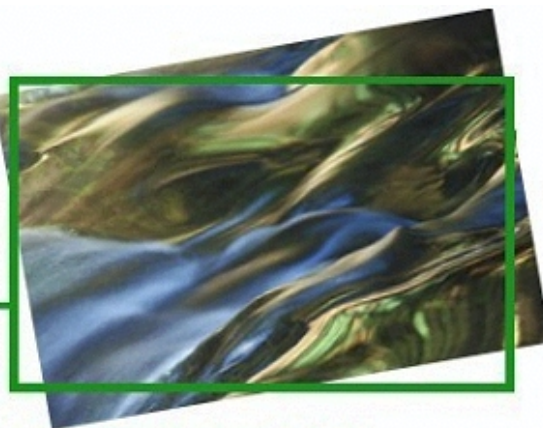




POLITECNICO DI MILANO



www.cremona.polimi.it/msa

MASTER IN INGEGNERIA DEL SUOLO E DELLE ACQUE

Tesi di Master universitario:

*Progetto di gestione della rete di canali
del Consorzio Irrigazioni Cremonesi per
l'attivazione di salti d'acqua disponibili
ai fini idroelettrici*

Candidato: ing. Angela Nadia Sulis

Relatore: prof. Alberto Bianchi

*Tutor della sede di tirocinio: ing. Stefano Loffi
(Consorzio per l'Incremento dell'Irrigazione
nel Territorio Cremonese)*

A.A. 2001/2002



Ente Regionale di Sviluppo
Agricolo della Lombardia

Indice

Indice	1
Premessa	3
Capitolo 1 La rete irrigua cremonese	5
1.1 Caratteri principali	5
1.2 Contesto geomorfologico	6
1.3 Struttura e funzionamento	8
1.4 Sviluppo della rete nel tempo	9
1.5 Riferimenti bibliografici	11
Capitolo 2 Lo sfruttamento idroelettrico della rete irrigua cremonese	11
2.1 Sviluppo dello sfruttamento idroelettrico e stato attuale degli impianti	11
2.2 Punti notevoli della rete per l'installazione di nuovi impianti	17
2.3 Scenari politici ed energetici	18
2.4 I microimpianti idroelettrici in Europa	19
2.5 Riferimenti bibliografici	22
Capitolo 3 Il modello di ottimizzazione	24
3.1 Il problema di ottimizzazione	24
3.2 Il modello matematico della rete	24
3.2.1 Topologia: i nodi e gli archi	24
3.2.2 Orizzonte spaziale e rappresentazione dei canali	26
3.2.3 Orizzonte temporale, passo temporale e scenari	28
3.2.4 Variabili	29
3.2.5 Vincoli	31
3.2.6 Obiettivo	32
3.3 Parametri	33
3.3.1 Afflussi	33
3.3.2 Portate massime e minime nei canali	34
3.3.3 Erogazioni	35
3.3.4 Impianti idroelettrici	37
3.3.5 Convenzione di Genivolta	37
3.4 Soluzione operativa	38
3.4.1 Il software ampl	38
3.4.2 Il simulatore excel	38
3.5 Riferimenti bibliografici	38
Capitolo 4 Interpretazione dei risultati	39
4.1 Portate circolanti nella rete	39

4.2	Portate turbinate ed energia prodotta.....	40
4.2.1	La stagione irrigua.....	40
4.2.2	La stagione invernale.....	40
4.2.3	Gli scenari di manutenzione dei canali.....	41
4.2.4	Le curve di durata degli impianti	42
4.3	Potenza installata ed energia prodotta	44
4.4	Un caso particolare: progetto di riattivazione dei tre impianti storici.....	46
4.5	Riferimenti bibliografici.....	47
Capitolo 5	Analisi della componente economica.....	48
5.1	Costi di realizzazione e manutenzione	48
5.1.1	Costi di investimento e di gestione.....	48
5.1.2	Piani finanziari	50
5.2	Nuovo panorama energetico e opportunità di ricavi	51
5.2.1	Il valore economico dell'energia venduta al Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale.....	51
5.2.2	Il valore economico dei Certificati Verdi.....	53
5.3	Convenienza economica di ripristinare le antiche centrali e di attivare nuovi salti	53
5.3.1	Indicatori di convenienza economica e soglie.....	53
5.3.2	Definizione dei parametri dell'analisi	55
5.3.3	Convenienza economica dei singoli impianti della rete.....	55
5.3.4	Convenienza economica del progetto completo.....	59
5.3.5	Confronto con la realizzazione di un impianto equivalente per potenza ed energia ..60	
5.3.6	Convenienza economica del progetto di riattivazione degli impianti storici	60
5.4	Sensibilità dei parametri della valutazione economica	60
5.4.1	Sensibilità della soluzione al tipo di piano finanziario.....	61
5.4.2	Sensibilità della soluzione al tasso di interesse	62
5.4.3	Sensibilità della soluzione alla quota di finanziamento	62
5.4.4	Analisi del caso peggiore	63
5.5	Alcune alternative di realizzazione del progetto completo	63
5.5.1	Opportunità di realizzazione del bypass di Mirabello.....	64
5.5.2	Realizzazione del progetto in due fasi.....	65
5.6	Riferimenti bibliografici.....	66
Conclusioni.....		67
Appendice 1: sezioni di interesse		68
Appendice 2: misure di portata		72
Bibliografia generale		73

Premessa

Questo studio nasce con l'intento di risolvere una questione che interessa particolarmente il Consorzio Irrigazioni Cremonesi:

è possibile ed economicamente conveniente, alla luce dei nuovi scenari energetici e politici, riattivare le centrali idroelettriche dismesse nella rete irrigua?

Il risultato primario sarà quindi la risposta, affermativa o negativa alla precedente domanda.

Ma la curiosità e il metodo scientifico hanno suggerito agli autori un passo in più, e la seconda domanda a cui si ardisce rispondere sarà:

esistono altri punti della rete irrigua cremonese dove è possibile ed economicamente vantaggioso installare potenza idroelettrica?

I passi logici seguiti nella trattazione, che ricalcano quelli seguiti durante lo studio stesso, sono:

- definire il punto di partenza: confini spaziali dell'area di interesse, struttura e funzionamento della rete irrigua cremonese, in quale contesto morfologico ed economico è nata e si è sviluppata e quindi ha assunto i caratteri attuali (Capitolo 1),
- lo sfruttamento idroelettrico della rete irrigua cremonese: storia dello sfruttamento idroelettrico, sezioni di interesse della rete per l'installazione di nuovi impianti, scenari politici ed energetici attuali che favoriscano l'utilizzazione idroelettrica della rete, tipologia di impianti da attivare (Capitolo 2);
- elaborazione di un primo schema di risoluzione del problema: il modello matematico della rete, il problema di ottimizzazione da risolvere (scenari, variabili, vincoli, obiettivi, algoritmi) e le soluzioni specifiche adottate per rappresentare i fenomeni che avvengono nella rete (Capitolo 3);
- interpretazione dei risultati ottenuti con il modello: questo risponde alla prima parte del quesito, ovvero sulla possibilità di ripristinare le antiche centrali e di attivare nuovi salti (Capitolo 4);
- estensione dell'analisi alla componente economica: costi di realizzazione e manutenzione di un micro-impianto idroelettrico, analisi delle opportunità di ricavi alla luce del nuovo panorama del mercato elettrico a seguito del Decreto 'Bersani' . Il risultato di questa fase dello studio risponde alla seconda parte del quesito, ovvero sulla convenienza economica di ripristinare le antiche centrali e di attivare nuovi salti (Capitolo 5).

Capitolo 1 La rete irrigua cremonese

1.1 Caratteri principali

L'abbondante disponibilità di acqua per l'irrigazione, in provincia di Cremona, è dovuta alla fitta rete irrigua creata in un lento processo di costruzione, del quale si hanno le prime conoscenze storiche documentate intorno al decimo secolo d.C..

L'evoluzione della rete irrigua, che deriva acqua per gravità dai fiumi e dalle sorgenti, si è praticamente conclusa alla fine del XIX secolo. Nel successivo le grandi nuove realizzazioni hanno visto l'introduzione di canali adduttori alimentati da impianti di sollevamento.

L'ultima grande arteria irrigua, ed anche la maggiore di tutto il territorio, è il canale Pietro Vacchelli, di proprietà del "Consorzio per l'incremento dell'irrigazione nel territorio cremonese" - che d'ora innanzi chiameremo "Consorzio Irrigazioni Cremonesi" o, ancor più brevemente, "Consorzio".

Nonostante la staticità del reticolo irriguo e la disponibilità d'acqua non più incrementabile, se non, come detto, con assai più onerosi sistemi di sollevamento, l'agricoltura dei nostri giorni, certo ben diversa ed assai più esigente rispetto anche ad un recente passato, non ha mai subito il "fattore irrigazione" come elemento limitante della produzione; segno evidente che il sistema è ancora efficiente ed efficace.

Elemento sostanziale che ha consentito la "tenuta" del sistema irriguo è senz'altro la regolazione a serbatoio dei grandi laghi prealpini, che consente lo spostamento della disponibilità nella stagione estiva.

Il sistema irriguo cremonese è gestito da diversi soggetti, sia pubblici (consorzi di bonifica) sia privati (consorzi di irrigazione, consorzi di miglioramento fondiario, comunioni, società ecc.).

Tra questi ultimi si annovera il Consorzio, che di essi è il maggiore, e rappresenta una singolarità in tutta Italia; esso è infatti l'unico ente nato in forza di una legge del 1873 che dava, e dà, facoltà agli enti locali di costituire Consorzi di Irrigazione. Nonostante il Consorzio sia espressione di 51 Comuni gode di natura privatistica ed è costituito in ente morale che opera senza scopo di lucro.

Il Consorzio Irrigazioni Cremonesi è titolare, oltre che del canale Pietro Vacchelli, di una rete di altri canali principali per la distribuzione di acqua ai fini irrigui: la portata complessiva dispensata è di nominali 57,779 metri cubi al secondo che rappresentano circa il 35% di tutta l'acqua utilizzata nella provincia.

Questa rete, estesa per circa 260 chilometri, sarà, d'ora in poi, la struttura di riferimento del nostro lavoro e verrà indicata semplicemente come "rete".

La rete è localizzata nel territorio della bassa Pianura Padana e si sviluppa in tutta la provincia di Cremona e in una piccola parte della bassa pianura bergamasca. Le fonti di approvvigionamento idrico sono costituite dalle derivazioni dal fiume Adda, emissario del lago di Como, regolato alla traversa di Olginate, dal fiume Oglio, emissario del lago di Iseo, regolato alla traversa di Sarnico e infine dai fontanili, che separano idealmente in direzione est-ovest la provincia bergamasca da quella cremonese. Durante la stagione irrigua (dal 25 aprile al 25 agosto) il Consorzio serve un comprensorio diretto di 64.510 ettari, che aumenta a circa 85.000 ettari tenendo conto di altri apporti sovrapposti e delle colature (comprensorio indiretto)[1].

1.2 Contesto geomorfologico

Il territorio su cui si snoda la rete irrigua cremonese è caratterizzato da una ottima propensione alle attività agricole, come testimonia la carta Ersal della capacità d'uso dei suoli (Vedi Figura 1.1) in cui i suoli sono valutati nelle prime tre classi [3].

Dal punto di vista pedopaesaggistico, come si può notare in Figura 1.2, sono presenti due principali sistemi: il livello fondamentale della pianura, formatosi per colmamento alluvionale durante l'ultima glaciazione, e il sistema delle valli alluvionali, corrispondenti ai piani di divagazione dei corsi d'acqua attivi o fossili (nell'area di interesse oltre ai corsi d'acqua già citati sono presenti il fiume Serio, che attraversa la provincia di Cremona da nord a sud passando per Crema, e il Serio Morto, ovvero l'antico corso del fiume Serio).

Tradizionalmente la provincia di Cremona si considera suddivisa in tre zone, differenti per caratteri geomorfologici, da nord a sud: il Cremasco, il Cremonese e il Casalasco. Considerando anche la bassa bergamasca possiamo considerare il territorio di interesse suddiviso in quattro aree.

Il Bergamasco è interessato principalmente dai canali derivatori dal fiume Oglio (Calciana, Molinara, Suppeditazione e Naviglio Grande) e dai fontanili, presenta suoli a tessitura da media a moderatamente grossolana e con altimetrie variabili.

Il Cremasco è costituito da suoli in abbondanza sabbiosi ed è interessato principalmente dall'adduzione delle acque dell'Adda attraverso il canale Vacchelli. Nel Canale Vacchelli confluiscono in questa zona le acque estratte dal comprensorio di bonifica dei Mosi, presso Trescore.

Il Cremonese è il cuore della rete, su cui si snoda la maggior parte dei canali secondari e terziari, detti anche rogge, e presenta i suoli con migliori caratteristiche: tessitura in prevalenza franca, drenaggio buono, livello medio della falda superficiale tra i 100 e i 200 cm.

