (7.12)$$

Ogni volta che le gronde forniscono apporti modesti ai serbatoi (accade spesso, soprattutto nei periodi estivi) questi producono una variazione di livello che si aggira intorno ad 1 *cm*: ecco quindi perchè lo strumento non distingue afflussi diversi, producendo quelle tipiche code verticali sulle carte probabilistiche di Fig.7-9 e Fig.7-11.

La divergenza delle code delle distribuzioni per valori alti di portata si spiegano invece considerando il fatto che le portate sono intercettate da canali di gronda. I canali hanno ovviamente un massimo di portata trasportabile oltre il quale semplicemente l'acqua fluente tracima l'opera di presa e prosegue la sua corsa nell'alveo naturale del torrente

cui appartiene, alterando quindi la distribuzione di probabilità delle portate entranti al sistema. Tali errori riguardano tuttavia pochi dati e valori estremi, riteniamo quindi il fenomeno trascurabile.

7.3 Individuazione dei modelli

Abbiamo già individuato la categoria di modelli che utilizzeremo: i PARMA. Dobbiamo ora stabilirne l'ordine ed effettuarne la taratura.

Nella scelta dell'ordine del modello da utilizzare abbiamo considerato due aspetti tra di loro contrapposti:

- L'esigenza di rappresentare in modo soddisfacente il fenomeno fisico.
- Il limite tecnologico, in termini di tempi di calcolo e memoria occupata, che un ordine elevato comporta, dal momento che il modello deve essere poi incluso nella formulazione del problema di controllo ottimo.

Vedremo come un modello di ordine 0 (7.13) possa costituire un buon compromesso fra queste due esigenze.

$$y_{t+1} = \varepsilon_{t+1} \quad (7.13)$$

Per tarare il modello è necessario stimare 365 vettori di parametri θ_t , uno per ogni giorno dell'anno, utilizzando una finestra mobile centrata sul giorno t di estensione fissata. Per un modello PAR 0 i parametri da stimare sono esclusivamente la media $\mu_{t\ln}$ e varianza $\sigma_{t\ln}$ tramite i quali è possibile destandardizzare e denormalizzare la variabile $y_t \sim N(0, 1)$ e ricostruire gli afflussi a_t^i .

In relazione alla scarsa quantità di dati a nostra disposizione (6 anni in totale data l'impossibilità di utilizzare l'anno 1996 a causa dei troppi buchi) non ci è sembrato accettabile dividere le serie storiche, come sarebbe d'uopo fare, in due sottoserie ed utilizzarne una per tarare i modelli e l'altra per validarli. Infatti in tal caso avremmo dovuto

basare taratura e validazione su serie di soli 3 anni rendendo così poco significativi entrambi i processi. Siamo quindi stati costretti ad eseguire la validazione parzialmente sugli stessi dati utilizzati per tarare i modelli.

7.3.1 Il modello del bacino delle gronde 1350 m

Abbiamo calcolato, per ogni giorno t dell'anno e con una finestra mobile di 9 giorni, i parametri $(\mu_{t\ln}^{G1350}, \sigma_{t\ln}^{G1350})$ della lognormale relativi alla serie \check{a}_t^{G1350} .

Quello che a noi interessa è però calcolare i parametri per la serie \check{a}_t^{Camp} che abbiamo ottenuto applicando a \check{a}_t^{G1350} la relazione lineare (7.10). La serie è quindi distribuita come una Lognormale a tre parametri che otteniamo tramite le seguenti formule:

$$\begin{aligned}\mu_{t\ln}^{Camp} &= \mu_{t\ln}^{G1350} + \ln(2.4351) \\ \sigma_{t\ln}^{Camp} &= \sigma_{t\ln}^{G1350} \\ m^{Camp} &= -2.5\end{aligned}$$

Vediamo in Fig. (7-13) come un modello PAR0 possa fornire una buona descrizione dell'andamento degli afflussi.

7.3.2 Il modello del bacino della gronda 1100 m

Come nel Par.7.3.1, possiamo concludere che un modello PAR(0) può essere sufficiente (vedi Fig.7-14) per spiegare la dinamica degli afflussi \check{a}_{t+1}^{Prov} del bacino imbrifero in questione. Si può tra l'altro notare come il modello riesca a descrivere bene la fase di calo estivo degli afflussi, fino al raggiungimento del periodo di minimo (tra maggio e settembre).

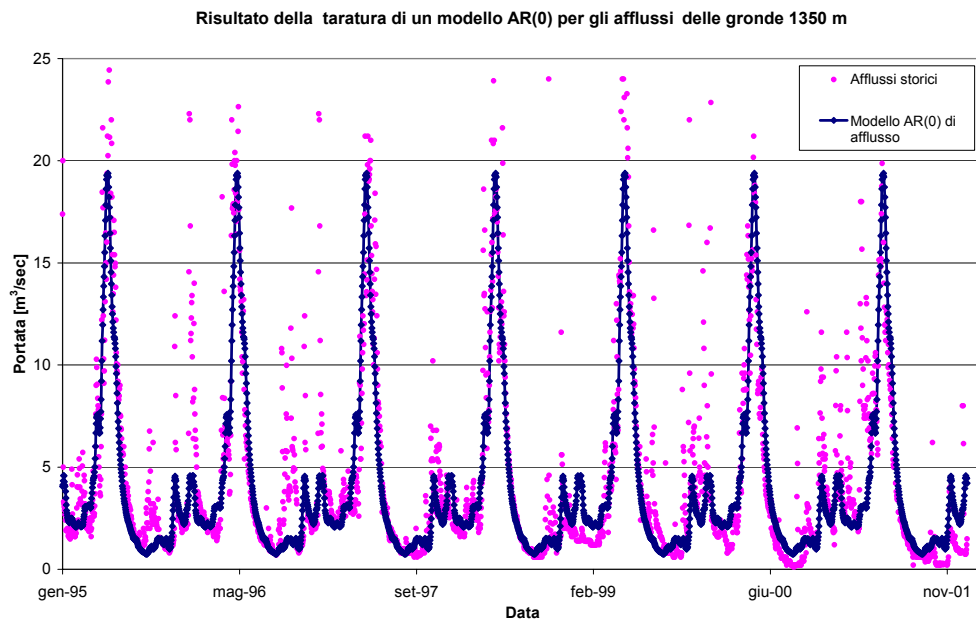


Figura 7-13: Gli afflussi generati con un modello PAR(0) e gli afflussi \check{a}_t^{G1350} a confronto per il serbatoio di Campotosto.

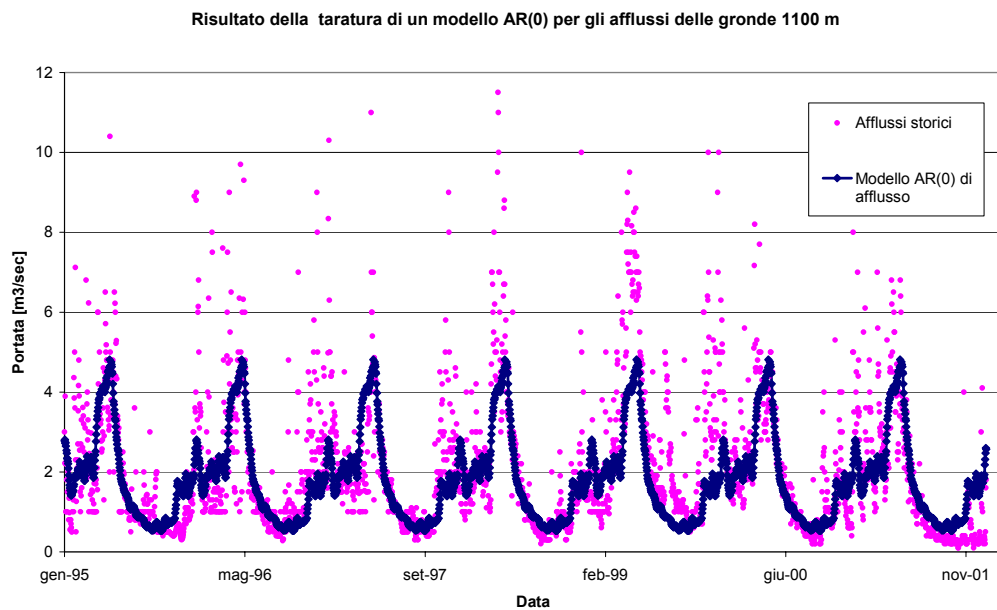


Figura 7-14: Gli afflussi generati con un modello PAR(0) confrontati con la serie $\check{a}_{t+1}^{Pr ovv}$

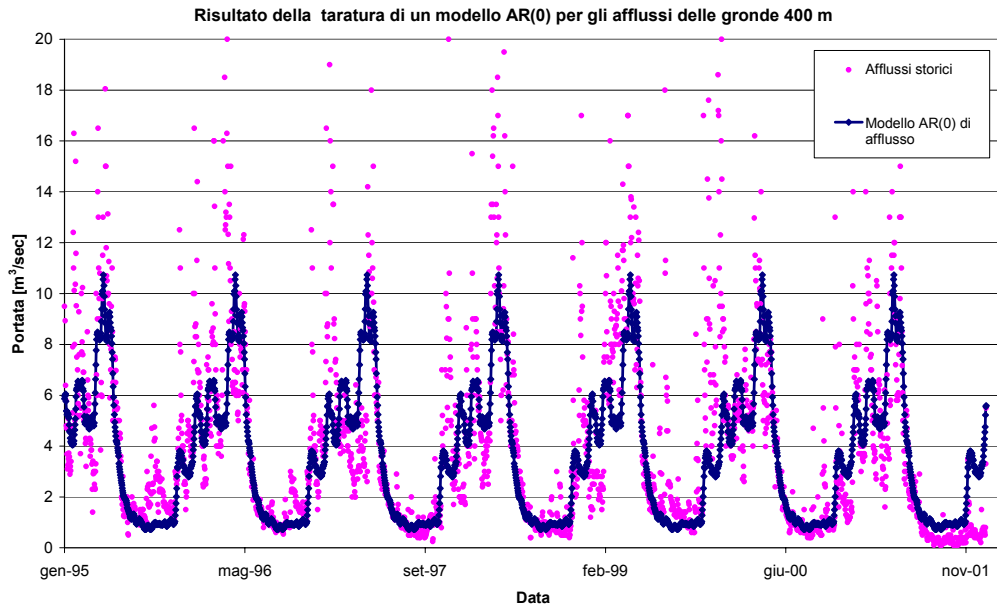


Figura 7-15: Gli afflussi generati con un modello PAR(0) confrontati con la serie \tilde{a}_{t+1}^{Piag}

7.3.3 Il modello del bacino delle gronde 400 m

Il bacino imbrifero sotteso dalle gronde a quota 400 m è stato modellizzato analogamente ai precedenti.

E' bene ricordare che i due canali captano corsi d'acqua appartenenti a due gruppi montuosi diversi, sia dal punto di vista geologico che da quello idrogeologico.

Tenendo conto anche di questo fatto possiamo concludere che la serie degli afflussi generata dal modello AR(0), fornisce una discreta approssimazione dell'andamento degli afflussi \tilde{a}_{t+1}^{Piag} (vedi Fig.7-15).

Capitolo 8

IL MODELLO DEL DISTRETTO IRRIGUO

8.1 Modelli teorici di utenza irrigua e loro limiti

Come le altre componenti di un sistema, anche l'utenza irrigua viene usualmente descritta tramite modelli matematici, siano essi concettuali, fisici o empirici, spaziando da modelli di tipo black-box a complessi modelli descrittivi, rappresentabili nella maniera più generale dalle seguenti equazioni:

$$c_{t+1} = f_t(c_t, u_t, w_t, \varepsilon_{t+1}) \quad (8.1a)$$

$$y_t = h_t(c_t, u_t, w_t, \varepsilon_{t+1}) \quad (8.1b)$$

dove c_t è la variabile di stato del modello, y_t è l'uscita (solitamente la biomassa prodotta o la fallanza di fornitura idrica), w_t è un ingresso esogeno ed ε_{t+1} è il disturbo.

Una volta individuata e definita la struttura della funzione di transizione di stato $f_t(\cdot)$ e della trasformazione di uscita $y_t(\cdot)$ il modello può essere tarato con le note tecniche a partire da una serie di dati storici.

Molto spesso è troppo dispendioso ed inutile raggiungere tale dettaglio nella descrizione di questa componente del sistema, sia per il costo della raccolta dei dati richiesti per la taratura che per il tempo di calcolo indotto dall'elevata dimensionalità del vettore stato del modello generale del sistema. Già con tre variabili di stato il tempo di calcolo sale a valori spesso inaccettabili. Di conseguenza la descrizione dell'utenza irrigua si riduce quasi sempre ad un modello non dinamico tempovariante.

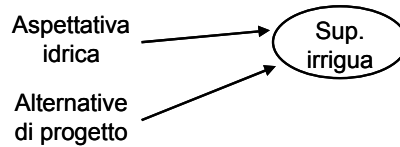
In molti casi infine il modello è ulteriormente semplificato eliminando ogni componente stocastica, riducendo la domanda idrica ad una funzione deterministica $W(t)$, cioè una traiettoria.

Può inoltre capitare che alcuni aspetti dell'utenza irrigua, specie quelli di natura socio-economica, siano scarsamente identificabili e/o strutturabili. Diviene di conseguenza difficile formalizzarli tramite le funzioni $f_t(\cdot)$ e $y_t(\cdot)$ nelle (8.1); tale difficoltà può indurre ad avventate semplificazioni ed omissioni.

Come modellizzare allora fenomeni intrinsecamente incerti, soggetti alle dinamiche della mente umana, quali ad esempio la reazione degli agricoltori di fronte ad offerte di incentivi o di nuove possibilità di irrigazione?

Abbiamo cercato di trovare una soluzione ad entrambi questi problemi modellizzando il distretto irriguo del Consorzio Bonifica Nord (CBN) tramite le Bayesian Belief Networks (BBN), o Reti Bayesiane di Credenza. Utilizzando questo strumento arriveremo ad una descrizione dell'utenza irrigua più ricca di una semplice traiettoria di domanda, senza aumentare la dimensionalità dello stato ed includendo nel modello anche i fenomeni socio-economici, soggettivi e non strutturati, cui abbiamo fatto cenno poco fa.

Altro vantaggio connesso all'adozione delle reti Bayesiane, derivante dalla loro rappresentabilità tramite un'intuitiva interfaccia grafica, è la possibilità di coinvolgere i diretti interessati, ovvero gli agricoltori dell'area, nella identificazione del modello. La partecipazione dei portatori di interesse non istituzionali è infatti un fattore critico di successo non solo nell'ottenimento di un modello credibile, ma soprattutto nella successiva fase di negoziazione: gli agricoltori, avendo compreso il modello costruito e verificato che esso rappresenti il loro punto di vista e la loro maniera di ragionare e reagire ai possibili



Progetto		sud+nord			sud		
superficie irrigua [ha]	Aspettativa idrica	bassa	media	alta	bassa	media	alta
	1000-2000	0.1	0.05	0	0.95	0.75	0.35
	2000-3000	0.2	0.1	0	0.05	0.25	0.65
	3000-4000	0.5	0.15	0	0	0	0
	4000-5000	0.2	0.25	0	0	0	0
	5000-6000	0	0.3	0.1	0	0	0
	6000-7000	0	0.15	0.2	0	0	0
	7000-8000	0	0	0.4	0	0	0
	Oltre 8000	0	0	0.3	0	0	0

Figura 8-1:

ingressi, accetteranno come verosimili le valutazioni presentate nel processo decisionale.

8.2 Le reti Bayesiane

Una rete Bayesiana è un modello costituito di tre elementi:

- Un insieme di nodi rappresentanti le variabili del sistema, ognuno dei quali può assumere un numero finito di valori (stati) mutuamente esclusivi; Queste variabili possono rappresentare sia aspetti socio-economici che aspetti puramente fisico-agrari.
- Un insieme di archi che connettono i nodi che rappresentano relazioni causali tra le variabili; ognuno di tali archi è diretto da un nodo padre (o causa) ad un nodo figlio (o effetto).
- Un insieme di tabelle di probabilità condizionata (CPT), che definiscono la distribuzione di probabilità del nodo figlio condizionata agli stati dei nodi genitore (vedi fig.8-1).

L'insieme dei primi due elementi dà luogo ad un grafo orientato aciclico. L'unione di questo con le CPT genera una BBN pronta ad essere utilizzata. Per far questo si

attribuiscono valori ad alcune variabili (in gergo si pone evidenza su alcuni nodi) e si analizza come di conseguenza vari la distribuzione di probabilità degli altri nodi. Il cambiamento di una variabile (o nodo) si propaga attraverso la rete alle variabili (nodi) direttamente o indirettamente dipendenti da essa, seguendo le relazioni rappresentate dagli archi e quantificate dalle CPT.

Tramite la BBN si ottiene così una distribuzione di probabilità congiunta di tutte le variabili della rete.

Il software da noi utilizzato per creare ed utilizzare le reti Bayesiane è Hugin¹. Tale programma fornisce:

- Una comoda interfaccia grafica, utile per costruire e modificare velocemente ed intuitivamente il grafo.
- Strumenti per lo riempimento delle CPT, ad esempio per l'implementazione di relazioni algebriche tra nodi (vedi Par.8.4).
- Un motore di inferenza logica che compila la rete e permette di analizzare la propagazione delle evidenze inserite attraverso la rete stessa.

Nei paragrafi seguenti esponiamo la costruzione della BBN, che prevede per quanto abbiamo visto due fasi: la generazione del grafo e la successiva quantificazione delle relazioni ivi individuate, tramite riempimento delle CPT.

8.3 La rete Bayesiana del distretto irriguo: il grafo

Abbiamo diviso la rete in quattro settori, ognuno dei quali rappresenta un processo presente nel distretto irriguo: *Comportamento degli agricoltori*, *Evapotraspirazione delle colture*, *Distribuzione della risorsa*, *Crescita delle colture* (vedi fig.8-2). Ogni settore è rappresentato da un blocco di nodi; in fig.8-2 sono mostrati per ogni blocco, ovvero per ogni settore, i nodi di ingresso e di uscita ed i legami tra essi e quindi tra i settori stessi.

¹Hugin Researcher, software sviluppato dall'Università di Aalborg, disponibile all'url www.hugin.com.

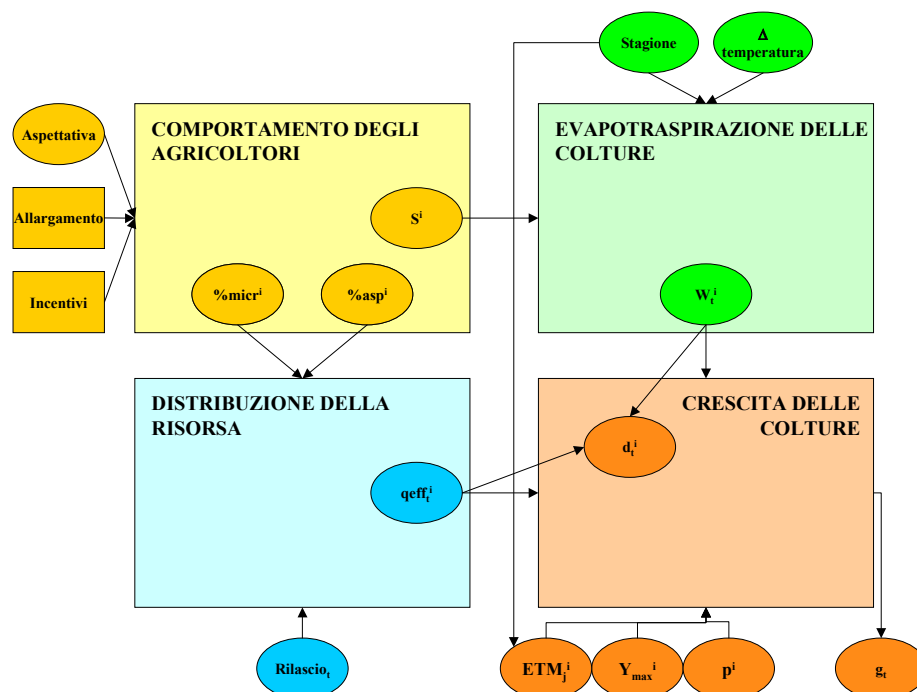


Figura 8-2: Grafo della BBN del distretto irriguo divisa nei quattro settori da noi individuati.

Nei paragrafi seguenti analizziamo uno per uno i grafi dei quattro settori.

8.3.1 Le BBN dei settori e loro interazione: Comportamento degli agricoltori

Questo settore (vedi Fig.8-3) descrive le dinamiche secondo cui i contadini del bacino Vomano - Tordino rispondono alle alternative pianificatorie individuate dai nodi *Aspettativa*, *Allargamento* ed *Incentivi*.

Abbiamo selezionato tre colture (cavolfiore, pomodoro e mais; per le ultime due abbiamo ipotizzato un regime di rotazione annuale, poichè diversamente si avrebbe un'inaccettabile impoverimento del suolo) ritenendole rappresentative delle coltivazioni presenti nel distretto, sia per quanto riguarda l'andamento del fabbisogno idrico durante l'anno che per la loro rilevanza socio-economica nel contesto locale.

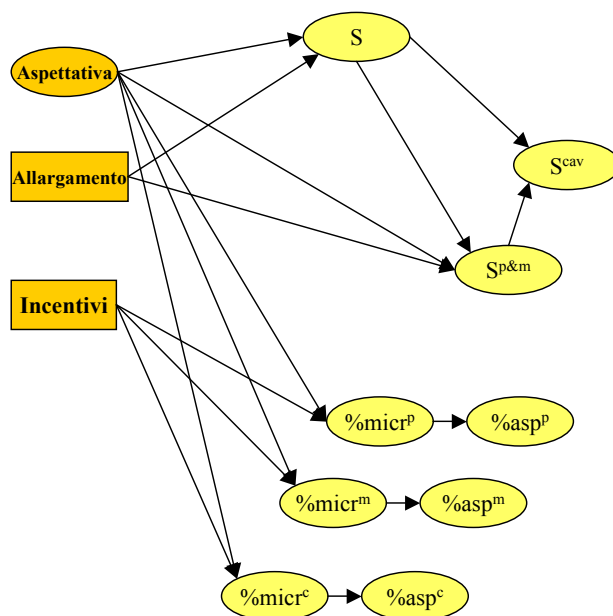


Figura 8-3: Grafo esteso del settore *Comportamento agricoltori*

Descriviamo di seguito i singoli nodi di questo settore nel dettaglio.

Aspettativa (ingresso) Questo nodo rappresenta l'aspettativa idrica, ovvero stima qualitativamente (gli stati possono ad esempio essere *alta*, *media*, *bassa*) la quantità di acqua che gli utenti irrigui prevedono di ricevere aderendo al consorzio; essi si baseranno sulle dichiarazioni fatte loro dal CBN e sulla capacità dimostrata da quest'ultimo di fornire effettivamente le quantità dichiarate negli anni precedenti.

Allargamento (ingresso) Estensione dei terreni serviti dalle infrastrutture del CBN e aumento della concessione di derivazione dalla traversa di Villa Vomano. Si considerano due sole possibilità: lo stato di fatto (alternativa 0) ed il raddoppio di estensione dell' area servita dalle infrastrutture del CBN (incluso il raddoppio della concessione di derivazione) (vedi Cap.4).

Incentivi (ingresso) Tramite questo nodo rappresentiamo l'intervento normativo che consiste nell'introduzione di incentivi volti all'innovazione delle tecniche irrigue, in un'ottica di maggiore efficienza nell'uso della risorsa acqua (vedi Cap.4). Anche il previsto passaggio del CBN dalla tariffazione puramente ad ettaro ad una tariffazione parzialmente a consumo può essere considerata equivalente ad un incentivo indiretto all'efficienza.

S : superficie irrigua del CBN Come si vede in Fig.8-3, gli agricoltori decideranno se aderire al Consorzio basandosi sui valori assunti dalle due variabili di pianificazione *Aspettativa* e *Allargamento*. Il numero di aderenti determina l'estensione (*ha*) di terreno del bacino servito dalle infrastrutture del CBN. La relazione tra i nodi genitore *Aspettativa* e *Allargamento* ed il nodo figlio S non è però immediatamente quantificabile; essa dovrebbe essere desunta da un'approfondita conoscenza dell'atteggiamento dei contadini e della loro propensione al cambiamento che può essere ottenuta a seguito di consultazioni ed interviste con i singoli interessati e con i rappresentanti del consorzio.

S^i : Superficie del CBN dedicata alla i-ma coltura (uscita) Rappresenta la decisione da parte dei contadini aderenti al CBN di quanto territorio (*ha*) dedicare alla i-ma coltura (la superficie dedicata alla rotazione annuale pomodoro-mais è rappresentata tramite un unico nodo $S^{p\&m}$, ponendo così che le aree dedicate a queste due colture siano equivalenti). Tale decisione dipende dal nodo *Allargamento* (la zona interessata all'estensione del Consorzio potrebbe essere più adatta a particolari colture che ad altre), dal nodo *Aspettativa* (differenti colture hanno differente fabbisogno idrico, una bassa aspettativa porta alla scelta di colture a basso fabbisogno) e dalla superficie totale S irrigata dal CBN. Anche la quantificazione di questa relazione richiede interviste e consultazioni.

$\%_{micr_irr^i}$: % microirrigazione per la coltura i-ma (uscita) Tramite questo nodo vogliamo rappresentare la percentuale di coltivazione i-ma che gli agricoltori sceglieranno di irrigare utilizzando la microirrigazione, tecnica irrigua che offre un'efficienza di

distribuzione pari al 95%. Ipotizziamo che i singoli agricoltori prendano questa decisione basandosi sull'aspettativa e sugli incentivi resisi disponibili.

$\%asp_irr^i$: **% aspersione per la coltura i-ma (uscita)** E' il complemento a 1 della variabile precedente. Non abbiamo considerato altre tecniche (come l'irrigazione a goccia) perchè non adatte al tipo di coltivazioni presenti nella zona o alla conformazione del territorio ed infatti attualmente praticamente assenti.

8.3.2 Le BBN dei settori e loro interazione: Evapotraspirazione delle colture

In questo paragrafo ripercorriamo i passaggi e le semplificazioni che ci hanno portato da un modello dinamico di crescita della pianta alla rete statica rappresentante il processo di evapotraspirazione delle colture implementata nella rete Bayesiana dell'utenza irrigua.

Rete Bayesiana dinamica

Abbiamo inizialmente creato un grafo orientato (vedi Fig.8-4) rappresentante le relazioni di causa-effetto tra le principali variabili in gioco nella crescita della pianta, basandoci sulla struttura di un modello matematico di crescita vegetale²; per ora ci limiteremo ad un'analisi qualitativa dei nodi e delle relazioni tra essi.

Temperatura aria e Radiazione solare Questi nodi rappresentano rispettivamente la temperatura media giornaliera dell'aria espressa in gradi centigradi e la radiazione solare media giornaliera espressa in (MJ/m²). Ipotizzeremo che queste variabili seguano una traiettoria annuale.

²Il modello su cui ci siamo basati si fonda su equazioni di crescita ed evapotraspirazione note in letteratura e sugli studi condotti da Stockle e Donatelli (vedi [22], [23], [24]).

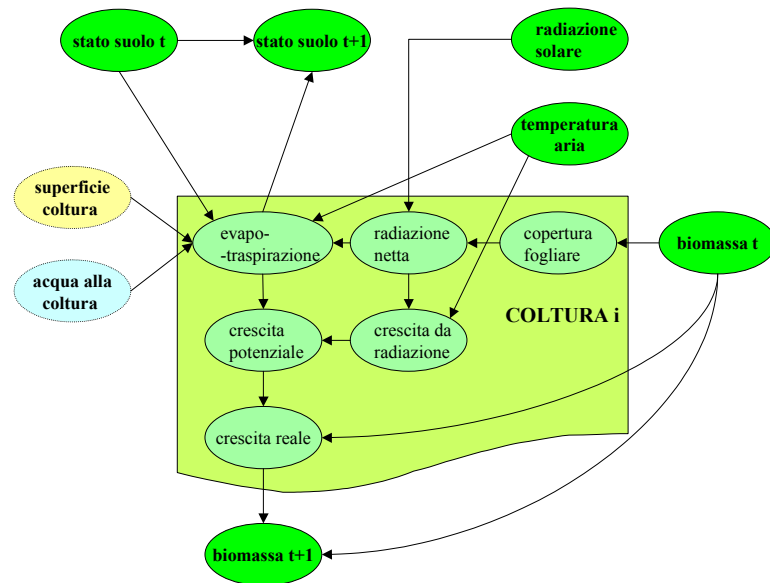


Figura 8-4: Grafo costruito basandoci sul modello matematico dinamico di crescita della pianta

Copertura fogliare Il nodo *Copertura* dipende dallo sviluppo fogliare della coltura in questione e dovrà quindi essere collegato con il nodo che rappresenta l'accumulo di biomassa fino all'istante t (nodo *Biomassa t*).

Radiazione netta Con il termine "netta" si vuole intendere l'effettiva radiazione solare intercettata dalla pianta e sfruttata quindi nei processi fotosintetici. La radiazione solare totale dovrà essere depurata da quella parte che non giunge alle piante ma viene dispersa sul terreno. Perciò questo termine dovrà dipendere dai due nodi *Radiazione solare* e *Copertura*.

Evapotraspirazione E' la somma della perdita di acqua dal terreno per evaporazione e dalle piante per traspirazione. Le piante assorbono acqua dal terreno e la usano principalmente come vettore per i composti e le sostanze nutritive di cui necessita per la formazione e lo sviluppo delle sue strutture cellulari (idrogeno, sali minerali, proteine,

grassi), quindi viene rilasciata in atmosfera attraverso le foglie sotto forma di vapore acqueo. Solo l'1% circa di essa entra nella costituzione del vegetale.

L'assorbimento di acqua da parte dell'apparato radicale (processo di traspirazione) avviene per osmosi e utilizza l'acqua trattenuta nelle porosità dello strato superficiale del terreno (acqua di capillarità); ciò viene rappresentato nella nostra rete collegando i nodi *Stato suolo t* e *Acqua alla pianta* con il nodo *Evapotraspirazione*.

Inoltre quest'ultimo sarà influenzato dai nodi *Temperatura aria* e *Radiazione netta* che determinano il tasso di evaporazione.

Infine tramite la dipendenza dal nodo *Superficie coltura* è possibile il passaggio da un valore specifico di evapotraspirazione (per unità di superficie) a quello di tutta l'area dedicata alla coltura.

Crescita limitata da radiazione Questo nodo rappresenta la crescita di biomassa nella situazione in cui la fornitura idrica sia ottimale e l'unico fattore limitante sia costituito dalla radiazione solare e dalla temperatura.

Crescita potenziale Il nodo racchiude un passaggio puramente matematico: è infatti una semplice operazione di minimo tra i termini crescita limitata da radiazione e crescita limitata da traspirazione. Quest'ultimo valore è immediatamente ricavabile a partire dal nodo *Evapotraspirazione*.

Crescita reale e Biomassa $t+1$ Il nodo *Biomassa $t+1$* è il risultato della somma fra la biomassa presente al tempo t e la crescita reale, ovvero l'aumento di biomassa fra l'istante t e $t+1$.

Semplificazioni attuate al modello di crescita della pianta

La rete appena descritta presenta alcuni problemi:

- è difficile trattare processi dinamici attraverso una rete Bayesiana. Una rete infatti può rappresentare l'evoluzione temporale di un sistema solo duplicando la propria

struttura di partenza un numero di volte pari ai passi temporali da considerare, senza la possibilità di assumere una struttura ciclica. Ciò rende difficilmente implementabile il suo utilizzo all'interno di un problema di controllo ottimo su orizzonte infinito.

- la presenza di due variabili di stato, $biomassa_t$ e $stato\ del\ suolo_t$, aumentando la dimensione del vettore degli stati del sistema, appesantisce in maniera critica il processo di ottimizzazione, portando su macchine di media potenza a tempi di calcolo eccessivamente lunghi.

E' possibile ovviare ad entrambi questi problemi passando da un modello dinamico ad uno statico tempovariante. Vedremo nei seguenti paragrafi come ciò sia possibile.

Eliminazione dinamica del suolo Analizzando le equazioni del modello di crescita vegetale ricalcato nella costruzione della rete si osserva che nel medio-lungo periodo (i turni irrigui durano mediamente 10-15 giorni) il contributo del terreno all'alimentazione idrica delle piante è trascurabile. Infatti la capacità di accumulo del terreno non è significativa rispetto ai volumi evapotraspirati. Inoltre è compito proprio dell'irrigazione fare in modo che il terreno non si asciughi, per evitare danni alle piante, e che la lama d'acqua applicata sia tale da non eccedere la capacità del terreno, per evitare sprechi. Alla luce di queste considerazioni riteniamo accettabile trascurare la dinamica del terreno e quindi eliminare il relativo nodo *stato del suolo t*.

Riportiamo in Appendice C i passaggi matematici che giustificano questa conclusione.

Eliminazione dinamica della biomassa Ipotizziamo che durante la stagione colturale la pianta non sia sottoposta ad eccessivi e prolungati stress idrici, e che quindi l'andamento della biomassa e della copertura fogliare seguano una traiettoria definita e ottimale; possiamo quindi eliminare il nodo *biomassa t* ed utilizzare tale traiettoria come ingresso alla rete. Così facendo eliminiamo la dinamica di crescita della biomassa vegetale.

Tramite queste semplificazioni abbiamo reso statico il modello di crescita della pianta,

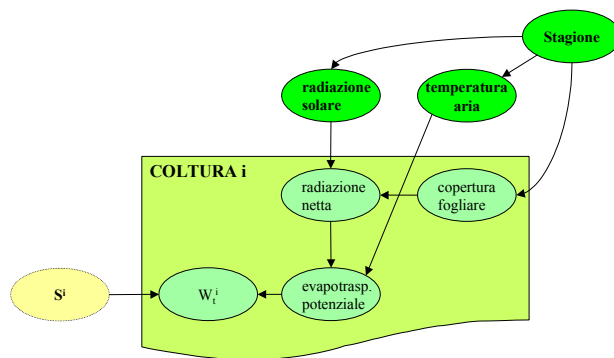


Figura 8-5: Grafo per modello statico di crescita della pianta

il quale ha ora come uscita la domanda idrica (W_t^i) della coltura i -ma all'istante t e non più la biomassa della pianta; il modello rimane comunque tempovariante poichè il nodo Copertura (così come Temperatura dell'aria e Radiazione solare) varia con l'istante temporale considerato (ovvero dipende dal nodo *Stagione*) come mostrato in Fig.8-5.

Sostituzione del blocco Pianta con traiettoria giornaliera di fabbisogno

Il blocco di nodi così ottenuto è un oggetto il quale, una volta inseriti temperatura, radiazione solare e copertura fogliare, e presa S^i calcolata dal blocco del settore *Comportamento degli agricoltori*, restituisce la domanda idrica giornaliera della coltura, senza che intervenga alcun elemento di soggettività nè alcuna decisione umana. Gli unici elementi di incertezza sono di tipo stocastico ed intrinseci alla natura dei fenomeni considerati. La funzione di tale blocco può quindi essere svolta più semplicemente in maniera analitica, utilizzando un software che implementi un sistema di equazioni di crescita vegetale il quale produca traiettorie di evapotraspirazione potenziale, ovvero di fabbisogno idrico specifico giornaliero (w_t^i). A tale scopo abbiamo adottato il software Cropwat (vedi Par.8.4.1). Possiamo ora sostituire parte del blocco Coltura i di Fig.8-5 con un unico nodo w_t^i generato tramite tale software (vedi Fig.8-6)

Esplicitando poi le tre colture considerate (cavolfiore, pomodoro, mais) si ottiene la rete finale da noi utilizzata per questo settore (vedi Fig.8-7), di cui descriviamo nel

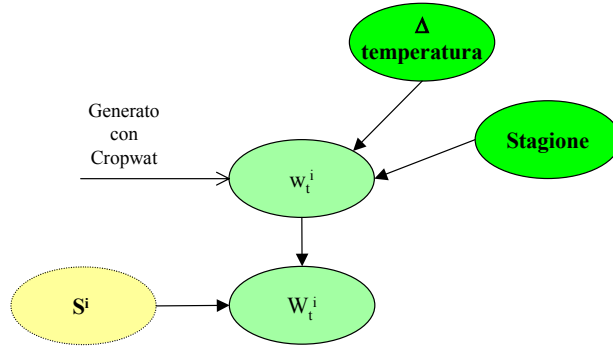


Figura 8-6: Grafo con nodo w_t^i (fabbisogno) generato tramite Cropwat

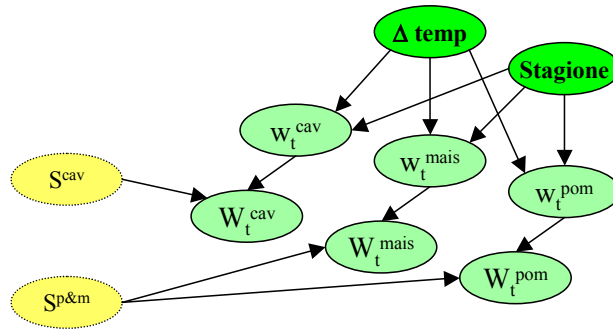


Figura 8-7: Grafo del settore *Evapotraspirazione delle colture*. I nodi sono esplicitati per le tre diverse colture considerate

dettaglio i nodi:

Stagione (ingresso) Abbiamo suddiviso il periodo irriguo, aprile-settembre, in 18 fasi, o stagioni, corrispondente ai 18 periodi in cui abbiamo suddiviso le traiettorie di fabbisogno delle colture (vedi Par. 8.4.1).

Δ temperatura (ingresso) Questo nodo definisce la probabilità con cui la temperatura dell'aria sia maggiore, inferiore o pari alla media storica (vedi Par. 8.4.1).

w_t^i Il fabbisogno $[mm/die]$ della coltivazione i-ma all'istante t , dipende dalla fase di crescita della pianta, quindi dal nodo *stagione*, e dalla temperatura. Il calcolo di questi

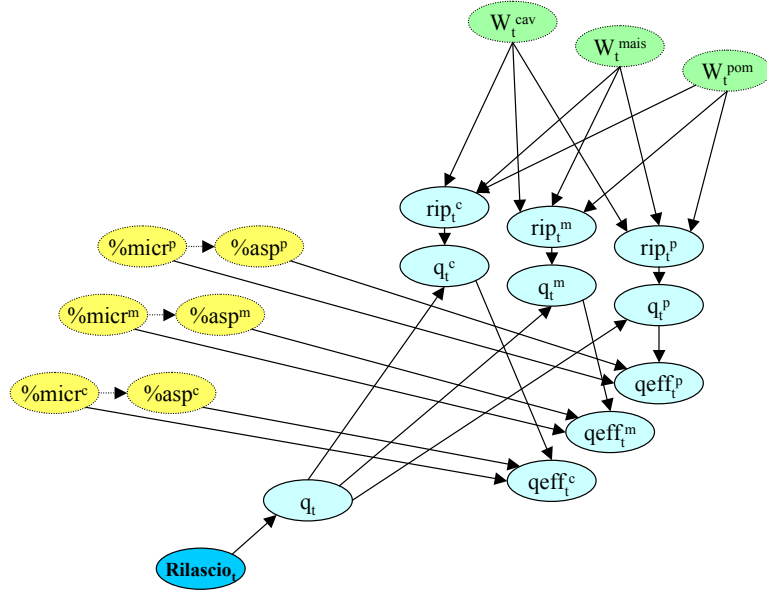


Figura 8-8: Grafo del settore *Distribuzione della risorsa*

valori è stato eseguito discretizzando le traiettorie di fabbisogno generate dal software Cropwat.

W_t^i (uscita) La domanda idrica della coltura i-ma all'istante t, espressa in metri cubi al giorno [m^3/die], è semplicemente calcolata come prodotto della superficie dedicata alla coltura per il fabbisogno della medesima:

$$W_t^i = S^i \bullet w_t^i$$

8.3.3 Le BBN dei settori e loro interazione: Distribuzione della risorsa

Questo settore (vedi Fig.8-7) rappresenta la maniera in cui la portata rilasciata a Villa Vomano viene distribuita tra le diverse colture considerate.

Rilascio_t (ingresso) Questo nodo rappresenta la portata d'acqua che viene quotidianamente derivata dal CBN alla traversa di Villa Vomano.

q_t Abbiamo ipotizzato la presenza di perdite d'acqua, causate da evaporazione e fuoriuscite, lungo le infrastrutture di distribuzione del CBN.

Per riprodurre questo fenomeno inseriamo il nodo *Acqua al campo* (q_t), rappresentante la portata d'acqua media giornaliera effettivamente a disposizione degli agricoltori, calcolata in maniera puramente matematica moltiplicando il valore assunto dal nodo Rilascio_t per un coefficiente di efficienza (0.9).

q_tⁱ E' il volume totale d'acqua [m^3] mandato il giorno t alla testa dei campi della coltivazione i-ma; essa viene calcolata secondo la funzione seguente:

$$q_t^i = q_t \bullet rip_t^i \quad (8.2)$$

rip_tⁱ La presenza di più colture pone il problema di come ripartire l'acqua disponibile agli agricoltori (q_t) tra le diverse coltivazioni considerate.

Questo nodo rappresenta appunto la percentuale di q_t che i contadini decidono di destinare alla coltura i-ma all'istante t . Il criterio di questa ripartizione d'acqua dipende fortemente dalla soggettività dei coltivatori e dalla loro tradizione agricola. Risultando impossibile, come vedremo, avere l'interazione con gli agricoltori di cui si avrebbe bisogno per formalizzare tali soggettività all'interno di questo studio, abbiamo scelto di implementare un criterio di distribuzione puramente razionale: ripartire l'acqua in modo che ogni coltura abbia deficit specifico ($Def.Spec.^i_t$ definito secondo la 8.3) uniforme (al netto dell'efficienza della tecnica irrigua adottata), ovvero assuma valore costante al variare di i .

$$Def.Spec.^i_t = \frac{W_t^i - q_t^i}{W_t^i} = 1 - \frac{q_t^i}{W_t^i} \quad (8.3)$$

Tale risultato si ottiene adottando la seguente funzione di riparto

$$rip_t^i = \frac{W_t^i}{W_t^{tot}} \quad (8.4)$$

in cui W_t^{tot} rappresenta la domanda irrigua complessiva del distretto all'istante t :

$$W_t^{tot} = \sum_j W_t^j \quad (8.5)$$

Sostituendo la (8.2) e la (8.4) nella (8.3) risulta infatti:

$$Def.Spec._t^i = 1 - \frac{q_t \bullet rip_t^i}{W_t^i} = 1 - \frac{q_t \bullet \frac{W_t^i}{W_t^{tot}}}{W_t^i} = 1 - \frac{q_t}{W_t^{tot}} \quad (8.6a)$$

come si voleva dimostrare quindi il deficit specifico all'istante t risulta essere il medesimo per tutte le piante.

qeff_tⁱ (uscita) E' il volume d'acqua effettivamente arrivato alle piante della coltura i-ma. Tiene conto dell'efficienza del mix di tecniche irrigue utilizzate dagli agricoltori (%micr_irrⁱ, %asp_irrⁱ). Viene calcolato tramite la seguente formula:

$$qeff_t^i = q_t^i \bullet (0.95 \bullet \%micr_irr^i + 0.8 \bullet \%asp_irr^i)$$

Nota: l'efficienza di irrigazione non viene considerata nella ripartizione della portata disponibile; questo perchè il singolo agricoltore che scelga una tecnica efficiente come la microirrigazione la sceglie per aumentare e migliorare la propria produzione, non per ottenere il medesimo raccolto ricevendo meno acqua dal consorzio e spendendo per di più soldi per gli impianti necessari (si ricordi che la quota annua di adesione al consorzio è indipendente dalla quantità d'acqua consumata).

8.3.4 Le BBN dei settori e loro interazione: Crescita delle colture

Questo settore calcola la perdita economica connessa al deficit irriguo prodotto. Vi viene implementata la seguente formula additiva sviluppata dalla Fao [8]:

$$\frac{Y_m - Y_a}{Y_m} = k_y \bullet \frac{ET_m - ET_a}{ET_m} \quad (8.7)$$

in cui Y_m è il raccolto massimo a fine anno, Y_a il raccolto effettivamente ottenuto, ET_m l'evapotraspirazione massima, ET_a l'evapotraspirazione effettiva e k_y un coefficiente legato al tipo di coltura considerata.

Dividendo la crescita della pianta in quattro fasi j (periodo vegetativo, fioritura, formazione del raccolto, maturazione) la 8.7 diventa:

$$\frac{Y_m - Y_a}{Y_m} = \sum_j \left(k_y^j \bullet \frac{ETM_j - ETA_j}{ETM_j} \right) \quad (8.8)$$

in cui k_y^j dipende oltre che dalla coltura considerata anche dalla fase di crescita della coltura stessa, mentre ETM_j ed ETA_j sono l'evapotraspirazione massima e quella effettiva della pianta durante la fase di crescita j .

Per rendere tale formula separabile (come richiesto dall'algoritmo di risoluzione della programmazione dinamica stocastica) abbiamo prima di tutto posto

$$\frac{Y_m - Y_a}{Y_m} = \sum_j \left(k_y^j \bullet \frac{ETM_j - \sum_{t \in fasej} ETA_t}{ETM_j} \right) \quad (8.9)$$

$$K_j = \frac{k_y^j \bullet Y_m}{ETM_j} \quad (8.10)$$

$$ETM_j = \sum_{t \in fasej} ETM_t \quad (8.11)$$

con ETM_t l'evapotraspirazione massima nell'istante t .

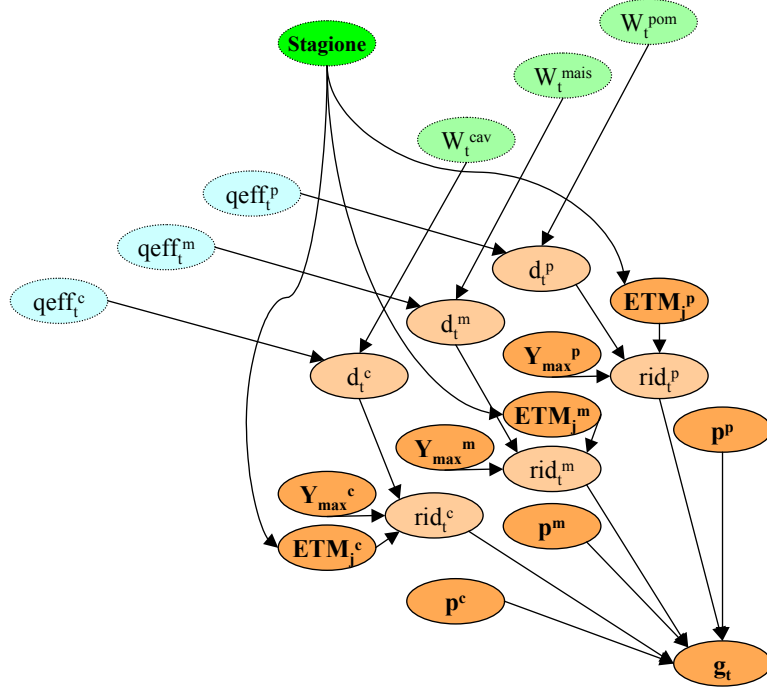


Figura 8-9: Grafo relativo alla sottorete del blocco *Produzione*

Si ottiene così la seguente

$$Y_m - Y_a = \sum_{t=1}^{365} [K_{j(t)} \bullet (ETM_t - ETA_t)] \quad (8.12)$$

Questa formula permette di associare ad un certo valore di deficit di evapotraspirazione $ETM_t - ETA_t$ (che assumiamo equivalente al deficit irriguo $(W_t^i - q_t^i)^+$) un mancato raccolto $(Y_m - Y_a)$ cui poi associare un mancato ricavo ovvero un costo economico.

Vediamo ora i nodi del grafo di questo settore, mostrata in Fig.8-9.

d_t^i : **deficit coltura i-ma all'istante t** E' calcolato come differenza in metri cubi tra la domanda irrigua della coltura W_t^i e l'acqua fornitale q_t^i .

Y_{max}^i (ingresso) E' il parametro Y_m usato nella (8.8), riferito alla coltura i-ma. Tale parametro è fortemente incerto e dipende da molti fattori (tipo di semente, di terreno, di clima...); per questo è rappresentato tramite una distribuzione di probabilità.

ETM_j^i (ingresso) E' il parametro ETM_j usato nella (8.8), riferito alla coltura i-ma. Equivale alla sommatoria sul periodo corrispondente alla fase j di W_t^i .

rid_t^i E' la quota di riduzione di raccolto dovuta alla fallanza irrigua determinatasi all'istante t . Viene calcolata come

$$rid_t^i = K_{j(t)}^i \bullet (ETM_t - ETA_t) \quad (8.13)$$

di modo che la sua sommatoria su un anno, vista la (8.12) dia la perdita annuale di raccolto:

$$\sum_{t=1}^{365} rid_t^i = \sum_{t=1}^{365} [K_{j(t)}^i \bullet (ETM_t - ETA_t)] = Y_m - Y_a \quad (8.14)$$

p^i (ingresso) Questo nodo rappresenta il prezzo di vendita medio annuo della coltura i-ma. Anche questo parametro è fortemente incerto, dipendono dalle dinamiche economiche di domanda ed offerta, ed è quindi rappresentato tramite una pdf.

g_t (uscita) Il nodo g_t rappresenta la perdita economica connessa alla riduzione di raccolto nell'istante t delle diverse colture; esso viene calcolato implementando la formula seguente:

$$g_t = \sum_i (p^i \bullet rid_t^i) \quad (8.15)$$

Sommando la (8.15) su un anno si ottiene:

$$g = \sum_{t=1}^{365} \sum_i (p^i \bullet rid_t^i) = \quad (8.16a)$$

$$= \sum_i p^i \bullet \sum_{t=1}^{365} rid_t^i \quad (8.16b)$$

viste la (8.13) e la (8.14) si ottiene quindi

$$g = \sum_i p^i \bullet (Y_m - Y_a) \quad (8.17)$$

che è il costo economico corrispondente alla riduzione annuale di raccolto, ovvero esattamente ciò che si voleva.

8.4 Lo riempimento delle CPT

Come ogni altro tipo di modello anche la rete Bayesiana (in Fig.8-10 è mostrata la BBN completa) contiene dei parametri: essi sono i valori di probabilità contenuti nelle CPT. Tuttavia la taratura di una rete come questa differisce da quella di un normale modello stocastico.

Normalmente un modello viene tarato basandosi su serie di dati rilevati, facendo in modo che i valori generati dal modello siano il più possibile simili a quelli storicamente osservati (metodo dei minimi quadrati, di massima verosimiglianza etc.). Nel caso di una rete Bayesiana come quella da noi implementata ciò non è possibile perchè non esistono dati sul tipo di fenomeni che intende rappresentare, come ad esempio la scelta di aderire o meno al consorzio. Abbiamo quindi utilizzato tecniche di taratura diverse a seconda del nodo considerato:

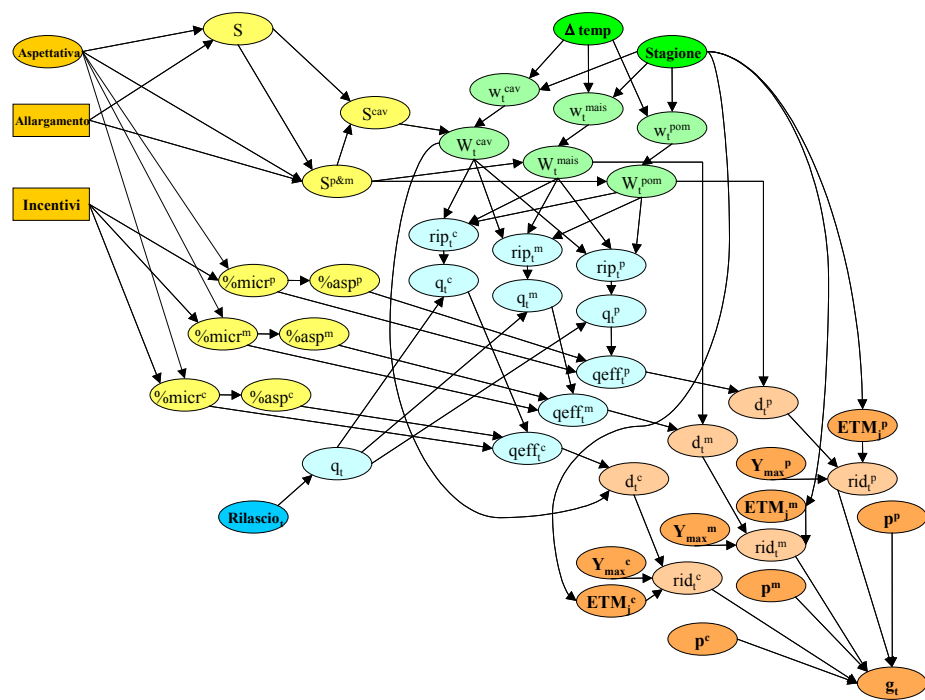


Figura 8-10: BBN dell'intero distretto irriguo

Semplici calcoli algebrici

Alcuni nodi dipendono in maniera deterministica dai propri nodi genitore, ad esempio la domanda idrica dipende algebricamente da fabbisogno e superficie coltivata:

$$W_t^i = w_t^i \bullet S^i \quad (8.18)$$

In casi come questo la pdf viene generata automaticamente da Hugin implementando la formula e discretizzandola sugli stati del nodo figlio.

Interazione con esperti di settore

In alcuni casi i dati necessari allo riempimento di una CPT possono essere forniti da un'esperto di settore, il quale, conoscendo a fondo il fenomeno da rappresentare, è in grado di descriverlo statisticamente (ad esempio un agronomo può fornire dati sui fabbisogni delle piante nelle loro diverse fasi di crescita);

Interviste con i portatori di interesse (nel nostro caso gli agricoltori)

Alcuni nodi dipendono dai rispettivi nodi genitore in una maniera che non è descrivibile da alcun tipo di relazione matematica e per la quale non esistono esperti di settore cui rivolgersi. Per tali nodi, come ad esempio S , S^i , $\%micr^i$, l'unica possibilità è rilevare i dati direttamente dagli unici soggetti che li conoscono: i portatori di interesse stessi. Per fare questo bisogna intervistare ogni soggetto, ad esempio ogni agricoltore, adottando la seguente procedura:

- l'esperto spiega al soggetto intervistato l'intera rete e si assicura che egli ne abbia compreso bene i meccanismi e l'uso che se ne intende fare;
 - viene fissata un'evidenza sui nodi genitore del nodo che si vuole tarare (es. *Aspettativa*, *Allargamento* ed S nel caso di taratura del nodo $S^{p\&m}$);

- il soggetto intervistato dichiara quale stato sceglierebbe, ad esempio la percentuale di superficie da lui coltivata che dedicherebbe alla rotazione mais-pomodoro posto *Allargamento*=no, *Aspettativa*=media; lo stakeholder può anche dichiarare la probabilità con cui sceglierebbe più di uno stato;
- gli ultimi due passi vanno ripetuti per tutte le possibili combinazioni di stato dei nodi genitore;

Una volta intervistati tutti gli stakeholders (o il campione che se ne è deciso di considerare) si risale alla CPT tramite strumenti statistici, calcolando la probabilità media corrispondente ad ogni cella della CPT, pesando eventualmente le opinioni dei differenti soggetti in base alla loro importanza (ad esempio l'ampiezza della superficie irrigua da essi posseduta).

8.4.1 Come abbiamo proceduto

Per quanto riguarda i numerosi nodi puramente algebrici, le cui formule sono già state esposte nel paragrafo 8.3, abbiamo semplicemente implementato in Hugin le formule stesse.

Più problematico è stato lo riempimento di quei nodi socio-economici sottoposti ad estrema soggettività ed intrinseca incertezza presenti soprattutto nel settore *Comportamento degli agricoltori* (vedi par.8.3.1).

Lo studio da noi portato avanti infatti, pur nel contesto di un progetto finanziato dalla Comunità Europea ed appoggiato dalla Regione Abruzzo, è pur sempre uno studio di tipo accademico, il quale non ha pretesa di arrivare a risultati effettivamente implementabili, ma solo di dare ai diversi portatori di interesse presenti sul territorio, ed alle entità politiche coinvolte, un'idea di cosa sarebbe possibile fare e di quali risultati si potrebbero raggiungere nel caso si attivasse la volontà politica di procedere ad un reale processo di negoziazione fra le parti in causa. Per questo motivo non abbiamo avuto modo di attivare quell'intensa, approfondita e capillare interazione con i portatori di interesse,

specialmente con gli agricoltori, che sarebbe stata necessaria alla taratura di alcuni nodi della rete.

Abbiamo supplito a ciò utilizzando le informazioni che l'ing. Catucci, rappresentante del CBN e quindi esperto del settore, ci ha fornito sull'attuale utilizzo del suolo, sui metodi di irrigazione e sulla distribuzione delle colture attuali; partendo da questi dati abbiamo ipotizzato come gli agricoltori reagirebbero alle variabili di pianificazione (*Allargamento*, *Incentivi*) creando quindi un modello non vero ma verosimile, che è poi ciò che ci interessa ottenere al livello in cui è portato avanti questo studio.

Abbiamo per esempio ipotizzato che un aumento di aspettativa comporti un aumento di S, poichè aumenterà il numero di agricoltori convinti che aderire al consorzio sia conveniente; contemporaneamente aumenterà la frazione di terreno dedicata alla rotazione pomodoro mais, coltivazione che ha un maggiore fabbisogno idrico ma che garantisce anche un maggiore riscontro economico.

Allo stesso modo la presenza di incentivi per le tecniche irrigue porterà ad un aumento della quota di terreno irrigata a microirrigazione.

Il nodo *Aspettativa*

La taratura di questo nodo è particolare. Essendo un nodo di ingresso vi si deve porre un'evidenza, ma tale valore non può essere definito a priori dato l'altissimo grado di soggettività in gioco. L'aspettativa degli agricoltori dipende infatti da quella che è stata la performance del CBN negli anni passati, ma come abbiamo visto una BBN non può essere ciclica e quindi neanche dinamica. Del resto a noi interessa il modello del distretto irriguo a regime, non il transitorio durante il quale gli agricoltori valuteranno se aderire o meno. Togliamo allora questo nodo in maniera ricorsiva: ipotizziamo un valore di partenza medio e simuliamo la gestione del sistema: se vengono creati grossi deficit il valore di aspettativa idrica impostato deve essere abbassato, altrimenti si prova ad alzarlo, cercando di raggiungere la convergenza in un numero finito di tentativi.

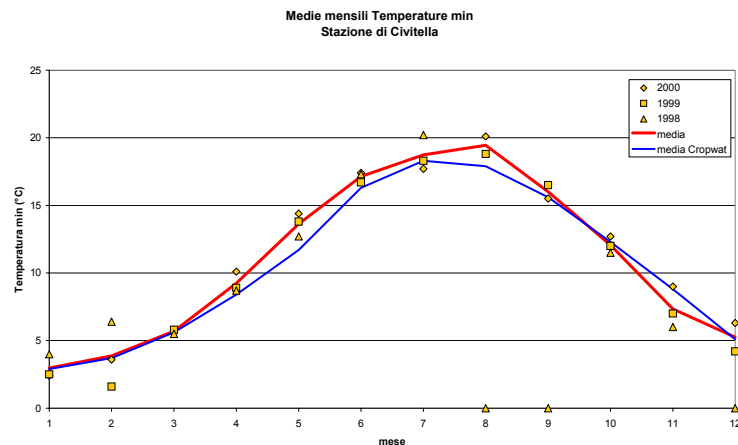


Figura 8-11: Traiettorie di T_{\min} per gli anni 1998,1999 e 2000; traiettoria media e traiettoria media di Cropwat

Il nodo Δ Temperatura

Per tarare questo nodo è necessario ricorrere ad analisi statistiche di serie storiche di temperatura. Purtroppo gli unici dati di cui siamo venuti in possesso sono quelli trovati su Internet all'interno del sito dell' A.R.S.S.A. Abruzzo (Agenzia Regionale per i Servizi di Sviluppo Agricolo) forniti dal Centro Agrometeorologico Regionale. Tali dati consistono in annali per i soli anni 1998, 1999 e 2000 per le diverse stazioni meteorologiche della regione oltre ad analisi qualitative della climatologia dell'area. In Fig. 8-11 e 8-12 sono mostrate le tre serie disponibili, la traiettoria media tra queste e la traiettoria media usata da Cropwat (serie storica fornita dalla plugin Climwat, che contiene dati climatici per pressochè qualsiasi città del pianeta). La scarsità di dati disponibili non consente un'analisi statistica significativa, decidiamo perciò di considerare un ΔT sia positivo che negativo di $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, tanto per T_{\min} che per T_{\max} . Associamo arbitrariamente a tali valori una probabilità del 15%. La probabilità che la temperatura media mensile sia nella media risulterà quindi pari al 70%.

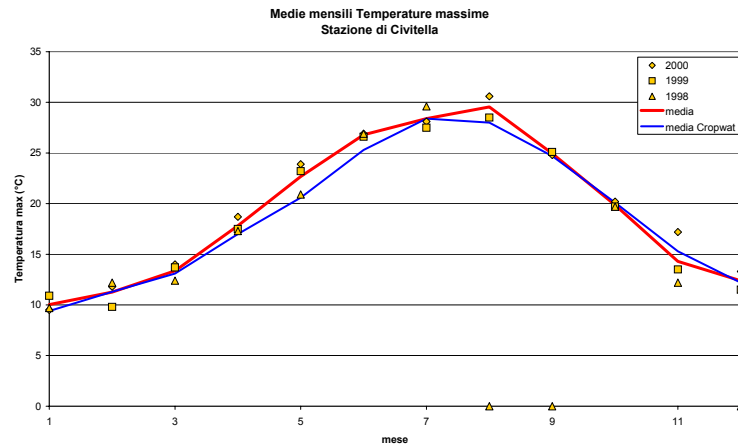


Figura 8-12: Traiettorie di T_{\max} per gli anni 1998,1999 e 2000; traiettoria media e traiettoria media di Cropwat

Il nodo w_t^i : utilizzo di Cropwat

Per generare i nodi w_t^i abbiamo utilizzato come detto il software Cropwat. Vediamo di cosa si tratta.

Il software Cropwat è un programma per la pianificazione e gestione di sistemi di irrigazione, sviluppato dal Land and Water Development Division della Fao [10]. Le sue funzioni comprendono il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento, del fabbisogno idrico delle colture e degli schemi di irrigazione.

Il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) è basato sul metodo FAO Penman-Monteith e necessita come input dei dati meteo-climatici della zona (medie decadal di temperatura massima e minima, umidità, radiazione solare e velocità del vento).

Il fabbisogno idrico ottimale delle colture viene poi calcolato da ET_0 tramite un coefficiente K_c dipendente dal tipo di pianta considerato.

In fig. 8-13 vediamo le traiettorie di fabbisogno (espresso in mm/die) generate da Cropwat per le i tre tipi di coltura considerati: mais, pomodoro, cavolfiore primaverile ed

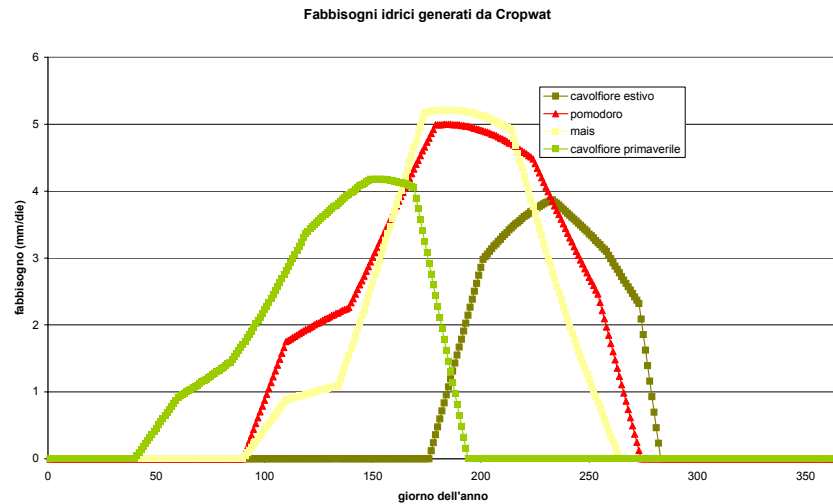


Figura 8-13: Traiettorie di fabbisogno (mm/die di acqua) per le colture considerate estivo.

Il nodo Per ogni coltura abbiamo generato altre due traiettorie oltre a quella menzionata nel paragrafo precedente: queste sono state calcolate abbassando ed alzando di $2\text{ }^{\circ}C$ entrambe T_{max} e T_{min} durante tutto l'anno (vedi Par.8.4.1).

Dopodichè abbiamo discretizzato le traiettorie temporalmente seguendo il criterio di garantire che all'interno di ciascun periodo nessuno dei fabbisogni avesse una variazione superiore ad $1\text{ }mm/die$ (vedi Fig.8-15). Abbiamo allora diviso l'anno in 18 periodi, corrispondenti agli stati del nodo *Stagione* (vedi Par.8.3.2) e calcolato il fabbisogno medio all'interno di ogni periodo; la CPT del nodo w_t^i è stata poi riempita in modo che ad ogni combinazione di stati dei due nodi genitore *Stagione* e $\Delta temperatura$ corrispondesse il relativo fabbisogno medio.

Il settore Crescita della pianta

Il settore *Crescita della pianta* dovrebbe calcolare per ogni coltura il deficit irriguo all'istante t , la conseguente riduzione di raccolto tramite l'equazione (8.7) proposta dalla

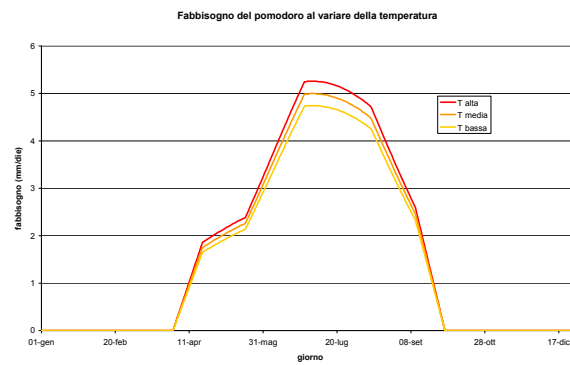


Figura 8-14: Sensibilità della traiettoria di fabbisogno del pomodoro alla temperatura

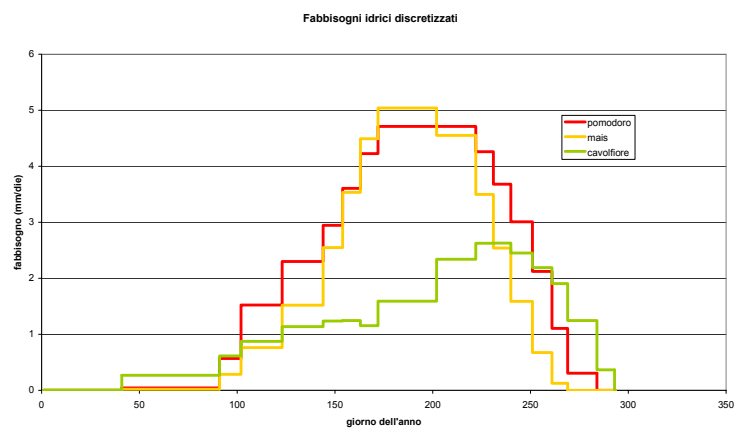


Figura 8-15:

Fao riscritta come la (8.12) ed infine il costo economico g_t . In realtà ci siamo limitati a calcolare i deficit, aggregarli ed usare tale deficit aggregato come costo per passo su cui calcolare l'indicatore usato sia in fase di ottimizzazione che di simulazione (vedi Cap.5). Questa semplificazione è stata scelta per una serie di motivi:

- i parametri k_y^i ed Y_{\max}^i sono fortemente dipendenti dall'area geografica considerata, dalla qualità del suo terreno, dal clima etc. servirebbe quindi un'estesa campagna sperimentale per determinare i valori da utilizzare, campagna che ovviamente non è stata da noi condotta;
- un'indicatore così sofisticato è difficilmente credibile e verificabile da parte degli agricoltori, i quali preferiscono confrontarsi con valori più concreti quale è appunto il deficit irriguo;
- i parametri k_y^i sono definiti per deficit presenti nella singola fase di crescita, o per sequenze di esse. Se i deficit si verificano durante tutta la stagione irrigua si deve usare un k_y medio per ogni stagione, ma a questo punto, verrebbe a cadere la variabilità con t delle conseguenze economiche di d_t^i . Minimizzare la perdita economica come calcolata nel Par.8.3.4 equivarrebbe allora a minimizzare il deficit irriguo.

8.5 Utilizzo della rete e suo inserimento in TwoLe

Il fine operativo dell'identificazione di un modello dell'utente irriguo è poter valutare quantitativamente il seguente indicatore di settore (vedi Cap. 3):

$$irr = \frac{1}{H} \sum_{t \in H} g_t(r_t) \quad (8.19)$$

$$g_t(r_t) = \sum_{i \in \text{colture}} \left[(W_t^i - q_t^i)^+ \right] \quad (8.20)$$

La rete da noi ottenuta funziona in questo modo: fissate le evidenze sui nodi relativi agli interventi, sui nodi *Aspettativa*, *Stagione* (\bar{T}) e *Rilascio* _{t} (\bar{r}) restituisce la distribuzione di probabilità sugli stati del nodo g_t per t appartenete alla stagione \bar{T} .

In TwoLe l'utente irriguo è rappresentato come un canale cui viene associato, per ogni giorno t , un costo in funzione della portata transitante r_t .

E' necessario fornire al DSS una tabella per ogni stagione T in cui ad ogni valore della variabile $Rilascio_t$ sia associato il corrispondente valore atteso del costo $E(g_t)$; TwoLe si occuperà poi di associare ad ogni istante temporale t la corrispondente tabella per la stagione T .

Abbiamo quindi generato un nuovo elemento, con funzione d'interfaccia, che ci permette di ottenere dalla rete Bayesiana queste tabelle. A tal fine abbiamo scritto un programma che implementa la seguente procedura:

- Si fissano le variabili d'intervento
 - si fissa l'evidenza sul nodo *Stagione*
 - * si fissa l'evidenza sul nodo *Rilascio* _{t}
 - * si propaga la rete e si calcola il valore atteso di g_t
 - * ripetere per ogni classe di rilascio
 - ripetere per ogni stagione.
- Salvare i risultati su file.

Il codice del programma è stato scritto in linguaggio C++ utilizzando le API di Hugin, ovvero librerie di funzioni che permettono al programma da noi creato di interfacciarsi con la rete creata in Hugin ed eseguirvi tutte le operazioni implementate dal motore di inferenza di questo software, come istanziamento, propagazione della probabilità, etc.