Il Casalasco presenta caratteristi simili al Cremonese dal punto di vista pedologico, ma con una maggiore concentrazione di argille a livello superficiale, il che unito alle basse altitudini, alla vicinanza del Po e alla concentrazione dei colatori della rete (detti dugali) lo rendono un territorio in cui la difesa dalle acque, piuttosto che il suo approvvigionamento, è il principale problema.

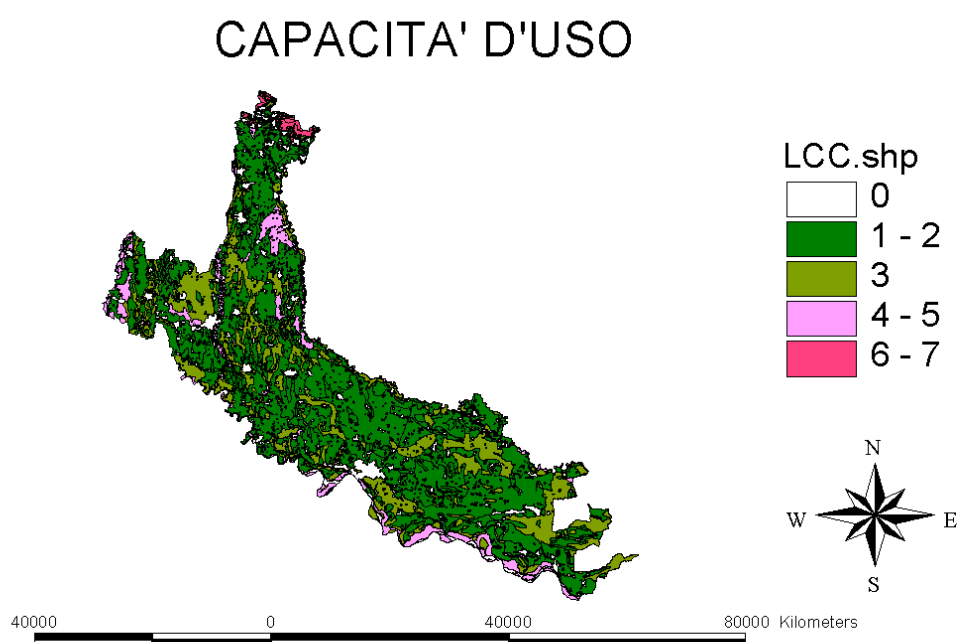


Figura 1.1. Capacità d'uso dei suoli del comprensorio irriguo. (Ente Regionale Sviluppo Agricolo Lombardia)

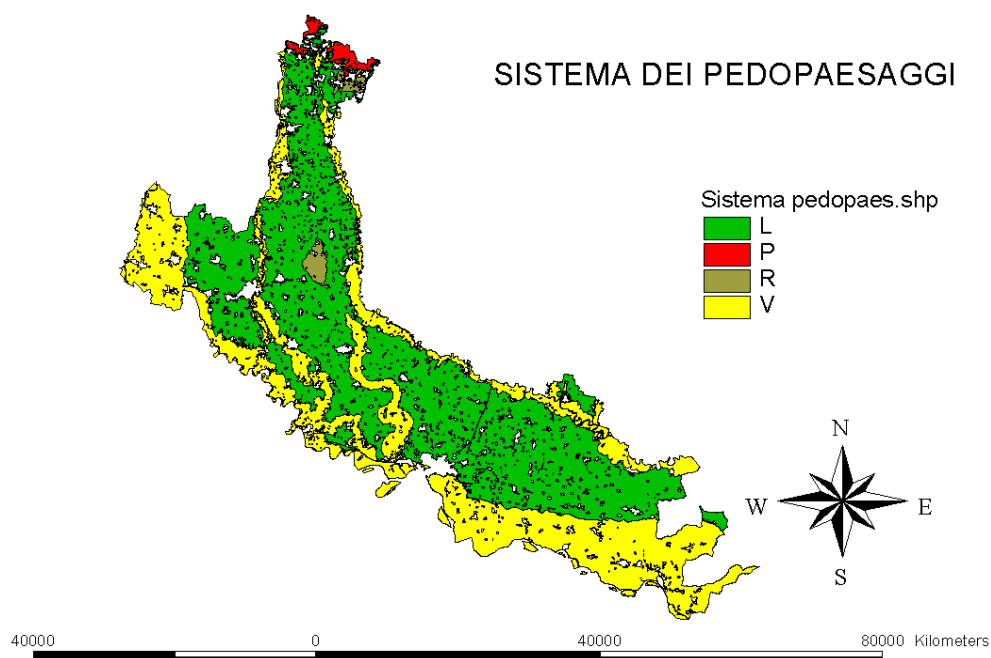


Figura 1.2 Carta dei pedopaesaggi del comprensorio irriguo (Ente Regionale per lo sviluppo agricolo della Lombardia)

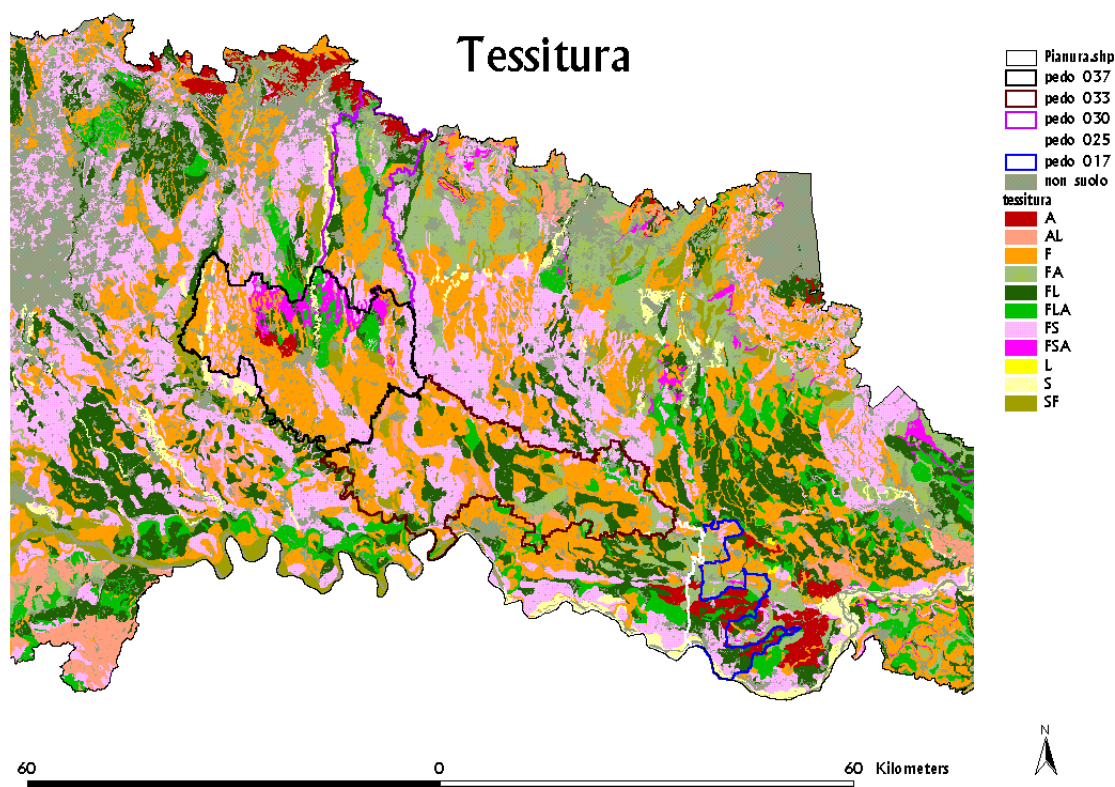


Figura 1.3. Carta della tessitura dei suoli dell'area della pianura lombarda in cui si trova il comprensorio irriguo (Ente regionale per lo sviluppo agricolo della Lombardia)

1.3 Struttura e funzionamento

Il Consorzio Irrigazioni Cremonesi si occupa, senza fini di lucro [4] dell'adduzione dell'acqua irrigua e della sua distribuzione a tutti gli utenti.

Dal punto di vista amministrativo il comprensorio irriguo è suddiviso in 9 aree, dette camperie, in ognuna delle quali uno o più campari si occupano del governo delle acque e della manutenzione dei canali.

I canali sono esclusivamente a carattere irriguo, a volte sono al di sopra del piano campagna, a volte in trincea, ma in ogni caso non fanno da colatori.

L'acqua viene consegnata agli utenti secondo schemi predefiniti, in base agli accordi presi con il Consorzio, la consegna avviene solo durante la stagione irrigua e può essere di tipo continuo oppure a tempo, e segue una successione temporale detta ruota.

In caso di insufficienza idrica si distribuisce il deficit proporzionalmente a tutti gli utenti.

Nei canali l'acqua si muove per gravità, sfruttando il degradare naturale del territorio da nord ovest a sud est dai 200 metri slm ai 40 metri slm.

Per capacità e per funzione si possono distinguere tre ordini di canali: i canali di adduzione, che partono dalle derivazioni dai corsi d'acqua e sono intercettati lungo il loro corso dai canali del secondo ordine, le rogge, che alimentano. A loro volta le rogge sono intercettate da rogge minori – i canali del terzo ordine – che distribuiscono la dispensa alle singole aziende agricole. La dispensa è consegnata attraverso le bocche: cavi sotto il pelo libero la cui apertura e chiusura è regolata da una paratoia. Le aree delle sezioni delle bocche si possono considerare in prima approssimazione

proporzionale alla dispensa da consegnare, misurata secondo l'antica unità di misura dell'oncia cremonese, che corrisponde a una portata tra 16 e 20 l/s.

All'interno della singola azienda, sollevata con mezzi meccanici o per gravità, l'acqua viene utilizzata per l'irrigazione, che si effettua principalmente con il tradizionale metodo a scorrimento.

Le sezioni dei canali sono ad area decrescente, in modo da mantenere costantemente alto da monte a valle il livello del pelo libero, nonostante i prelievi degli utenti. Le manovre eseguite dai campari per regolare i flussi idrici sono lente, e la rete raggiunge condizioni di regime in un tempo dell'ordine delle ore.

Dal punto di vista idraulico si tratta di una rete a gravità in regime di moto permanente rigurgitato.



Figura 1.4. Rete dei principali canali del Consorzio Irrigazioni Cremonesi.

Nella Figura 1.4 sono rappresentati i principali canali della rete.

1.4 Sviluppo della rete nel tempo

Nel territorio cremonese, da secoli utilizzato intensamente per le pratiche agricole, esistono canali e rogge fino dal XV Secolo, che appartenevano al Condominio Pallavicino (si pensi che il derivatore Calciana sull'Oglio risale al 1380)

I Marchesi Pallavicino hanno sempre mantenuto la rete funzionante e nei 4 secoli in cui è stata di loro proprietà l'hanno ampliata e migliorata. Questa era la rete irrigua che serviva la pianura cremonese centrale fin dal 1500.

Fino alla seconda metà del XIX Secolo le principali fonti idriche sfruttate erano il fiume Oglio e i fontanili, gli antichi canali del Condominio Pallavicino, e non erano assolutamente sufficienti a garantire il fabbisogno degli utenti: l'Oglio non era ancora regolato dalla diga di Sarnico, quindi presentava un regime idrologico naturale tipico dei corsi d'acqua vallivi, con la classica magra nel periodo estivo, in cui le esigenze delle colture irrigue sono maggiori.

La dotazione media specifica era intorno a 0,8 l/s ha [1], inferiore al valore medio ritenuto in letteratura sufficiente per garantire un buon livello di producibilità delle colture irrigue, pari a 1 l/s ha¹. Del resto le tecniche di irrigazione conosciute erano quelle tradizionali per scorrimento tra solchi e per adacquamento, che prevedevano un ingente consumo di acqua per coprire l'appezzamento da irrigare di una lama d'acqua, e non si utilizzavano strumenti meccanici come le pompe per sollevare e trasportare le acque irrigue.

L'esigenza di ottenere una maggiore dotazione idrica convinse un gruppo di 59 comuni cremonesi a consorziarsi per appoggiare un progetto grandioso di un insigne cittadino cremonese: Pietro Vacchelli, ovvero quello di costruire un canale che derivasse le acque del fiume Adda in località Merlino, nel cremasco, per convogliarle attraverso tutto il Cremasco fino al nodo di Genivolta, dove convergevano gli antichi canali derivatori dall'Oglio e da cui si dipartiva la rete irrigua già esistente. Dopo alterne vicissitudini il canale Vacchelli, già canale Marzano, venne terminato nel 1890 e il Consorzio ottenne la possibilità di prelevare dall'Adda ben 25 m³/s, integrando le portate derivate dall'Oglio e raddoppiando così l'acqua disponibile per tutto il cremonese.