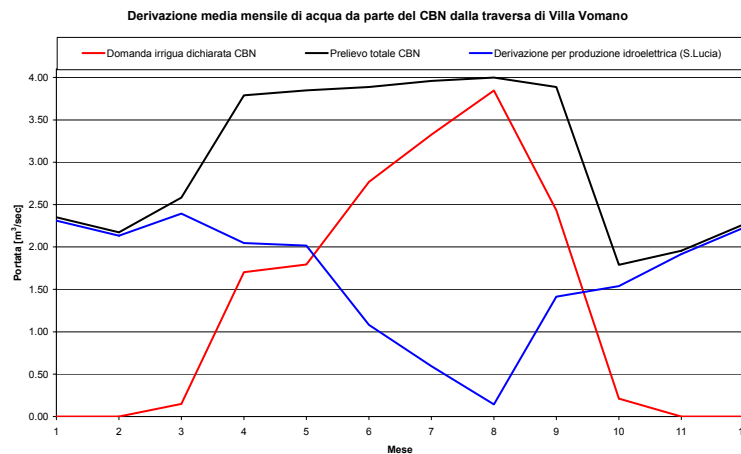


Figura 8-16:

8.5.1 Validazione della rete

Vista la particolare tecnica di taratura utilizzata per la BBN ci si potrebbe chiedere se il modello non si è allontanato troppo dalla realtà: finora infatti non abbiamo praticamente usato alcun dato misurato direttamente sulle realtà fisica. Abbiamo allora voluto verificare a posteriori che almeno lo scenario corrispondente alla situazione presente sia ben riprodotto dalla BBN da noi creata.

Gli unici dati misurati a nostra disposizione, forniti dal CBN, sono medie mensili di portata derivata alla traversa di Villa Vomano.

Nella realtà però non tutta l'acqua derivata da questa traversa viene effettivamente mandata ai consorziati del distretto irriguo: una parte viene turbinata dalla centrale di S.Lucia (gestita dal CBN medesimo) per produrre energia elettrica che a sua volta in buona parte viene utilizzata per alimentare le pompe necessarie a distribuire l'acqua su tutta l'area servita.

Abbiamo allora calcolato le medie mensili turbinate a S.Lucia e le abbiamo sottratte al prelievo totale del CBN a Villa Vomano, ottenendo la portata d'acqua utilizzata dal CBN per irrigazione (vedi Fig.8-16).

Il problema a questo punto è: come confrontare l'alternativa 0 generata dalla BBN

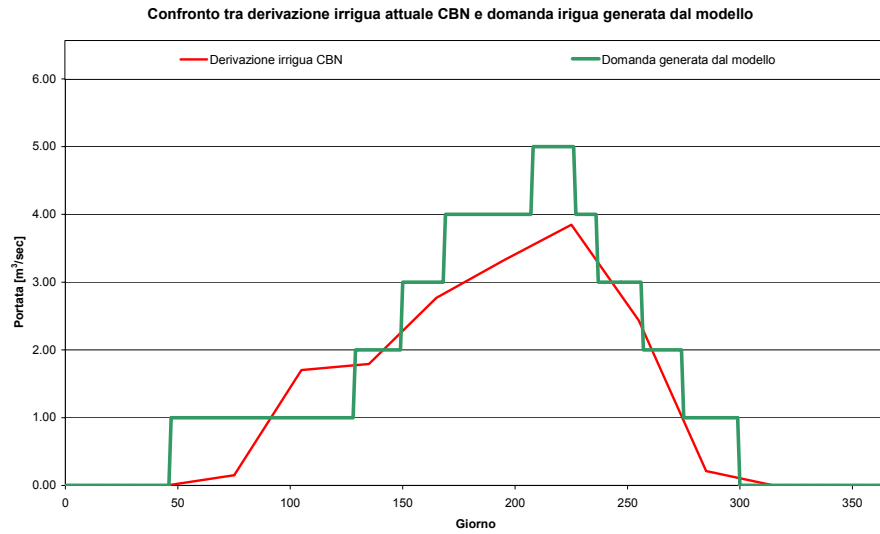


Figura 8-17: Confronto tra l'attuale derivazione a fini irrigui effettuata dal CBN all'altezza di Villa Vomano e la domanda irrigua generata dal nostro modello per lo scenario attuale

con la traiettoria di domanda irrigua dichiarata dal CBN?

Abbiamo generato una traiettoria di fornitura idrica ottimale prodotta dalla BBN prendendo per ogni stagione il più basso valore di $Rilascio_t$ che desse un valore atteso di g_t (e quindi del deficit irriguo) uguale a zero.

Il confronto tra le due traiettorie è mostrato in Fig.8-17.

Come si può vedere è presente una buona correlazione la quale consente di affermare che il modello è validato.

La presenza nella traiettoria generata di un picco estivo di $5 \text{ m}^3/\text{s}$ evidenzia il fatto che c'è un limite fisico al soddisfacimento della domanda irrigua del consorzio dovuto alla portata massima derivabile a Villa Vomano che è di $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Capitolo 9

IDENTIFICAZIONE DELLE ALTERNATIVE

Nel Cap. 4 abbiamo spiegato che la soluzione che cerchiamo sarà costituita da una combinazione di interventi scelta dai decisori tra tutte le combinazioni possibili, ad esempio l'allargamento del distretto irriguo e una contemporanea modifica della modalità di regolazione. Abbiamo adottato il termine *alternativa* per indicare una combinazione di *azioni*, cioè di interventi quantitativamente ben definiti.

L'insieme \mathcal{A} delle alternative è quindi il seguente

$$\mathcal{A} = \left\{ A : A = (r, i, d, c) \quad \text{con } r \in \mathcal{R}, i \in \mathcal{I}, d \in \mathcal{D}, c \in \mathcal{C} \right\} \quad (9.1)$$

dove:

- \mathcal{R} è l'insieme dei prelievi per l'acquedotto del Ruzzo
- \mathcal{I} è l'insieme degli incentivi all'adozione di tecniche irrigue più efficienti
- \mathcal{D} è l'insieme dei valori di DMV
- \mathcal{C} è l'insieme degli ampliamenti del CBN
- \mathcal{P} è l'insieme delle politiche di regolazione in corrispondenza della quaterna (r, i, d, c) . ■

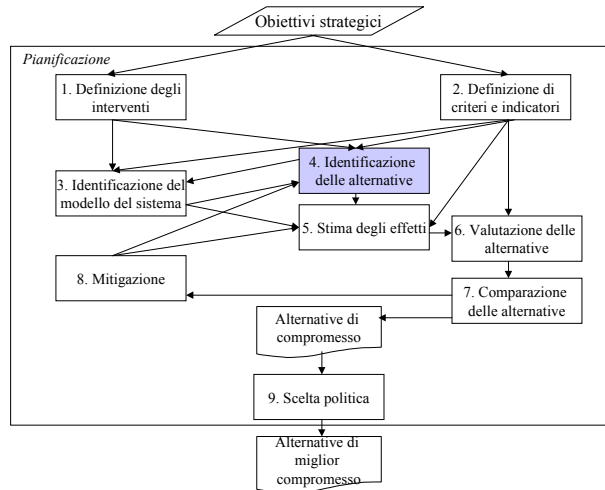


Figura 9-1: Processo decisionale

Definiamo *scenario* una quaterna (r, i, d, c) . L'unione di uno scenario e di una politica definisce un'alternativa.

Abbiamo visto nel Cap.2 che l'insieme \mathcal{A} contiene infinite alternative, dal momento che sono infinite le possibili politiche di regolazione.

Nei prossimi paragrafi daremo una definizione completa della politica di regolazione p e di alcune sue caratteristiche; successivamente descriveremo il metodo che utilizzeremo per calcolarla. Risulteranno così definiti tutti gli elementi che individuano un'alternativa A .

9.1 La politica di regolazione

Una *politica di regolazione* p [16] è una sequenza temporale

$$p = \left\{ m_t(\cdot); t = 0, 1, \dots \right\} \quad (9.2)$$

in genere periodica, di *leggi di controllo* $m_t(\cdot)$, ciascuna delle quali fornisce l'insieme dei controlli u_t nota l'*informazione* \mathfrak{S}_t disponibile all'istante t , cioè

$$u_t = m_t(\mathfrak{S}_t) \quad (9.3)$$

L'informazione consiste nell'insieme delle variabili che è possibile conoscere al tempo t , come l'invaso del serbatoio s_t o, ad esempio, lo stato z_t delle utenze (se si decide di rappresentare anche questa parte del sistema con un modello dinamico) o l'informazione idro-meteorologica I_t rilevata nel bacino imbrifero.

Aumentando la dimensione del vettore di informazioni \mathfrak{S}_t ci si attende che le prestazioni della politica migliorino. Contemporaneamente aumentano anche i costi: i costi di gestione, perché in ogni istante t tutte le componenti di \mathfrak{S}_t devono essere misurate e occorre quindi disporre delle necessarie reti di misura, e i costi di progetto della politica dato che il tempo di calcolo per la soluzione del problema di controllo aumenta esponenzialmente con la dimensione di \mathfrak{S}_t . Nel nostro modello l'unica variabile di stato è costituita dall'invaso del serbatoio di Campotosto s_t e non viene considerato alcun tipo d'informazione idro-meteorologica. Di conseguenza il vettore d'informazione \mathfrak{S}_t è costituito dalla sola variabile s_t .

Mostriamo ora i motivi per cui riteniamo opportuno definire la modalità di regolazione attraverso una politica piuttosto che con una semplice sequenza di controlli.

Se gli afflussi fossero deterministici (se cioè fossero noti con certezza i valori che assumeranno in ogni istante futuro), fissato il controllo u_0 , l'erogazione effettiva sarebbe univocamente determinata già al tempo 0, come pure l'invaso s_1 . Questo significa che già al tempo 0 potremmo definire il controllo u_1 , come pure quelli di tutti gli istanti successivi. Se dunque l'afflusso fosse deterministico e conoscessimo la sequenza $\{\bar{a}_t\}_{t=0,1,\dots}$ degli afflussi che si realizzeranno, potremmo stabilire la sequenza dei controlli ottimi $\{\bar{u}_t\}_{t=0,1,\dots}$ e la sequenza dei livelli $\{\bar{s}_t\}_{t=0,1,\dots}$ che ne consegue. Supponiamo di aver scelto la sequenza dei controlli e sia quindi \bar{u}_0 il primo che applichiamo. Gli afflussi in realtà non sono deterministici e quindi non è detto che l'invaso s_1 all'istante 1 sia proprio l'invaso

\bar{s}_1 ipotizzato. Se non lo fosse, il regolatore si troverebbe in difficoltà: dovrebbe infatti applicare il controllo \bar{u}_1 da noi suggeritogli, ma si renderebbe conto che tale decisione è stata presa facendo riferimento a una situazione che non è quella da lui osservata. E' per questo motivo che doviamo fornirgli una decisione per ogni possibile situazione, cioè per ogni valore di s_1 ; in altre parole, fornirgli una legge di controllo e quindi una politica.

In conclusione, il controllo in anello aperto (cioè l'assegnare a priori la successione dei controlli da applicare in ciascuno degli istanti futuri) sarebbe una modalità di controllo razionale solo se gli afflussi fossero deterministicamente noti; poiché non lo sono, la modalità razionale è adottare una politica, cioè specificare cosa fare per ogni situazione che potrebbe presentarsi.

Nell'esempio precedente abbiamo supposto che la regolazione avesse un unico obiettivo e per questo abbiamo potuto parlare di decisione e di politica ottima. Nel caso in cui si debba tenere conto di diversi obiettivi, fra loro conflittuali, non esiste una sola politica ottima, ma tante politiche diverse, a ciascuna delle quali corrispondono diversi valori degli obiettivi. Si pone quindi il problema di come progettare tutte le politiche di cui tenere conto nel processo decisionale.

Politiche ammissibili e politiche efficienti.

Diamo ora qualche definizione per caratterizzare il tipo di politica che siamo interessati ad individuare.

Una politica p appartiene all'insieme delle politiche ammissibili \tilde{P} se i relativi controlli $u_t = m_t(\mathfrak{F}_t)$ appartengono all'insieme di controlli ammissibili \tilde{U}_t , ovvero l'insieme di controlli la cui applicazione non porta a violare i vincoli imposti dalla struttura fisica del sistema. Nei capitoli 7 e 8 abbiamo tradotto tale struttura in un modello matematico. Una politica è quindi ammissibile se rispetta l'insieme delle equazioni che costituiscono tale modello.

Una politica p è efficiente, e appartiene a P^{eff} , quando, tra le politiche ammissibili, non esiste alcuna politica che fornisca una prestazione migliore di p rispetto ad almeno

un obiettivo, senza peggiorarne uno degli altri. Tutte le politiche non efficienti (dette anche *dominate*) possono essere eliminate dal processo decisionale, poiché nessuno sarà mai interessato ad esse. Per ogni insieme (r, i, d, c) dato, noi vogliamo ottenere, tra le politiche ammissibili, tutte e sole le politiche efficienti, il cui insieme è detto *frontiera di Pareto* e può essere individuato impostando e risolvendo un opportuno *problema di controllo ottimo a molti obiettivi*, che definiamo più avanti.

Politiche a più valori

Anche se l'impostazione basata sulla politica appare molto razionale, essa è però di fatto fallita, poiché poche sono state le applicazioni in cui è stata effettivamente adottata. Le ragioni del fallimento sono molte e complesse; ci limitiamo per ora ad illustrarne una sola, legata alla definizione stessa di politica.

La definizione presentata nel paragrafo precedente è quella comunemente adottata nella *Teoria del Controllo*, dove il compito della politica è di controllare “automaticamente” un dato sistema. Quando la politica è utilizzata nella gestione di una risorsa naturale, come ad esempio un lago, non le si chiede però di gestire “automaticamente” il sistema, ma solo di aiutare il gestore del sistema, suggerendogli delle decisioni valide, lasciando a lui l'ultima parola sulla decisione da adottare. In questa prospettiva appare quindi più razionale che la politica non proponga un solo controllo $u_t = m_t(\mathfrak{F}_t)$, ma l'insieme $U_t = M_t(\mathfrak{F}_t) \subseteq \tilde{U}_t$ di tutti i controlli equivalenti [3], cioè di tutti i controlli che forniscono, nel lungo periodo, pari prestazioni del sistema rispetto agli obiettivi del problema di controllo. Il gestore può così scegliere nell'insieme U_t il controllo u_t che a suo parere meglio risponde alla situazione corrente.

Nel nostro caso ad esempio lasciamo ad Enel la libertà di scegliere il giorno t il controllo $u_t \in U_t$ che più ritenga opportuno alla luce di quei fattori che non abbiamo modellizzato nel nostro studio. Da questo momento in poi quando ci riferiremo ad una politica p intenderemo sempre una politica a più valori (9.4).

$$p = \left\{ M_t(\cdot); t = 0, 1, \dots \right\} \quad (9.4)$$

9.2 Il problema di controllo

Caratterizziamo ora il problema la cui risoluzione permette d'individuare l'insieme delle politiche efficienti.

9.2.1 Criteri

Per individuare gli obiettivi rispetto ai quali progettare le politiche bisogna in primo luogo definire i criteri di cui si vuole tenere conto. Nel Cap. 5 sono stati definiti i criteri, uno per ogni settore, che verranno utilizzati per valutare gli effetti delle alternative. D'acchito saremmo quindi portati a pensare che le politiche debbano essere progettate tenendo conto di tutti i criteri di settore. Questa intuizione non è però corretta, in quanto valutare le alternative significa concentrarsi sull'insieme (r, i, d, c, p) , mentre il progetto delle politiche riguarda solo una delle sue componenti (p) e avviene avendo fissato le altre quattro (r, i, d, c): non è quindi detto che tutti i criteri che sono necessari nel primo caso lo siano anche nel secondo.

L'idea di non utilizzare nel progetto delle politiche tutti i criteri considerati in valutazione non nasce solo da motivi di carattere teorico, ma anche dalla difficoltà pratica di risolvere un problema di controllo ottimo con un numero elevato di obiettivi. Infatti, il tempo di calcolo necessario a individuare la frontiera di Pareto, cresce esponenzialmente con il numero di criteri (e quindi di obiettivi) considerati. È dunque necessario che questo numero non sia troppo elevato. Dovremo pertanto scegliere, all'interno dell'insieme \mathcal{C} dei criteri di settore, un sottoinsieme \mathcal{C}_c di criteri, detti *criteri di controllo*.

Abbiamo scelto di strutturare la ricerca di politiche utilizzando due criteri: la *produzione di energia* (settore idroelettrico) e la *produzione di biomassa vegetale* (settore irriguo). La scelta è ricaduta su questi due settori dato che fra essi sorgono le maggiori

confluitività all'interno del sistema. I settori ambiente e fornitura idropotabile sono stati considerati all'interno del modello, attraverso i vincoli posti sui minimi rilasci (vedi Cap.6). Il livello di soddisfazione di questi settori dipende da tali valori e non dalla politica ottenuta. Ciò rispecchia la situazione reale, infatti ricordiamo che i DMV e il prelievo del Ruzzo sono applicati come vincoli legali che il gestore idroelettrico è tenuto a garantire.

9.2.2 Indicatori

L'indicatore di controllo di un settore deve essere costruito a partire dai rispettivi *indicatori* di settore definiti nel capitolo 5.

Definiamo come primo elemento la durata dell'orizzonte h su cui vogliamo valutare il sistema, dato che da essa dipenderà la forma degli indicatori di controllo. Si presti attenzione al fatto che questa è la lunghezza dell'orizzonte con cui vengono progettate le politiche, ma non è necessariamente anche quella da utilizzarsi per stimarne gli effetti (vedi Cap.10).

Il caso più semplice consiste nel considerare un orizzonte temporale finito. In questo caso la forma degli indicatori di controllo è la seguente

$$i = \sum_{t=0}^{h-1} g_t(s_t, \mathbf{u}_t, \varepsilon_{t+1}) + g_h(s_h) \quad (9.5)$$

dove la funzione $g_h(\cdot)$ è detta penale sullo stato finale ed esprime il costo dovuto al fatto di trovarsi nell'istante finale nello stato s_h . Assumere un orizzonte finito e $g_h(\cdot)$ identicamente nulla significa che non siamo interessati a ciò che accade dopo l'istante h : dall'istante successivo per noi è come se il sistema non esistesse più. È quindi molto probabile che la politica, approssimandosi al termine dell'orizzonte, sfrutti a fondo la risorsa, ad esempio svuoti il lago. La scelta di un orizzonte finito è dunque accettabile solo se il sistema che si considera ha realmente vita finita, cosa che non è vera per il Vomano, a meno che non si specifichi la penale $g_h(\cdot)$, in modo che essa rifletta corret-

tamente le aspettative che riponiamo sul periodo che si estende oltre h sino all'infinito. Quest'operazione è però in genere tutt'altro che facile e rischia di essere molto arbitraria.

Quando l'interesse per il sistema si estende su un futuro indefinito, come nel nostro caso, è più logico considerare un orizzonte infinito, cioè assumere che h tenda all'infinito. Su un tale orizzonte il valore di i tende anch'esso all'infinito, qualsiasi sia la traiettoria considerata, e l'indicatore perde così di significato. Per risolvere questa difficoltà ci sono due vie alternative. La prima consiste nel definire un *tasso di sconto* γ con cui scontare i costi futuri, così che l'indicatore assume la seguente forma

$$i = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{\tau=0}^t \left(\frac{1}{1 + \gamma} \right)^{\tau} g_{\tau}(s_{\tau}, \mathbf{u}_{\tau}, \varepsilon_{\tau+1}) \quad (9.6)$$

Essa implica che i costi nel futuro prossimo sono più importanti dei costi nel futuro remoto. Si parla in questo caso di *orizzonte infinito con tasso di sconto*. La seconda consiste nel considerare il *costo medio su orizzonte infinito*

$$i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t + 1} \sum_{\tau=0}^t g_{\tau}(s_{\tau}, \mathbf{u}_{\tau}, \varepsilon_{\tau+1}) \quad (9.7)$$

che non discrimina tra costi nel futuro prossimo e nel futuro remoto. La scelta tra la (9.6) e la (9.7) dipende dalla sensibilità ai costi futuri mostrata dagli esperti di settore e dal tipo di grandezze rispetto alle quali sono definiti gli indicatori. Noi abbiamo deciso di adottare il costo medio su orizzonte infinito dato che alcuni dei nostri indicatori definiscono costi non monetari a cui non riterremmo opportuno associare un tasso di sconto.

Abbiamo ora gli elementi per definire i due indicatori di controllo: per il settore idroelettrico il *Ricavo lordo medio su orizzonte infinito* (9.8)

$$i_{Enel} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t + 1} \sum_{\tau=0}^t \sum_{c \in \text{centrali}} R_{\tau}(E_c(q_{\tau}^c)) \quad (9.8)$$

e per il settore irriguo il *deficit irriguo aggregato medio su orizzonte infinito* (9.9)

$$i_{irr} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t+1} \sum_{\tau=0}^t \sum_{i \in colture} \left[(W_t^i - q_t^i)^+ \right] \quad (9.9)$$

Per identificare ognuno di essi sembrerebbe necessario individuare infinite funzioni di costo per passo. Si può però ridurre l'onere assumendo che il costo per passo sia una funzione periodica del tempo, di periodo T pari a un anno, ovvero

$$g_t(\cdot) = g_{t+kT}(\cdot) \quad , \quad t = 0, 1, \dots; \quad k = 1, 2, \dots \quad (9.10)$$

Ciò significa che, per ogni indicatore, dobbiamo individuare solo T funzioni. Questa ipotesi si fonda sul fatto che tutte le funzioni $f_t(\cdot)$ che definiscono il modello del sistema idrico possono essere ritenute periodiche, con periodo pari appunto a T :

$$f_t(\cdot) = f_{t+kT}(\cdot) \quad (9.11)$$

9.2.3 Obiettivi

Il sistema su cui operiamo non è deterministico, in quanto esso contiene variabili stocastiche in ingresso. Una variabile y_t è detta *stocastica* quando non è noto il valore che essa assume, ma solo la sua distribuzione di probabilità Φ_t .

La presenza di elementi di stocasticità fa sì che, anche quando la politica p sia stata definita, i valori degli indicatori di controllo i_k , $k = irr, Enel$, siano stocastici, e non forniscano un valore deterministico utilizzabile per creare un ordinamento delle politiche ottenute. Possiamo però ottenere un ordinamento se consideriamo di ciascun indicatore una statistica J_k

$$J_k = J_k(p) \quad k = irr, Enel \quad (9.12)$$

che ne filtri la stocasticità, giacché questa risulta essere una funzione deterministica della politica. L'applicazione di una statistica agli indicatori di controllo dà luogo a una funzione obiettivo.

La stocasticità è indotta nel nostro caso dai tre afflussi che abbiamo deciso di descrivere con modelli AR(0) ciclostazionari (vedi Cap. 7). Per ogni giorno t disponiamo quindi della distribuzione di probabilità Φ_t dei disturbi; possiamo quindi utilizzare come statistica il *valore atteso*, definito in letteratura come *criterio di Laplace*. Definiamo pertanto le due funzioni obiettivo da minimizzare:

$$J_k(p) = E_{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots} [i_k(\cdot)] \quad k = irr, Enel \quad (9.13)$$

9.2.4 Formalizzazione

Abbiamo individuato tutti i componenti che costituiscono il problema di controllo e possiamo ora darne una definizione formale e completa.

$$p = \arg \min_p [J_{Enel}(p), J_{irr}(p)] \quad (9.14a)$$

soggetta ai vincoli

$$s_{t+1} = f_t(s_t, \mathbf{u}_t, \varepsilon_{t+1}) \quad t = 0, 1, \dots \quad (9.15)$$

$$\mathbf{u}_t \in M_t(s_t) \subseteq \tilde{U}_t(s_t) \quad t = 0, 1, \dots$$

$$\varepsilon_{t+1} \sim N(0, 1) \quad t = 0, 1, \dots$$

$$p = \left\{ M_t(\cdot); \quad t = 0, 1, \dots \right\}$$

Poichè i due obiettivi siano conflittuali non esiste un'unica politica che li minimizzi entrambi ma diverse politiche che danno luogo a diverse situazioni di compromesso; ciò che ci interessa è l'insieme di tutte le politiche efficienti, ovvero la frontiera di Pareto. E' necessario a tal fine ricondurre il problema ad un insieme di problemi ad un solo obiettivo, la soluzione di ciascuno dei quali fornirà una particolare politica efficiente. Ciò si ottiene utilizzando il *Metodo dei pesi*, considerando cioè un obiettivo aggregato \bar{J} , definito come somma pesata degli obiettivi J_k

$$\bar{J} = \sum_{k=irr, Enel} \lambda_k J_k \quad (9.16)$$

dove i parametri λ_k sono pesi, che soddisfano la seguente condizione

$$\sum_{k=irr, Enel} \lambda_k = 1 \quad (9.17)$$

Il problema (9.14a, 9.15) è quindi equivalente alla seguente famiglia di problemi, parametrica nel vettore $\boldsymbol{\lambda} = |\lambda_k|$

$$p = \arg \min_p [\lambda_{irr} J_{irr}(p) + \lambda_{Enel} J_{Enel}(p)] \quad (9.18)$$

soggetti ai vincoli

$$s_{t+1} = f_t(s_t, \mathbf{u}_t, \boldsymbol{\varepsilon}_{t+1}) \quad t = 0, 1, \dots \quad (9.19)$$

$$\mathbf{u}_t \in M_t(s_t) \subseteq \tilde{U}_t(s_t) \quad t = 0, 1, \dots$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{t+1} \sim N(0, 1) \quad t = 0, 1, \dots$$

$$p = \left\{ M_t(\cdot); \quad t = 0, 1, \dots \right\}$$

Per semplicità di linguaggio utilizzeremo nel seguito l'espressione *generare una politica* per indicare la soluzione del problema di controllo ottimo ad un solo obiettivo che la definisce. Il metodo di risoluzione di questo problema consiste in un algoritmo di programmazione dinamica; parleremo di questo nell'appendice B.

9.3 Individuazione delle alternative

Vediamo ora il procedimento adottato per generare le alternative.

Fissiamo una quadrupla di interventi normativi e strutturali $(\bar{r}, \bar{i}, \bar{d}, \bar{c})$, ovvero uno

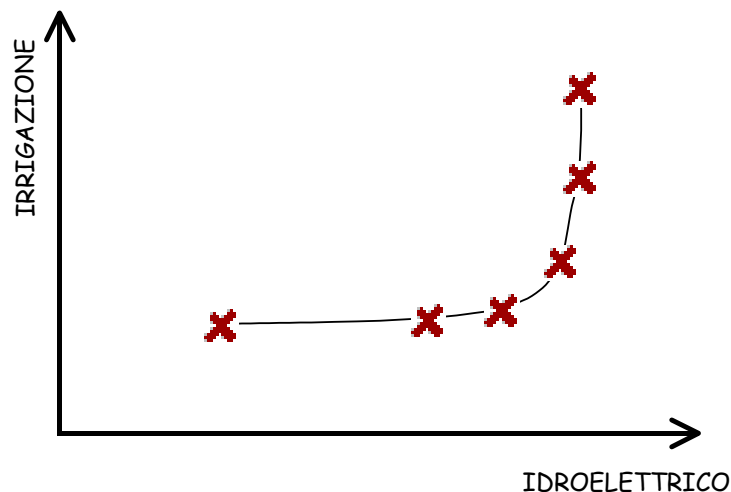


Figura 9-2: Frontiera di pareto per un fissato scenario; ad ogni punto corrisponde una diversa politica, calcolata per un diverso valore dei pesi λ^i

scenario; fissiamo un vettore λ^i di pesi e conseguentemente anche l'equazione obiettivo (9.18). Possiamo ora generare la politica p^i , ottima rispetto all'obiettivo aggregato considerato, le cui prestazioni corrispondono ad un punto della frontiera di pareto. E' così definita un'alternativa $(\bar{r}, \bar{i}, \bar{d}, \bar{c}, p^i)$.

All'atto pratico risulta impossibile calcolare le infinite politiche, e quindi le infinite alternative $(\bar{r}, \bar{i}, \bar{d}, \bar{c}, p^i)$, che costituiscono la frontiera di Pareto dello scenario considerato, poichè ovviamente non possiamo risolvere infiniti problemi. Consideriamo quindi solo un numero finito di problemi, ossia un numero finito di vettori λ^i che, se scelti in modo opportuno, ci permetteranno d'intuire la forma della frontiera di Pareto (vedi Fig. 9-2).

E' necessario ripetere questo procedimento per ogni diverso insieme (r, i, d, c) di interventi strutturali e normativi che si vuole analizzare.

Capitolo 10

RISULTATI

Nei precedenti capitoli abbiamo visto come identificare le alternative: in particolare nel Cap.9 ci siamo concentrati sul progetto delle politiche e abbiamo mostrato come quelle efficienti rispetto all'insieme degli obiettivi possano essere generate risolvendo un problema di controllo ottimo. Ad ognuna delle quaterne (r, i, d, c) di azioni strutturali e normative che vogliamo considerare possiamo così associare un insieme di politiche di controllo p efficienti in senso paretiano. Ciascuna cinquina (r, i, d, c, p) così individuata (azioni strutturali e normative, politica) costituisce un'alternativa. Per individuare le alternative che riscuotono maggior consenso tra i portatori di interesse occorre stimarne gli effetti in tutti i settori definiti nel Cap. 4. È questa la fase 5 della procedura (vedi Fig. 10-1) che come risultato produce una matrice, detta *matrice degli effetti*, il cui elemento (i, j) contiene la stima del valore del j -esimo indicatore realizzato dalla i -esima alternativa.

Successivamente abbiamo normalizzato ogni indicatore di valutazione rispetto al valore assunto nella situazione storica. In questo modo abbiamo associato ad essi un'utilità svolgendo, seppure in maniera semplificata, la fase 6 della procedura decisionale (vedi Fig. 10-1).

Nel Cap. 4 abbiamo visto che gli effetti si quantificano tramite indicatori i cui valori sono funzionali delle traiettorie F delle variabili idrologiche; queste traiettorie sono

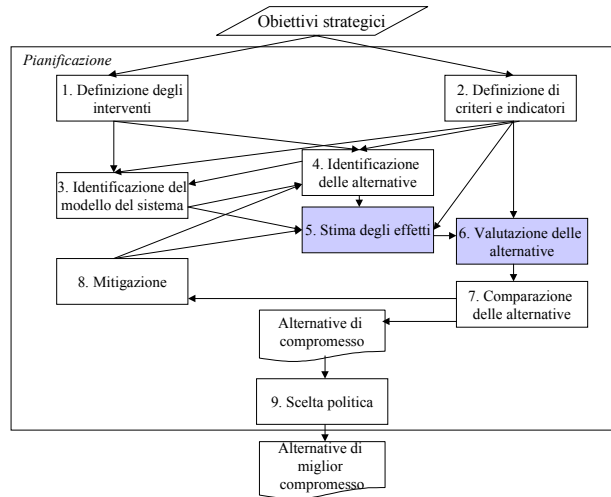


Figura 10-1: Fase 5: stima degli effetti. Fase 6: valutazione delle alternative

ottenute effettuando simulazioni sul modello del sistema.

Nel presente capitolo presentiamo le politiche efficienti ottenute e le relative simulazioni, mostrando le loro prestazioni rispetto a tutti gli indicatori, le traiettorie delle più significative variabili idrologiche e le frontiere di Pareto.

10.1 Incertezza e stocasticità

Per confrontare le diverse alternative è necessario che per ognuna di esse gli indicatori assumano un valore deterministico, ma se le traiettorie sono incerte e/o stocastiche¹ tali sono anche gli indicatori; va quindi eliminata ogni incertezza e stocasticità presente nelle traiettorie simulate.

¹Una variabile y_t è detta *stocastica* quando non è noto il valore che essa assume, ma solo la sua distribuzione di probabilità Φ_t . Una variabile è invece *incerta* quando è noto solo l'insieme dei valori Ξ_t che essa può assumere, ma non sono note le probabilità di realizzazione di ciascuno di essi.

10.1.1 Incertezza

Come visto la politica p_i dell'alternativa A_i è a più valori, nel senso che, in ogni istante di tempo t , noto l'invaso s_t , essa propone al regolatore l'insieme $M_t^i(s_t)$ di tutti i controlli \mathbf{u}_t che forniscono la “migliore” prestazione del sistema. Gli effetti che l'alternativa A_i produce sul sistema sono quantificati da indicatori i cui valori possono essere calcolati date le traiettorie F di tutte le variabili idrologiche del sistema (livello del serbatoio di Campotosto, portate turbinate e pompate dalle diverse centrali, portate deviate verso acquedotto del Ruzzo e verso il distretto irriguo) sull'orizzonte di riferimento.

Per determinare queste traiettorie si deve simulare l'evoluzione del modello del sistema modificato e regolato secondo l'alternativa considerata, simulando anche il criterio secondo cui il regolatore sceglie il controllo u_t tra tutti i controlli dell'insieme $M_t^i(s_t)$; fintanto che tale criterio non è definito infatti le traiettorie F e quindi gli indicatori rimangono variabili incerte. Definiamo allora un modello del comportamento del regolatore, che chiameremo *estrattore*.

Abbiamo ipotizzato un comportamento del regolatore tale che ad ogni istante esso scelga il controllo minore tra quelli proposti dalla politica:

$$u_t^i = \min M_t^i(s_t)$$

Tale modello è chiamato *estrattore inferiore*. Utilizzandolo ci poniamo nella situazione peggiore rispetto agli interessi del gestore idroelettrico (Enel). Un minore valore di portata turbinata infatti significa un minore guadagno immediato; contemporaneamente un minore valore di portata pompata comporta un minore guadagno futuro (ricordiamo che per Enel l'acqua pompata aumenta di valore).

Così facendo assumiamo ancora una volta un punto di vista cautelativo rispetto ad Enel, lasciandole margini di ulteriore sfruttamento della risorsa idrica.

10.1.2 Stocasticità

Abbiamo visto come trattare l'incertezza, vediamo ora come trattare le *stocasticità*.

Supponiamo per semplicità che l'incertezza sia assente, il che equivale ad assumere che la politica sia ad un solo valore.

Per analogia con quanto visto nel paragrafo precedente, è facile intuire che la stocasticità del nostro modello, dovuta alle componenti di disturbo agenti su esso, rende stocastiche anche le traiettorie F delle variabili idrologiche e di conseguenza gli indicatori da esse definite.

Esistono due approcci diversi per eliminare questa stocasticità.

Simulazioni deterministiche

Eliminiamo i modelli stocastici delle tre componenti di afflusso a_t^{Camp} , a_t^{Prov} , a_t^{Piag} , poniamo come ingressi le serie storiche di afflusso, fissiamo lo stato iniziale ($s_0 = \bar{s}$) e simuliamo l'alternativa. Attraverso questo tipo di simulazione, detta *simulazione deterministica*, possiamo valutare la performance che l'alternativa potrebbe conseguire se in futuro si ripetessero serie di afflussi eguali a quelle storicamente verificatesi. I portatori di interesse possono inoltre paragonare tale performance con quanto osservato in passato comprendendo così i vantaggi (o gli svantaggi) che potrebbero ottenere.

Simulazioni Markoviane

La stocasticità dell'afflusso rende stocastico l'invaso di Campotosto, che è la nostra unica variabile di stato. Esso sarà pertanto definito in ogni istante da un vettore π_t la cui componente i -ma rappresenta la probabilità che all'istante t la variabile di stato s_t assuma l' i -mo dei suoi possibili valori. Simulando l'alternativa A_i , con i processi stocastici d'afflusso definiti nel Cap.7, otteniamo una traiettoria di π_t .

Poiché il sistema è periodico, è possibile dimostrare che la traiettoria π_0, π_1, \dots tende, al crescere di t , ad un ciclo $\bar{\pi}_0, \bar{\pi}_1, \dots, \bar{\pi}_{T-1}$. Non è però certo che tale ciclo sia raggiunto

in tempo finito; la simulazione viene quindi arrestata quando il ciclo è “sufficientemente” ben individuato. Ciò richiede sempre un tempo finito.

Noto il ciclo, poiché gli indicatori utilizzati sono separabili, possiamo facilmente calcolarne una statistica, quale ad esempio il valore atteso (criterio di Laplace).

In tal caso si usa la seguente espressione:

$$E_{\{a_t\}_{t=1,2,\dots}} [Z_k(F)] = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} \bar{\pi}_t' \cdot E_{a_{t+1}} [g_t^k] \quad (10.1)$$

dove \mathbf{g}_t^k è il vettore definito dalla (10.2a).

$$\mathbf{g}_t^k = |g_t^k(s_t^1, \mathbf{u}_t, a_{t+1}), \dots, g_t^k(s_t^n, \mathbf{u}_t, a_{t+1})|' \quad (10.2a)$$

10.2 Scelta della serie degli afflussi

Per effettuare una simulazione deterministica di un'alternativa A_i dobbiamo disporre di una serie di afflusso, che, ovviamente, non può che essere di lunghezza finita. La finitezza della serie non costituisce però un problema in fase di stima. Quando si progetta una politica è essenziale stimarne gli effetti su un orizzonte infinito; se infatti l'obiettivo fosse definito su un orizzonte finito non verrebbe attribuito alcun valore alla risorsa oltre il termine dell'*orizzonte di progetto* e di conseguenza, avvicinandosi al termine dell'orizzonte, i controlli proposti potrebbero sfruttare troppo a fondo la risorsa. Nella stima degli effetti questo rischio, invece, non sussiste, perché le politiche sono già definite.

Dobbiamo dunque scegliere la serie di afflusso da utilizzare. I dati a nostra disposizione coprono l'arco temporale 1995-2001, tuttavia i dati per il 1996 non sono utilizzabili per via delle grosse lacune che presentano (vedi Cap.7), riducendo a 5 le serie annuali disponibili.

Abbiamo deciso di adottare il segmento 1997-2001, il quale differisce da quello su cui è stato tarato il modello per un solo anno; ciò significa valutare le performance di una politica in parte sugli stessi dati su cui è stata progettata, dando luogo a performance

migliori di quelle che si potranno verificare in futuro applicando la politica alla realtà (overfitting). Nell'ipotesi di voler procedere ad una reale negoziazione tra portatori di interesse sarebbe indispensabile ottenere serie storiche molto più lunghe, almeno di 20 anni, da dividere in serie di taratura e serie di validazione. In conseguenza del carattere teorico del presente studio ci accontentiamo dei dati fornitici da Enel ed accettiamo i risultati che ne conseguono.

10.3 Alternative considerate

- *STORIA*: valutiamo le prestazioni storicamente ottenute dal regolatore idroelettrico.
- *SCENARIO ATTUALE* : valutiamo le prestazioni che possono essere ottenute cambiando solamente la politica di gestione, senza alcun intervento nè strutturale nè normativo. Abbiamo individuato 5 politiche risolvendo 5 problemi di controllo ottimo (vedi Cap.9):
 - *Ottimo idroelettrico (1.a)*: abbiamo posto peso 1 sull'obiettivo idroelettrico e 0 su quello irriguo. Così facendo abbiamo calcolato una politica che fa esclusivamente gli interessi di Enel, come succede nella situazione storica; ricordiamo infatti che Enel ha tutti i diritti di sfruttamento della risorsa idrica.
 - *Ottimo irriguo (1.b)*: abbiamo posto peso 1 sull'obiettivo irriguo e 0 su quello idroelettrico. Questo rappresenta la situazione opposta alla precedente in cui è il CBN ad avere tutti i diritti di gestione della risorsa
 - *Lessicografico da irriguo a idroelettrico (1.c)*: abbiamo posto peso 1 sull'obiettivo idroelettrico, 0 su quello irriguo ed ottimizzato assumendo come insieme dei controlli ammissibili $\tilde{U}_t(s_t)$ l'insieme dei controlli ottimi per l'utenza irrigua $M_t^{irr}(\cdot)$ calcolati al punto precedente. Così facendo cerchiamo la politica che fornisca la migliore prestazione idroelettrica possibile senza peggiorare la prestazione irrigua rispetto al proprio ottimo.

- *Lessicografico da idroelettrico a irriguo (1.d)*: analoga e speculare alla precedente.
 - *Compromesso (1.e)*: abbiamo calcolato la politica corrispondente al vettore di pesi $[1,34]$, ovvero peso 1 sull'obiettivo idroelettrico e 34 su quello idroelettrico.
- *SCENARI PRELIEVO RUZZO*: abbiamo considerato due possibili variazioni della concessione di derivazione per l'acquedotto del Ruzzo e simulato su essi la politica di compromesso:
 - $q^{Ruzzo} = 1.4m^3/s$ (*1.e.r14*).
 - $q^{Ruzzo} = 2.1m^3/s$ (*1.e.r21*).
 - *SCENARI DMV FUCINO*: abbiamo considerato due possibili valori di DMV da imporre sul Rio Fucino e simulato su essi la politica di compromesso:
 - DMV^{Fucino} pari al 10% della portata naturale (*1.e.f10*).
 - DMV^{Fucino} pari al 30% della portata naturale (*1.e.f30*).
 - *SCENARIO MISTO*:
 - $q^{Ruzzo} = 2.1m^3/s$ e DMV^{Fucino} pari al 30% della portata naturale (*1.e.misto*).
 - *SCENARI DMV SU GRONDE*: abbiamo considerato che alternativamente la gronda a 1100 o le gronde a 400 deviano solamente il 70% della portata dei torrenti da esse intercettati. Ciò equivale a imporre un DMV pari al 30% della portata fluente quotidianamente. Per entrambi i casi abbiamo ricalcolato e simulato la politica di compromesso (vettore dei pesi $[1,34]$).
 - DMV^{1100} pari al 30% della portata fluente (*1.e.1100*).
 - DMV^{400} pari al 30% della portata fluente (*1.e.400*).

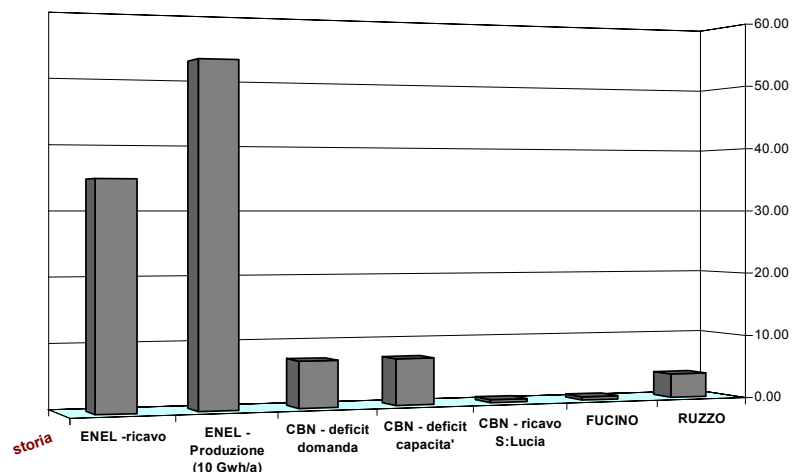


Figura 10-2: Valore degli indicatori nella situazione storica

- *SCENARIO RADDOPPIO DISTRETTO IRRIGUO*: abbiamo considerato l'allargamento della superficie servita dalle infrastrutture del Consorzio di Bonifica Nord (CBN), il raddoppio della portata derivabile dalle traverse di Villa Vomano e di S.Lucia ed infine raddoppiato la portata massima turbinabile dalla centrale idroelettrica di S.Lucia, di proprietà del CBN.

Abbiamo ricalcolato per questo scenario tutte le politiche calcolate per lo Scenario Attuale .

10.4 Stima degli effetti

Per prima cosa stimiamo gli impatti delle alternative considerate, effettuando simulazioni deterministiche e confrontando le prestazioni di ognuna di esse con quella della regolazione storica, riportata in Fig.10-2

I valori degli indicatori relativi alla situazione storica vengono calcolati sulle traiettorie F storicamente misurate. Si presenta però un problema: noi disponiamo di serie storiche giornaliere di portata turbinata e pompata ma non di traiettorie giornaliere di portata derivata dal CBN alla traversa di Villa Vomano nè di quella deviata verso la centrale di

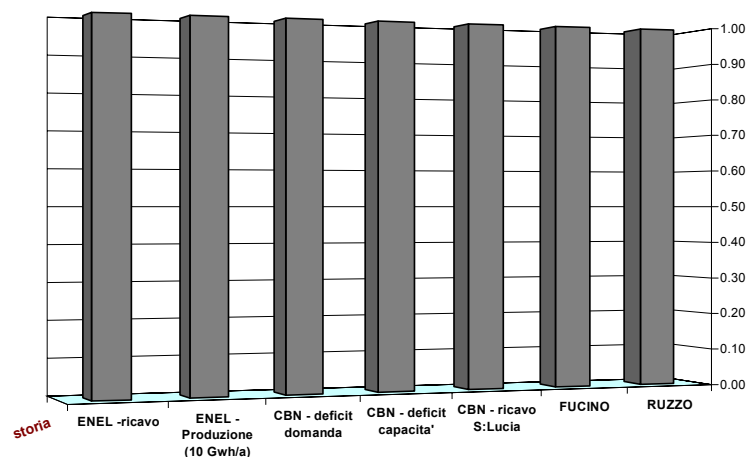


Figura 10-3: Valori normalizzati degli indicatori nella situazione storica

S.Lucia, entrambe traiettorie necessarie al calcolo degli indicatori del settore irriguo. Per calcolarle abbiamo ipotizzato che storicamente il CBN abbia derivato tutta l'acqua che fosse possibile derivare, ovvero la portata rilasciata da Montorio fino al limite massimo di $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, e che di questa abbia poi deviato verso la centrale di S.Lucia solamente la quota eccedente la domanda per uso irriguo, assunta pari a quella da noi calcolata (vedi Cap.8).

Abbiamo normalizzato gli indicatori di valutazione rispetto al valore da essi assunti nella situazione storica (vedi Fig.10-3) in modo da poter valutare le variazioni relative che subiranno al cambiare dell'alternativa considerata. I valori assoluti sono riportati nella matrice degli impatti posta a fine capitolo (vedi Fig.10-47)

10.4.1 Scenario Attuale

Ottimo idroelettrico (1.a)

Come si vede in Fig.10-4 ottimizzando rispetto al solo portatore d'interesse idroelettrico otteniamo una politica che aumenta notevolmente il ricavo medio annuo di Enel (circa 12 milioni di Euro in più); la produzione aumenta ovviamente anch'essa ma non quanto il

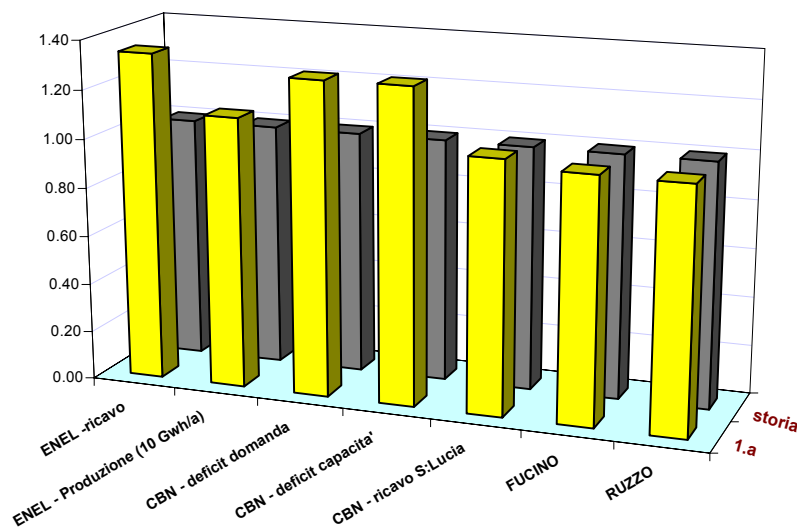


Figura 10-4: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi all'alternativa 1.a e storia

ricavo economico, dimostrando che l'allocazione temporale della produzione è un fattore fondamentale.

Osservando la Fig.10-5 si capisce che l'aumento di ricavo è ottenuto sfruttando a fondo gli afflussi tardo-primaverili (anche tramite pompaggio, vedi Figg.10-6 e 10-7) per ricaricare il serbatoio e poi turbinare da ottobre fino all'aprile successivo, ovvero nel periodo di massimo valore dell'energia idroelettrica. Ciò è confermato dalla Fig.10-8 in cui risalta l'aumento di produzione nella fascia invernale.

Per quanto riguarda il settore irriguo risulta evidente un netto aumento del deficit sia rispetto alla domanda sia rispetto alla portata di concessione; in Fig.10-9 è riportata la differenza tra la fornitura della presente alternativa e la fornitura storica; come si può osservare la storia risulta mediamente migliore tranne che nel 1999, anno in cui la politica calcolata, per via di afflussi particolarmente alti, genera abbondanti rilasci. Abbiamo invece un lieve aumento del ricavo dalla centrale di S.Lucia (di proprietà del CBN), che sfrutta l'aumento di portata turbinata da Enel d'inverno, quando non è di alcuna utilità agricola.

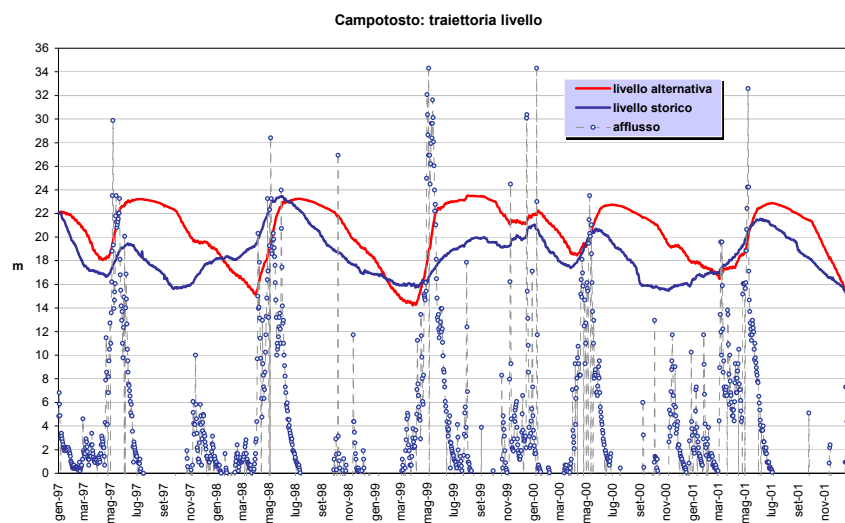


Figura 10-5: Traiettorie (1997-2001) dei livelli (m) e degli afflussi (mc/sec) di Campotosto nell'alternativa 1.a e nella storia

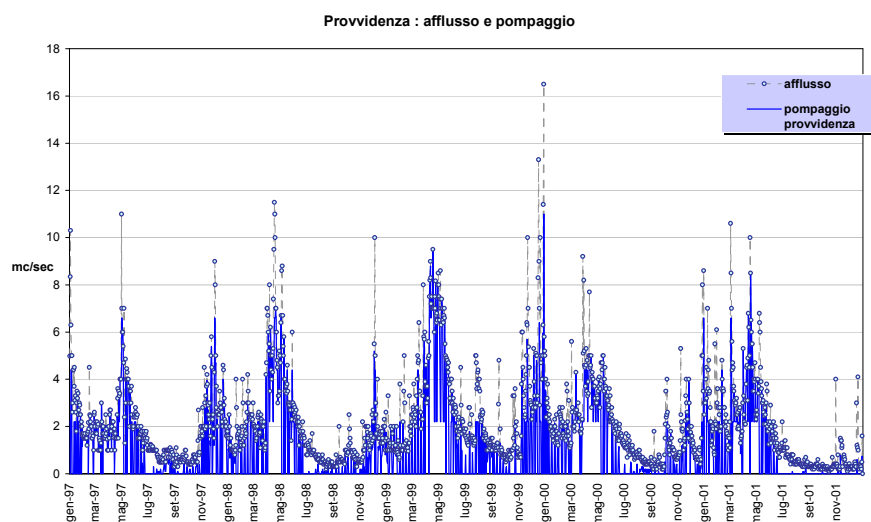


Figura 10-6: Traiettorie (1997-2001) di afflussi e pompaggi di Provvidenza nell'alternativa 1.a

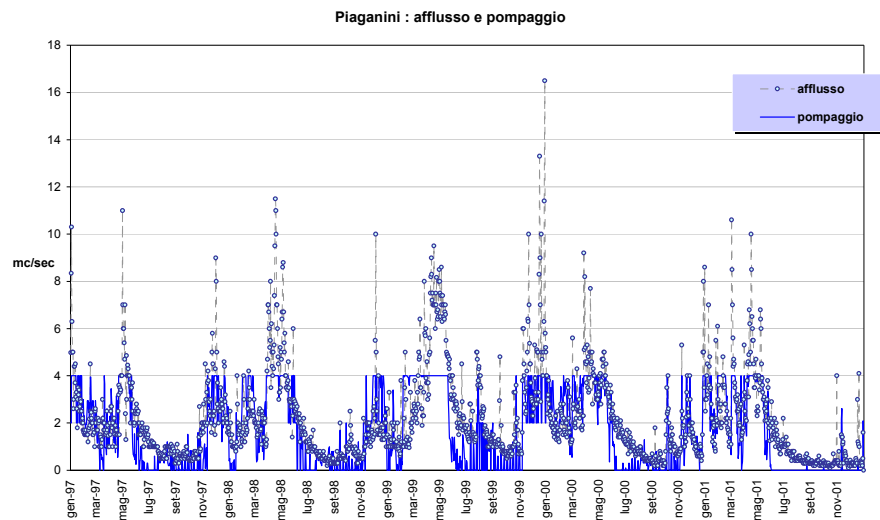


Figura 10-7: Traiettorie (1997-2001) di afflussi e pompaggi di Piaganini nell'alternativa 1.a

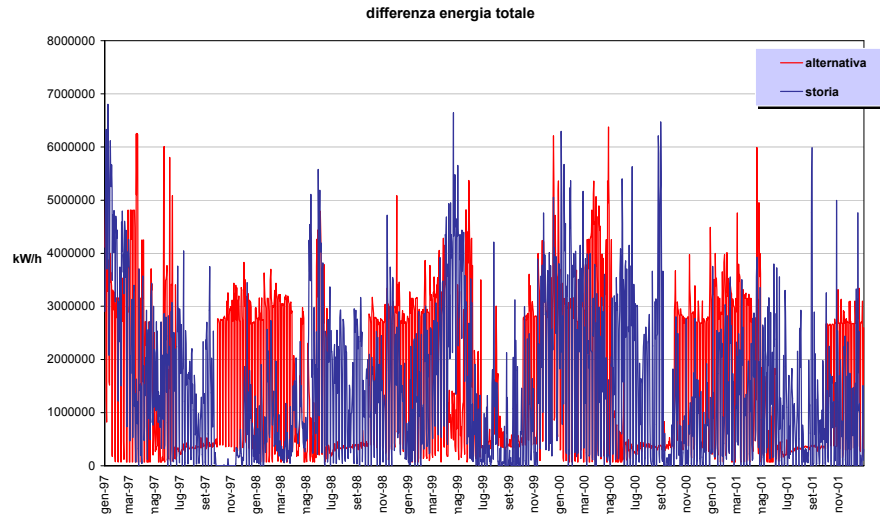


Figura 10-8: Traiettorie (1997-2001) dell'energia prodotta nell'alternativa 1.a e nella storia

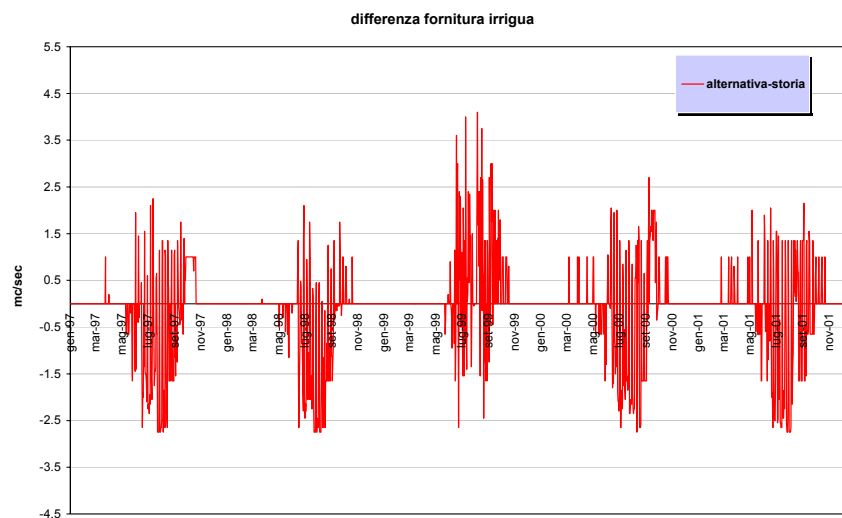


Figura 10-9: Traiettorie (1997-2001) della differenza fra la fornitura irrigua nell'alternativa 1.a e nella storia

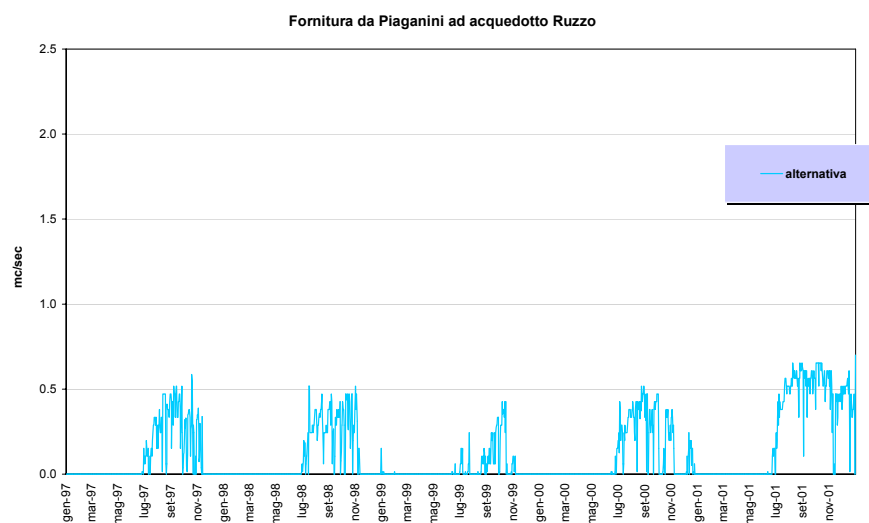


Figura 10-10: Traiettorie (1997-2001) della portata fornita al Ruzzo dal serbatoio di Piaganini nell'alternativa 1.a

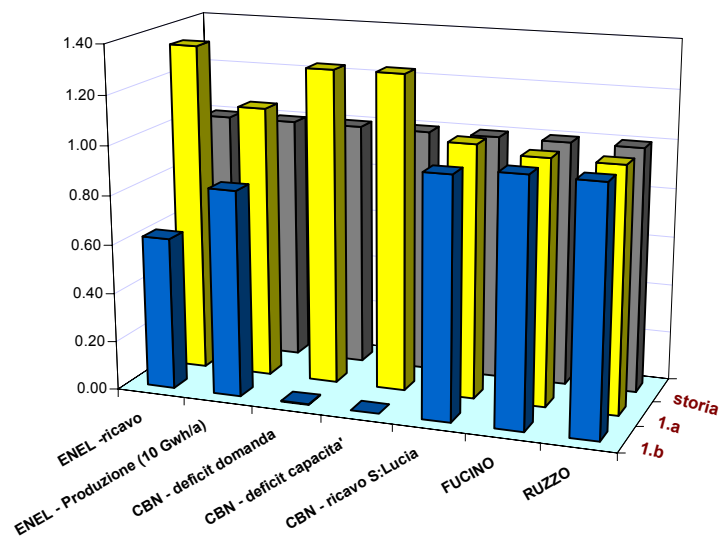


Figura 10-11: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.b, 1.a e storia

L'andamento della portata inviata dal serbatoio di Piaganini all'acquedotto del Ruzzo nei giorni in cui l'afflusso dalla gronda 400 in sponda sinistra non è sufficiente è mostrato in Fig.10-10. Tale andamento, equivalente a quello storico, è il medesimo per tutte le alternative relative allo Scenario Attuale, poichè tutte queste vengono simulate con le medesime serie di afflussi e come abbiamo visto il relativo indicatore dipende da tali valori e non dalla politica ottenuta.

L'indicatore Ruzzo, come anche l'indicatore Fucino, cambia valore solamente in corrispondenza di scenari diversi da quello attuale.

Ottimo irriguo (1.b)

Specularmente alla precedente politica, la presente annulla entrambi i deficit irrigui, diminuendo però sensibilmente anche il ricavo e la produzione di Enel; si ha anche una lieve diminuzione del ricavo ottenuto dalla centrale di S.Lucia, che ricordiamo non essere considerato nell'obiettivo irriguo (vedi Fig.10-11).

Settore irriguo: la fornitura risulta sempre superiore a quella storica (Fig.10-12).

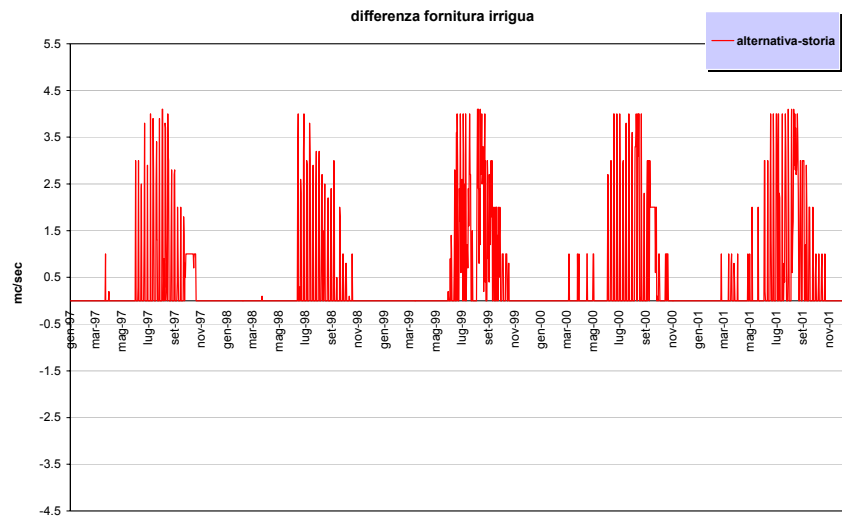


Figura 10-12: Traiettorie (1997-2001) della differenza fra la fornitura irrigua nell'alternativa 1.b e nella storia

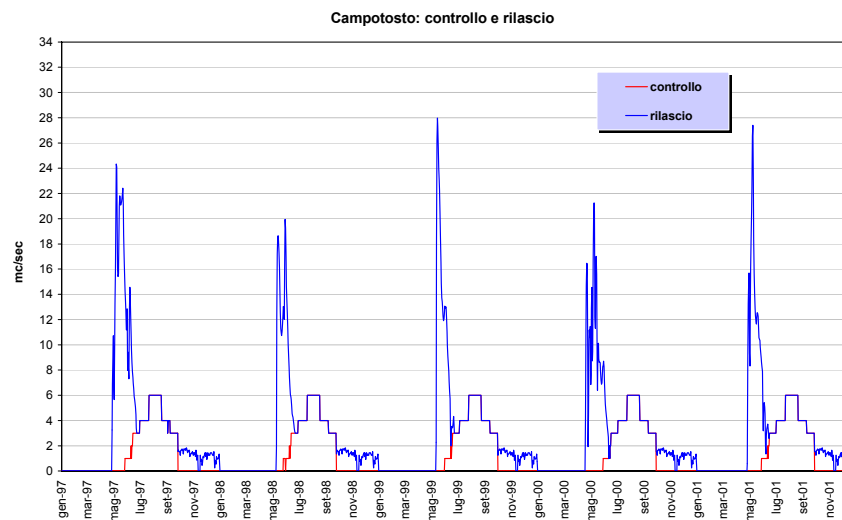


Figura 10-13: Traiettorie (1997-2001) dei controlli e dei rilasci dal serbatoio di Campotosto per l'alternativa 1.b

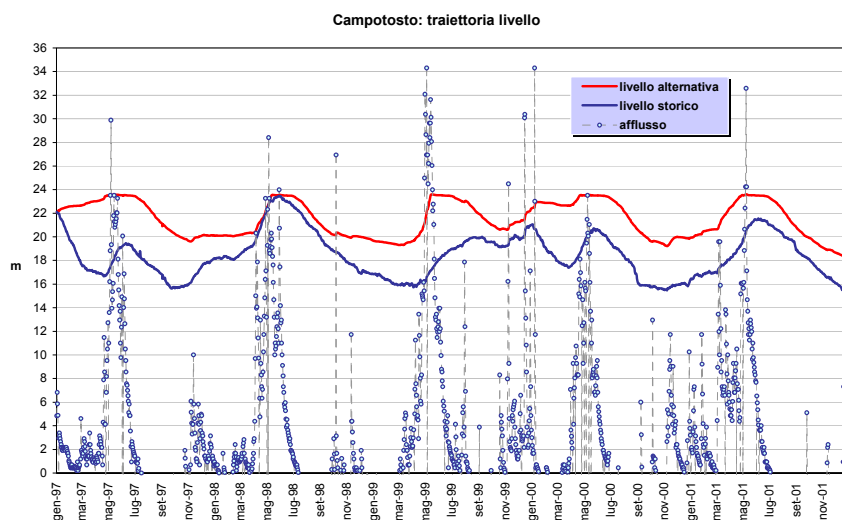


Figura 10-14: Traiettorie (1997-2001) dei livelli (m) e degli afflussi (mc/sec) di Campotosto nell'alternativa 1.b e nella storia

Settore idroelettrico: poichè l'interesse idroelettrico non è stato in alcun modo considerato i pompaggi risultano sempre nulli, mentre si ha rilascio da Campotosto solamente d'estate, per soddisfare la domanda irrigua, in tarda primavera quando il serbatoio raggiunge il colmo (vedi Fig.10-13) e in autunno per garantire il minimo rilascio a valle di Montorio e la fornitura al Ruzzo; il risultato è una traiettoria del livello lacuale con oscillazioni molto ridotte (vedi Fig.10-14) e sempre superiore a quella storica.

Lessicografico da irriguo a idroelettrico (1.c)

Gli obiettivi del settore irriguo ovviamente non variano rispetto alla 1.b, tranne il ricavo di S.Lucia che aumenta lievemente poichè ora Enel turbinata durante l'inverno; notevole è invece l'aumento degli indicatori del settore idroelettrico, che migliorano nettamente rispetto alla storia, raggiungendo valori simili a quelli ottenuti ottimizzando rispetto al settore idroelettrico (vedi Fig.10-15); vediamo come tale risultato sia possibile:

Settore idroelettrico: come per la 1.a le centrali pompano tutta l'acqua che possono, ma a differenza di quella turbinano anche durante i mesi estivi, fornendo l'acqua neces-

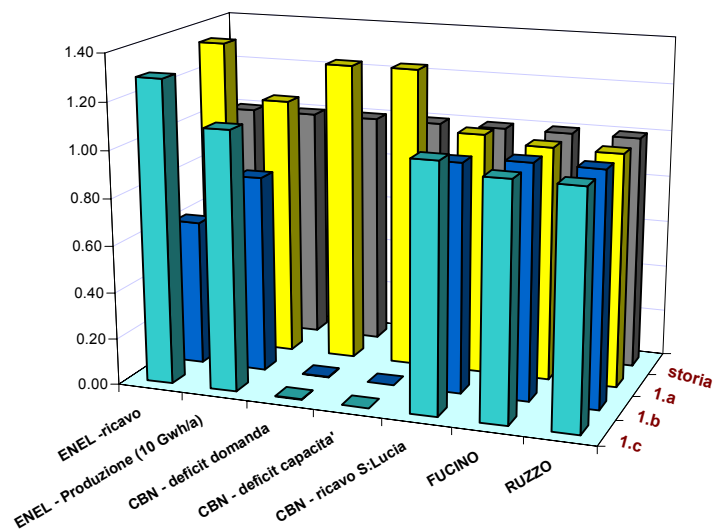


Figura 10-15: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.c , 1.b, 1.a e storia

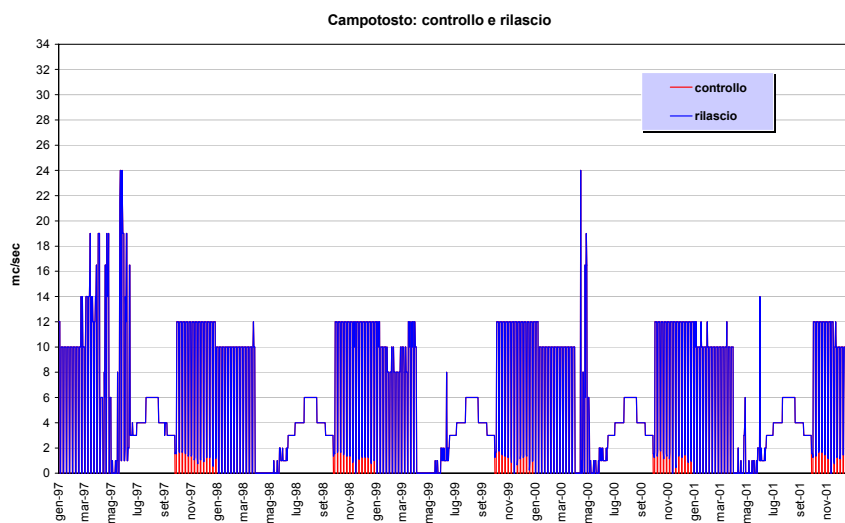


Figura 10-16: Traiettorie (1997-2001) dei controlli e dei rilasci dal serbatoio di Campotosto per l'alternativa 1.c

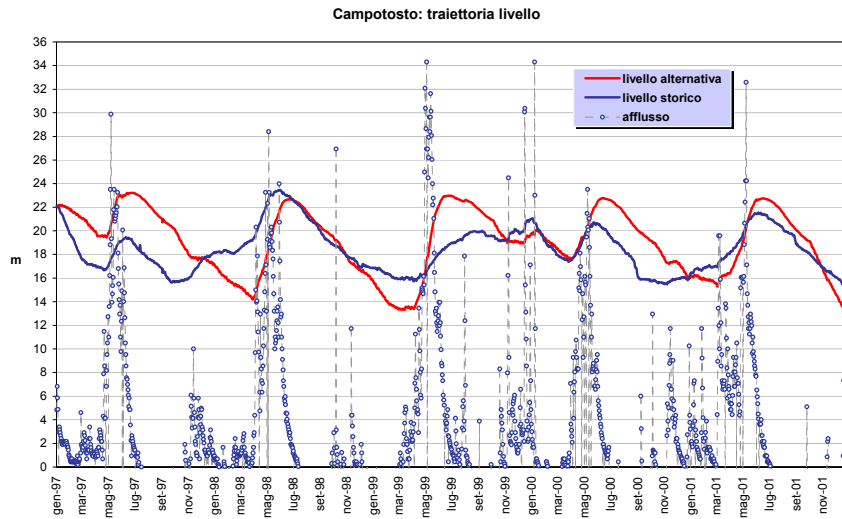


Figura 10-17: Traiettorie (1997-2001) dei livelli (m) e degli afflussi (mc/sec) di Campotosto nell'alternativa 1.c e nella storia

saria al distretto irriguo (vedi Fig.10-16); tutto questo comporta oscillazioni dell'invaso lacuale leggermente più ampie (svuota di più) ma soprattutto crescite rapide durante le piogge tardo-primaverili e discese lente ma continue da fine Giugno a metà Marzo: in estate per la fornitura irriguo e in autunno inverno per la produzione idroelettrica (vedi Fig.10-17).

Settore irriguo: la fornitura è identica a quella dell'alternativa 1.b.