La dotazione irrigua specifica, secondo i calcoli effettuati dall'Ing. Bruno Loffi, ha raggiunto così il valore medio di 1,28 l/s ha, valore che mantiene tuttora [1].

Le acque della rete, che già lungo i canali del Condominio Pallavicino fornivano forza motrice a mulini e opifici, furono anche utilizzate, quando la tecnologia lo permise, per la produzione di energia idroelettrica, di cui si tratterà nel Capitolo 2.

Con una tale disponibilità idrica, gli utenti del Consorzio sono man mano cresciuti e, potenziati i canali esistenti, si è ottenuta nel 1948 la concessione dallo Stato a derivare dall'Adda altri 12 m³/s.

La regolazione dei laghi di Como e Iseo, negli anni '20-'30, ha regolarizzato il corso dei fiumi e permesso al Consorzio di ottenere un aumento della portata derivabile sia sull'Adda (+1,5 m³/s) sia sull'Oglio (+ 1,536 m³/s), arrivando così a totalizzare la disponibilità idrica attuale.

Agli antichi canali con l'andare del tempo si sono affiancati altri canali e rogge, tendenzialmente paralleli, in modo che l'acqua dal punto di prelievo avesse un percorso indipendente per ogni utente, che si assicurava così un approvvigionamento autonomo [1]. Dagli anni '60, nell'ottica del riordino irriguo, una serie di sistemazioni idrauliche ha modificato, semplificato e reso più efficiente la rete, riducendo il numero delle rogge e migliorandone il sistema di alimentazione.

La rete irrigua cremonese si presenta oggi come un meccanismo efficiente e preciso per la distribuzione della risorsa idrica: il bilancio idrico annuale vede una perdita inferiore al 2% delle portate convogliate, sia per le provvidenziali buone caratteristiche idrologiche dell'area sia per la buona tenuta dei canali, la presenza attenta dei campari, affiancati dal prossimo sistema di telemisura e telecontrollo già installato sul canale Vacchelli e l'attenzione con cui si eseguono i lavori di manutenzione e di potenziamento, permettono di governare in modo capillare la risorsa idrica e di fornire agli utenti un servizio di qualità.

¹ In realtà questo valore medio nasconde notevoli differenze tra le tre aree della provincia: la dotazione continua specifica ottima è stata calcolata durante gli studi preliminari per il canale Vacchelli, e vale 1 l/s ha per il cremasco, e il cremonese e 0,25-0,50 l/s ha per il casalasco.

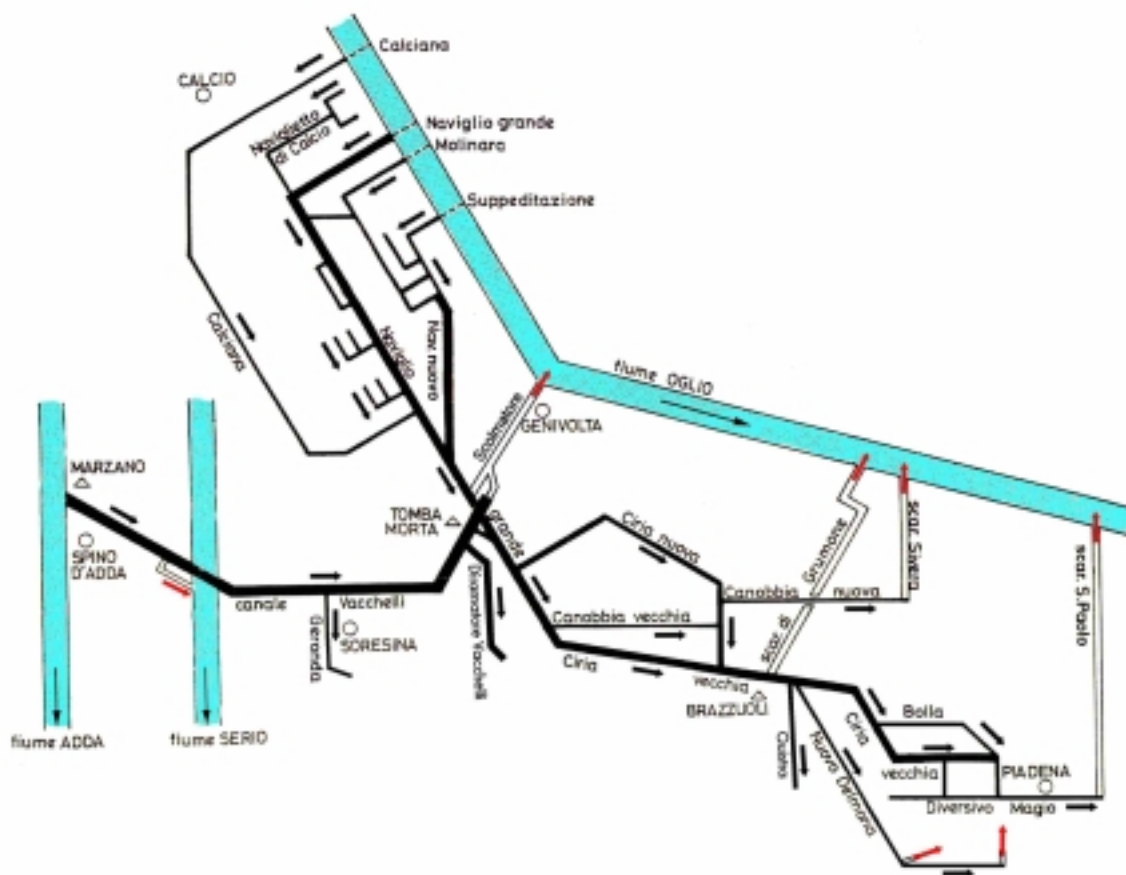


Figura 1.5. Attuale struttura della rete irrigua cremonese

1.5 Riferimenti bibliografici

- [1] Bruno Loffi, Storia della rete irrigua cremonese, 1987
- [2]: Profilo della Provincia di Cremona a cura della Camera di Commercio Industria e Artigianato della Provincia di Cremona, tratto dal Censimento 2000 dell'Agricoltura
- [3]: Ersal, carta della capacità d'uso dei suoli, 2000
- [4]: Statuto del Consorzio Irrigazioni Cremonesi , Art.1

Capitolo 2 Lo sfruttamento idroelettrico della rete irrigua cremonese

2.1 Sviluppo dello sfruttamento idroelettrico e stato attuale degli impianti

Fin dai tempi in cui le acque della rete irrigua appartenevano al Condominio Pallavicino si utilizzavano alcuni salti per animazione delle macine [1]. Nel 1896 fu prospettata a Vacchelli l'opportunità di costruire due centraline idroelettriche sui canali della rete: a Cumignano e a

Mirabello²; così, sotto la spinta entusiastica dei progressi dell'epoca nella tecnologie costruttive di impianti per la produzione di energia, il Consorzio si accinge alla costruzione di impianti idroelettrici, con l'obiettivo di fornire energia all'area del Cremonese. Furono costruiti gli impianti di Rezza (1902) sul Naviglio Grande, che produceva 105 kW, l'impianto di Mirabello poco più a valle sempre sulla stessa asta (1904), da 140 kW e infine l'impianto di Campagnola (1923) sulla Ciria Nuova, da 93 kW. Tra il 1905 e il 1913 il Naviglio Grande, a valle dei due salti, fu pure ampliato e la sua pendenza ridotta per aumentare il salto utile.

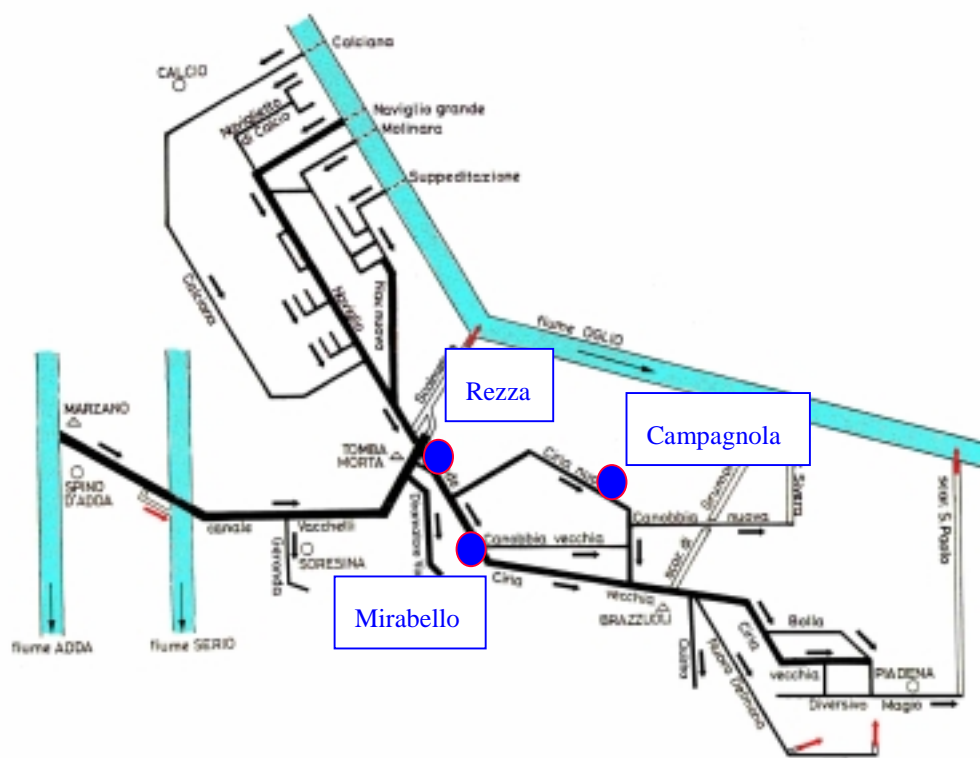


Figura 2.1. Posizioni degli impianti storici nello schema idraulico attuale della rete.

Impianto, Asta, Portata ottima, Salto Motore, tipo di turbina, potenza, energia annua.

² Presso Cumignano si proponeva di costruire un tornacanal che, raccogliendo le acque dei canali Naviglio Nuovo, Grande e Geronda, le portasse all'altezza di Gorgo Rotondo, sul Grande, dove c'è un salto di 7 metri.

L'energia prodotta veniva fornita agli utenti, che stipulavano con il Consorzio contratti d'affitto, ed era utilizzata per l'illuminazione pubblica³ e privata dei comuni del cremonese, per sollevare acque irrigue presso alcune bocche, per alimentare macchine di industrie locali.

L'esercizio delle centrali diede al Consorzio, per molti anni, discrete soddisfazioni economiche e consentì sufficiente compatibilità le necessità di utilizzo delle acque della rete per soddisfare le esigenze di due diversi tipi di utenze: quelle irrigue e quelle idroelettriche.

L'energia elettrica prodotta era pressoché stabile durante il ciclo annuale e l'intero arco di tempo in cui le centraline restavano attive; la produzione non risentiva di variazioni di portata, tipiche del servizio irriguo, perché le macchine turbinavano meno della portata necessaria alle dispense irrigue estive; nel periodo invernale le acque fatte transitare a scopi idroelettrici venivano tratte al di fuori della rete, ordinariamente senza difficoltà, attraverso gli scaricatori.

Le acque del Naviglio Grande venivano convogliate in massima parte nella Ciria Nuova, per alimentare la Campagnola, che fino allo scaricatore di Grumone diventava la nuova asta principale della rete invece del Grande, con le conseguenti modifiche di alimentazione dei canali del terzo ordine, che dovevano essere alimentati in parte dalla Ciria Nuova invece che dal Grande.

Gli impianti erano inoltre sorvegliati e mantenuti da squadre di operai specializzati che risiedevano in genere nelle vicinanze, in modo da poter intervenire tempestivamente in caso di eventi pericolosi.

Dopo il 1936 entrava in vigore il regime dei prezzi amministrati dalla mano pubblica, nella direzione della creazione del monopolio di stato dell'energia, attuata con la concentrazione di tutta la produzione e distribuzione dell'energia elettrica nell'Enel, e iniziava così la crisi economica degli impianti, che risultavano nel tempo sempre meno convenienti da mantenere in esercizio, e che tra il 1947 e il 1949 vennero dismessi. Alla dismissione seguì il ripristino del Naviglio Grande come asta principale della rete e l'interro del tornacanal di Mirabello, che portando le acque turbinate nella omonima centrale sulla Ciria Nuova, le rendeva disponibili alla Campagnola.

I tre impianti storici della rete rappresentano un vero e proprio patrimonio culturale del Consorzio e della Provincia di Cremona, si possono addirittura leggere come opere di archeologia idraulica. Da un sopralluogo effettuato nell'estate del 2002 nei siti di Rezza e di Campagnola, se ne è rilevato lo stato attuale.