Lessicografico da idroelettrico ad irriguo (1.d)

Rispetto alla storia i due indicatori di deficit diminuiscono sensibilmente, senza però avvicinarsi alle prestazioni ottenute dalle 1.b ed 1.c; interessante è invece il comportamento degli indicatori del settore idroelettrico: questi aumentano, superando addirittura il valore assunto per la 1.a, ovvero per la politica ottima dal punto di vista idroelettrico! Questo comportamento si spiega considerando che tutte le presenti simulazioni sono state eseguite adottando l'estrattore inferiore; ciò significa che all'interno dell'insieme di controlli ottimi $M_t(s_t)$ si è sempre scelto l' u_t minore, che, come detto precedente-

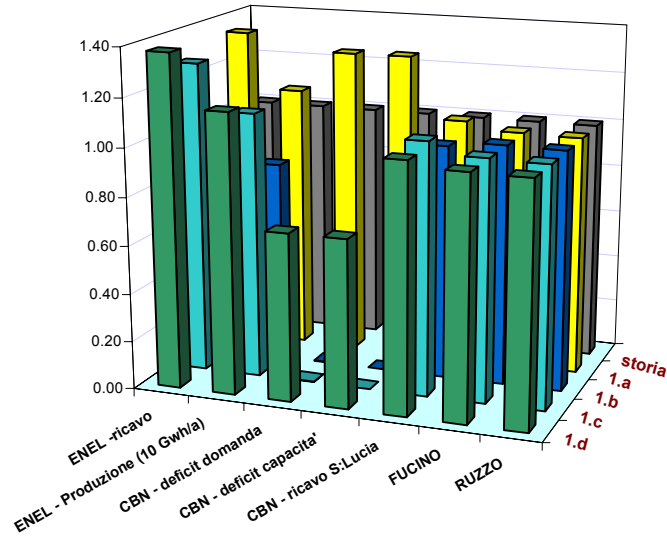


Figura 10-18: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.d, 1.c, 1.b, 1.a e storia

mente, fornisce l'estremo inferiore del possibile guadagno di lungo termine di Enel (vedi Par.10.1.1). Sul lungo periodo tutti i controlli u_t appartenenti a $M_t(s_t)$ forniscono la medesima prestazione, ma questo non succede su un orizzonte temporale finito quale quello delle simulazioni deterministiche; si spiega così l'aumento di prestazione da 1.a ad 1.d: l'ottimizzare (lessicograficamente) l'obiettivo irraggiato porta a turbinare più acqua d'estate e quindi paradossalmente aumenta anche il ricavo idroelettrico, almeno sui 5 anni considerati (vedi Fig.10-18).

Settore idroelettrico: i pompaggi sono sfruttati al massimo, come per le 1.c; osservando la Fig.10-19 si può osservare come all'abbondante produzione invernale si affianchi un pur limitato rilascio estivo, tranne che in Agosto, quando si ha rilascio esclusivamente per garantire il rilascio obbligatorio a valle di Montorio e la fornitura al Ruzzo. Evidentemente durante questo mese l'insieme dei controlli ammissibile per la 1.d $\tilde{U}_t^{1.d}$, uguale all'insieme dei controlli ottimi per la 1.a $M_t^{1.a}(\cdot)$, è costituito da pochi e minimi valori.

Settore irriguo: la Fig.10-20 mostra che la prestazione irrigua dell'alternativa considerata è, escludendo Agosto, quasi sempre migliore della performance storica.

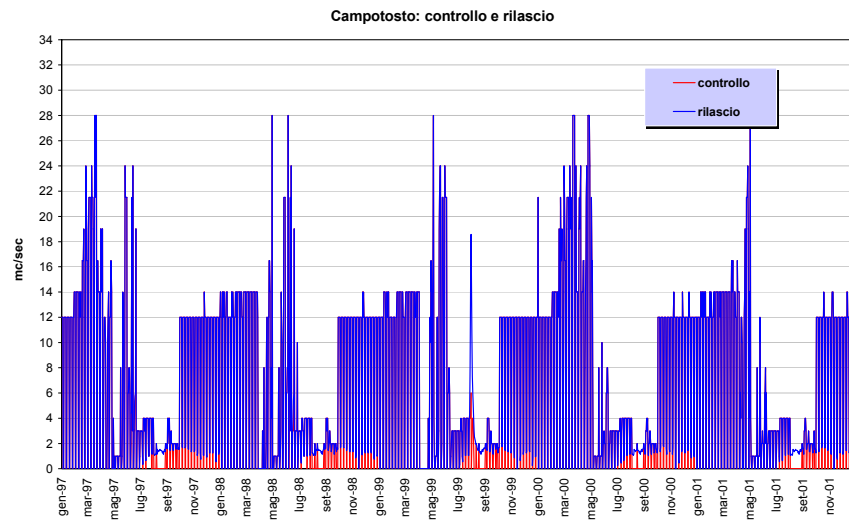


Figura 10-19: Traiettoria (1997-2001) dei controlli e dei rilasci dal serbatoio di Campotosto per l'alternativa 1.d

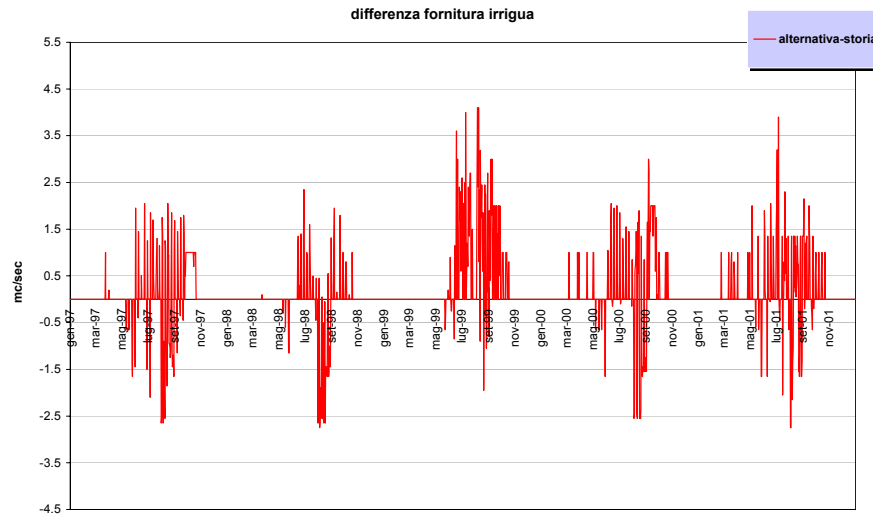


Figura 10-20: Traiettoria (1997-2001) della differenza fra la fornitura irrigua nell'alternativa 1.d e nella storia

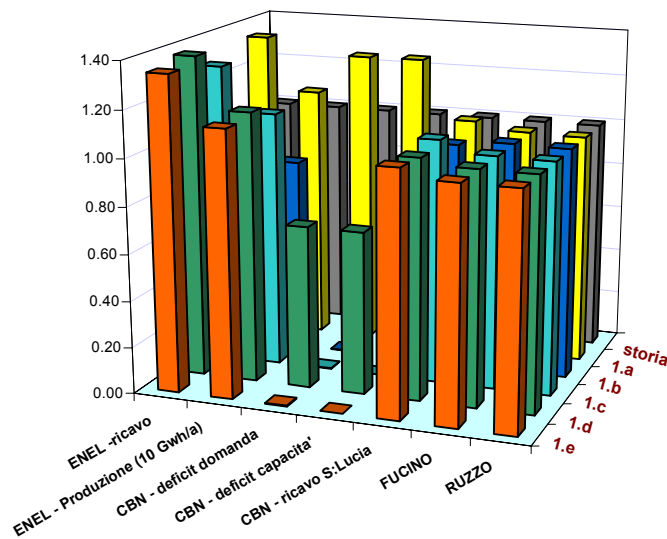


Figura 10-21: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e, 1.d, 1.c, 1.b, 1.a e storia

Compromesso (1.e)

Questa politica di gestione raggiunge praticamente l'utopia: gli indicatori irrigui sono appena superiori allo 0, mentre quelli idroelettrici sono poco più bassi che nel caso 1.a di ottimo idroelettrico (vedi Fig.10-21).

Questa prestazione si ottiene turbinando intensamente da giugno a fine marzo e ricaricando velocemente il serbatoio sfruttando a fondo le piogge primaverili; ciò causa oscillazioni del livello di Campotosto molto più ampie di quelle dei casi precedenti (Fig.10-22). Il livello particolarmente basso raggiunto a fine 2001 si spiega osservando la scarsità di piogge tra novembre e dicembre.

In Fig.10-23 mostriamo l'immagine della frontiera di Pareto relativa allo scenario attuale.

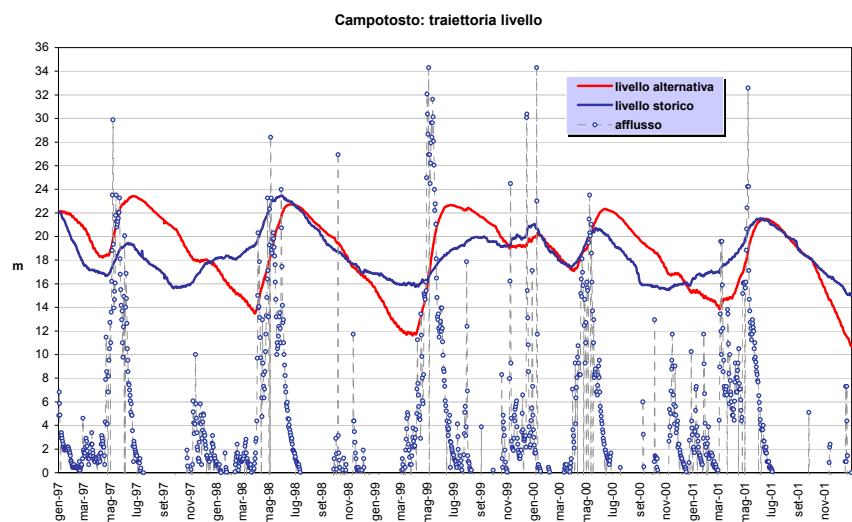


Figura 10-22: Traiettorie (1997-2001) dei livelli (m) e degli afflussi (mc/sec) di Campotosto nell'alternativa 1.e e nella storia

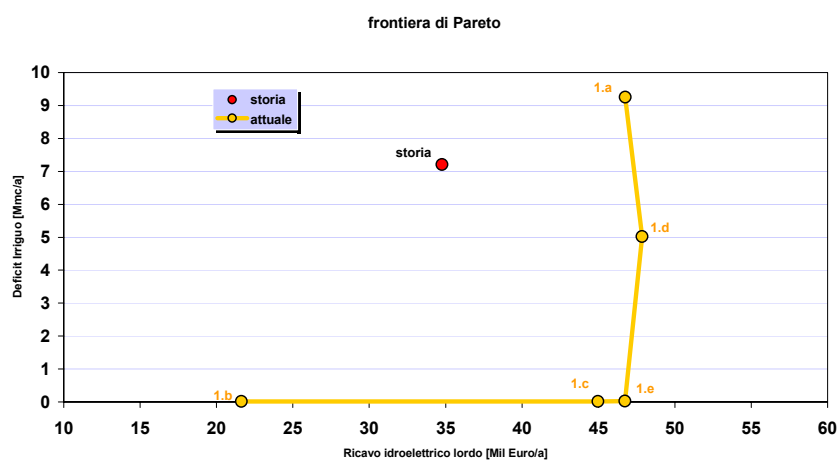


Figura 10-23: Frontiera di pareto relativa allo scenario attuale

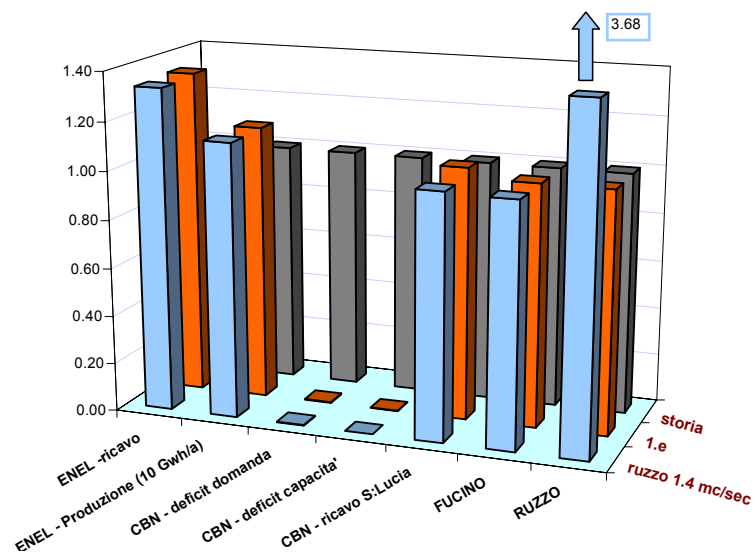


Figura 10-24: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.r14, 1.e e storia

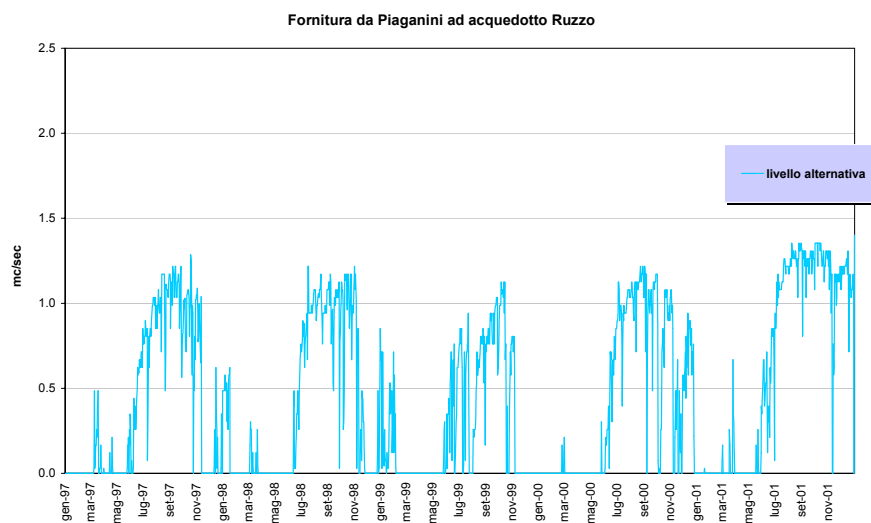


Figura 10-25: Traiettorie (1997-2001) della portata fornita al Ruzzo dal serbatoio di Piaganini nell'alternativa 1.e.r14.

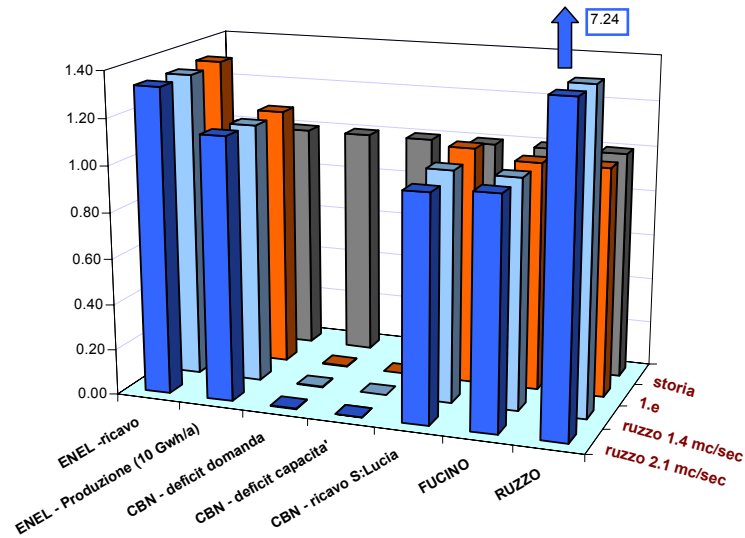


Figura 10-26: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.r21, 1.e e storia

10.4.2 Scenari Prelievo Ruzzo

$$q^{Ruzzo} = 1.4m^3/s \text{ (1.e.r14)}$$

In Fig.10-24 vediamo un confronto delle prestazioni rispettivamente dell'alternativa 1.e e 1.e.r14, quest'ultima è ottenuta, come le successive, applicando allo scenario considerato la politica dell'alternativa 1.e.

L'unico indicatore che cambia, a parte una piccola diminuzione del ricavo di S.Lucia, è quello relativo alla portata deviata da Piaganini per servire l'acquedotto, ovviamente aumentato (vedi anche Fig.10-25).

$$q^{Ruzzo} = 2.1m^3/s \text{ (1.e.r21)}$$

Anche in questo caso l'unica variazione sensibile, a parte quella dell'indicatore Ruzzo, è il ricavo della centrale di S.Lucia, ulteriormente diminuito rispetto all'alternativa 1.e (vedi Figg.10-26 e 10-27).

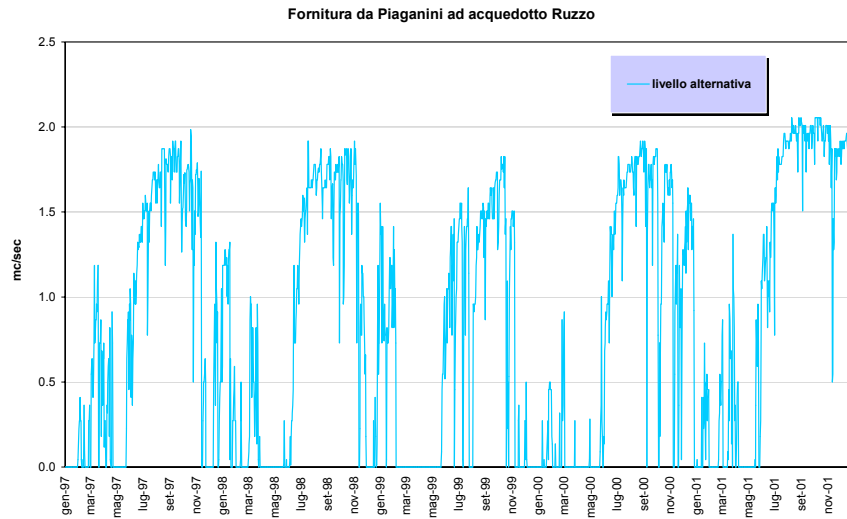


Figura 10-27: Traiettorie (1997-2001) della portata fornita al Ruzzo dal serbatoio di Piaganini nell'alternativa 1.er.21.

10.4.3 Scenari DMV su Fucino

Entrambi gli scenari *1.e.f10* (DMV^{Fucino} pari al 10% della portata naturale) ed *1.e.f30* (DMV^{Fucino} pari al 30% della portata naturale), simulati secondo la politica dell'alternativa 1, non comportano alcuna variazione degli indicatori idroelettrici ed irrigui; cambia esclusivamente l'indicators relativo al DMV sul Rio Fucino (vedi Figg.10-28 e 10-29).

10.4.4 Scenario misto

A parte gli ovvii effetti sugli indicatori Fucino e Ruzzo, l'alternativa *1.e.misto* ($q^{Ruzzo} = 2.1m^3/s$ e DMV^{Fucino} pari al 30% della portata naturale) causa solamente una lieve diminuzione del ricavo di Enel e della centrale di S.Lucia, che ricordiamo ancora una volta essere gestita dal CBN (vedi Fig.10-30).

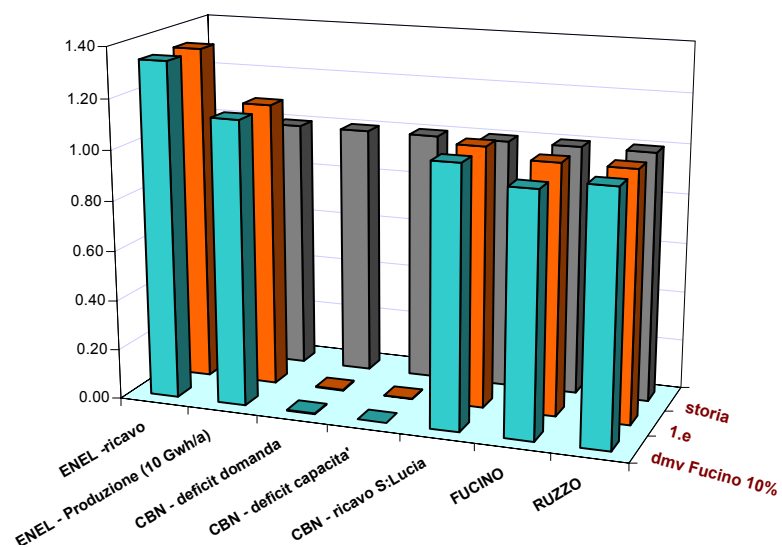


Figura 10-28: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.f10, 1.e e storia

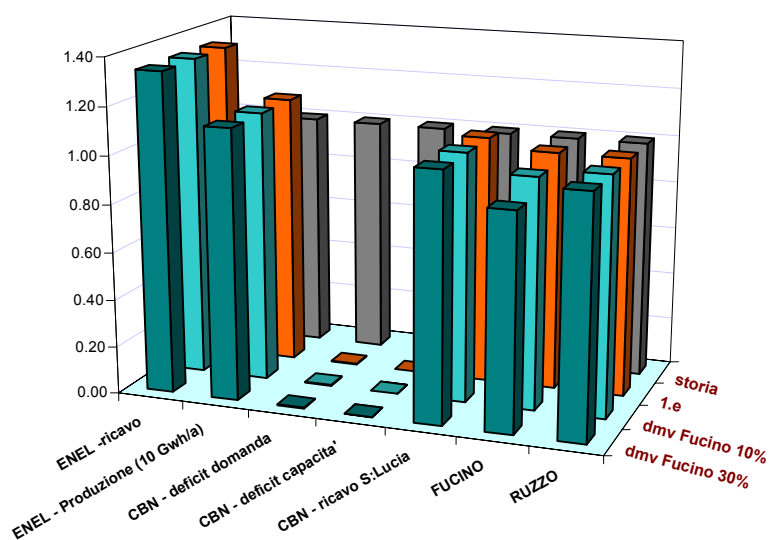


Figura 10-29: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.f30, 1.e e storia

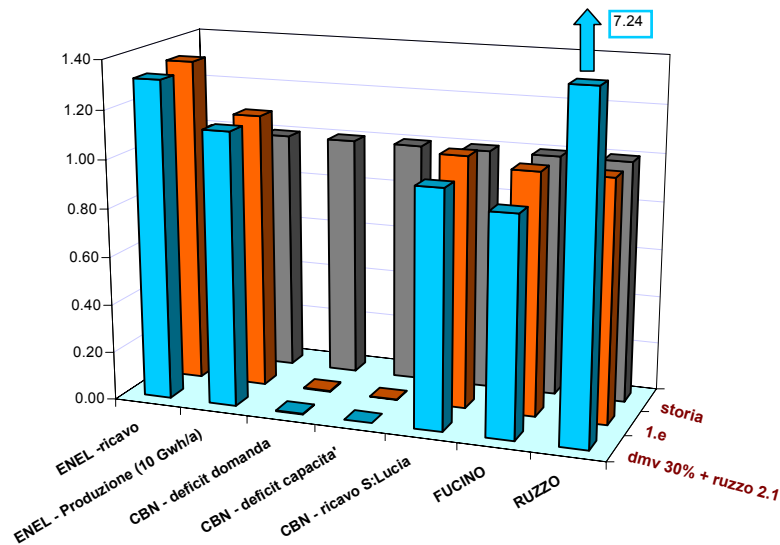


Figura 10-30: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.misto, 1.e e storia

10.4.5 Scenari DMV su gronde

Per ognuna dei seguenti due scenari è stata calcolata una politica risolvendo il problema di controllo ottimo con vettore dei pesi [1,34] (uguale all'alternativa 1.e).

DMV sulla gronda 1100 pari al 30% della portata fluente (1.e.1100)

L'imposizione del DMV sulla gronda 1100 comporta una apprezzabile diminuzione degli indicatori del settore idroelettrico, specialmente della produzione, mentre lascia inalterati quelli del settore irriguo (a parte il ricavo di S.Lucia leggermente diminuito) (vedi Fig.10-31).

DMV sulla gronda 400 pari al 30% della portata fluente (1.e.400)

Gli effetti sono identici a quelli della 1.e.1100 per quanto riguarda il settore idroelettrico; per il resto abbiamo un'ulteriore riduzione del ricavo di S.Lucia ed un forte aumento della portata inviata dal serbatoio di Piaganini all'acquedotto del Ruzzo, dovuto alla riduzione di apporto dalla gronda 400 in sponda sinistra.

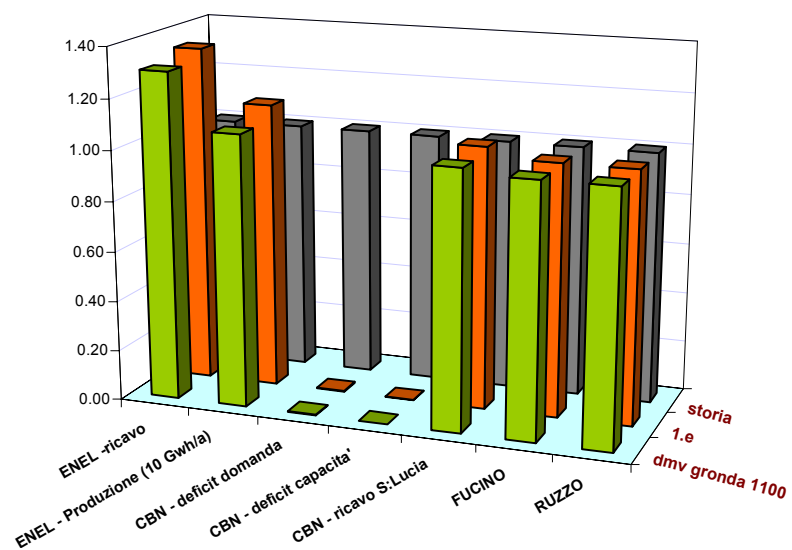


Figura 10-31: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.1100, 1.e e storia

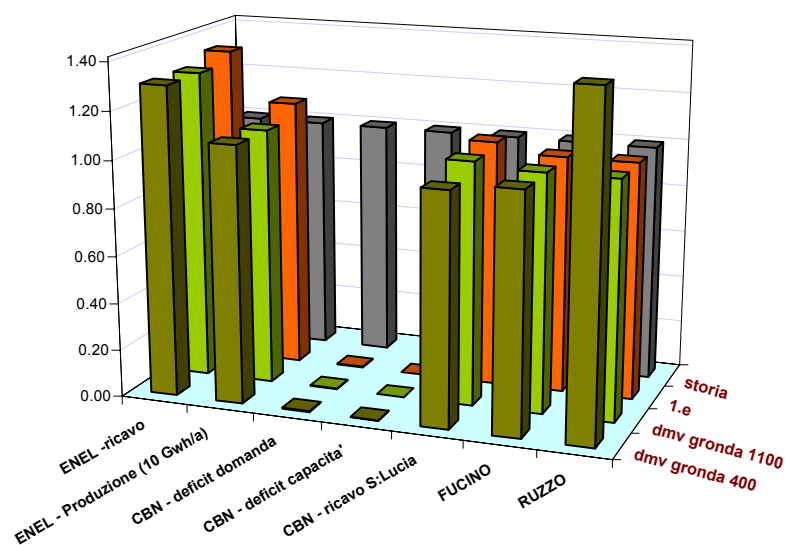


Figura 10-32: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 1.e.400, 1.e e storia

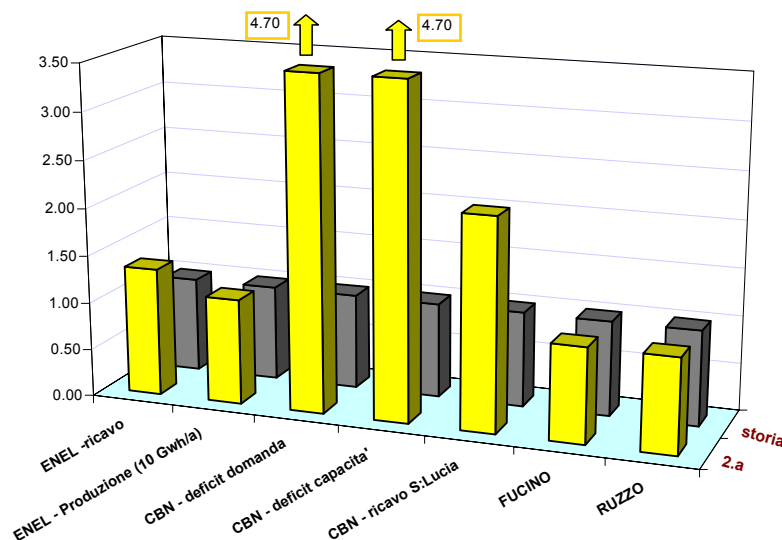


Figura 10-33: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 2.a e storia

10.4.6 Scenario Raddoppio Distretto Irriguo

Come per le alternative dello scenario Attuale, anche quelle corrispondenti allo scenario Raddoppio Distretto, producono tutte la medesima performance sugli indicatori Ruzzo e Fucino; ci limiteremo quindi ad osservare gli effetti sui settori idroelettrico ed irriguo.

Ottimo idroelettrico (2.a)

La prestazione sugli indicatori idroelettrici (vedi Fig.10-33) è uguale a quella dell'ottimo irriguo su scenario Attuale, la politica della 2.a è infatti identica a quella della 1.a, poichè i cambiamenti della funzione di costo e della domanda del distretto irriguo non vengono considerati nella ottimizzazione; ciò è confermato dall'andamento del livello d'invaso (non riportato) identico a quello della 1.a. Il deficit ovviamente è aumentato sensibilmente, addirittura più che triplicato, benchè in valore assoluto la portata deviata sia aumentata, come si può vedere in Fig.10-34, da cui risulta evidente che luglio ed agosto sono i mesi critici nell'aumento della fallanza di fornitura irrigua.

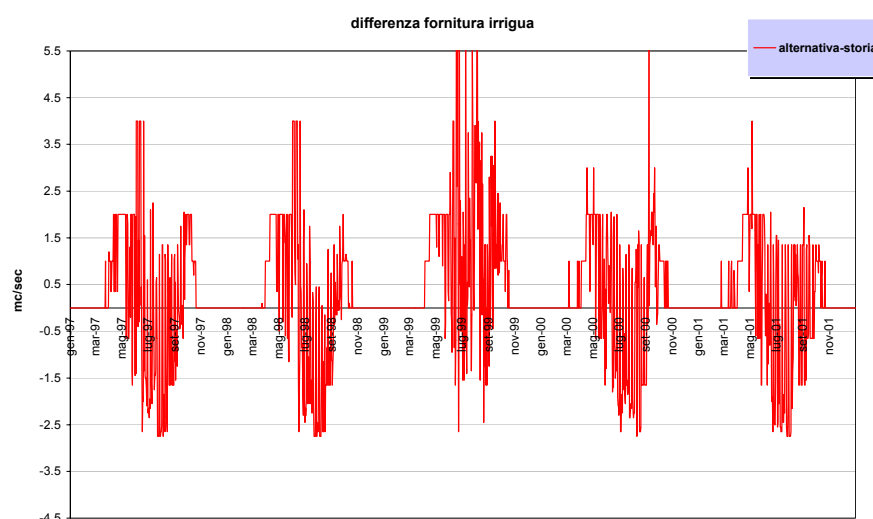


Figura 10-34: Traiettorie (1997-2001) della differenza fra la fornitura irrigua nell'alternativa 2.a e nella storia

Ottimo irriguo (2.b)

Il deficit rispetto alla domanda diminuisce drasticamente senza però arrivare a zero, a differenza del deficit rispetto alla concessione, che si annulla del tutto, evidenziando la pur lieve inadeguatezza del semplice raddoppio della portata derivabile in caso di allargamento del distretto irriguo.

Rispetto alla storia il ricavo idroelettrico diminuisce proporzionalmente più di quanto diminuisca la produzione (vedi Fig.10-35) dal momento che si tende a turbinare in periodi in cui è meno conveniente farlo.

Settore irriguo: la portata fornita al distretto aumenta sempre e considerevolmente rispetto alla storia (Fig.10-36), causando una veloce discesa del livello lacuale durante la stagione irrigua (vedi Fig.10-37), tanto da scendere a volte sotto il livello storico, a differenza della 1.b; è interessante notare che, sempre a differenza della 1.b, sono presenti pompaggi che sfruttano le precipitazioni autunnali (fine Settembre - metà Novembre), non utili a fini irrigui, per ricaricare il serbatoio di Campotosto (vedi Fig.10-38).

Settore idroelettrico: situazione analoga alla 1.b; in Fig.10-39 si può notare il con-

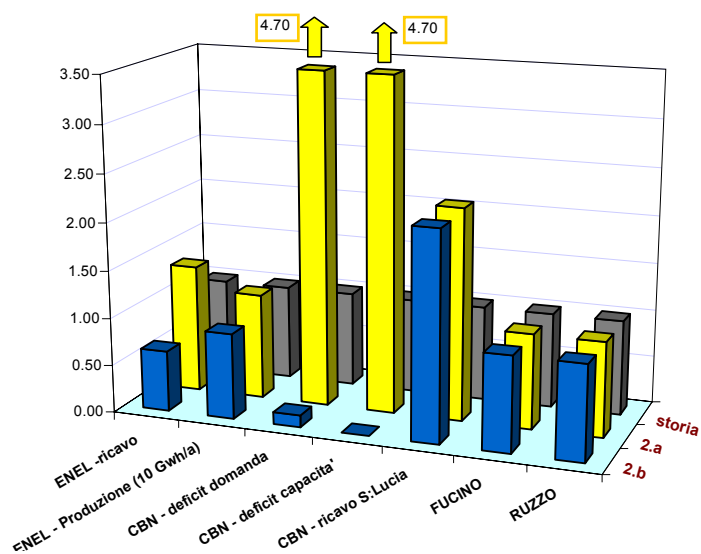


Figura 10-35: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 2.b, 2.a e storia

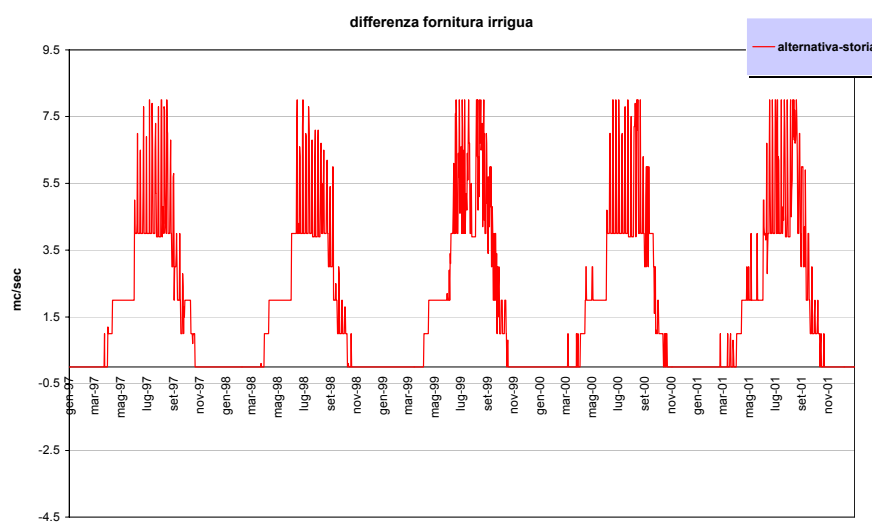


Figura 10-36: Traiettoria (1997-2001) della differenza fra la fornitura irrigua nell'alternativa 2.b e nella storia

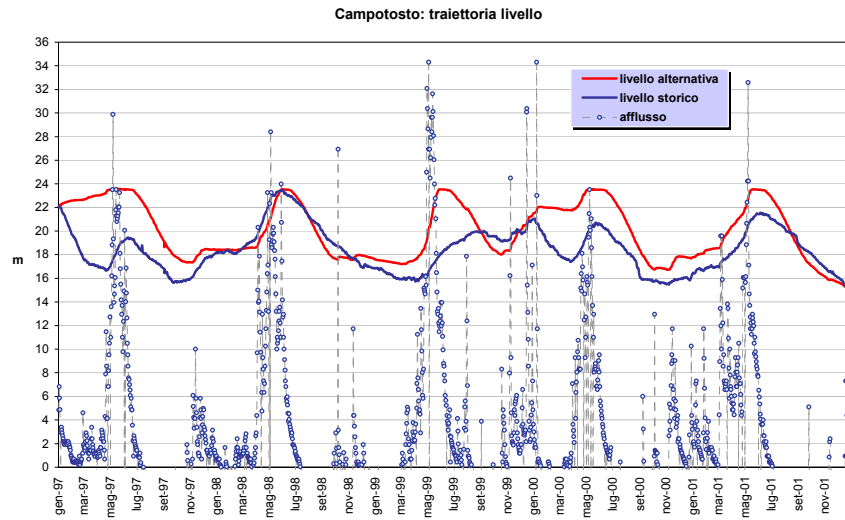


Figura 10-37: Traiettorie (1997-2001) dei livelli (m) e degli afflussi (mc/sec) di Campotosto nell'alternativa 2.b e nella storia

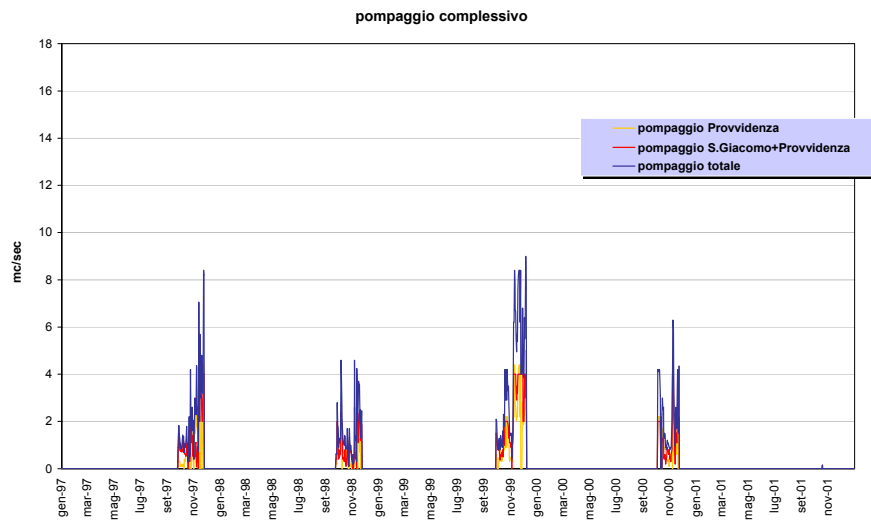


Figura 10-38: Traiettorie (1997-2001) dei pompaggi di San Giacomo, di Provvidenza e complessivi nell'alternativa 2.b.