Impianto della Rezza: rimane l'edificio macchine, in buone condizioni, posizionato sul letto del canale, gli organi di presa e di restituzione e un sifone autoinnescante utilizzato come organo di scarico durante il funzionamento della centrale. Nelle immediate vicinanze si estendono campagne alberate senza altri evidenti segni di antropizzazione, nessuna traccia dell'antico villaggio che era predisposto alla sorveglianza dell'impianto.

Nella Figura 2.2 due fotografie dell'impianto dallo stesso punto di vista a circa 100 anni di distanza. Si tratta sicuramente di un edificio di pregio architettonico che in prima analisi vale la pena di conservare.

³ B. Loffi ricorda l'entusiasmo con cui i cremonesi accolsero il servizio, al punto che i giornali locali titolavano che "Il corso [Corso Campi, n.d.a.] e piazza Roma sembravano illuminati a giorno" e "...né Milano né Piacenza hanno fari di così perfetta gradualità" (B.Loffi, 1987).



Figura 2.2 Due fotografie dell'impianto della Rezza: prospetto di monte. Quella a sinistra risale al 1905, quella a destra al 2002.

Impianto di Campagnola: rimane un magazzino sulla sinistra idrografica del canale e uno stramazzo sul canale stesso, sovrastato da una paratoia regolabile. Questo punto, dal momento che è dotato di una passerella, è utilizzato spesso come sezione di misura delle portate della Ciria Nuova.

L'area circostante è costituita da case sparse e da una grande corte di pregio architettonico, detta Corte de'Cortesi.

Per entrambi gli impianti gli organi di presa sono obsoleti e nell'ottica di una riattivazione dell'impianti occorre sostituirli, in particolare è necessario:

- demolire o comunque non utilizzare i sifoni autoinnescanti come organi di scarico che, in base alle informazioni fornite dall'Ufficio Tecnico del Consorzio⁴, non risultano più funzionanti, e che in ogni caso non rispondono agli standard di progettazione per gli impianti idroelettrici, che prevedono un by-pass come organo di scarico;
- dotare gli impianti degli opportuni organi di presa, di scarico e restituzione in conformità con la normativa vigente.

Inoltre per l'impianto di Campagnola è necessario costruire un edificio centrale ex novo e, se soddisfa la normativa attuale in materia di sicurezza, utilizzare a qualche scopo l'edificio esistente, che era utilizzato come magazzino, in modo da non demolirlo. È necessario valutare l'esproprio della proprietà simmetrica al magazzino, rispetto al canale, attualmente adibita ad uso residenziale, in base alla normativa vigente in materia di sicurezza nei pressi degli impianti idroelettrici.

Dell'impianto di Mirabello si fornisce una foto recente del fabbricato esistente. Dal punto di vista edilizio è il meglio conservato.

⁴ Informazioni fornite dal Geom. Manfredini, responsabile dell'Ufficio Tecnico del Consorzio, presente durante il sopralluogo.



Figura 2.3. Impianto di Mirabello, vista da valle.

Dal momento che :

- i siti dove sono ubicati i tre impianti sono stati valutati storicamente come i prioritari;
- la presenza in due casi di un edificio centrale potrebbe significare una riduzione dei costi di attivazione degli impianti in tali punti;

nel Capitolo 3 tutti e tre i punti della rete verranno introdotti nel modello di ottimizzazione per valutarne il potenziale idroelettrico in base alla attuale configurazione della rete.

Fino alla fine degli anni '80 il Consorzio si è chiesto più volte, con il supporto di società di consulenza ed esperti, se valesse la pena riattivare gli antichi impianti, e se esistessero altri punti della rete in cui fosse opportuno ed economicamente vantaggioso installare potenza idroelettrica. Esiste negli archivi in particolare un progetto preliminare di riattivazione della centrale di Mirabello, corredato da una analisi economica. Tuttavia questi studi sono sempre rimasti lettera morta, dal momento che, in base alle tecnologie dell'epoca, non si era in grado di costruire impianti di tali dimensioni che fossero economicamente convenienti, tenendo conto del valore economico dell'energia elettrica, sui cui vigeva il monopolio Enel. Oggi lo scenario del mercato dell'energia elettrica è cambiato, dopo che nel 1999 è stato liberalizzato il mercato (ex D.L.vo 79/99, vedi Par.2.3) e la tecnologia permette di installare impianti sempre più efficienti anche se di piccole dimensioni: per questo motivo il Consorzio ha deciso di riportare alla luce la questione.

Inoltre, dopo la costruzione nel 1982 dello scolmatore di Genivolta, che permette ai Navigli Grande e Civico di scaricare in Oglio fino a $40 \text{ m}^3/\text{s}$ prima di essere rimpinguati dal canale Vacchelli, che a sua volta utilizza lo scolmatore dopo aver alimentato le poche rogge a valle di Genivolta, il punto della rete più adatto all'installazione della potenza idroelettrica risultava proprio lo scolmatore, per due ragioni:

- in questo punto della rete, con contributi dei due Navigli, che possono scaricare fino a 20 m³/s ciascuno, e il contributo del Vacchelli (2 m³/s) si concentrano i volumi idrici più ingenti della rete;
- lo scolmatore presenta lungo il suo corso un salto maggiore di 7 metri, funzionale al convogliamento delle acque al di fuori della rete.

La società Genhydro di Padova, in collaborazione con i Consorzi Irrigazioni Cremonesi e Vacchelli, ha installato proprio su questo salto la prima centralina idroelettrica della rete di nuova generazione, centralina che ha iniziato la sua attività nell'estate del 2002.

Il Consorzio si è impegnato, attraverso una convenzione, a fornire alla centrale di Genivolta durante l'anno una portata media di 20 m³/s in 10 mesi, ferme restando le esigenze di irrigazione della rete, che hanno la precedenza, esigenze tali per cui nei due mesi di luglio e agosto il Consorzio non fornisce acqua alla centrale, che rimane inattiva. Questo significa che, durante i mesi invernali, in cui i canali della rete sono stati negli ultimi 50 anni quasi asciutti, dall'inverno 2002/2003 si dovranno convogliare portate per alimentare l'impianto di Genivolta, infatti le portate minime che circolano tradizionalmente nella rete, sufficienti a mantenere la biocenosi e per esigenze anti-incendio e di soccorso, non sono assolutamente sufficienti a garantire la portata di convenzione.

Figura 2.4. Immagine aerea del nodo idraulico di Genivolta e schema idraulico.



2.2 Punti notevoli della rete per l'installazione di nuovi impianti

L'idea di analizzare la potenzialità idroelettrica di altri punti della rete, oltre ai tre punti storici, è nata in seguito a due considerazioni:

- come a Genivolta, esistono nella rete altri scolmatori, che per loro natura sono posti su dislivelli degradanti verso il corpo recettore. Si è allora pensato all'opportunità di installare potenza idroelettrica sugli scaricatori della rete, previa analisi dei salti e delle portate⁵ massime convogliabili. Questa considerazione suggerisce di analizzare gli scolmatori non più a valle del nodo di Brazzuoli, dove le portate massime non superano gli 11 m³/s;
- alla luce dell'entrata in esercizio dell'impianto di Genivolta e del conseguente scenario di gestione della rete durante la stagione invernale, che prevede un prelievo ingente dai fiumi Adda e Oglio e dai fontanili, è necessario convogliare nei canali della rete volumi idrici superiori a quelli convogliati fino ad ora. Volumi idrici che si potrebbero non solo far transitare attraverso le centrali storiche, ma, se sufficienti, anche attraverso gli scolmatori, in modo da smaltirle.

Ciò non toglie che possano esistere altri punti altre sezioni di interesse in cui sia opportuno installare potenza idroelettrica, punti che si possono isolare con una analisi territoriale della morfologia, nota la capacità dei canali.

I seguenti punti, evidenziati nello schema idraulico della rete in Figura 2.5, rappresentano dunque il risultato di una prima analisi, che, lungi dall'essere esaustiva, è comunque supportata da giustificazioni razionali, dall'esperienza e dalla conoscenza della rete del personale del Consorzio⁶, verranno inseriti nel modello di ottimizzazione.

⁵ Per la struttura della rete infatti gli scolmatori, andando da monte a valle, sono dimensionati per smaltire portate sempre minori, essendo da monte a valle decrescenti le capacità dei canali e le portate convogliate. Dalla portata di 40 m³/s di Genivolta, si arriva alla portata di 4 m³/s allo scaricatore di S.Paolo.

⁶ Le sezioni di interesse su cui approfondire l'analisi sono stati stabiliti in collaborazione con il Direttore del Consorzio Ing. S. Loffi e con il responsabile dell'Ufficio Tecnico Geom. Manfredini.

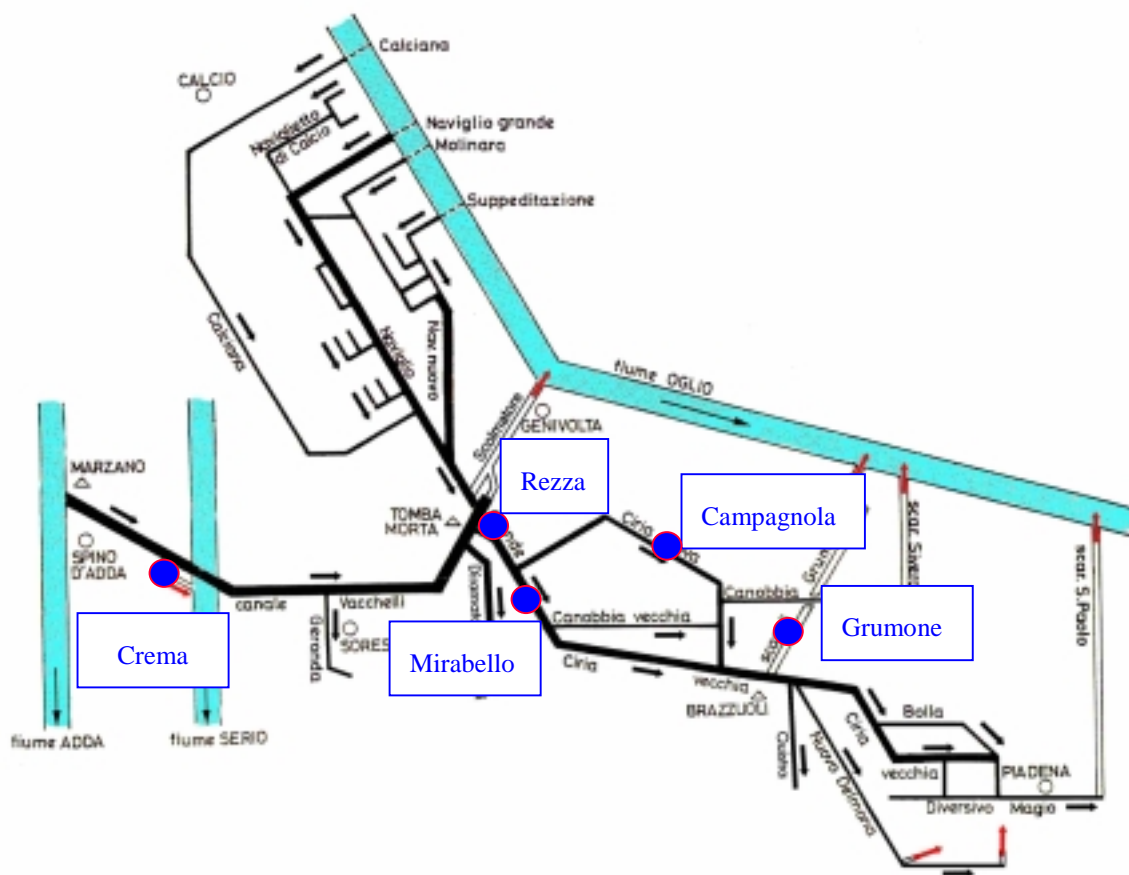


Figura 2.5. Posizioni dei punti di interesse per l'installazione di impianti nello schema idraulico della rete.

2.3 Scenari politici ed energetici

I cambiamenti fondamentali verificatisi nel settore energetico italiano dagli anni '50 - in cui le centrali storiche furono dismesse - ad oggi sono una delle motivazioni addotte nel Par. 2.2 per motivare l'attivazione di nuovi impianti idroelettrici nella rete. Questi cambiamenti sono concentrati negli ultimi 5 anni e si possono schematizzare cronologicamente secondo lo schema seguente:

- dopo aver recepito la Direttiva europea 96/92/CE, concernente norme comuni sul mercato interno dell'energia elettrica, il 9 febbraio 1999 il Consiglio dei Ministri, approva il decreto legislativo di liberalizzazione del mercato elettrico, di attuazione della direttiva sopracitata. La normativa è entrata in vigore il 1° aprile 1999. Nel nuovo assetto le attività di produzione, importazione, esportazione, acquisto e vendita di energia elettrica sono libere (nel rispetto degli obblighi di servizio pubblico). Queste attività possono anche essere svolte da un unico soggetto, a patto che sia garantita almeno la separazione contabile e gestionale.
- Il decreto Bersani definisce il nuovo assetto del settore elettrico e scandisce i tempi della liberalizzazione. Queste trasformazioni riguardano la modifica dell'assetto societario di Enel, del sistema della rete elettrica italiana, la cessione parziale della capacità di generazione da Enel ad altri soggetti, l'apertura del mercato libero, in cui non solo portare a termine queste operazioni, ma anche, a regime, comprare e vendere direttamente energia, con la possibilità di effettuare tutte le operazioni tipiche del settore

finanziario, una volta che si è ottenuta la certificazione dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas di "cliente idoneo"⁷. I clienti non valutati idonei sono definiti vincolati e dovranno rappresentare, a regime, una parte residuale del sistema. Nel transitorio, finché non saranno definiti i clienti idonei, i produttori di energia affidano la propria produzione ad un "acquirente unico", ovvero al Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale, che a sua volta vende l'energia comprata dai produttori o direttamente agli utenti o a grossisti. Questo meccanismo di canalizzazione sull'acquirente unico sarà mantenuto per i clienti che verranno vincolati, considerati non dotati della capacità negoziale di stipulare contratti di fornitura con qualsiasi produttore, distributore o grossista.