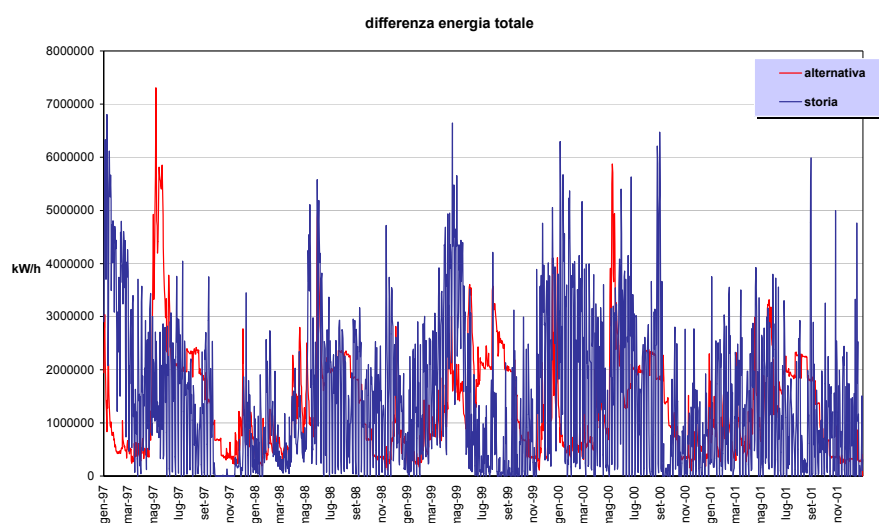


Figura 10-39: Traiettorie (1997-2001) dell'energia prodotta da Enel nell'alternativa 2.b e nella storia.

centramento della produzione nella la stagione estiva, quando viene turbinata l'acqua rilasciata da Campotosto per alimentare il distretto irriguo.

Lessicografico da irriguo a idroelettrico (2.c)

Gli indicatori idroelettrici aumentano notevolmente, specialmente il ricavo economico (vedi Fig.10-40), evidenziando una migliore distribuzione temporale della produzione (vedi Fig.10-41), ottenuta come già visto pompando abbondantemente e rilasciando quando la produzione di energia è più conveniente (vedi Fig.10-42); il settore irriguo rimane identico, a parte i ricavo di S.Lucia che aumenta per via delle portate turbinate a fini idroelettrici, quando non sono di alcun uso per l'agricoltura.

Lessicografico da idroelettrico ad irriguo (2.d)

Gli indicatori idroelettrici salgono addirittura oltre il valore assunto per la 2.a (la spiegazione di questo fenomeno è già stata data relativamente alla alternativa 1.d); gli indicatori di deficit, sono diminuiti rispetto all'ottimo idroelettrico ma rimangono molto

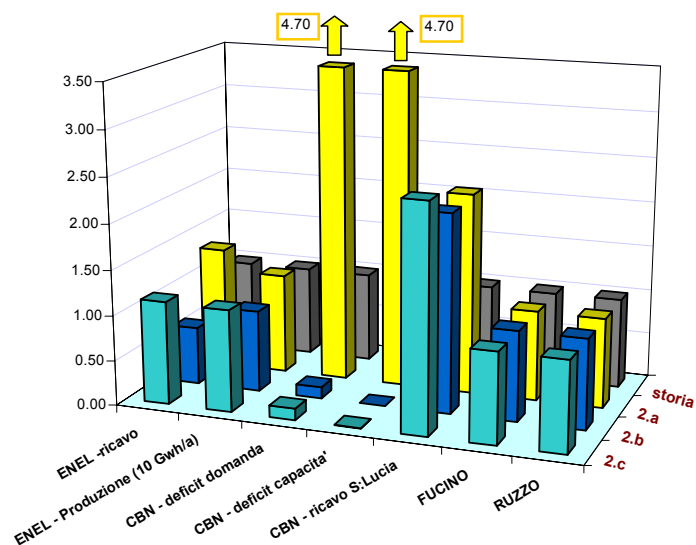


Figura 10-40: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 2.c, 2.b, 2.a e storia

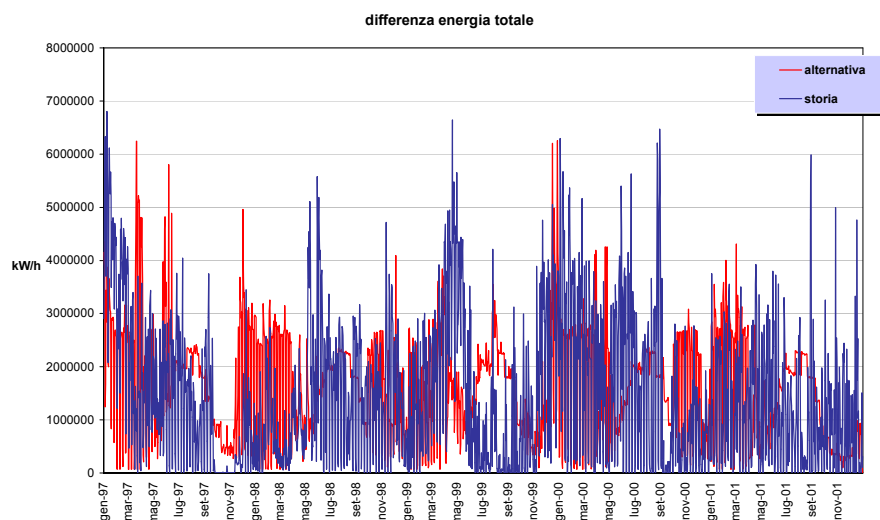


Figura 10-41: Traiettorie (1997-2001) dell'energia prodotta da Enel nell'alternativa 2.c e nella storia.

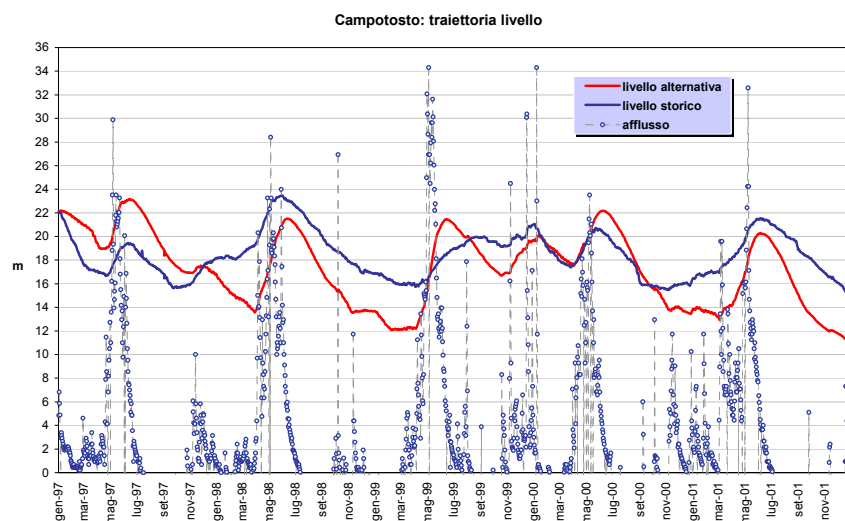


Figura 10-42: Traiettorie (1997-2001) dei livelli (m) e degli afflussi (mc/sec) di Campotosto nell'alternativa 2.c e nella storia

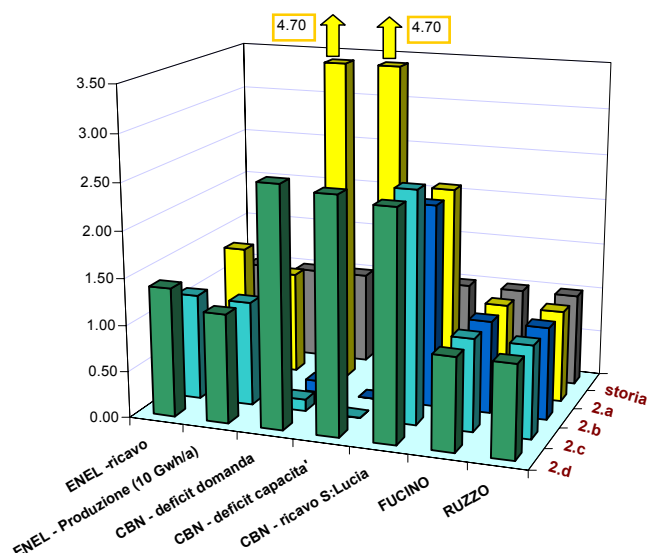


Figura 10-43: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 2.d, 2.c, 2.b, 2.a e storia

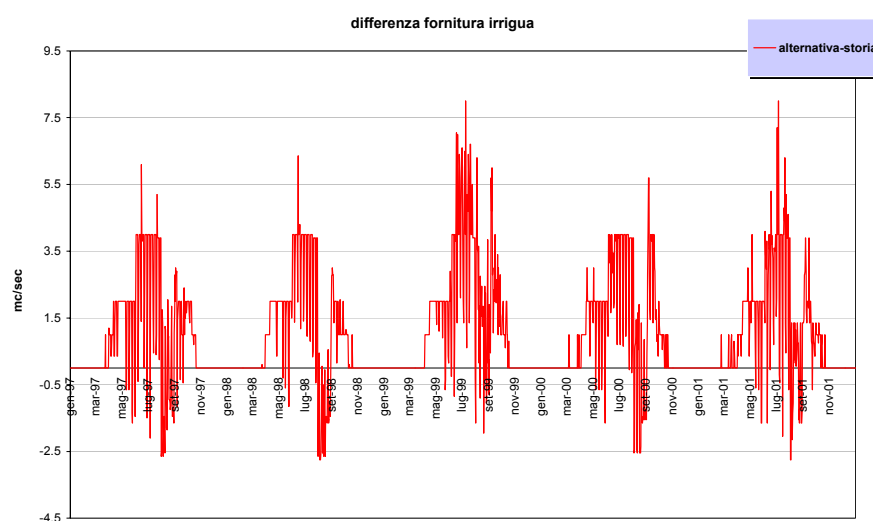


Figura 10-44: Traiettorie (1997-2001) della differenza fra la fornitura irrigua nell'alternativa 2.d e nella storia

lontani dallo zero (vedi Fig.10-43); ciò è dovuto, come nel caso 1.d, alla mancata fornitura durante il mese di Agosto (Fig.10-44), quando è massima la domanda per uso irriguo.

Compromesso (2.e)

Anche in questo caso, come per la 1.e, ci avviciniamo fortemente all'utopia: il ricavo idroelettrico è praticamente uguale a quello ottimo (ma minore di quello ottenuto dalla 2.d) mentre gli indicatori di deficit sono solo impercettibilmente aumentati rispetto all'ottimo irriguo. Tale risultato è ottenuto grazie al solito meccanismo: pompare per quanto possibile gli afflussi ai serbatoi di Provvidenza e Piaganini e turbinare quando il valore dell'energia è massimo, fidandosi degli afflussi primaverili per la ricarica del serbatoio.

In Fig.10-46 mostriamo l'immagine della frontiera di Pareto relativa allo scenario Raddoppio Distretto, sovrapposta alla frontiera dello scenario Attuale.

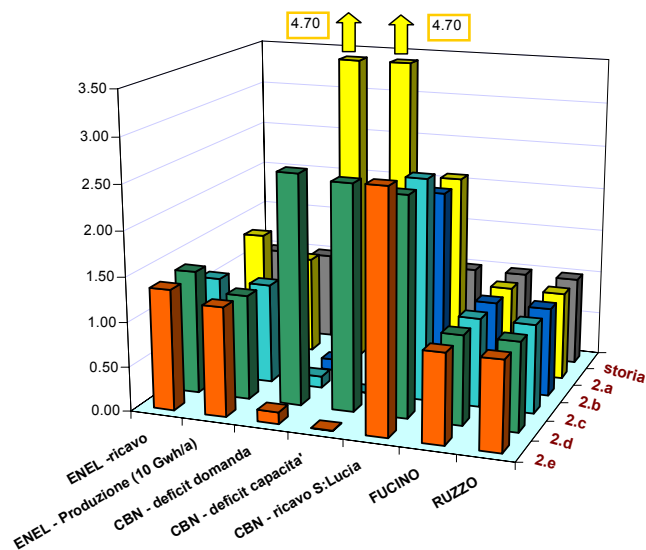


Figura 10-45: Confronto fra i valori normalizzati degli indicatori relativi alle alternative 2.e, 2.d, 2.c, 2.b, 2.a e storia

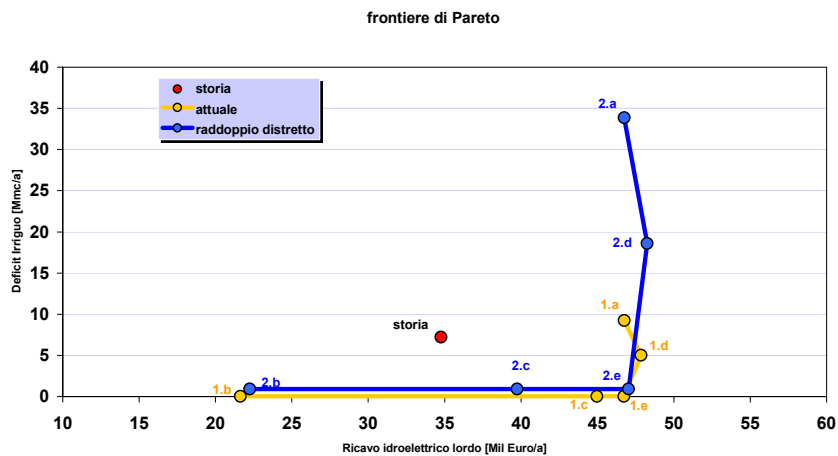


Figura 10-46: Frontiere di Pareto relative allo scenario Attuale e allo scenario Raddoppio Consorzio Irriguo.

MATRICE IMPATTI		INDICATORI						
		ENEL		Irrigazione		Fucino		Ruzzo
		Ricavo [MIL Euro/a]	Produzione [Gwh/a]	Deficit su domanda [Mmc/a]	su capacità [Mmc/a]	Ricavo S.Lucia [MIL Euro/a]	portata media mancante [mc/s]	prelievo Piaganini [Mmc/a]
A L T E R N A T I V E	Storia	34.77	527.65	7.211	7.199	0.49	0.50	3.74
	A1 Scenario Attuale							
	a. ottimo idroelettrico	46.76	586.17	9.260	9.257	0.51	0.50	3.73
	b. ottimo irriguo	21.63	444.31	0.019	0.000	0.48	0.50	3.73
	c. Lex irriguo -> idroelettrico	44.96	583.02	0.019	0.000	0.51	0.50	3.73
	d. Lex idroelettrico -> irriguo	47.85	611.43	5.022	5.013	0.50	0.50	3.73
	e. irriguo 0.5 - idroelettrico 0.5	46.74	601.25	0.027	0.008	0.51	0.50	3.74
	Prelievo Ruzzo							
	e.r14 a 1.4 mc/sec	46.34	598.45	0.020	0.002	0.49	0.50	13.77
	e.r21 a 2.1 mc/sec	46.26	603.85	0.022	0.003	0.48	0.50	27.06
	DMV Fucino							
	e.f10 10% portata media	46.69	599.90	0.026	0.008	0.51	0.48	3.73
	e.f30 30% portata media	46.61	597.57	0.027	0.009	0.51	0.45	3.73
	Caso Misto							
	e.misto 2.1 mc/sec + 30%	45.82	597.09	0.022	0.003	0.48	0.45	27.06
	DMV Gronde							
	e.1100 gronda 1100 (30%)	45.27	571.20	0.022	0.003	0.50	0.50	3.74
	e.400 gronde 400 (30%)	45.29	571.67	0.031	0.012	0.48	0.50	5.30
	A2 Raddoppio Distretto							
	a. ottimo idroelettrico	46.76	586.17	33.86	33.82	1.09	0.50	3.73
	b. ottimo irriguo	22.24	476.87	0.91	0.00	1.07	0.50	3.73
	c. Lex irriguo -> idroelettrico	39.74	594.59	0.93	0.03	1.22	0.50	3.73
	d. Lex idroelettrico -> irriguo	48.26	619.76	18.59	18.13	1.20	0.50	3.73
	e. irriguo 0.5 - idroelettrico 0.5	47.05	644.66	0.93	0.04	1.31	0.50	3.73

Figura 10-47: Valori degli indicatori in corrispondenza di tutte le alternative considerate.

Conclusioni e sviluppi futuri

Conclusioni

Lo studio è nato dal progetto M.E.R.I.T. il quale pone come obiettivo l'uso delle Reti Bayesiane per la costruzione di Sistemi di Supporto alle Decisioni in un ottica di promozione ed allargamento della partecipazione al processo decisionale dei portatori di interesse. Preso atto dell'impossibilità di descrivere l'intero sistema tramite Reti Bayesiane, abbiamo integrato approccio Markoviano ed approccio Bayesiano, applicando quest'ultimo solamente alle componenti del sistema per cui è effettivamente necessario, e stimato quantitativamente l'impatto che l'allargamento del distretto irriguo (CBN) ed il cambiamento della politica di gestione delle acque possono avere sulle diverse utenze individuate: utenza idroelettrica, utenza irrigua, utenza ambientale ed utenza civile.

Partendo da una descrizione del sistema fisico studiato e delle utenze conflittuali ivi presenti siamo giunti a definire i possibili interventi sul sistema necessari per aumentare la soddisfazione delle diverse utenze considerate. Abbiamo poi definito i criteri tramite cui definire qualitativamente la soddisfazione di ogni settore e gli indicatori necessari a quantificare l'impatto sul sistema degli interventi.

La costruzione del modello di un sistema tanto complesso ha richiesto la formulazione di alcune ipotesi semplificative e l'applicazione di alcune modifiche tramite cui siamo passati dallo schema del sistema fisico allo schema del modello implementato (schema logico del sistema). Abbiamo poi definito i modelli di ogni componente di tale schema, utilizzando le Reti Bayesiane per il modello del distretto irriguo e modelli matematici classici per tutte le altre componenti. In particolare la costruzione e taratura del modello

degli afflussi ha comportato l'effettuazione di bilanci giornalieri ed annuali necessari per riempire i notevoli buchi presenti nelle serie temporali disponibili e per ricostruire il contributo all'afflusso al sistema del bacino proprio del lago di Campotosto.

Abbiamo quindi integrato i due tipi di modello (Bayesiano e Markoviano) ottenendo un unico modello dell'intero sistema del Vomano, successivamente implementato nel Decision Support System TwoLe.

A questo punto abbiamo scelto alcune combinazioni di interventi normativi e strutturali ed associato ad ognuna almeno una politica efficiente, arrivando all'identificazione delle alternative d'intervento sul sistema successivamente valutate. In particolare abbiamo considerato lo scenario attuale, lo scenario di raddoppio dell'estensione del distretto irriguo, diversi scenari di prelievo idropotabile (1.4, 2.1 m^3/sec), di DMV sul Rio Fucino (10%, 30% della portata naturale), di DMV sulle gronde 400 o sulla gronda 1100 (30% sulla portata fluente alternativamente sull'una o sulle altre) e combinazioni di queste.

Abbiamo stimato gli effetti delle alternative definite effettuando simulazioni deterministiche su orizzonte finito ed osservando le corrispondenti traiettorie assunte dalle variabile idrologiche di interesse. E' stata inoltre effettuata una valutazione semplificata delle alternative tramite indici definiti normalizzando il valore di ogni indicatore rispetto alla situazione storica.

I risultati ottenuti dimostrano che la disponibilità d'acqua nell'area considerata può essere sufficiente, se ben gestita, ad aumentare il grado di soddisfazione di tutte le utenze, compresa quella idroelettrica, che potrebbe addirittura aumentare il proprio ricavo di circa 12 milioni di Euro l'anno. Tale risultato si spiega considerando che attualmente Enel non sfrutta quanto potrebbe la funzione di pompaggio delle proprie centrali invertibili, funzione che nella alternative di compromesso da noi calcolate permette di ricaricare velocemente il serbatoio con gli afflussi al sistema che non sono di immediata utilità per nessun utente, sfruttando poi l'acqua invasata sia per alimentare il distretto irriguo nella stagione colturale (primavera-estate) sia per produrre più energia nei periodi in cui essa

ha valore maggiore (autunno-inverno). Si ottiene quindi una gestione della risorsa idrica più efficiente ed equa, come era negli obiettivi del presente studio.

Questi risultati risentono tuttavia in quanto a credibilità della scarsa qualità e quantità dei dati di afflusso forniti dal gestore idroelettrico medesimo, nonché della ridotta partecipazione effettiva dei portatori di interesse alla definizione dei criteri e degli indicatori di settore, all'identificazione delle ipotesi semplificative adottate ed alla costruzione e taratura dei modelli delle componenti dello schema logico del sistema. Questa ridotta partecipazione è strutturale alle finalità sperimentali del progetto. Gli ampi margini di miglioramento rispetto alla situazione storica ci consentono comunque di affermare che l'eventuale adozione effettiva da parte dei decisori politici e dei portatori di interesse della procedura decisionale studiata ed il suo completamento (comparazione delle alternative, negoziazione, scelta dell'alternativa di compromesso, mitigazione) comporterebbe senz'altro anche nella realtà un netto miglioramento rispetto alla situazione esistente.

In questo senso è interessante riportare le reazioni allo studio emerse durante il meeting tenutosi il 7/5/2003 al Palazzo della Regione in l'Aquila (Abruzzo) durante il quale abbiamo presentato la metodologia ed i risultati dello studio ai seguenti rappresentanti dei portatori di interesse:

- Settore Ambiente

- Un impiegato del Parco Nazionale del Gran sasso e Monti della Laga.
- Non si è presentato alcun rappresentante delle diverse associazioni ecologiste operanti nella zona (WWF, Legambiente), che pure erano state invitate ad intervenire.

- Settore Idroelettrico

- Due rappresentanti di Enel Produzione: il responsabile degli impianti ed il responsabile delle relazioni pubbliche.

- Settore Fornitura Idropotabile

- Il rappresentante di ATO Teramo, la società che gestisce l'acquedotto del Ruzzo, non si è presentato al meeting.

- Settore Irriguo

- Il direttore del Consorzio di Bonifica Nord.

Hanno partecipato al meeting anche 2 rappresentanti politici della Regione Abruzzo: un dirigente e l'assessore all'ambiente.

Tutti i partecipanti si sono mostrati molto interessati alla metodologia di processo decisionale esposta, specialmente il rappresentante del settore irriguo ed i due rappresentanti politici, che hanno apprezzato specialmente l'aspetto di promozione della partecipazione al processo decisionale. I rappresentanti del settore idroelettrico invece, pur apprezzando l'impianto dello studio, hanno contestato il criterio di settore da noi adottato, la massimizzazione del ricavo, affermando che, come già sapevamo (vedi Cap.4), la gestione attuale degli impianti idroelettrici del sistema Vomano ha il solo obiettivo di soddisfare i picchi di domanda sulla rete nazionale. I due responsabili Enel ci hanno inoltre detto che l'eventuale decisione di cambiamento di tale obiettivo e quindi di adozione di una diversa politica di gestione dovrebbe essere presa a livello centrale dai dirigenti dell'azienda.

Questa affermazione fa capire che solo la partecipazione di soggetti che siano effettivamente in grado di prendere decisioni importanti può portare a risultati che siano condivisi ed accettati dagli attori del processo decisionale. D'altro canto solo una negoziazione promossa e supportata a livello politico, dalla Regione Abruzzo e/o dallo Stato, può portare alla partecipazione attiva di tali decisori.

E' evidente che nel momento in cui si manifestasse la volontà di procedere ad una reale negoziazione bisognerebbe rifare il presente studio da capo, avendo a disposizione molti più dati climatici ed idrologici, e procedendo ad un coinvolgimento molto più intenso ed

impegnativo di tutti i portatori di interesse. La possibilità di attivazione di una reale procedura di negoziazione è attualmente al vaglio della Regione Abruzzo.

In conclusione, per quanto riguarda le reti Bayesiane, abbiamo verificato la loro utilità nella descrizione di tutti quegli elementi socio-economici non strutturati di solito non considerati nel canonico approccio Markoviano.

I software attualmente esistenti presentano tuttavia limiti come strumenti di calcolo, risultando utili soprattutto per la loro interfaccia grafica intuitiva che permetterebbe la partecipazione degli agricoltori alla costruzione del modello, e quindi indirettamente al processo decisionale, nel caso si attivasse un reale processo di negoziazione.

Sviluppi futuri

In caso di attivazione di un reale processo decisionale si avrebbe la possibilità di costruire il grafo della BBN e le relative Tabelle di Probabilità Condizionata interagendo direttamente con gli agricoltori dell'area Vomano-Tordino, tramite interviste. In tal caso sarà interessante definire le modalità di interazione che consentano il miglior livello di consultazione possibile, e studiare la possibilità di usare gli strumenti di taratura automatica, presenti nei software attualmente esistenti, sui dati rilevati dalle interviste.

Un altro sviluppo interessante riguarda la possibilità di usare le BBN per uno studio preliminare del sistema, che consenta di capire qualitativamente le dinamiche agenti su di esso e quindi analizzare, sempre qualitativamente, le cause dell'insorgere di conflittualità.

Parte I

APPENDICI

Appendice A

Le Reti Bayesiane

Le reti bayesiane sono uno strumento che permette la rappresentazione di relazioni tra le variabili di un sistema il cui elevato grado d'incertezza non consente di raggiungere una conoscenza ben strutturata di esso. Per tale ragioni esse si adattano ai domini applicativi in cui per diverse motivazioni, che vanno dall'imprecisione all'incompletezza dell'informazione disponibile fino alla natura specifica delle relazioni esistenti tra le diverse variabili che descrivono lo stato del mondo, l'informazione disponibile è incerta.

Reti Bayesiane (Bayesian Belief Networks), Causal Networks, Probabilistic Networks, BBN sono i nomi piu' diffusi con i quali viene conosciuta questa metodologia che ha ricevuto grande attenzione sia in ambito scientifico che industriale.

Le reti bayesiane presero piede a partire dagli anni '80 sulla spinta degli studi d'intelligenza artificiale e della ricerca di uno schema che rappresentasse il modello di ragionamento inferenziale umano in condizioni di incertezza.

le BBN hanno trovato via via applicazione in diversi domini tra cui quello dell'agricoltura [18], della diagnosi medica [1] e della diagnosi di guasti nel processo produttivo di semiconduttori [2].

Questo strumento non ha come scopo la costruzione di un modello o di una replica perfetta del miglior esperto del campo di studio considerato, esso mira invece a supportare la figura dell'esperto del dominio applicativo in questione fornendo un supporto valido e

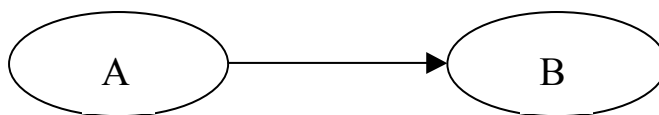


Figura A-1: Esempio di influenza causale tra due nodi A e B.

concreto al ragionamento in situazioni complesse.

Le reti devono essere intese come grafi atti a rappresentare impatti causali tra eventi; il ragionamento effettuato su di esse è dipendente da come il grado di certezza su uno o più eventi influenzi il grado di certezza su altri eventi.

In sostanza, i modelli che si costruiscono con queste modalità rappresentano un formalismo per ragionare in presenza di incertezza. Più precisamente il ragionamento nella direzione degli archi orientati è del tipo in Fig.A-1

Diciamo per esempio che l'evento A causa con certezza x l'evento B .

Intuitivamente siamo quindi portati a formulare il seguente ragionamento: “se sappiamo che l'evento A si è verificato, allora l'evento B si sarà verificato con certezza x ”.

Un ragionamento simile può essere effettuato anche nella direzione opposta: essendosi verificato l'evento B si può dedurre quale sia la probabilità che esso sia stato causato dall'evento A .

In particolare si nota come l'informazione disponibile su determinati eventi porti a modificare il grado di certezza associato ad altri eventi che siano in legame causale con essi. In ogni caso è comunque chiaro che, se l'informazione disponibile porta a rivedere il grado di certezza di dati eventi, quest'ultimo deve essere in qualche modo specificato prima che l'informazione sia disponibile ovvero è necessario fornire dei gradi di certezza a priori.

Tali gradi di certezza a priori verranno poi modificati in accordo con l'informazione a disposizione utilizzando gli assiomi del calcolo delle probabilità.

Quindi è necessario sottolineare come, a fronte di un modello grafico che descrive il

contesto causale studiato, sia necessario fornire un insieme di informazioni a priori che identifichino il grado di certezza di ogni evento modellato.

Diamo in questa appendice le definizioni teoriche che permettono di comprendere il funzionamento di una rete Bayesiana.

A.1 Fondamenti teorici

A.1.1 Richiami di teoria sulla probabilità condizionata

La teoria delle Reti Bayesiane poggia sulla regola di Bayes, la quale esprime la probabilità dell'evento A noto la realizzazione dell'evento B .

Dato uno spazio di probabilità $(\Omega, \mathbf{A}, P[.])$, dove:

- Ω : spazio campionario (insieme di tutti i possibili risultati dell'esperimento);
- \mathbf{A} : spazio degli eventi (contenente Ω);
- $P[.]$: funzione di probabilità con Dominio in \mathbf{A} e Codominio in $[0, 1]$

e dati due eventi A e B appartenenti ad \mathbf{A} , indichiamo con:

$$P[A/B]$$

la probabilità che si verifichi A sapendo che si è già verificato B , cioè la probabilità di A condizionata a B .

Tra queste variabili vale la relazione:

$$P[A/B] = \frac{P[AB]}{P[B]} \quad \text{per } P[B] \neq 0 \quad (\text{A.1})$$

Una dimostrazione intuitiva di ciò è questa: sapere che si è verificato B toglie importanza allo spazio campionario Ω e rende di fatto B il nuovo spazio campionario.-

$P[A/B]$ va quindi intesa come la probabilità che si verifichino contemporaneamente A e B (cioè $P[AB]$) pesata non più rispetto a Ω ma rispetto a B , che, verificandosi, diventa un evento certo.

La legge di Bayes, detta anche legge di probabilità delle cause, si esprime nella forma completa nel modo seguente:

Teorema 1 *dato lo spazio di probabilità $(\Omega, \mathbf{A}, P[.])$, siano B_1, B_2, \dots, B_n appartenenti ad \mathbf{A} ; per ogni i $P[B_i] > 0$; $i \neq j \implies B_i B_j = 0$; $\Omega = \bigcup_i B_i$; allora per ogni A appartenente ad \mathbf{A} :*

$$P[B_k/A] = \frac{P[A/B_k] \cdot P[B_k]}{\sum_i P[A/B_i] P[B_i]} \quad (\text{A.2})$$

Due eventi A e B si dicono *stocasticamente indipendenti* se:

$$P[A|B] = P[A] \quad (\text{A.3})$$

oppure:

$$P[B|A] = P[B]$$

oppure:

$$P[AB] = P[A]P[B]$$

Tutte e tre queste espressioni sono equivalenti.

La relazione di probabilità condizionata riesce quindi a migliorare la predizione in campo incerto, ma solo se sussiste dipendenza stocastica tra A e B .

Analizziamo ad esempio la (A.3): questa ci dice che il verificarsi dell'evento B non modifica la probabilità del verificarsi di A se A e B sono stocasticamente indipendenti.

A.1.2 Reti causali

Passiamo ora a formalizzare alcune regole di calcolo che devono essere soddisfatte dalle strutture bayesiane.

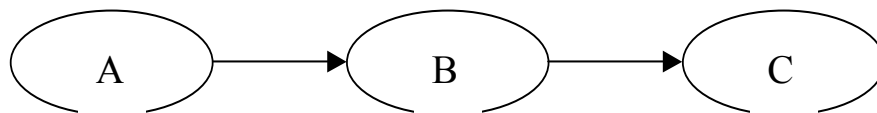


Figura A-2: Esempio di connessione seriale.

L'influenza causale tra due variabili può essere vista graficamente come una freccia che collega le due variabili (o nodi) nella direzione che va dalla causa all'effetto. Questa è anche la veste grafica utilizzata per rappresentare le relazioni tra delle variabili in una rete bayesiana.

Si consideri ad esempio la situazione riportata in Fig.A-2.

In questo caso la variabile A influenza direttamente la variabile B che a sua volta influenza direttamente la variabile C .

Avremo che la conoscenza dello stato assunto dalla variabile A influenzerà il grado di certezza sulla variabile B che a sua volta influenzerà il grado di certezza sulla variabile C .

Analogamente conoscere lo stato della variabile C influenzerà il grado di certezza sulla variabile A tramite la variabile B .

D'altra parte se lo stato della variabile B è noto allora il canale di comunicazione tra A e C risulta bloccato e quindi le variabili A e C diventano indipendenti.

In questo caso diremo allora che le variabili A e C risultano *D-separated* dalla variabile B . Inoltre, nel caso in cui lo stato di una variabile sia noto, diremo che quella variabile è *istanziata*.

In conclusione l'informazione viene trasmessa, nel caso di una connessione seriale, solo se la variabile che fornisce tale connessione non è istanziata, in caso contrario non si propaga.

Consideriamo ora il tipo di connessione mostrato in Fig.A-3.