- Il 2002 è l'anno in cui il Decreto Bersani prevede si attivino i certificati verdi: certificazioni che un certo quantitativo di energia elettrica è prodotto da fonte rinnovabile. Non vengono fatte distinzioni fra le diverse sorgenti di energia rinnovabile, ma è necessario che l'energia sia prodotta da nuovi impianti, o da impianti oggetto di interventi di potenziamento, rifacimento e riattivazione, entrati in esercizio dopo il 1° Aprile 1999, e si tratta quindi di una opportunità sfruttabile per gli impianti della rete. Un impianto che produce energia rinnovabile può emettere ogni anno un certificato verde "a preventivo", relativo alla produzione prevista per l'anno successivo, o "a consuntivo", relativo alla produzione dell'anno precedente. Un impianto può emettere certificati verdi per otto anni al massimo. I Certificati verdi sono stati introdotti dal legislatore italiano per consentire il rispetto dell'obbligo introdotto all' art. 11 del Decreto, ovvero che tutti i produttori ed importatori di energia elettrica da fonte non rinnovabile, debbano immettere nella rete nazionale un quantitativo di nuova energia prodotta da fonti rinnovabili. Per il primo anno (2001) è stata fissata una quota del 2%, per gli anni successivi potranno essere apportati incrementi tenendo conto delle evoluzioni normative in materia di contenimento di gas inquinanti, con particolare riferimento agli impegni internazionali previsti dal Protocollo di Kyoto. Per ora (2002) la quota percentuale è costante al 2%.
- I certificati verdi potranno essere oggetto di libero scambio tra produttori ed importatori. A tal fine è previsto che il Gestore del Mercato elettrico organizzi una serie di contrattazioni degli stessi, ovvero attivi il mercato dei certificati verdi. Anche il Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale ha facoltà di mettere sul mercato certificati verdi, e fissa un prezzo inferiore al prezzo con cui l'acquirente unico vende energia ma superiore al prezzo a cui compra energia rinnovabile, in modo da far partecipare con vantaggio alla borsa dell'energia tutti i produttori. Nel 2002 sono state effettuate tre sessioni di prova del mercato dei certificati verdi.

2.4 I microimpianti idroelettrici in Europa

A seguito degli impegni presi dai paesi europei in ratifica del Protocollo di Kyoto, la posizione della UE è di promuovere i processi energeticamente efficienti e di favorire un ulteriore aumento nello sviluppo delle fonti rinnovabili d'energia. Fin dai primordi della produzione d'energia elettrica, l'idroelettrico è stato, ed è tuttora, la più importante fonte rinnovabile utilizzata. Attualmente nell'UE l'idroelettrico, sia grande che piccolo, rappresenta, secondo il Libro Bianco sull'energia in

⁷ L'art.2 del Decreto Bersani definisce il cliente idoneo come "la persona fisica o giuridica che ha la capacità di stipulare contratti di fornitura di energia elettrica con qualsiasi produttore, distributore o grossista, sia in Italia che all'estero".

Europa pubblicato dalla Commissione Europea, il 13% dell'energia elettrica totale generata, consentendo una riduzione nelle emissioni di CO₂ di oltre 67 milioni di tonnellate all'anno. Ma mentre i grandi impianti idroelettrici convenzionali richiedono la sommersione di aree estese, con notevoli costi ambientali e sociali, un piccolo impianto idroelettrico "minore" (con una potenza installata inferiore a 10 MW), se opportunamente progettato si integra facilmente nell'ecosistema locale.

L'idroelettrico "minore", generato cioè con microimpianti idroelettrici, è tra le rinnovabili la fonte che maggiormente contribuisce alla produzione elettrica, sia a livello europeo sia mondiale. Nel mondo si stima ci sia una potenza installata pari a 47.000 MW, con un potenziale tecnico ed economico vicino a 180.000 MW. In Europa la potenza installata è di circa 9.500 MW e l'obiettivo della CE per il 2010 è di raggiungere i 14.000 MW [5].

Nella Figura 2.6 una panoramica della attuale e potenziale produzione di energia da microimpianti idro tratta da uno studio della European Small Hydropower Association, redatto nell'ambito del progetto europeo Altener.

Country	SHP 1999			Potential (technical constraints only)				Potential with economic and environmental constraints			
				Upgrading		New SHP		Upgrading		New SHP	
	MW	GWh	Number	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh
Austria	848	4 246	1 110	212	1 062	1 272	6 369	127	637	967	4 840
Belgium	95	385	39	13	100	58	229	5	36	26	156
Denmark	1	30	38	0	0	0	0	-	-	-	-
Finland	320	1 280	225	42	150	150	600	32	130	100	400
France	1 977	7 100	1 700	300	1 200	1 500	6 000	300	1 200	1 000	4 000
Germany	1 502	6 253	5 625	350	1 300	1 100	4 000	210	800	240	900
Greece	48	160	17	2	8	200	1 300	2	5	100	600
Ireland	32	120	44	20	90	76	360	5	20	36	165
Italy	2 209	8 320	1 668	700	2 500	1 300	4 800	140	500	500	1 850
Luxembourg (*)	39	195	29								
Netherlands (**)	-	-	-							19	95
Portugal	280	1 100	60	20	60	610	2 400	20	60	470	1 850
Spain	1 548	5 300	1 056	100	350	2 410	7 800	100	350	1 000	3 224
Sweden	1 050	4 600	1 615	300	1 200	700	3 000	150	700	300	1 200
UK	160	840	126	20	80	250	1 200	20	80	70	365
Total	10 118	40 019	13 352	2 080	8 100	9 615	38 058	1 111	4 518	4 828	19 645

(*) Data for this country does not come from the answers to BlueAGE questionnaire; Source: <http://www.cegedel.lu/fr/pro/produchydro.html>

(**) Data for this country does not come from the answers to BlueAGE questionnaire.

Figura 2.6. I dati si riferiscono al 1999, lo scenario futuro è il 2015, SHP sta per small hydropower plant [5].

La maggioranza dei piccoli impianti idroelettrici è ad acqua fluente: la turbina produce quando l'acqua è disponibile nel corso d'acqua su cui è installata. Quando il corso d'acqua è in magra e la portata scende al di sotto di un certo valore predeterminato, la produzione di energia cessa. Questo significa che piccoli impianti indipendenti non sono in grado di fornire energia con continuità, almeno che essi non siano dimensionati in modo tale da avere sempre acqua sufficiente per funzionare. Tuttavia gli impianti della rete irrigua cremonese, per la struttura propria della rete, riescono a sfuggire a questi problemi di variabilità delle portate, poiché, stabilito a priori che alle prese di Adda e Oglio siano disponibili con continuità le portate nominali di concessione, la rete non sente l'influenza della pluviometria perché i suoi canali non fanno da colatori, né l'influenza

del regime naturale dei fiumi, le cui acque vengono regolate a monte dai laghi e nella rete stessa dai campari.

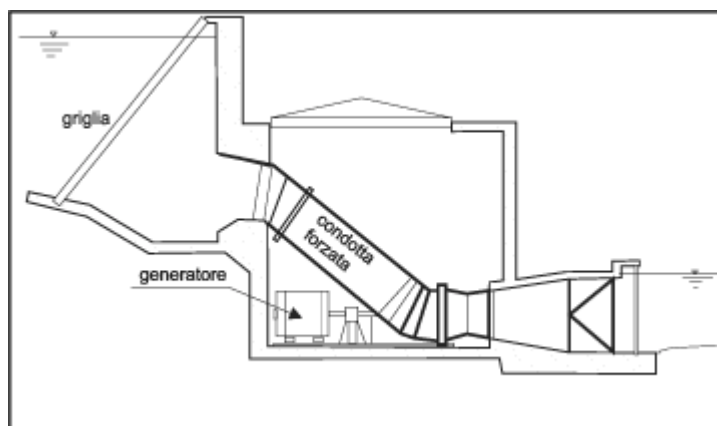


Figura 2.7. Schema idraulico di un impianto ad acqua fluente per salti medio-bassi [4].

Tuttavia quello della eccessiva variabilità dei flussi idrici è il principale problema in un microimpianto idroelettrico, e per questo lo tratteremo anche se non si riferisce agli impianti di studio: esso può essere risolto in due modi. Il primo è l'utilizzo di laghi esistenti o bacini artificiali di accumulo posti a monte dell'impianto, quando la morfologia del territorio lo permette. Il secondo è la connessione dell'impianto ad una rete di distribuzione elettrica. Questo secondo gode del vantaggio di facilitare la regolazione ed il controllo automatico della frequenza di generazione dell'energia elettrica, ma paga lo svantaggio di dover vendere l'energia all'azienda distributrice al prezzo da lei imposto - il cosiddetto buy-back - che può essere troppo basso. In anni recenti, nella maggior parte degli Stati Membri dell'UE, il prezzo è stato fissato dai governi nazionali che, consapevoli dei benefici ambientali delle fonti rinnovabili, hanno provveduto ad aumentare il buy-back. Portogallo, Spagna e Germania hanno dimostrato che buy-back ragionevoli sono essenziali per aumentare la produzione d'energia elettrica da fonti rinnovabili.

Con la liberalizzazione del mercato europeo dell'energia elettrica, i piccoli produttori si sono trovati in una posizione svantaggiata nel contrattare l'acquisto della propria energia da parte delle compagnie distributrici. È per questo che sono stati previsti strumenti di incentivazione per la produzione di energia rinnovabile, come i Certificati Verdi, e altre forme di finanziamento che in particolare in Italia non interessano l'idroelettrico, considerato probabilmente un sistema di produzione energetica già sovrasfruttato.

In ogni caso, con le tecnologie disponibili attualmente e tenendo conto della progressiva saturazione delle fonti di energia idroelettrica in Italia, in ragione di un sfruttamento massiccio e di lunga data, è possibile installare con successo impianti idroelettrici di piccole dimensioni in aree prevalentemente pianeggianti- tipicamente nei sistemi di approvvigionamento idrico, sfruttando il salto di pozzi piezometrici e di serbatoi pensili, e allo stesso modo nelle reti irrigue. La Pianura Padana inizia a dotarsi di questi impianti, che, sebbene per la variabilità dei parametri di dimensionamento, siano molto difficili da progettare e realizzare, presentano un modesto costo di gestione, un limitato impatto ambientale, una vita attesa non inferiore a quella dei grandi impianti e una produzione "inevitabile" di energia, diremmo per usare il gergo dell'economia, una esternalità positiva per i gestori delle reti idriche.

Il parametro in gioco nella definizione di microimpianto idroelettrico è la potenza installata. Non c'è accordo tra gli Stati Membri della UE sulla definizione di microimpianto idroelettrico. In Portogallo, Spagna, Irlanda ed ora anche Grecia e Belgio accettano 10 MW come limite superiore per la potenza installata. In Italia il limite è fissato a 3 MW (gli impianti con potenza installata

superiore dovrebbero vendere l'energia a prezzi inferiori); in Francia il limite è stato stabilito in 8 MW e nel Regno Unito in 5 MW.

Nel seguito si considererà come piccolo ogni impianto con potenza installata fino a 10 MW. Questo valore è adottato da 5 Stati Membri, dall'ESHA (European Small Hydropower Association) dalla Commissione Europea e dell'UNPEDE (l'Unione Internazionale dei Produttori e Distributori di Energia Elettrica). In base ai dati della Tabella 2.1 e della **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, gli impianti della rete irrigua cremonese sono da considerare a pieno titolo microimpianti idroelettrici. Nella Figura 2.7 un classico esempio di schema idraulico di impianto installato su un canale irriguo.

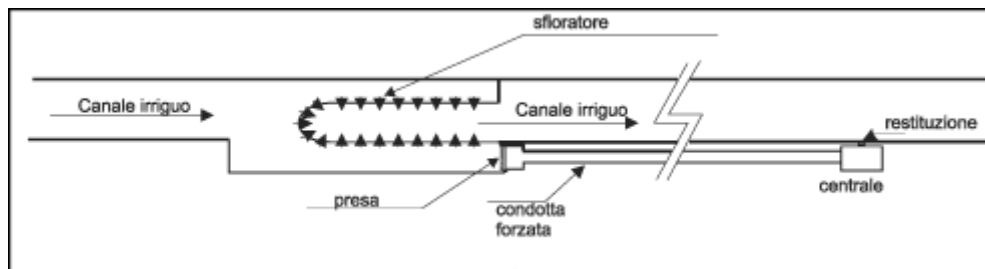


Figura 2.8. Schema idraulico tipico di un impianto su un canale irriguo [4].

La ESHA ha valutato importanti gli impatti ambientali prodotti dai microimpianti nei comparti: visivo, acustico e biologico.

Nella Figura 2.9 lo standard costruttivo per un'opera di presa da un canale a pelo libero.

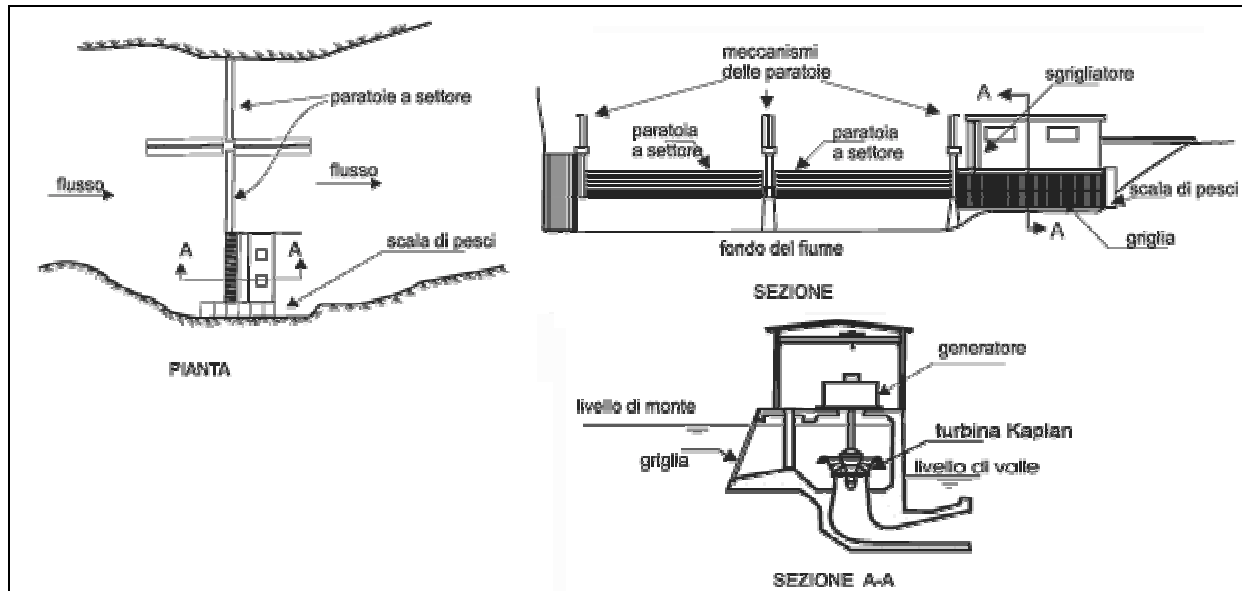


Figura 2.9. Schema costruttivo tipico di un'opera di presa da canale [4].

2.5 Riferimenti bibliografici

[1] B. Loffi, Consorzio Irrigazioni Cremonesi Cento Anni, 1987

- [2] Decreto Bersani Decreto Legislativo 16 marzo 1999, n.79
- [3] Sito web del Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale www.grtn.it
- [4] European Small Hydropower Association, Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site, 1998
- [5] European Small Hydropower Association, Blue energy for a Green Europe, 1998
- [6] Sito web di RETScreen International Renewable Energy Decision Support Centre www.etscreen.net

Capitolo 3 Il modello di ottimizzazione

3.1 Il problema di ottimizzazione

La costruzione del modello matematico della rete è funzionale al problema a cui si desidera trovare la soluzione. L'obiettivo di questa parte dello studio è di capire quali flussi idrici ottimi è possibile garantire nelle sezioni di interesse della rete, definite nel Capitolo 2, con l'obiettivo di massimizzare la produzione di energia idroelettrica in tali punti. Il risultato sarà quindi la distribuzione delle portate ottime nelle sezioni di interesse nel tempo. Per ottenere questo risultato è opportuno utilizzare un modello che descriva la rete irrigua, costituito da una serie di regole (vincoli) di convogliamento delle acque che ricalchino quelle esistenti nella realtà, e di un motore di ottimizzazione. Si è deciso, perché il problema lo permette e per semplicità, di costruire un modello lineare della rete, a cui applicare un motore di ottimizzazione lineare: la programmazione lineare, utilizzata fin da quando è stata inventata negli anni '50 per la risoluzione di problemi di ottimizzazione vincolata in innumerevoli campi [1].

3.2 Il modello matematico della rete

Nella terminologia della teoria dei sistemi la rete si può definire in anello aperto (senza ricircoli) e come è consuetudine, è descritta e rappresentata attraverso una topologia a grafi. Gli archi orientati rappresentano il percorso dell'acqua nei canali, i nodi rappresentano punti in cui si uniscono o si dividono canali o semplicemente sezioni di interesse. Per definire il modello della rete è necessario specificare:

- la topologia della rete (gli archi, i nodi e il modo in cui sono tra loro collegati)
- l'orizzonte spaziale e temporale del problema
- le variabili del sistema
- i vincoli del sistema
- l'obiettivo da ottimizzare

3.2.1 Topologia: i nodi e gli archi

I nodi sono i punti della rete in cui vengono prese le decisioni e sono il punto a cui arrivano e da cui partono gli archi orientati. Gli archi diretti verso un nodo rappresentano i flussi idrici in entrata, quelli in direzione uscente rappresentano i flussi idrici in uscita. Secondo il principio di conservazione della massa ad ogni nodo compete una espressione di uguaglianza, che rappresenta un vincolo (vedi Par.3.2.5), e che si può sintetizzare come:

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{in} = \sum_{j=1}^m Q_j^{out}$$

dove:

Q_i^{in} = portata in entrata nel nodo, su un arco diretto verso il nodo

Q_j^{out} = portata in uscita dal nodo, su un arco diretto in direzione uscente dal nodo.

Dal punto di vista topologico i nodi si possono distinguere in:

- **nodi di derivazione**, nei quali il numero di archi in uscita è maggiore o uguale al numero di archi in ingresso. Questi nodi a loro volta si distinguono in:
 - *nodi di decisione*, se almeno uno degli archi in uscita è una variabile di decisione del sistema. I nodi di decisione del sistema sono 10;
 - *nodi di derivazione semplice*, altrimenti detti *nodi irrigui*, che non presentano archi di decisione in uscita. Tipicamente questi nodi sono utilizzati per modellizzare i prelievi delle utenze irrigue e sono posti appena a monte di un nodo di decisione. I nodi di derivazione semplice sono 16;
- **nodi di congiunzione**, nei quali il numero di archi in uscita è minore al numero di archi in ingresso. Questi nodi rappresentano confluenze tra canali. I nodi di congiunzione sono 4;
- **nodi idroelettrici**, nei quali il numero di archi in entrata eguaglia il numero di archi in uscita, oppure il numero degli archi in uscita è nullo. Questi nodi rappresentano gli impianti idroelettrici: l'acqua che li attraversa genera un guadagno e vi viene convogliata attraverso i rispettivi archi di decisione appena a monte. I nodi idroelettrici sono 5, di cui 3 sono di tipo terminale, ovvero in cui il numero di archi in uscita è nullo.

Gli archi sono i tratti dei canali compresi nella rete e sono orientati nel verso di percorrenza dell'acqua secondo gravità.

Dal punto di vista topologico gli archi si possono distinguere in:

- **archi sorgente**, diretti verso un nodo ma non provenienti da alcun nodo, che rappresentano gli afflussi idrici al sistema. Gli archi sorgente sono 2, e rappresentano le sorgenti di approvvigionamento idrico: Adda e Oglio;
- **archi pozzo**, provenienti da un nodo ma non diretti verso alcun nodo, che rappresentano i deflussi uscenti dalla rete per effetto delle perdite nei canali o delle erogazioni irrigue agli utenti del consorzio. Gli archi pozzo sono 18, di cui 16 rappresentano le utenze irrigue e sono immediatamente a valle di nodi di derivazione semplice, mentre 2 rappresentano le portate convogliate a valle della parte di rete analizzata nel dettaglio, verso la Canobbia Nuova e a valle della sezione di Brazzuoli nella Ciria Vecchia;
- **archi intermedi**, provenienti da un nodo e diretti verso un altro nodo, che rappresentano tratti dei canali dell'area di studio. Gli archi intermedi sono 39 e rappresentano i tratti dei canali modellizzati.

Gli archi sorgente e gli archi pozzo che rappresentano utenze irrigue sono associati a parametri del problema (vedi Par.3.3), ovvero ad essi sono assegnati valori numerici fissati a priori dell'ottimizzazione: i valori delle portate di concessione per gli archi sorgente e i valori delle erogazioni medie stagionali per gli archi pozzo irrigui. I flussi sui restanti archi pozzo e sugli archi intermedi sono variabili.

3.2.2 Orizzonte spaziale e rappresentazione dei canali

Dal punto di vista spaziale il problema di gestione dei flussi idrici è limitato alla parte settentrionale della rete, delimitata dai seguenti punti a monte, che rappresentano archi sorgente della rete:

- il canale Vacchelli alla traversa sul fiume Adda;
- i canali Molinara, Calciana, Suppeditazione, Naviglio Grande alle traverse sul fiume Oglio;
- i fontanili ;

e delimitato a valle da alcuni degli archi pozzo della rete:

- lo scaricatore di Crema sul fiume Serio;
- lo scaricatore di Genivolta;
- il Cavo Canobbia Nuova e lo scaricatore Sivera;
- lo scaricatore di Grumone

All'interno di questa area si individuano sugli archi intermedi della rete i seguenti canali:

- Canale Vacchelli
- Naviglio Grande
- Roggia Ciria Nuova
- Cavo Canobbia Vecchia
- Roggia Ciria Vecchia

Ogni canale è rappresentato da uno o più archi in sequenza.

Secondo la classificazione effettuata nel Par.1.3, i canali rappresentati da archi sono tutti quelli del primo ordine ed alcuni del secondo ordine funzionali allo studio, ovvero quelli che presentano lungo il loro corso organi di regolazione (paratoie, traverse, stramazzi, salti), che permettono di regolarne il regime e di scambiare acqua con altri canali. I restanti canali del secondo ordine e del terzo sono rappresentati in modo compatto attraverso gli archi-pozzo diretti alle utenze che servono.