In questo caso l'influenza può fluire tra tutti i figli della variabile A a meno che quest'ultima risulti istanziata. Diremo allora che le variabili B , C e D risultano *D-*

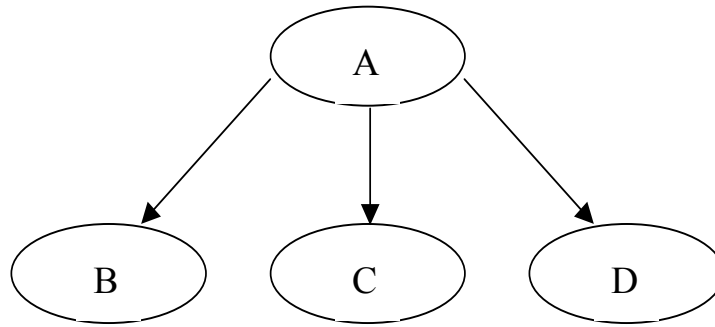


Figura A-3: Esempio di connessione divergente.

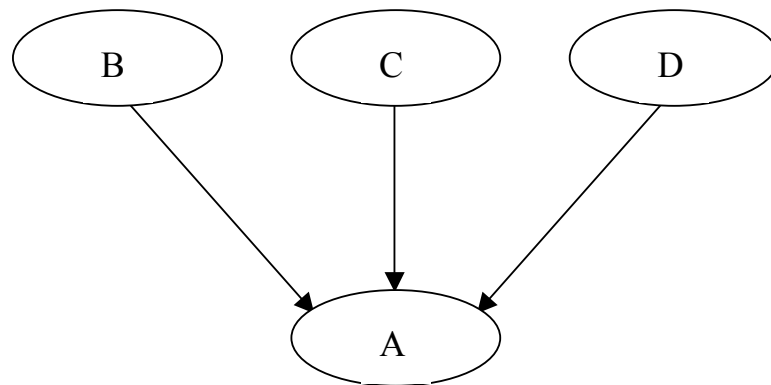


Figura A-4: Connessione convergente

separate dalla variabile A . Pertanto possiamo concludere che l'informazione si trasmette attraverso una connessione divergente a patto che la variabile che determina tale connessione non sia istanziata.

Infine, analizziamo la situazione riportata in Fig.A-4.

Nel caso in cui nulla sia noto su A tranne quello che è possibile inferire dai suoi genitori B , C e D , allora i suoi genitori sono indipendenti: la conoscenza dello stato assunto da uno di loro non altera il grado di certezza sugli altri. Al contrario, se è possibile conoscere in quale stato si trovi la variabile A , i suoi genitori non risultano più indipendenti. In merito a ciò è necessario osservare che l'informazione disponibile su A può essere di tipo diretto oppure proveniente da uno dei suoi discendenti. Questo fenomeno viene detto

dipendenza condizionata.

L'informazione relativa allo stato assunto da una variabile viene più propriamente detta *evidenza*.

Alla luce di tale considerazione fatta in precedenza possiamo concludere che un'evidenza può essere trasmessa, nel caso di una connessione convergente, solo se la variabile che individua la connessione è nota oppure se uno dei suoi discendenti ha ricevuto evidenza.

Al fine di chiarire il concetto di evidenza è necessario fare una precisazione. In particolare, se lo stato di una variabile è noto con certezza, parleremo di "*Evidenza Hard*", se invece ne è nota solo una distribuzione di probabilità parleremo di "*Evidenza Soft*". L'evidenza Hard viene più propriamente detta *istanza*.

I tre diversi tipi di connessione appena introdotti e commentati esauriscono le possibili tipologie di connessione e consentono in ogni rete causale di decidere se una data coppia di variabili risulta dipendente data l'informazione disponibile (evidenza).

Formalmente è necessario introdurre il concetto di *D-Separazione*.

- *Definizione:* D-Separazione [13]:

Sia data una rete Causale e siano A e B due variabili appartenenti ad essa. Allora A e B vengono dette D-Separate se per tutti i cammini tra A e B esiste una variabile intermedia V tale che una delle seguenti affermazioni risulta verificata:

1. la connessione è seriale o divergente e lo stato di V è noto con certezza,
2. la connessione è convergente e né la variabile V né alcun discendente di V hanno ricevuto evidenza.

Nel caso in cui A e B non siano D-Separate, diremo che esse sono D-Connesse.

A.1.3 Reti Bayesiane

Forniremo ora informazioni circa l'aspetto quantitativo delle reti. Questo è possibile solo approfondendo quanto detto nel Par.A.1.1 dove abbiamo introdotto i primi concetti di calcolo probabilistico.

Alla luce del teorema di Bayes possiamo illustrare come si possa applicare il calcolo delle probabilità alle variabili che costituiscono una rete causale.

Formalmente, in una rete causale ogni nodo rappresenta una variabile aleatoria che può assumere un numero finito n di valori mutuamente esclusivi.

Pertanto detta A tale variabile si avrà:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

e con $P[A]$ si indicherà la distribuzione di probabilità ad essa associata:

$$P[A] = \begin{bmatrix} P[A] = a_1 \\ P[A] = a_2 \\ . \\ . \\ P[A] = a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ x_n \end{bmatrix} \quad x_i \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1$$

Perciò avremo che, data una variabile B che può assumere m valori distinti, $P[A|B]$ sarà una matrice di dimensione $[n \times m]$ contenente elementi $P[a_i|b_j]$, mentre $P[A, B]$ sarà una matrice di dimensione $[n \times m]$ contenente elementi $P[a_i, b_j]$.

Allora il calcolo della probabilità congiunta delle variabili A e B ($P[A, B]$) viene effettuato utilizzando la (A.1) la quale richiede di calcolare $n \times m$ volte la seguente quantità: $P[a_i, b_j] = P[a_i|b_j]P[b_j]$.

Pertanto si può concludere come la matrice di probabilità congiunta per le variabili A e B ($P[A, B]$) possa essere ottenuta moltiplicando la matrice della probabilità condizionata della variabile A , data la variabile condizionate B ($P[A|B]$), per il vettore della probabilità marginale $P(B)$.

Alla luce di quanto appena introdotto presentiamo un semplice esempio.

Pensiamo ad una rete in cui una variabile A influenzi tramite una connessione divergente due variabili B e C .

Mentre la componente qualitativa viene riportata in Fig.A-5, la componente quanti-

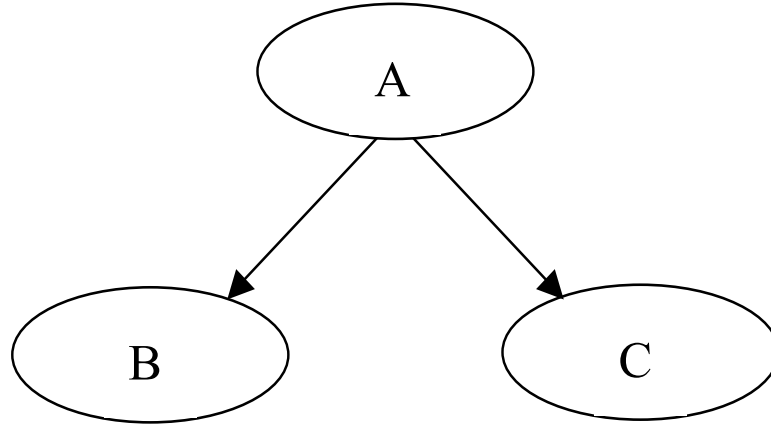


Figura A-5: Influenza causale di A su B e C.

Tabella A.1: Probabilità marginale a priori per la variabile A

	$A = a_1$	$A = a_2$
$P[A]$	0.7	0.3

tativa viene espressa tramite le tabelle di probabilità A.1, A.2, A.3.

Vediamo ora come sia possibile effettuare computazioni in grado di determinare valori di probabilità non direttamente espressi tramite le tabelle di probabilità sopra riportate.

Innanzitutto è possibile calcolare i valori delle probabilità marginali per le variabili B e C .

In tale caso si utilizza la relazione (A.1) per il calcolo delle probabilità congiunte $P[B, A]$ e $P[C, A]$. Per esempio, avremo che per $A = a_1$ e $B = b_1$:

$$P[B = b_1, A = a_1] = P[B = b_1 | A = a_1] \cdot P[A = a_1] = 0.8 \cdot 0.7 = 0.56$$

Quindi, applicando tale schema di calcolo per gli altri stati delle variabili A e B ,

Tabella A.2: Probabilità di B condizionata rispetto ad A

$P[B A]$	$A = a_1$	$A = a_2$
$B = b_1$	0.8	0.1
$B = b_2$	0.2	0.9

Tabella A.3: Probabilità di C condizionata rispetto ad A

$P[C A]$	$A = a_1$	$A = a_2$
$C = c_1$	0.8	0.1
$C = c_2$	0.2	0.9

Tabella A.4: Probabilità congiunta P[BA]

$P[B, A]$	$A = a_1$	$A = a_2$
$B = b_1$	0.56	0.03
$B = b_2$	0.14	0.27

otterremo la tabella di probabilità congiunta (vedi Tab.A.4).

A questo punto, utilizzando le tabelle di probabilità congiunta $P[B, A]$ e $P[C, A]$, è possibile calcolare le probabilità marginali per le variabili B e C . Tale calcolo viene effettuato applicando quello che viene definito come *procedimento di marginalizzazione rispetto alla variabile A*, ovvero semplicemente sommando per riga i valori di probabilità indicati nelle tabelle di probabilità congiunta:

$$P[a_i] = \sum_{b_j} P[a_i, b_j]$$

Applicando tale procedura per la variabile B si ottiene la Tab.A.5.

Dopo aver mostrato come sia possibile calcolare le probabilità marginali per le variabili B e C a partire dalle tabelle di probabilità che specificano la componente quantitativa della rete Bayesiana, vediamo come sia possibile utilizzare l'informazione disponibile per aggiornare le distribuzioni di probabilità in gioco.

Nel caso specifico dell'esempio in esame cerchiamo di capire come, dal punto di vista quantitativo, la conoscenza dello stato in cui si trova la variabile B possa influenzare il grado di certezza delle restanti variabili.

Supponiamo di voler determinare la probabilità a posteriori per la variabile A . Per

Tabella A.5: Probabilità marginale P[B]

	$B = b_1$	$B = b_2$
$P[B]$	0.59	0.41

Tabella A.6: Probabilità a posteriori congiunta $P[C, A]$

$P[C, A]$	$A = a_1$	$A = a_2$
$C = c_1$	0.76	0.005
$C = c_2$	0.19	0.045

effettuare tale calcolo si utilizza il Teorema di Bayes:

$$P[A|B = b_1] = \frac{P[B = b_1|A] \cdot P[A]}{P[B = b_1]} = \frac{1}{0.59} \cdot (0.8 \cdot 0.7, 0.1 \cdot 0.3) = (0.95, 0.05)$$

La conoscenza della probabilità a posteriori $P[A|B = b_1]$ consente di calcolare la probabilità a posteriori per la variabile C tramite la (A.1) e la probabilità a posteriori congiunta $P[C, A]$ che non risulta direttamente disponibile, ma che è possibile calcolare sempre tramite la (A.1), come si vede dalla Tab.A.6.

Grazie alla disponibilità della tabella di probabilità a posteriori congiunta $P[C, A]$ è possibile calcolare la probabilità marginale a posteriori per la variabile C tramite l'applicazione della procedura di marginalizzazione rispetto alla variabile A :

$$P[C] = (0.765, 0.235)$$

A questo punto abbiamo calcolato l'impatto dovuto all'informazione ricevuta circa la variabile B sulle restanti variabili A e C .

Compreso il funzionamento di ogni nodo nella rete causale possiamo ora formalizzare il concetto di indipendenza condizionata già visto nel Paragrafo precedente.

Definizione 2 *Indipendenza condizionata: [13]*

Siano date tre variabili A , B e C . Diremo che le variabili A e C sono condizionalmente indipendenti data la variabile B se risulta verificata la seguente condizione:

$$P(A|B) = P(A|B, C)$$

Dalla definizione di indipendenza condizionata tra variabili appena introdotta è possibile asserire che qualora lo stato della variabile B risulti noto con certezza (variabile

istanziata o Hard Evidence) l'eventuale informazione disponibile sulla variabile C (Hard Evidence o Soft Evidence) non altererà in alcun modo la distribuzione di probabilità associata alla variabile A . Inoltre, è utile ricordare che il concetto di indipendenza condizionata appare nel caso di connessioni seriali (vedi Fig.A-2) e divergenti (vedi Fig.A-3).

La definizione precedente può apparire in qualche modo asimmetrica, ma è possibile mostrare che se vale la relazione $P[A|B] = P[A|B, C]$ allora in base alla regola di Bayes avremo quanto segue:

$$P[C|A, B] = \frac{P[A|C, B] \cdot P[C|B]}{P[A|B]} = \frac{P[A|B] \cdot P[C|B]}{P[A|B]} = P[C|B]$$

Si osservi che per dimostrare quanto sopra è necessario che $P[A|B] > 0$. Pertanto si può concludere che se A risulta condizionalmente indipendente da C dato B allora per simmetria si avrà anche che C sarà condizionalmente indipendente da A dato B .

Sino ad ora abbiamo presentato la componente qualitativa dei modelli causali ovvero la struttura grafica utilizzata per rappresentare relazioni di dipendenza ed indipendenza condizionata. Abbiamo inoltre presentato un esempio sulla componente quantitativa ovvero sulle distribuzioni di probabilità associate alla rete causale. In particolare abbiamo visto che la forza dell'influenza esercitata da una variabile su altre variabili viene espressa come quantità numerica associata all'arco che le connette. Con l'introduzione della componente quantitativa si giunge alla definizione del concetto di rete Bayesiana presentata di seguito.

Definizione 3 *Rete Bayesiana [13]*

Una rete Bayesiana è costituita da una rete causale, componente qualitativa, che esprime delle relazioni di dipendenza ed indipendenza condizionata tra variabili, e da una componente quantitativa che descrive la forza di impatto tra variabili. Formalmente una rete Bayesiana è costituita da un grafo orientato aciclico (non è possibile che una variabile abbia influenza diretta o indiretta su se stessa) e da un insieme di probabilità condizionate. In particolare, per ogni variabile A con genitori B_1, B_2, \dots, B_n viene specificata

una distribuzione condizionata di probabilità:

$$P[A|B_1, B_2, \dots, B_n]$$

che descrive la forza di impatto delle variabili genitore sulla variabile figlio. Inoltre, è necessario sottolineare che per le variabili A che non hanno genitori sarà sufficiente specificare la relativa probabilità marginale a priori:

$$P(A)$$

Si osservi che grazie al concetto di D-separazione se due variabili A e B sono D-Separate allora data evidenza e si avrà che:

$$P[A|B, e] = P[A|e]$$

Introduciamo ora un teorema, di cui tralascieremo la dimostrazione, che assicura la correttezza del modello di rete Bayesiana definito precedentemente. Sia dato il seguente universo di variabili:

$$U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$$

se si dispone della distribuzione di probabilità congiunta:

$$P[A_1, A_2, \dots, A_n]$$

allora è possibile calcolare per ogni variabile A_i la sua probabilità marginale:

$$P[A_i]$$

e la sua probabilità a posteriori data l'evidenza $P[A_i|e]$.

Si osservi che la complessità necessaria (numero di valori di probabilità da specificare)

per descrivere la distribuzione congiunta dell'universo U :

$$P[U] = P[A_1, A_2, \dots, A_n]$$

cresce in modo esponenziale con il numero delle variabili e con la numerosità del loro spazio campione. Pertanto è necessaria una forma più compatta ed efficiente per descrivere la distribuzione di probabilità congiunta. Per tale ragione introduciamo il *teorema della Chain Rule* il quale assicura la correttezza del modello di rete Bayesiana introdotto precedentemente.

Teorema 4 Chain Rule [13] *Si indichi con BN una Bayesian Network associata all'universo:*

$$U = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$$

allora la probabilità congiunta:

$$P[U] = P[A_1, A_2, \dots, A_n]$$

può essere espressa come prodotto delle probabilità condizionate associate alla Bayesian Network:

$$P[U] = P[A_1, A_2, \dots, A_n] = \prod_{i=1}^n P[A_i | pa(A_i)]$$

dove con $pa(A_i)$ si indica l'insieme dei nodi genitori di A_i .

A.2 Elementi strutturali di una rete

Chiariti gli aspetti teorici possiamo caratterizzare in modo completo gli elementi che compongono le reti Bayesiane:

1. Un set di nodi che rappresentano le variabili di gestione del sistema, ognuno con un numero finito di stati mutuamente esclusivi. Le variabili possono essere sia

discrete che continue. Una variabile discreta possiede un ben definito numero di possibili valori, di tipo numerico, qualitativo o booleano. In una BBN ognuno di questi valori diventa lo stato di un nodo. Una variabile continua può prendere valore entro un determinato intervallo di variazione. Per poterla rappresentare, la variabile continua deve essere spezzata in più sottointervalli, ognuno dei quali rappresenta il possibile stato del nodo in questione.

2. Un set di legami che rappresentano le relazioni causa-effetto tra i diversi nodi. Questi legami sono diretti dalla causa verso l'effetto. Se c'è un legame da un nodo A ad un nodo B, B è definito come un figlio di A, mentre A come un genitore di B.
3. Un set di probabilità, una per ogni nodo, che descrive la possibilità che un nodo si trovi in un determinato stato dati gli stati dei nodi che lo influenzano direttamente (probabilità condizionata). Queste sono chiamate tabelle di probabilità condizionata (CPT) e sono utilizzate per esprimere la forza delle relazioni tra i nodi della rete.

Gli elementi 1 e 2 insieme formano il diagramma della BBN (o, più formalmente, il grafico direzionato aciclico). Aggiungendo l'elemento 3 si definisce il funzionamento della rete bayesiana.

Una CPT contiene tanti valori quante sono le possibili combinazioni degli stati dei nodi "genitori".

Una volta che tutte le tabelle di probabilità condizionata sono state completate, la BBN può essere compilata ed usata per le analisi necessarie. Generalmente ciò consiste nell'alterare gli stati di qualche nodo osservando gli effetti che si ripercuotono sugli altri nodi in accordo con le relazioni espresse nelle CPT (formalmente la BBN codifica la distribuzione di probabilità congiunta di tutti i nodi della rete. Ogni volta che lo stato di un nodo viene modificato, la probabilità congiunta viene aggiornata attraverso l'iterativa applicazione del teorema di Bayes). Le variazioni nella rete sono viste in termini di variazioni della probabilità che un nodo si trovi in un particolare stato.

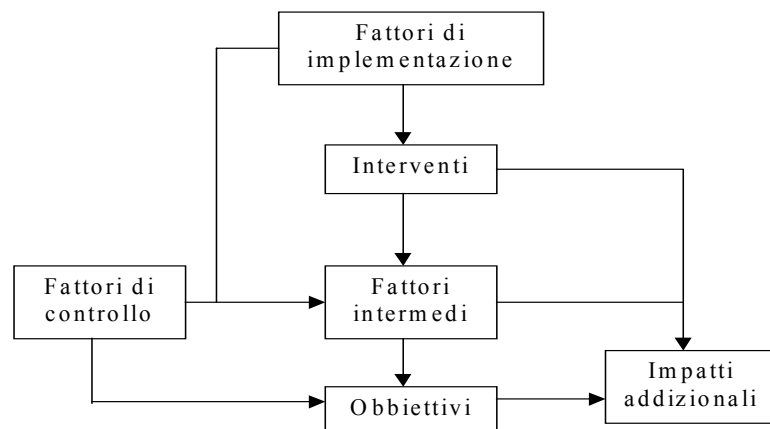


Figura A-6: Struttura generale di una rete bayesiana. Tratto da [6].

A.3 Applicazione delle reti Bayesiane a sistemi ambientali

Per applicare lo strumento di supporto decisionale fornito dalle reti bayesiane su un determinato sistema ambientale è necessario individuare le variabili da utilizzare per la sua schematizzazione. Queste variabili devono portare ad una rappresentazione compatta e chiara del problema senza tuttavia tralasciare aspetti significativi.

Generalizzando, si può definire una rete come la composizione di una serie di variabili, raggruppabili in 6 categorie, ognuna con delle qualità ben definite (vedi Fig.A-6).

In base a questa classificazione si può costruire una rete di prima approssimazione, adattandola poi alle esigenze dello studio e alle caratteristiche del sistema ambientale in esame.

In ogni caso è molto utile, come primo passo, raggruppare le variabili a disposizione all'interno di queste categorie in modo da comprendere meglio come funziona il sistema e quali sono gli obiettivi della rete.

In base a questa prima classificazione, vengono individuate le seguenti categorie:

- **Obiettivi** : rientra all'interno di questa categoria tutto ciò che si vuole modificare

attraverso la gestione del sistema (produttività agricola, risorse d'acqua, qualità delle acque, ecc.). Chiarire quali sono gli obiettivi permette di definire i criteri su cui si baseranno poi le scelte gestionali.

- **Interventi** : le azioni che si desidera implementare per poter raggiungere o quantomeno migliorare gli obiettivi prefissati. Essi possono essere anche visti come delle alternative gestionali. Possono essere attuati una volta per tutte (costruire un serbatoio), oppure possono essere pensate come delle azioni di lungo periodo (aumento della disponibilità d'acqua per una zona irrigua).
- **Fattori intermedi** : fattori che legano tra loro obiettivi e interventi. Se per esempio un intervento fosse la costruzione di un serbatoio a fini irrigui e l'obiettivo fosse l'incremento della produzione agricola, un fattore intermedio potrebbe essere l'aumento della superficie coltivata.
- **Fattori di controllo** : fattori che non possono essere modificati da alcun intervento ma che in qualche modo influenzano il sistema (fattori politici, economici, sociali).
- **Fattori di implementazione** : fattori attraverso i quali gli interventi, tanto di breve quanto di lungo termine, possono essere attuati con successo (disponibilità finanziarie, disponibilità di terreni e di acqua, consenso sociale).
- **Impatti addizionali** : fattori che vengono modificati dagli interventi messi in atto ma che non hanno a che fare con il sistema ambientale che si vuole gestire.

Da quanto visto dunque le variabili di una rete possono rappresentare fattori fisici, sociali ed economici. Possono rappresentare delle cose tangibili come l'acqua, oppure concetti astratti come il consenso dei contadini.

Una volta fissate le variabili in gioco definendo così la componente qualitativa della rete è necessario passare alla determinazione della componente quantitativa. Ciò si ottiene compilando le tabelle di probabilità condizionata (CPT) utilizzando tutte e le più appropriate informazioni disponibili. I dati necessari per costruire una CPT devono

descrivere come lo stato di una variabile viene modificato in seguito a delle modifiche delle variabili genitori.

La compilazione di ogni riga di una tabella di probabilità implica una domanda a cui è necessario dare una risposta.

Se due variabili A e B sono legate tra loro con una relazione di causa-effetto, la domanda da porsi sarà del tipo: se la variabile A si trova nello stato a_1 , quale è la probabilità che la variabile B si trovi nello stato b_1 ? E nello stato b_2 ?

A seconda del tipo di variabili considerate, rispondere a questo tipo di domanda può essere semplice oppure estremamente difficile. La natura delle domande stesse suggerisce il tipo di dati necessari per costruire le CPT; in generale le informazioni da raccogliere possono essere raggruppate in quattro classi:

1. Dati raccolti direttamente attraverso una campagna di misurazioni. Naturalmente questo tipo di dati può essere ottenuto solo se le variabili in questione si prestano ad essere misurate.
2. Dati raccolti attraverso la consultazione dei portatori d'interesse. Nel nostro caso bisogna ricorrere a questo tipo di dati per conoscere quale può essere il grado d'adesione dei contadini al Consorzio in seguito ad una ipotizzata disponibilità idrica. Si dovranno quindi raccogliere tutte le informazioni possibili attraverso domande mirate poste ai portatori d'interesse utilizzando appositi questionari.
3. Dati ricavati dall'uscita di modelli appositamente calibrati.
4. Dati raccolti interpellando esperti di settore. Come i dati di tipo 2, anche questi sono molto soggettivi e dovranno essere ottenuti ponendo all'esperto una serie di domande che permettano di stimare la probabilità che una variabile venga a trovarsi in un particolare stato in funzione dello stato assunto dai suoi genitori.

Una volta compilate tutte le tabelle la BBN è pronta ad essere utilizzata: si modifica lo stato delle variabili che rappresentano gli interventi e si esaminano gli effetti che vengono

prodotti sui nodi che rappresentano gli obiettivi della rete. Questi effetti sono mostrati in termini di variazione della probabilità che un determinato stato venga raggiunto.

Se le CPT sono state compilate con le migliori informazioni disponibili, allora i cambiamenti dei valori di probabilità che si osservano negli obiettivi possono fornire anche un'idea quantitativa abbastanza realistica dell'andamento delle variabili. Comunque questi valori devono essere trattati con una certa cautela. Uno strumento di supporto alle decisioni, come è una rete Bayesiana, deve essere infatti utilizzato per comprendere al meglio le dinamiche che stanno alla base del sistema studiato e per affiancare il decisore nella fase gestionale, non come strumento che fornisce una soluzione automatica del problema.

Appendice B

La Programmazione Dinamica Stocastica

In questa appendice analizziamo l'algoritmo che permette di risolvere il problema di controllo ad un solo obiettivo impostato nel Cap. 9. Poichè la descrizione dell'algoritmo per il caso generale di politiche a più valori è molto complessa, verrà inizialmente esposta la descrizione relativa ad una politica ad un solo valore, per poi proporre la sola estensione al caso più generale.

B.1 L'algoritmo di soluzione

Il problema di controllo che dobbiamo risolvere si presenta come un problema decisionale a più stadi, in ciascuno dei quali, noto lo stato x_t , si deve adottare una decisione u_t . Le conseguenze di questa decisione non sono deterministicamente note, ma possono in qualche misura essere anticipate, prima che la prossima decisione debba essere presa. Ogni decisione comporta un costo immediato, ma influenza anche, tramite il nuovo stato che produce, il contesto in cui le prossime decisioni verranno prese, e quindi anche il loro effetto, ossia i costi in cui si incorrerà negli stadi futuri. Ciò che cerchiamo è una regola per decidere, cioè una politica, che minimizzi il costo totale degli stadi futuri. Elemento

chiave del problema appare quindi essere la relazione intercorrente tra costi immediati e costi futuri.

Nel prendere la decisione dobbiamo dunque soppesare il costo immediato, cioè il costo $g_t(x_t, u_t, \epsilon_{t+1})$ che subiremo nella prossima transizione, e la desiderabilità dello stato x_{t+1} che il sistema raggiungerà. Occorre quindi individuare una misura di tale desiderabilità. L'idea più immediata è di considerare il costo in cui si incorrerebbe partendo da x_{t+1} e adottando decisioni ottime in tutte le transizioni successive. Denoteremo tale costo con il simbolo $H_{t+1}^*(x_{t+1})$ e lo chiameremo *costo-futuro ottimo* (optimal cost-to-go).

Se fosse noto il costo-futuro ottimo per tutti gli stati x_{t+1} , la decisione ottima $m_t^*(x_t)$ al tempo t potrebbe essere individuata minimizzando il valore atteso della somma del costo immediato e del costo-futuro scontato:

$$\mathbb{E}_{\epsilon_{t+1} \sim \phi_t(\cdot | x_t, u_t)} [g_t(x_t, u_t, \epsilon_{t+1}) + \alpha H_{t+1}^*(x_{t+1})]$$

Si denoterà questo fatto con la seguente scrittura

$$m_t^*(x_t) = \arg \min_{u_t} \mathbb{E}_{\epsilon_{t+1} \sim \phi_t(\cdot | x_t, u_t)} [g_t(x_t, u_t, \epsilon_{t+1}) + \alpha H_{t+1}^*(x_{t+1})] \quad (\text{B.1})$$

Conseguentemente il costo-futuro ottimo $H_t(x_t)$, associato allo stato presente sarà dato dalla seguente equazione

$$H_t^*(x_t) = \min_{u_t} \mathbb{E}_{\epsilon_{t+1} \sim \phi_t(\cdot | x_t, u_t)} [g_t(x_t, u_t, \epsilon_{t+1}) + \alpha H_{t+1}^*(x_{t+1})] \quad (\text{B.2})$$

Come si vede si tratta di un'equazione ricorsiva, detta *equazione di Bellman*, che fornisce il costo-futuro ottimo al tempo t , noto quello al tempo $t + 1$. É pertanto immediato pensare di utilizzare la (B.2) in modo ricorsivo, procedendo all'indietro, dall'istante finale sino a quello iniziale. É proprio questa l'idea guida della Programmazione Dinamica (PD): un algoritmo che permette di calcolare i costi-futuri ottimi per ogni istante t .

L'ipotesi principale che sta alla base di quanto scritto sopra è che la funzione obiettivo sia separabile, cioè sia esprimibile come somma di due contributi disgiunti: uno dovuto

solo alla decisione presa all'istante t ed uno dovuto a tutte le decisioni future.

Non è detto che la u_t che minimizza la (B.1) sia unica. Questa proprietà è comune a tutti i controlli appartenenti all'insieme

$$M_t^*(s_t) = \left\{ u_t \in U_t(s_t) : \mathop{\text{E}}_{\varepsilon_{t+1} \sim \phi_t(\cdot | s_t, u_t)} [g_t(s_t, u_t, \varepsilon_{t+1}) + H_{t+1}^*(s_{t+1})] \text{ è min} \right\} \quad (\text{B.3})$$

che costituisce dunque la legge di controllo a più valori che definisce la politica ottima a più valori cercata.

Si noti che la politica ottima è completamente definita dalla (B.1) per ogni istante t , se è nota la funzione $H^*(\cdot)$. A sua volta questa funzione, detta *funzione di Bellman*, è univocamente definita dalla conoscenza dei costi-futuri relativi ad ogni istante t , giacchè questi ne costituiscono le diverse sezioni temporali.

L'algoritmo risolutivo prende spunto da due teoremi: il primo dimostra che la funzione di Bellman $H^*(\cdot)$ del problema considerato è una funzione periodica di periodo T ; pertanto essa è univocamente definita dalla conoscenza di T costi-futuri:

$$H_t^*(\cdot) \quad t = 0, \dots, T-1$$

Il secondo teorema prova che, sotto condizioni molto generali, praticamente sempre verificate nei casi reali, la funzione di Bellman è l'unica soluzione del seguente sistema di equazioni di Bellmann (*condizione di ottimalità*):

$$H_0(x_0) = \min_{u_0} \mathop{\text{E}}_{\varepsilon_1} [g_0(x_0, u_0, \varepsilon_1) + \alpha H_1(x_1)] \quad \forall x_0 \in \mathcal{S}_{x_0} \quad (\text{B.4})$$

$$H_1(x_1) = \min_{u_1} \mathop{\text{E}}_{\varepsilon_2} [g_1(x_1, u_1, \varepsilon_2) + \alpha H_2(x_2)] \quad \forall x_1 \in \mathcal{S}_{x_1} \quad (\text{B.5})$$

...

$$H_{T-1}(x_{T-1}) = \min_{u_{T-1}} \mathop{\text{E}}_{\varepsilon_0} [g_{T-1}(x_{T-1}, u_{T-1}, \varepsilon_0) + \alpha H_0(x_0)] \quad \forall x_{T-1} \in \mathcal{S}_{x_{T-1}} \quad (\text{B.6})$$

soggetto ai vincoli

$$x_{t+1} = f_t(x_t, u_t, \epsilon_{t+1}) \quad t = 0, \dots, T-1 \quad (\text{B.7})$$

$$u_t \in \mathcal{U}_t(x_t) \quad (\text{B.8})$$

$$\epsilon_{t+1} \sim \phi_t(\cdot | x_t, u_t) \quad t = 0, \dots, T-1 \quad (\text{B.9})$$

Per risolvere il problema di controllo è necessario individuare T funzioni di Bellman e T leggi di controllo ad un sol valore che soddisfino la condizione di ottimalità (B.4) e (B.6). Esse possono essere determinate tramite un algoritmo noto con il nome di Algoritmo delle Successive Approssimazioni (ASA), basato sulla Programmazione Dinamica Stocastica.

L'algoritmo è stato proposto per la prima volta da White [26] con riferimento alle catene di Markov stazionarie, e poi generalizzato al caso delle catene di Markov periodiche da Su e Deininger [25] e da Nardini [17], individuando condizioni sufficienti per la convergenza dell'algoritmo.

Nel seguito verrà evitato l'uso della notazione delle catene di Markov, generalmente utilizzato nell'esposizione dell'ASA, poiché l'uso della notazione in termini di variabili di stato porta ad una implementazione più efficiente su calcolatore.

L'algoritmo è definito dalla seguente sequenza di operazioni:

- *Passo 0 (inizializzazione):*

Si ponga a 0 l'indice k dell'iterazione corrente.

Data la funzione reale $h^0(\cdot)$ (in cui il pedice 0 si riferisce all'iterazione corrente) definita sull'insieme finito di stato \mathcal{S}_{x_t} , si assegnano ad essa dei valori di inizializzazione arbitrari, ad esempio:

$$h^0(\cdot) = 0 \quad \forall x \in \mathcal{S}_{x_0}$$

- *Passo 1:*

Si considerino T funzioni a valori reali $H_\tau^k(\cdot)$, $\tau = 0, 1, \dots, T-1$, definite su $\widehat{\mathcal{S}}_{x_t}$,

calcolate ricorsivamente per $t = T - 1, T - 2, \dots, 1, 0$ tramite la seguente relazione:

$$H_t^k(x) = \min_{u_t \in \mathcal{U}_t(x)} \mathbb{E}_{\epsilon_{t+1} \sim \phi_{t+1}} [g_t(x, u_t, \epsilon_{t+1}) + \alpha H_{t+1}^k(f_t(x, u_t, \epsilon_{t+1}))] \quad (\text{B.10})$$

$$\forall x \in \widehat{\mathcal{S}}_{x_t}$$

nella quale $H_T^k(x) = h^k(x)$ per ogni $x \in \widehat{\mathcal{S}}_{x_0}$, $\phi_t(\cdot)$ è la densità di probabilità del disturbo ed f è la funzione di transizione di stato.

• *Passo 2:*

Si ponga:

$$h^{k+1}(x) = H_0^k(x) \quad \forall x \in \widehat{\mathcal{S}}_{x_0}$$

Si incrementi k di una unità e si ritorni al Passo 1.

A questo algoritmo deve essere naturalmente aggiunto un *criterio di terminazione* che consenta di trovare la soluzione in un numero finito di passi. Proprio a tal scopo è stata costruita la successione di funzioni $h^k(\cdot)$, delle quali ne esiste una per ogni iterazione; il test è infatti compiuto sulla variazione dei valori di queste funzioni tra un'iterazione e la successiva.

Data la presenza del fattore di sconto α , la distanza tra $h^k(\cdot)$ e $h^{k-1}(\cdot)$, definite $\forall x \in \mathcal{S}_{x_0}$, deve andare gradualmente riducendosi. Il test può quindi essere condotto utilizzando i due indicatori:

$$\begin{aligned} \Lambda_{\min}^k &= \min_x [h^k(x) - h^{k-1}(x)] \\ \Lambda_{\max}^k &= \max_x [h^k(x) - h^{k-1}(x)] \end{aligned}$$

L'algoritmo potrà quindi ritenersi giunto a convergenza quando $\Lambda_{\min}^k = \Lambda_{\max}^k \simeq 0$: questa condizione implica infatti che si siano stabilizzati sia la forma che i valori della $h(\cdot)$.

Un terzo teorema prova che l'algoritmo precedente è una procedura per la soluzione del sistema (B.4) e (B.9); in altre parole prova che, al tendere di k a infinito, le funzioni $H_t(\cdot)$ fornite dalle (B.10) tendono al costo-ottimo atteso $H_t^*(\cdot)$. Il che giustifica il test di terminazione. A convergenza ottenuta assumeremo quindi che le ultime T funzioni calcolate costituiscano un'accettabile approssimazione della funzione di Bellman $H^*(\cdot)$.

Conseguentemente la politica ottima è definita ancora una volta dalla (B.1), in cui $H_{t+1}^*(x_t)$ è dato dalla funzione di Bellman ora calcolata. Essendo questa periodica di periodo T , anche la politica di controllo risulterà periodica dello stesso periodo.