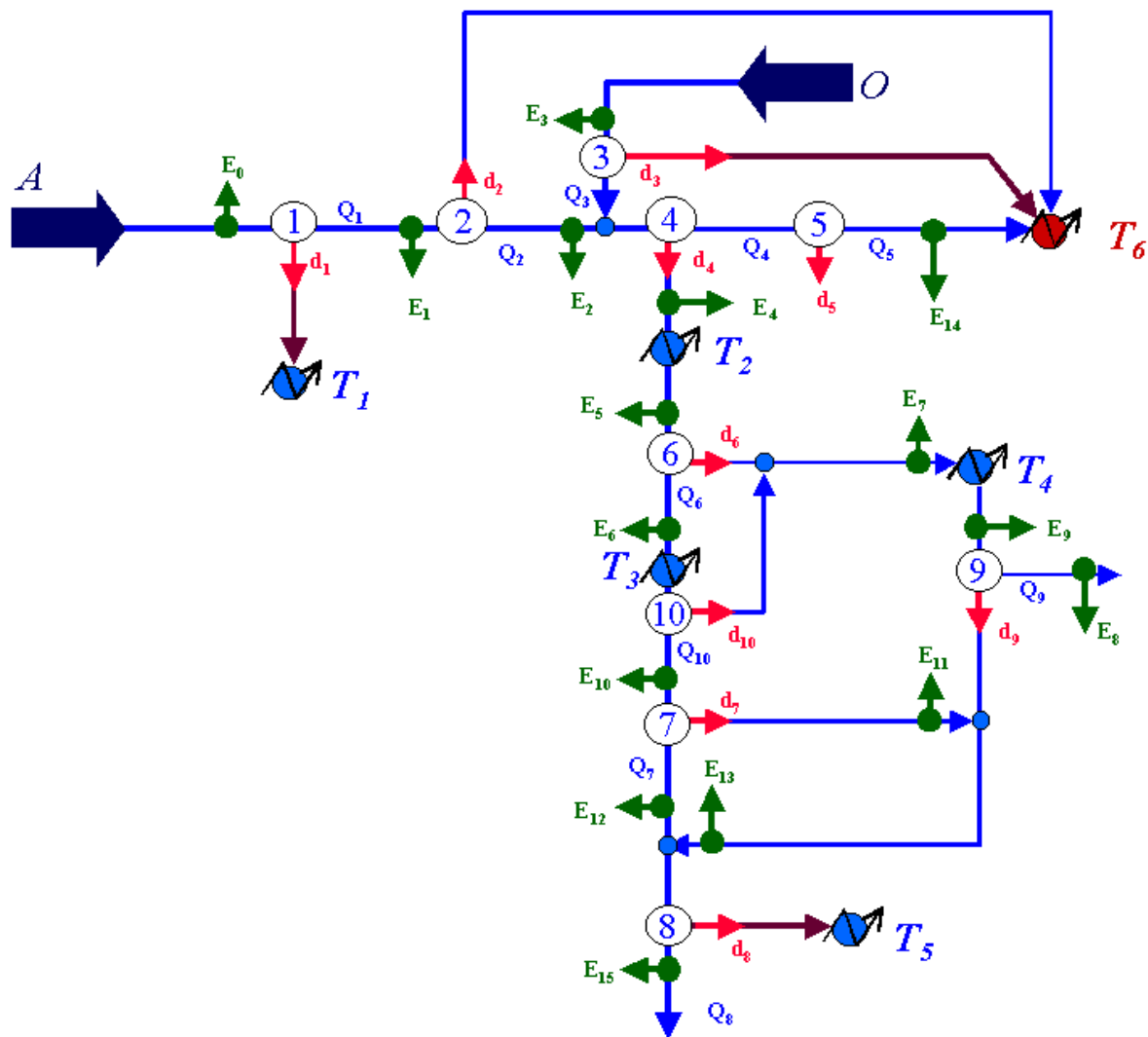


Figura 3.1. Grafo della rete irrigua cremonese.

Nella Figura 3.1 è rappresentato il grafo della rete. La lunghezza degli archi non rappresenta la lunghezza reale ma risponde alle esigenze rappresentative del grafo. Se si confronta il grafo con lo schema idraulico della rete, riportato in Figura 1.5, si può osservare che i nodi sono stati progettati in modo da contenere al più una decisione. Avremo quindi bisogno di utilizzare ben 4 nodi per rappresentare il crocevia idraulico Tomba Morta di Genivolta, dove è necessario in poche centinaia di metri prendere le seguenti decisioni:

- scaricare dal Naviglio Grande verso lo scolmatore e quindi verso l'impianto di Genivolta (d_3);
- derivare dal Vacchelli nel Naviglio Grande (d_4);
- scaricare dal Vacchelli nel Naviglio Civico (d_5);
- scaricare dal Vacchelli al termine dello scolmatore di Genivolta e quindi all'impianto tramite il Carione (Q_5 - E_{14}).

3.2.3 Orizzonte temporale, passo temporale e scenari

Il problema da risolvere ha un orizzonte temporale annuale, perché annuale è lo svolgersi del ciclo di utilizzo dei canali per l'irrigazione e la loro manutenzione. Partendo dalla considerazione che la rete è istantanea, ovvero non presenta invasi e quindi accumuli, si può affermare che in ogni istante la configurazione dei flussi dipende, fissati gli organi di regolazione, soltanto dagli afflussi alla rete e dalle richieste degli utenti. Si può allora schematizzare l'anno come una successione di intervalli nei quali gli afflussi e le richieste siano costanti. Analizzando le attività che governano gli afflussi e le erogazioni della rete si isola la decade come l'intervallo di tempo più breve entro cui si mantiene costante uno schema afflussi-erogazioni⁸, inoltre si possono ridurre in decadi anche gli altri intervalli senza una grave perdita di informazioni⁹. Il passo temporale del modello sarà quindi la decade e l'anno solare risulterà costituito quindi da 36 decadi.

Il susseguirsi delle attività di irrigazione-manutenzione suggerisce di dividere l'anno in 7 scenari di afflussi-erogazioni, ognuno dei quali corrisponde ad una decade tipica che si presenta con una certa durata. Nella Tabella 3.1 si possono individuare gli scenari e le loro durate in decadi e in giorni.

Nella Figura 3.2 è rappresentato graficamente il susseguirsi dei valori dei parametri e quindi degli scenari durante l'anno.

È opportuno precisare che, dato il carattere istantaneo della rete e quindi l'indipendenza tra i flussi da un giorno al successivo, la sequenza temporale mostrata in figura è quella che tradizionalmente il Consorzio applica, sia per l'irrigazione che per la manutenzione. Tuttavia, fermo restando il calendario della stagione irrigua, si potrebbero posizionare altri scenari di manutenzione in periodi dell'anno differenti, sempre al di fuori della stagione irrigua, senza cambiare di molto il risultato.

Per comprendere i valori assegnati alle portate di erogazione e di afflusso vedi Par.3.3.3 e Par.3.3.1.

Tabella 3.1. Scenari di afflussi-erogazioni e rispettive durate.

Scenari: afflussi ed erogazioni nelle decadi tipiche

	Scenari	Stagione irrigua	Stagione invernale	Manutenzione derivatori Oglio	Manutenzione Vacchelli	Secca Vacchelli	Maggio e Settembre	Fine agosto
		(1 giu-20 ago)	(21 ago-29 feb)	(1 mar-31 mar)	(1 apr-19 apr)	(20 apr-29 apr)		(21 ago-31 ago)
	Durata [decadi]	8	15	3	2	1	6	1
INGRESSI	A1	38,5	30	30	15	0	30	30
	A2	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576
	O1	10,243	6	0	6	6	7,68	7,68
	O2	4,436	4,436	2,9	4,436	4,436	4,436	4,436
	O3	4,6	4,6	0	4,6	4,6	4,6	4,6
EROGAZIONI	E0	0,49	0	0	0	0	0	0
	E1	2,83	0	0	0	0	0	0
	E2	9,67	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	E3	6,99	0	0	0	0	0	0
	E4	0,52	0	0	0	0	0	0
	E5	0,76	0	0	0	0	0	0
	E6	0,10	0	0	0	0	0	0
	E7	1,53	0	0	0	0	0	0
	E8	2,78	0	0	0	0	0	0
	E9	0,36	0	0	0	0	0	0
	E10	1,62	0	0	0	0	0	0
	E11	0,20	0	0	0	0	0	0
	E13	0,00	0	0	0	0	0	0
	E14	2,31	0	0	0	0	0	0
	E15	10,35	0	0	0	0	0	0

⁸ La decade di riferimento è la durata dell'asciutta del canale Vacchelli, che avviene tradizionalmente nel mese di aprile, durante la quale le paratoie dell'edificio di presa a Merlino vengono chiuse e non facendo il canale da colo né essendo alimentato dall'acquifero, rimane asciutto, a meno degli afflussi meteorici.

⁹ Per esempio: la stagione irrigua è a regime dal 25 aprile al 15 agosto, per 83 giorni, che in decadi corrispondono ad 8 decadi.

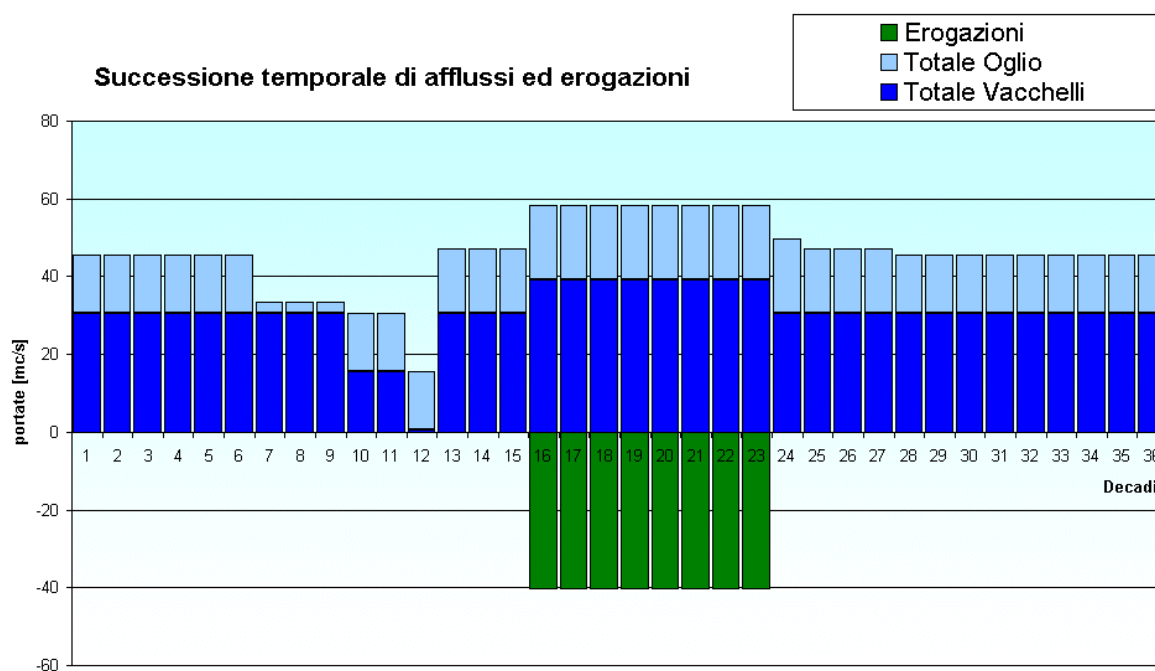


Figura 3.2. Ordine temporale di accadimento degli afflussi-erogazioni.

3.2.4 Variabili

Le variabili del sistema sono, per ogni decade dell'anno, le decisioni da prendere ai nodi d_i con $i=1..10$, le portate residuali risultanti Q_i con $i=1..10$ in uscita dai nodi di decisione e le portate T_j con $j=1..6$ virtualmente turbinare nelle 6 sezioni di interesse della rete. L'algoritmo di ottimizzazione modulerà le decisioni nel rispetto dei vincoli in modo da ottenere il valore massimo dell'obiettivo, assegnando di conseguenza i valori alle altre variabili. Le decisioni e i flussi residuali sono variabili associate ad archi a valle di nodi di decisione, le portate turbinare sono variabili associate ad archi a monte di nodi idroelettrici.

Il principio con cui sono stati assegnati i nomi alle variabili agli archi in uscita dai nodi di decisione è quello per cui in uscita dal nodo i -esimo, in cui è convogliata una portata totale in entrata pari a Q_i^{in} , ci sia un arco a cui è associata una portata di derivazione d_i ed il suo duale, a cui è associata la portata residua risultante Q_i .

Dieci sono i nodi di decisione, di conseguenza 10 sono le variabili di decisione e 10 le portate residuali, per ogni giorno dell'anno. In totale avremo quindi 3.600 variabili di decisione e altrettante portate residuali. Applicando il passo temporale della decade le variabili di decisione si riducono a 360 e altrettante rimangono le portate residuali. Analogamente le portate turbinare sono una per ogni impianto e una per ogni decade, per un totale di $6 \cdot 36 = 216$ variabili.

Il problema da risolvere presenta in totale $2 \cdot 360 + 216 = 736$ variabili.

In Tabella 3.2, Tabella 3.3 e sono riportate, per ogni nodo, le informazioni relative alle variabili derivate e residuali e il rispettivo significato.

Tabella 3.2. Variabili decisionali: portate derivate, simboli, significato e progressiva chilometrica del canale su cui sono poste.

Nodi di decisione - variabili decisionali

Portate derivate

Nodo	Sezione	Simbolo	Canale	Significato	Progressiva chilometrica
1	Crema	d1	Vacchelli	Scaricatore Serio	19,9
2	Salvirola	d2	Vacchelli	Impinguamento N.Civico a Salvirola	27,4
5	Genivolta	d5	Vacchelli	Genivolta impinguamento N.Civico	34,1
3	Genivolta	d3	Grande	Scaricatore Genivolta	21,4
4	Genivolta	d4	Grande	Genivolta valle impinguamento Vacchelli	34,1
10	Mirabello	d10	Grande	Tornacanal Grande-Ciria Nuova (Mirabello)	29,97
6	Mirabello	d6	Ciria Nuova	Impinguamento Ciria Nuova	29,7
9	Canobbia Nuova	d9	Ciria Nuova	Impinguamento Canobbia Nuova - Confluenza Ciria Vecchia	10,5
7	Canobbia Vecchia	d7	Canobbia Vecchia	Impinguamento Canobbia Vecchia	34,5
8	Brazzuoli	d8	Ciria Vecchia	Scaricatore Grumone	8,065

Tabella 3.3. Variabili decisionali: portate residuali, simboli, significato e progressiva chilometrica del canale su cui sono poste.