B.1.1 Implementazione dell'algoritmo

Tutto lo sforzo computazionale è concentrato nel passo 1, dove vengono calcolate T funzioni $H_t^k(x)$, ciascuna delle quali richiede quattro operazioni fondamentali:

1. simulazione del sistema dinamico, cioè applicazione della funzione di transizione di stato f per ottenere il valore dello stato x_{t+1} e del costo per passo g_t ;
2. interpolazione della $H_t^k(\cdot)$ in corrispondenza dello stato x_{t+1} , in generale non appartenente alla griglia di calcolo;
3. calcolo del valore atteso rispetto ai disturbi ϵ_t ;
4. minimizzazione del valore atteso rispetto ai possibili controlli u_t .

L'algoritmo riscritto in termini di programma di calcolo per ogni istante t compreso tra $T - 1$ e 0 assume quindi il seguente aspetto:

```
per ogni stato  $x_t$ 
{
    calcolo l'intervallo di controlli ammissibili;
    per ogni controllo  $u_t$ 
    {
```

```

    inizializzo a 0 il valore atteso del costo totale  $G$ ;
    per ogni disturbo  $\epsilon_t$ 
    {
        simulo il sistema dinamico e ottengo i valori di  $x_t$  e  $g_t$ ;
        approssimo  $H_{t+1}^k(x_{t+1})$ ;
        aggiorno  $G$ , sommandogli il valore di  $\phi_{\epsilon_t}[g_t + \alpha H_{t+1}^k(x_{t+1})]$ ;
    }
    assegno a  $H_t^k(x_t)$  il minimo tra i valori di  $G$  finora calcolati;
}
}

```

Si tratta dunque di tre cicli innestati: il più interno serve a calcolare il valore atteso come sommatoria dei costi per la loro densità di probabilità; il ciclo successivo ricerca il valore minimo del costo variando tutti i possibili controlli e quello più esterno considera tutte le combinazioni di stati.

L'onere computazionale per il calcolo di una funzione $H_t^k(\cdot)$ è quindi proporzionale al numero di volte che ogni ciclo deve essere ripetuto; queste coincidono con il numero di punti in cui è discretizzata ogni variabile ϵ_t , u_t e x_t , cioè con le cardinalità degli insiemi $\hat{\mathcal{S}}_{x_t}$, $\hat{\mathcal{S}}_{u_t}$, $\hat{\mathcal{S}}_{\epsilon_t}$ (Vedi Par.

Il calcolo del valore approssimato di H_{t+1}^k in x_{t+1} può essere eseguito utilizzando qualunque tipo di interpolazione locale tra i valori che H_{t+1}^k assume in corrispondenza degli estremi della classe di stato cui appartiene x_{t+1} . Solitamente come interpolatori vengono utilizzate rette o curve polinomiali (*splines*). È evidente che per ottenere valori interpolati ragionevoli e aderenti alla realtà fisica è necessario che la griglia di discretizzazione dello stato sia sufficientemente fitta.

Questo impone dunque un limite inferiore al numero N di classi di stato, al di sotto del quale non si può scendere, pena la perdita di significatività della soluzione. È dunque proprio N il parametro fondamentale che determina l'entità dei tempi di calcolo.

B.2 Discretizzazione del sistema e tempo di calcolo

Il sistema del Vomano viene descritto da un'equazione vettoriale avente la seguente forma:

$$\mathbf{x}_{t+1} = f_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t, \boldsymbol{\varepsilon}_{t+1})$$

dove \mathbf{x}_t è lo stato, \mathbf{u}_t il controllo, $\boldsymbol{\varepsilon}_{t+1}$ il disturbo agente sul sistema. Tali grandezze appartengono, nell'ordine, a degli insiemi \mathcal{S}_{x_t} , \mathcal{S}_{u_t} e $\mathcal{S}_{\varepsilon_{t+1}}$.

L'implementazione informatica dell'algoritmo risolvete può essere applicata solo se gli insiemi \mathcal{S}_{x_t} , \mathcal{S}_{u_t} e $\mathcal{S}_{\varepsilon_t}$ sono finiti e limitati per tutti gli istanti di tempo. Dal momento che un sistema naturale non presenterà a priori tale caratteristica è necessario ricondursi ad un sistema discretizzato “quasi” equivalente, in cui lo spazio dello stato, del controllo e del disturbo siano insiemi finiti. Descriveremo ora la procedura di discretizzazione adottata, definiremo le classi di discretizzazione e rapporteremo quest'ultime ai corrispondenti tempi di calcolo.

B.2.1 Classi di stato

Per ogni t , dato l'insieme di stato $\mathcal{S}_{\mathbf{x}_t}$, si definisce un insieme rettangolare $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t} \subseteq \mathcal{S}_{\mathbf{x}_t}$:

$$\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t} = \left\{ \mathbf{x}_t \mid \underline{b}_t^i \leq x_t^i \leq \bar{b}_t^i \quad i = 1, 2, \dots, n \right\} \quad t = 0, 1, \dots, T-1$$

in cui:

n è la dimensione dello stato;

x_t^i è la i -esima componente di \mathbf{x}_t ;

$\underline{b}_t^i, \bar{b}_t^i$ sono rispettivamente il limite inferiore e superiore di x_t^i .

Questi limiti devono essere scelti in modo tale che la probabilità che si verifichi un valore di $\mathbf{x}_t \notin \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}$ sia trascurabile.

Si consideri quindi una partizione ($\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^1, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^2, \dots, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^N$) di $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}$, si considerino cioè N sottoinsiemi disgiunti $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^1, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^2, \dots, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^N$ tali che $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t} = \bigcup_{j=1}^N \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^j$. Ad esempio, se per $i = 1, 2, \dots, n$ si divide l'intervallo $\left[\underline{b}_t^i, \bar{b}_t^i \right]$, in cui assume valori la i -esima componente dello stato, in N_i intervalli adiacenti, si possono definire gli insiemi $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^1, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^2, \dots, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^N$ come tutti i prodotti cartesiani possibili tra n sottointervalli, uno per ogni variabile di stato. In questo caso si ha $N = N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n$.

Sia $\hat{\mathbf{x}}^j \in \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}$ un punto che caratterizza in qualche senso l'insieme $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^j$; ad esempio il punto avente coordinate corrispondenti ai punti medi dei sottointervalli il cui prodotto cartesiano produce $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^j$. L'insieme finito di stato del sistema discretizzato è allora il seguente:

$$\hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t} = \{ \hat{\mathbf{x}}_t^1, \hat{\mathbf{x}}_t^2, \dots, \hat{\mathbf{x}}_t^N \}$$

Classi di controllo

In modo del tutto analogo, si definisce per ogni t un insieme rettangolare $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t} \subseteq \mathcal{S}_{\mathbf{u}_t}$ di controlli:

$$\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t} = \{ \mathbf{u}_t \mid \underline{u}_t^i \leq u_t^i \leq \bar{u}_t^i \quad i = 1, 2, \dots, m \} \quad t = 0, 1, \dots, T-1$$

e da questo, definita una partizione ($\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}^1, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}^2, \dots, \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}^M$) di $\tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}$, si ricava l'insieme discreto $\hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}$ dei controlli del sistema discretizzato:

$$\hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t} = \{ \hat{\mathbf{u}}_t^1, \hat{\mathbf{u}}_t^2, \dots, \hat{\mathbf{u}}_t^M \}$$

Classi di disturbo

Anche per il disturbo si procede in modo analogo, definendo dapprima per ogni t un insieme $\tilde{\mathcal{S}}_{\boldsymbol{\varepsilon}_t}$ rettangolare e limitato $\tilde{\mathcal{S}}_{\boldsymbol{\varepsilon}_t} = \{ \boldsymbol{\varepsilon}_t \mid \underline{\varepsilon}_t^i \leq \varepsilon_t^i \leq \bar{\varepsilon}_t^i \quad i = 1, 2, \dots, v \}$. Se il disturbo ha una descrizione di tipo set-membership con $\Xi_t(\mathbf{x}_t, \mathbf{u}_t)$ limitato, gli estremi $\{ \underline{\varepsilon}_t^i, \bar{\varepsilon}_t^i \}_{i=1, \dots, v}$ sono facilmente individuabili. Nel caso opposto essi devono essere scelti in modo che la

probabilità che $\varepsilon_t \in \mathcal{S}_{\varepsilon_t} - \tilde{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}$ sia trascurabile. Per questo, se le componenti del disturbo hanno distribuzione normale e sono tra loro statisticamente indipendenti, è sufficiente porre $\underline{\varepsilon}_t^i = -\vartheta \sigma_{Max}$ e $\bar{\varepsilon}_t^i = \vartheta \sigma_{Max}$ con $\vartheta \in N^+$ intero positivo sufficientemente grande (ad esempio 3 o 4), e $\sigma_{Max} = \text{Max}\{\sigma_0, \sigma_1, \dots, \sigma_{T-1}\}$, cioè pari al massimo tra gli scarti quadratici medi del disturbo.

Si definisce poi una partizione $(\tilde{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}^1, \tilde{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}^2, \dots, \tilde{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}^v)$, e quindi, detto $\hat{\varepsilon}_t^i$ un punto caratterizzante $\tilde{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}^i$ (ad esempio il baricentro), l'insieme discreto $\hat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}$ dei disturbi del sistema “quasi” equivalente risulta essere:

$$\hat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t} = \{\hat{\varepsilon}_t^1, \hat{\varepsilon}_t^2, \dots, \hat{\varepsilon}_t^v\}$$

Se il disturbo è stocastico ad ogni elemento di $\hat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}$ è associata una probabilità di realizzazione

$$\hat{\phi}_t(\hat{\varepsilon}_t^j) = \int_{\tilde{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t}^j} \phi_t(z) dz \quad j = 1, \dots, v \quad t = 0, \dots, T-1$$

dove $\phi_t(\cdot)$ è la distribuzione di probabilità di ε_t . La probabilità $\hat{\phi}_t(\cdot)$ risulta periodica di periodo T:

$$\hat{\phi}_t(\cdot) = \hat{\phi}_{t+kT}(\cdot) \quad k = 1, 2, \dots \quad t = 0, \dots, T-1$$

B.2.2 Il sistema discretizzato

Definiti gli insiemi discreti di definizione delle variabili di stato, controllo e disturbo, il sistema discretizzato sarà descritto dalla seguente equazione:

$$\hat{\mathbf{x}}_{t+1} = \hat{f}_t(\hat{\mathbf{x}}_t, \hat{\mathbf{u}}_t, \hat{\varepsilon}_{t+1}) \quad (\text{B.11})$$

dove: $\hat{\mathbf{x}}_t \in \hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}$, $\hat{\mathbf{u}}_t \in \hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}$, $\hat{\varepsilon}_{t+1} \in \hat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_{t+1}}$, $\forall t = 0, 1, \dots$; ad ogni istante t , il disturbo viene estratto dall'insieme $\hat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_{t+1}}$ e, nel caso esso sia stocastico, ad ogni elemento $\hat{\varepsilon}_{t+1}$ di $\hat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_{t+1}}$ è associata una probabilità $\hat{\phi}_t(\cdot)$ di estrazione. La funzione $\hat{f}_t(\cdot, \cdot, \cdot)$ è definita ponendo $\hat{f}_t(\hat{\mathbf{x}}_t, \hat{\mathbf{u}}_t, \hat{\varepsilon}_{t+1}) = \hat{\mathbf{x}}^j$ quando $f_t(\hat{\mathbf{x}}_t, \hat{\mathbf{u}}_t, \hat{\varepsilon}_{t+1}) \in \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^j$, $t = 0, 1, \dots$ $j = 1, 2, \dots, N$.

La funzione di costo per passo è analogamente ridefinita da:

$$\hat{g}_t(\hat{\mathbf{x}}_t, \hat{\mathbf{u}}_t, \hat{\mathbf{e}}_{t+1}) = g_t(\hat{\mathbf{x}}_t, \hat{\mathbf{u}}_t, \hat{\mathbf{e}}_{t+1}) \quad t = 0, 1, \dots$$

Sia la funzione $\hat{f}_t(\cdot)$ che il costo per passo $\hat{g}_t(\cdot)$ risultano ovviamente essere funzioni periodiche di periodo T .

Una politica di controllo ad un sol valore $\hat{p} = \{\hat{m}_1(\cdot), \hat{m}_2(\cdot), \hat{m}_3(\cdot), \dots\}$ è una sequenza di funzioni

$$\hat{m}_t(\cdot), \quad t = 0, 1, \dots \quad \text{con} \quad \hat{m}_t : \hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t} \rightarrow \hat{\mathcal{S}}_{\mathbf{u}_t}$$

che associano ad ogni valore del nuovo stato $\hat{\mathbf{x}}_t$ una decisione nel nuovo insieme dei controlli.

Il sistema così definito risulta essere un sistema a stati finiti con un ingresso incerto o stocastico; nel secondo caso è una catena di Markov.

Una volta determinate le leggi di controllo discrete $\hat{m}_t(\cdot)$ per il sistema discreto (B.11), si potrà dedurre una legge di controllo per il sistema originario assumendo che il controllo $\hat{m}_t(\hat{\mathbf{x}}_t^j)$ si applichi ad ogni $\mathbf{x}_t \in \tilde{\mathcal{S}}_{\mathbf{x}_t}^j$.

Le discretizzazioni adottate ed i tempi di calcolo

La fase di discretizzazione degli insiemi $\hat{\mathcal{S}}_{x_t}$, $\hat{\mathcal{S}}_{u_t}$, $\hat{\mathcal{S}}_{e_t}$ assume tanta più importanza nella risoluzione di un problema quanto più le risorse di calcolo disponibili siano limitate rispetto alla complessità computazionale del problema di controllo.

Come si legge in Soncini Sessa, [1998], infatti, l'algoritmo della Programmazione Dinamica Stocastica impiegato nella risoluzione del problema, benché molto robusto ed applicabile sotto ipotesi così blande da essere praticamente sempre soddisfatte in un sistema naturale, presenta un limite fortemente significativo: le sue richieste computazionali sono così elevate che per molte applicazioni la soluzione esatta del problema non è calcolabile, almeno con la potenza di calcolo comunemente disponibile. La ragione di ciò

si trova in quella che Bellman ha pittorescamente definito la "maledizione della dimensionalità" [4]: la complessità di calcolo dell'algoritmo (definita come numero di volte in cui la funzione di transizione di stato viene calcolata) cresce esponenzialmente con le dimensioni dello stato, del controllo e del disturbo del sistema.

Per apprezzare appieno la precedente affermazione si consideri, per esempio, un problema in cui lo stato abbia dimensione n , il controllo dimensione m e il disturbo dimensione v . Al fine di ottenere la funzione $H_t(x_t)$ l'insieme di stato S_{x_t} deve essere discreto; si supponga quindi di considerare 100 valori per discretizzare ciascuna componente dello stato; la griglia complessiva conterrà quindi 100^n punti. Per ciascuno di questi punti si deve effettuare numericamente la minimizzazione rispetto al controllo u_t . Ciò avviene con un algoritmo di ricerca del minimo in $U_t(x_t)$, che è un insieme nello spazio R^m . Per ogni valore di $u_t \in U_t(x_t)$ si deve valutare il corrispondente costo-futuro atteso; ciò comporta il calcolo del valore atteso e quindi una integrazione (per via numerica) nello spazio R^v . Da questo limite consegue che la Programmazione Dinamica Stocastica può essere di fatto applicata solo se le dimensioni n , m e v sono basse.

Nel caso specifico del sistema del Vomano, la complessità computazionale, che indicheremo con \mathbb{C} , è legata al numero di componenti delle variabili del problema di controllo:

$n = 1$	Variabili di stato	x_t^C		
$m = 3$	Variabili di controllo	u_t^0	u_t^1	u_t^2
$v = 3$	Variabili di disturbo	ε_t^C	$\varepsilon_t^{\text{Pr}}$	$\varepsilon_t^{\text{Piag}}$

Ciò significa che:

$$\begin{aligned}\widehat{\mathcal{S}}_{x_t} &= \{\hat{x}_t^C\} \\ \widehat{\mathcal{S}}_{u_t} &= \{\hat{u}_t^0, \hat{u}_t^1, \hat{u}_t^2\} \\ \widehat{\mathcal{S}}_{\varepsilon_t} &= \{\hat{\varepsilon}_t^C, \hat{\varepsilon}_t^{\text{Pr}}, \hat{\varepsilon}_t^{\text{Piag}}\}\end{aligned}$$

In funzione del numero di classi con cui si discretizza ciascuna delle componenti dello stato, del controllo e del disturbo la complessità totale del problema (che ricordiamo è il numero di volte che la funzione di transizione di stato viene calcolata) è data da:

$$\mathfrak{C} = \sum_{t=1}^{365} \left(N_t^1 \times \prod_{j=1}^3 M_t^j \times \prod_{k=1}^3 V_t^k \right)$$

in cui:

N_t^i = numero di valori considerati per la componente i-esima dello stato (in questo caso abbiamo una sola variabile di stato quindi $i=1$);

M_t^j = numero di valori considerati per la della componente j-esima del controllo;

V_t^k = numero di valori considerati per la della componente k-esima del disturbo.

La complessità \mathfrak{C} del problema influenza:

1. l'occupazione di memoria, perché dipende dalla dimensione delle 2 matrici che contengono le sezioni $H_t(x_t)$ e $H_{t+1}(x_{t+1})$ della funzione di Bellman.
2. il tempo di calcolo, che è lineare con la complessità \mathfrak{C} .

Ne consegue che i parametri n , m e v che definiscono la discretizzazione devono essere scelti in modo tale da ottenere occupazioni di memoria e tempi di calcolo accettabili.

La stima del tempo di calcolo a differenza dell'occupazione di memoria non può essere fatta a priori rispetto alla risoluzione del problema poiché i tempi di calcolo sono fortemente dipendenti dai sistemi hardware e software che si utilizzano.

Un numero elevato di classi di stato garantisce una buona precisione nella descrizione del volume di invaso ma fa anche esplodere i tempi di calcolo. È per questo che è opportuno discretizzare con un numero di classi che garantisca un compromesso tra tempi di calcolo accettabili e un sufficiente grado di precisione di discretizzazione.

Tabella B.1: Stima dei tempi di calcolo per la soluzione del problema di controllo in funzione delle discretizzazioni adottate

	x_t	u_t^0	u_t^1	u_t^2	ε_{t+1}^C	ε_{t+1}^{Pr}	ε_{t+1}^{Piag}	$T [ore]$
classi	91	17	6	3	5	4	5	7
classi	235	17	6	3	5	4	5	19
classi	2350	17	6	3	5	4	5	195

Nella Tab.B.1 sono presentate delle stime dei tempi di calcolo in funzione del numero di classi considerate per le variabili del modello.

In particolare la discretizzazione della variabile di stato del serbatoio di Campotosto è quella che più influisce sui tempi di calcolo.

Il livello di minimo invaso del serbatoio è a quota 1294 m.s.l.m. mentre la quota di massimo invaso è 1317.5 m.s.l.m. Per rappresentare con precisione lo stato di un serbatoio con 23.5 m di escursione ed una superficie media di 14 km² si dovrebbe utilizzare un passo di 1 cm. (che corrisponde a 140000 m³ di volume invasato), discretizzando lo stato del serbatoio in 2350 classi.

Questo, come si vede dalla Tab.B.1, è inaccettabile dati i tempi di calcolo stimati.

Viste le finalità del nostro studio e la necessità di ridurre il più possibile i tempi di calcolo, per le variabili del sistema è stato adottata la discretizzazione più lasca (prima riga della Tab.B.1).

Classi di controllo Per discretizzare il controllo del sistema occorre per prima cosa determinare l'intervallo di valori all'interno del quale sono comprese le decisioni che possono essere realmente adottate. In secondo luogo è necessario determinare la larghezza delle singole classi di controllo. Per fare ciò le strade che si possono seguire sono due: si possono adottare delle classi ad ampiezza uniforme oppure non uniforme. Nel primo caso viene assegnata la stessa importanza a tutto l'intervallo di controlli, mentre il secondo consente di "infittire" in modo non omogeneo la griglia, garantendo una migliore sensibilità rispetto ad alcuni valori dei controlli rispetto ad altri.

Nel nostro caso gli intervalli entro cui possono essere compresi i controlli sono $u_t^0 =$

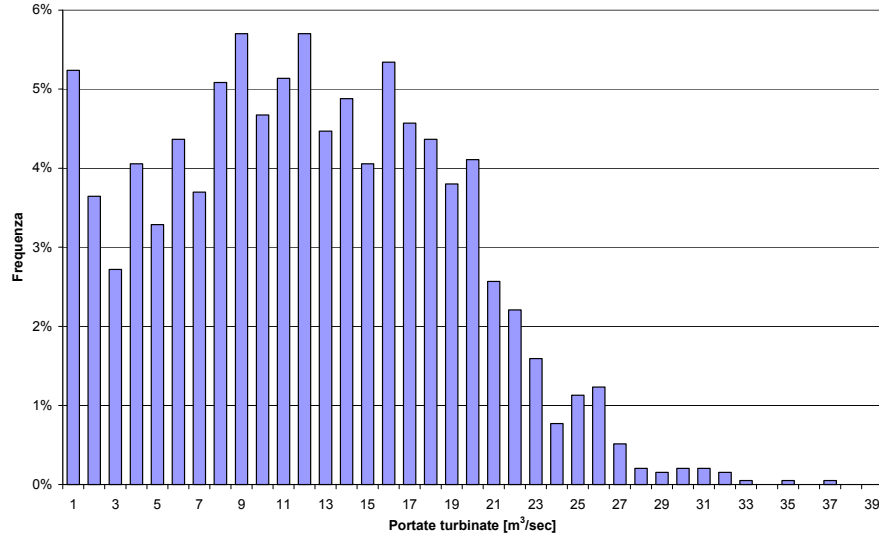


Figura B-1: Distribuzione delle portate turbinare dall'impianto di Provvidenza

$[0, 61.8]$, $u_t^1 = [0, 11]$, $u_t^2 = [0, 4]$. Gli estremi superiori di questi intervalli sono definiti rispettivamente dalla massima portata turbinabile dall'impianto di Provvidenza e dalle capacità di pompaggio delle centrali di Provvidenza e S. Giacomo.

L'intervallo relativo al controllo u_t^0 è stato ulteriormente ridotto dopo aver analizzato i dati relativi alle portate medie giornaliere turbinare a Provvidenza (vedi Fig.B-1). Queste sono uniformemente distribuite fino a circa $20 \text{ m}^3/\text{sec}$ e raramente superano questo valore. La massima portata media giornaliera turbinata storicamente è pari a $39 \text{ m}^3/\text{sec}$ (poichè il dato è calcolato su 24 ore mentre le turbine funzionano per 12-14 ore). Perciò l'intervallo entro cui il controllo u_t^0 può assumere valori è stato ridotto a $[0, 39]$.

La variabile u_t^0 è stata quindi discretizzata in 17 classi non uniformi infittendo la griglia per i valori di portata più frequenti (vedi Fig.B-1). Il risultato della discretizzazione è riportato in Fig.B-2.

I controlli u_t^1 e u_t^2 sono invece stati suddivisi in classi equidistribuite di portata: 6 classi per u_t^1 e 3 per u_t^2 .

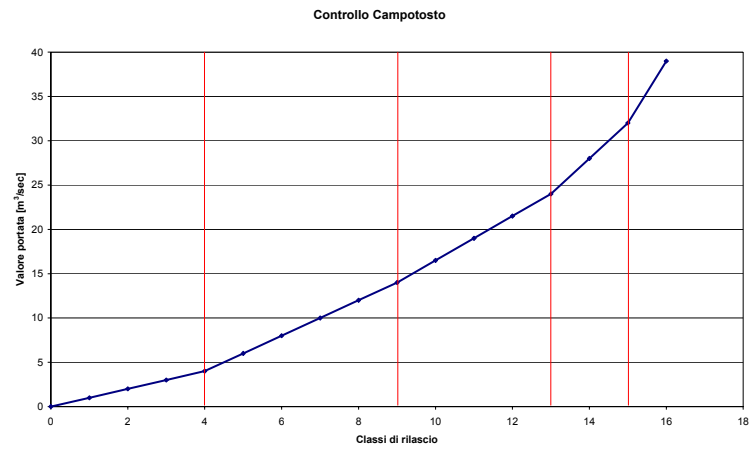


Figura B-2: Intervalli di discretizzazioni uniformi per u_t^0

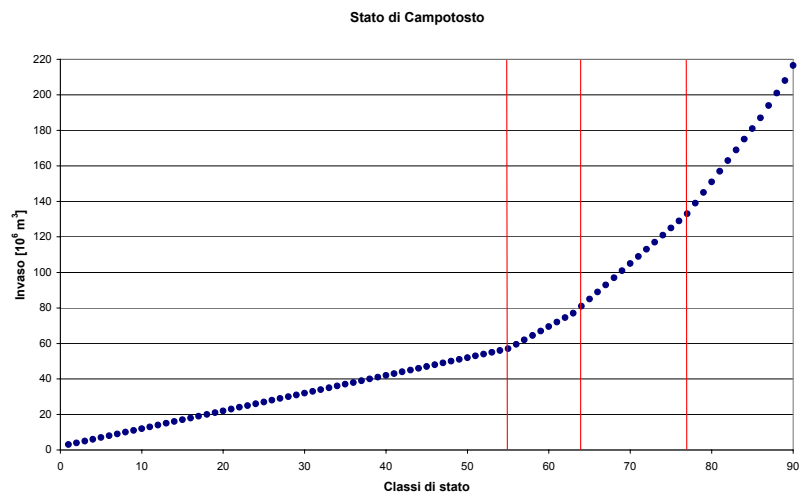


Figura B-3: Intervalli di discretizzazioni uniformi per x_t^C

Tabella B.2: Discretizzazione dei disturbi

	ε_{t+1}^C	$\varepsilon_{t+1}^{\text{Pr}}$	$\varepsilon_{t+1}^{\text{Piag}}$
N° classi	5	4	5
Ampiezza [m^3/sec]	6	2.5	6

Classi di stato Come riportato in Tab.B.1 la scelta di discretizzare lo stato del serbatoio in 91 classi di invaso è stata necessaria per ridurre i tempi di calcolo. La griglia non uniforme adottata può essere semplicemente riassunta in Fig.B-3. Anche in questo caso i valori per cui infittire o meno la griglia sono stati scelti in funzione degli invasi storicamente registrati per il serbatoio.

Classi di disturbo Nel Cap.7 abbiamo giustificato la scelta del modello AR(0) per rappresentare gli afflussi al sistema. Per questo motivo si considera $a_{t+1}^i = \varepsilon_{t+1}^i$. Queste variabili seguono una distribuzione di probabilità di tipo Lognormale e perciò sono continue in $[0, +\infty)$.

Dall'analisi delle serie storiche degli afflussi sono stati individuati degli insiemi entro cui si è scelto di discretizzare i disturbi in modo uniforme (vedi Tab.B.2).

Appendice C

Eliminazione dello stato del suolo

C.1 Il modello del suolo

Sfruttando la trattazione fornita dalla FAO [8] e [9], basata su un modello di cui si ha trattazione esaustiva, possiamo formulare l'equazione che regge la dinamica del contenuto idrico del terreno.

$$S_{t+1} = \min [S_t + r_t^e + h_t - E_t, S^{\max}] \quad (\text{C.1})$$

dove:

S_t è il contenuto idrico del terreno all'istante t espresso in $[mm \ H_2O]$, relativo al singolo strato l di terreno con il termine WC_l ;

S^{\max} è la capacità di campo del terreno $[mm \ H_2O]$;

r_t^e è l'apporto meteorico effettivo all'istante t $[mm]$;

h_t rappresenta l'acqua fornita per irrigazione all'istante t $[mm]$;

E_t è il tasso di evapotraspirazione effettiva della coltura espresso dalla seguente relazione:

$$E_t = \min \left[\frac{S_t}{S_{\min}} \cdot ET_t^{\text{pot}}, ET_t^{\text{pot}} \right] \quad (\text{C.2})$$

$$S_t^{\min} = (1 - \rho_t) \cdot S^{\max} \quad (\text{C.3})$$

dove ET_t^{pot} è il tasso di evapotraspirazione potenziale della coltura e ρ_t è la frazione del massimo contenuto idrico consumabile mantenendo $E_t = ET_t^{\text{pot}}$

C.2 Eliminazione della variabile di stato del suolo

Consideriamo che l'irrigazione avvenga per turni di durata Δ ed assumiamo, in prima ipotesi, che l'adacquamento abbia luogo alla fine del turno: se indichiamo con 0 l'istante iniziale del turno allora l'adacquamento avrà luogo all'istante $(\Delta - 1)$. Se la fornitura d'acqua alla fine del turno precedente è stata sufficiente, il contenuto idrico S_0 del terreno si suppone essere prossimo a $S^{\max} [mmH_2O]$, che è la capacità di campo del terreno.

Se durante il turno irriguo non piove, allora si può semplificare la (C.1):

$$S_{t+1} = \min [S_t - E_t, S^{\max}] \quad (\text{C.4})$$

La (C.4) vale per tutti i t tra 0 e $(\Delta - 2)$.

Il giorno $(\Delta - 1)$ invece l'equazione sarà differente perchè viene applicata al terreno la lama idrica $h_{\Delta-1}$.

Pertanto S_{Δ} sarà calcolabile, noto S_0 , con la seguente espressione:

$$S_{\Delta} = S_0 - \sum_{t=0}^{\Delta-1} E_t + h_{\Delta-1} \quad (\text{C.5})$$

Avendo a disposizione acqua sufficiente il contadino sceglierà la fornitura irrigua $h_{\Delta-1}$ in modo tale che S_{Δ} sia prossimo a S^{\max} . Ricordando che per le ipotesi precedenti anche $S_0 \simeq S^{\max}$, dalla (C.5) deduciamo che:

$$\sum_{t=0}^{\Delta-1} E_t = h_{\Delta-1} \quad (\text{C.6})$$

Qualora nel corso del turno irriguo si siano verificate precipitazioni tali da non saturare il terreno, la (C.5) diverrà:

$$S_{\Delta} = S_0 - \sum_{t=0}^{\Delta-1} E_t + h_{\Delta-1} + \sum_{t=0}^{\Delta-1} r_t^e \quad (C.7)$$

e quindi la (C.6) si modificherà nella seguente:

$$\sum_{t=0}^{\Delta-1} E_t = h_{\Delta-1} + \sum_{t=0}^{\Delta-1} r_t^e \quad (C.8)$$

Poichè deve essere contemporaneamente soddisfatta la (C.2), allora la (C.8) va corretta nella seguente:

$$\sum_{t=0}^{\Delta-1} E_t = \min \left[h_{\Delta-1} + \sum_{t=0}^{\Delta-1} r_t^e, \sum_{t=0}^{\Delta-1} ET_t^{pot} \right] \quad (C.9)$$

La (C.8) dice che nel medio-lungo periodo (i turni irrigui durano mediamente 10-15 giorni) il contributo del terreno all'alimentazione idrica delle piante è trascurabile.

Bibliografia

- [1] S. K. Andersen, K. G. Olsen, F.V. Jensen, and F. Jensen. Hugin - a shell for building bayesian belief universes for expert systems. In *Proceedings of the Eleventh International joint Conference on Artificial intelligence*., pages 1080–1085, Detroit, Michigan, 1989.
- [2] F. Archetti, A. Carelli, G. Pelizza, and F. Stella. Construction of bayesian network model for integrated circuits parametric testing. *Progress in industrial mathematics*, 1994.
- [3] A. Aufiero, R. Soncini-Sessa, and E. Weber. Set-valued control laws in minmax control problem. In *IFAC Workshop Modelling and Control in Environmental Issues, August 22-23*, Yokohama, Japan, 2001. Elsevier.
- [4] R. Bellman. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.
- [5] L.R. Brown. How water scarcity will shape the new century. *Water Science and Technology*, 43(4):17–22, 2001.
- [6] J. Cain. *Planning improvements in natural resources managent. Guidelines for using Bayesian networks to support the planning and management of development programmes in the water sector and beyond*. Centre for Ecology and Hydrology (CEH) Wallingford, Wallingford, UK, 2001.

- [7] Ecoter. L'estendimento del sistema irriguo del Vomano-Tordino e recupero energetico delle acque del fiume Vomano. Technical report, Ecoter S.R.l., Roma, 2001.
- [8] FAO. *Yield Response to Water Deficit*. Drainage and Irrigation Paper No 33, 1979.
- [9] FAO. *CLIMWAT: A climatic database for CROPWAT*. Number 49 in Irrigation and Drainage Papers. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 1994.
- [10] FAO. *CROPWAT. A computer program for irrigation planning and management*. Number 46 in Irrigation and Drainage Papers. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 1995.
- [11] K.C. Gilbert and R.M. Shane. TVA hydroscheduling model: theoretical aspects. *J. Water Res. Plann. Manage. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108(1):21–36, 1982.
- [12] INEA. Stato dell'irrigazione in Abruzzo. Technical report, INEA, 2001.
- [13] F.V. Jensen. *An Introduction to Bayesian Networks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1996.
- [14] P. Korhonen and J. Laakso. A Visual Interactive Method for Solving the Multiple Criteria Problems. *European Journal of Operational Research*, 24(2):277–287, 1986.
- [15] E. Laniado, A. Colorni, and S. Muratori. Procedimenti operativi e strumenti informatici per la comunicazione. In *Studi di Impatto ambientale nel settore dei trasporti*, pages 827–857. Ministero dell'Ambiente e delle Tutela del Territorio Servizio Valutazione di Impatto ambientale, Rome, Italy, 2002.
- [16] A. Maas, M.M. Hufschmidt, R. Dorfam, H.A. Thomas, S.A. Marglin, and G.M. Fair. *Design of Water Resource Systems*. Harvard Univ. Press, Boston, MA, 1962.
- [17] A. Nardini, C. Piccardi, and R. Soncini-Sessa. On the integration of risk aversion and average-performance optimization in reservoir control. *j-wrr*, 28(2):487–497, 1992.

- [18] L. K. Rasmussen. BOBLO: An expert system based on Bayesian networks to blood group determination of cattle. Research report 16. Technical Report 1995.16, Research center Foulum, Denmark, PB 23, 8830 Tjele, 1995.
- [19] E.G. Read. A dual approach to stochastic dynamic programming for reservoir release scheduling. In A.O. Esogbue, editor, *Dynamic Programming for Optimal Water Resources Systems Analysis*, pages 361–372. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [20] S. Rinaldi and C. Piccardi. *I sistemi lineari: teoria, modelli, applicazioni*. CittàStudiEdizioni, Milano, Italy, 1998.
- [21] R. Soncini-Sessa, A.E. Rizzoli, L. Villa, and E. Weber. Twole: a software tool for planning and management of water reservoir networks. *Hydrological Sciences Journal*, 44(4):619–631, 1999.
- [22] C. O. Stöckle and R. L. Nelson. *CROPSYST: Cropping Systems Simulation Model-User's Manual*. Biological Systems Engineering Dept., Washington State University, Pullman WA USA, 1997.
- [23] C. Stockle and G. Campbell. Simulation of Crop response to water and nitrogen: An example using spring Wheat. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers*, pages 66–68, 1989.
- [24] C. Stockle, G. Campbell, and S. Martin. A model to assess environmental impact of cropping systems. *American Society of Agricultural Engineers*, (92):2041, 1992.
- [25] Y.S. Su and R.A. Deininger. Generalization of Whites method of successive approximations. *Operations Res.*, 20(2):318–326, 1972.
- [26] White, D.J. Dynamic programming, Markov chains, and the method of successive pproximations. *J. Math. Anal. Appl.*, 6:373–376, 1963.

- [27] S. Yakowitz. Dynamic programming applications in water resources. *Water Resour. Res.*, 18(4):673–696, 1982.
- [28] W. Yeh. Reservoir management and operations models: a state of the art review. *Water Resour. Res.*, 21(12):1797–1818, 1985.