Nodi di decisione - variabili decisionali

Portate residuali

Nodo	Sezione	Simbolo	Canale	Significato	Progressiva chilometrica
1	Crema	Q1	Vacchelli	Crema	19,9
2	Salvirola	Q2	Vacchelli	Salvirola	27,4
4	Genivolta	Q4	Vacchelli	Genivolta monte N.Civico	34,1
5	Genivolta	Q5	Vacchelli	Fine (compreso scaricatore Carione)	34,4
3	Genivolta	Q3	Grande	Genivolta valle scaricatore	21,4
10	Mirabello	Q10	Grande	Valle tornacanal di Mirabello	29,97
6	Mirabello	Q6	Grande	Valle impinguamento Ciria Nuova	29,7
7	Canobbia Vecchia	Q7	Ciria Vecchia	Valle derivaz Canobbia Vecchia	34,5
9	Canobbia Nuova	Q9	Canobbia Nuova	Canobbia Nuova	10,5
8	Brazzuoli	Q8	Resto della rete	Portata residua rete basso cremonese	8,065

Nel Par.3.2.1 sono stati indicati i nodi idroelettrici come i punti della rete in cui sono virtualmente localizzati gli impianti idroelettrici. La variabile portata turbinata, che assume valori in conseguenza alla scelta delle decisioni ottime e in compatibilità con i vincoli del sistema, è pari alla portata che raggiunge il nodo. Solo per il nodo di Genivolta la portata turbinata assume un significato particolare: è il solo contributo del Consorzio Irrigazioni Cremonesi all'impianto, che riceve contributi anche dal Naviglio Civico, ed è pari alla somma di tre diversi contributi:

- portata d_2 derivata al nodo 2 di Salvirola sul Naviglio Civico;
- portata d_3 scaricata al nodo 3 di Genivolta dal Naviglio Grande allo scolmatore di Genivolta;
- portata (Q_5-E_{14}) scaricata al nodo 4 di Genivolta dal Vacchelli nello scaricatore Carione.

Nella Tabella 3.4 sono riportati i simboli delle portate turbinate nei sei impianti della rete e il loro significato.

Tabella 3.4. Variabili decisionali: portate turbinate, simboli, significato e progressiva chilometrica del canale su cui sono poste.

Nodi centrale- variabili decisionali

Impianto	Simbolo	Canale	Significato	Progressiva chilometrica
Crema	T1	Vacchelli	Portata allo scaricatore di Crema	19,9
Rezza	T2	Grande	Portata alla Rezza	24,77
Mirabello	T3	Grande	Portata a Mirabello	29,97
Campagnola	T4	Ciria Nuova	Portata a Campagnola	8,5
Grumone	T5	Ciria Vecchia	Portata allo scaricatore di Grumone	8,065
Genivolta	T6	Vacchelli	Contributo all'impianto di Genivolta	n. a.

3.2.5 Vincoli

I vincoli sono posti sia sui nodi che sugli archi, e possono essere di tipo fisico o di tipo gestionale.

Per una maggiore semplicità di trattazione chiameremo Q_i^{in} la somma delle portate in ingresso all'i-esimo nodo e Q_i^{out} la somma delle portate in uscita dall'i-esimo nodo. Il valore di tali portate per ogni nodo è intuibile osservando la Figura 3.1, e verrà esplicitato nel linguaggio di programmazione utilizzato per la risoluzione del problema nel Par.3.4.1

I vincoli fisici applicati sono i seguenti:

- su tutti i nodi vale la *legge di conservazione della massa*, per cui la somma delle portate entranti è pari alla somma delle portate uscenti. Riportiamo di seguito l'espressione che formalizza tali vincoli per ognuno dei nodi del sistema:

$$Q_i^{\text{out}} = Q_i^{\text{in}} \text{ con } i = 1..36^{10}$$

- sui nodi idroelettrici vale la relazione che fornisce la *portata turbinata* nel nodo. Di seguito le espressioni che formalizzano tali vincoli per i nodi centrale:

$$T_1 = d_1$$

$$T_2 = d_4 - E_4$$

$$T_3 = Q_6 - E_6$$

$$T_4 = d_6 + d_{10} - E_7$$

$$T_5 = d_8$$

$$T_6 = d_2 + d_3 + Q_5 - E_{14}$$

- sui nodi di derivazione semplice, o anche *nodi irrigui*, vale la regola per cui si fornisce all'utente una portata non superiore a quella richiesta. È necessario assicurarsi che le portate in uscita dal ramo residuale del nodo irriguo siano positive, e cioè che la portata in ingresso sia maggiore o uguale alla portata da erogare:

$$Q_i^{\text{in}} \geq E_i \text{ con } i = 0..15$$

- sugli archi valgono, ove possibile, le regole che assicurano che la *portata in un arco* sia pari o superiore alla minima, indicata con l'apice "min" e inferiore o pari alla massima, indicata

¹⁰ 36 sono i nodi della rete: 10 nodi di decisione, 16 nodi di derivazione semplice, 4 nodi di congiunzione e 6 nodi idroelettrici.

con l'apice "max". Dal momento che le portate massime sono state ricavate a partire dai dati di archivio del Consorzio, assumendole pari alle massime portate misurate. Dal punto di vista formale, dove sono noti i parametri relativi, valgono le relazioni:

$$Q_i^{\min} \leq Q_i \leq Q_i^{\max} \text{ con } i=1..10$$

$$d_i^{\min} \leq d_i \leq d_i^{\max} \text{ con } i=1..10$$

- Analogamente al vincolo precedente, anche gli impianti idroelettrici possono produrre energia solo all'interno di estremi inferiori -lo zero in prima approssimazione- ed estremi superiori. Formalmente anche le portate turbinate sono sottoposte alla relazione

$$T_i^{\min} \leq T_i \leq T_i^{\max} \text{ con } i=1..6$$

I vincoli gestionali applicati sono i seguenti:

- sugli archi che rappresentano scaricatori, si impone nullo il flusso durante la stagione irrigua, quindi, se indichiamo con l'apice "IRR" la stagione irrigua:

$$d_1^{IRR} = d_3^{IRR} = d_8^{IRR} = 0$$

- sul nodo di Genivolta si impone il rispetto della convenzione, secondo cui il Consorzio, fatte salve le esigenze dell'irrigazione, e quindi nelle decadi al di fuori della stagione irrigua, assicura all'impianto una portata media di 20 m³/s. Se indichiamo con T_{conv} tale periodo e con Q_{conv} la portata media di convenzione, posta D^j la durata della tipologia j-esima di decade, deve valere la relazione:

$$\sum_{j=1}^6 T_6^j \cdot D^j \geq Q_{conv} \cdot T_{conv}$$

si noti che durante la stagione irrigua tutti e tre i contributi all'impianto di Genivolta risultano nulli: la portata derivata a Salvirola dal Vacchelli soddisfa l'utenza Naviglio Civico e i due scaricatori di Genivolta e del Carione devono essere chiusi per le esigenze irrigue.

3.2.6 Obiettivo

L'obiettivo del problema è massimizzare la produzione energetica annua dei cinque impianti della rete. Indicando con η_i e h_i rispettivamente il rendimento e il salto motore dell'i-esimo impianto, l'espressione assume la seguente forma:

$$\max_{T_i^j} \left\{ \sum_{j=1}^{36} \sum_{i=1}^5 \eta_i h_i \cdot T_i^j \cdot D^j \right\}$$

dove:

D^j = durata della tipologia j-esima di decade

T_i^j = portata turbinata dall'impianto i-esimo nella decade di tipo j-esimo.

3.3 Parametri

I parametri sono i valori numerici che vengono utilizzati per forzare il sistema a rispettare i vincoli. Nel modello della rete irrigua proposto in questo studio si è deciso di parametrizzare:

- gli afflussi al sistema
- le portate minime e massime nei canali, ove presenti
- le erogazioni, sotto forma di medie stagionali, dispensate agli utenti
- le grandezze caratteristiche degli impianti idroelettrici virtuali
- gli estremi della convenzione tra il Consorzio e la società Genhydro, che gestisce l'impianto di Genivolta.

Il vantaggio di effettuare una parametrizzazione sta nella possibilità di esplorare semplicemente più scenari: una modifica fisica dei canali della rete si traduce nell'assegnamento ai canali modificati di nuove portate massime, lo spostamento, la chiusura o la nuova apertura di bocche di alimentazione, si traduce in una modifica dei valori delle erogazioni, e così via.

3.3.1 Afflussi

Il sistema è costituito da canali posti al di sopra del piano campagna, che non raccolgono le piogge del bacino idrografico di interesse, inoltre essi sono costantemente sorvegliati dal personale del consorzio, che mantiene costante il livello idrometrico, regolando gli organi di manovra alle derivazioni. Sulla base di queste ipotesi si può pensare in prima approssimazione che gli afflussi del sistema siano deterministici.

I valori assegnati sono, per i canali derivatori dal fiume Oglio, quelli delle portate di concessione, riportate nella Tabella 3.5, mentre per il canale Vacchelli sono assegnate le portate di convenzione durante la stagione irrigua e durante la stagione invernale una portata media di 30 m³/s a favore di sicurezza, sebbene la portata di convenzione sia superiore,.

Durante la manutenzione i canali derivatori dall'Oglio si ipotizzano a portata nulla, durante la manutenzione del canale Vacchelli si ipotizza una portata media di 15 m³/s, poiché il canale viene mantenuto con l'utilizzo di natanti. Durante la secca anche la portata derivata dal Vacchelli è pari a 0.

Tabella 3.5. Portate di concessione per i canali del Consorzio.

	Portate di concessione		
	Estiva giu-ago	Invernale ott-apr	Mezze stagioni sett e mag
Calciana	1,656	6	1,2
Naviglio Grande	8,587		6,464
Molinara	4,6	4,6	4,6
Suppeditazione			
Fontanili	2,9	2,9	2,9
Acque Nuove	1,536	1,536	1,536
Totale	19,279	15,036	16,7
Vacchelli	38,5	38,5	38,5
Totale	57,779	53,536	55,2

Gli afflussi dal comprensorio di bonifica dei Mosi sono posti pari al valore medio ($0,576 \text{ m}^3/\text{s}$) e gli afflussi dai fontanili sono posti anch'essi pari alle portate di concessione ($2,9 \text{ m}^3/\text{s}$).

3.3.2 Portate massime e minime nei canali

Come anticipato nel Par. 3.2.1 gli archi, che rappresentano i tratti dei canali della rete, e quindi le variabili, possono essere veicolo di flussi idrici sono all'interno di un intervallo di valori, compreso tra una portata minima e una portata massima.

Le portate minime sono necessarie per garantire le esigenze anti-incendio, di soccorso e ambientali¹¹.

Le portate massime sono pari alle massime misurate durante la stagione irrigua. Riguardo alle portate massime è necessario fare una precisazione: il fatto che un canale presenti il livello idrometrico massimo non significa che la portata che vi transiti sia la massima, perché la rete irrigua, più che ad una successione di canali, si può immaginare come una successione di invasi: le deboli pendenze, i rigurgiti e le conseguenti correnti lente, fanno sì che le portate nei canali dipendano non solo dalle perturbazioni di monte, ma anche da quelle di valle.

Le portate massime che si sono perciò imposte in alcuni punti della rete, pari alle massime misurate storicamente in tali sezioni, sono da considerare come un ordine di grandezza della capacità del canale in quel punto, e devono essere valutate con maggiore precisione attraverso un modello idraulico della rete.

Nella Tabella 3.6 sono riportati, per gli archi della rete su cui si sono imposte, le portate massime e minime.

¹¹ A rigore in canali artificiali non è corretto parlare di portate di minimo deflusso vitale, ma anche nei canali di irrigazione esiste una biocenosi da tutelare, quindi le portate minime nei canali assumono anche la funzione di tutelare la vita acquatica e si possono accomunare, per funzione anche se non per legislazione, ai minimi deflussi vitali.

Tabella 3.6. Portate massime e minime negli archi della rete.

Variabili decisionali: vincoli portate minime e massime (m³/s)

Nodo	Simbolo	Canale	Significato	Minimo	Massimo
1	d1	Vacchelli	Scaricatore Serio	0	10
1	Q1	Vacchelli	Crema	0	
2	d2	Vacchelli	Impinguamento N.Civico a Salvirola	0	11
2	Q2	Vacchelli	Salvirola	0	
3	d3	Grande	Scaricatore Genivolta	0	10
3	Q3	Grande	Genivolta valle scaricatore	0	
4	d4	Grande	Genivolta valle impinguamento Vacchelli	0	
4	Q4	Vacchelli	Genivolta monte N.Civico	0	
5	d5	Vacchelli	Genivolta impinguamento N.Civico	0	5,6
5	Q5	Vacchelli	Fine (compreso scaricatore Carione)	0,3	3
6	d6	Ciria Nuova	Impinguamento Ciria Nuova	0,3	
6	Q6	Grande	Valle impinguamento Ciria Nuova	0	
7	d7	Canobbia Vecchia	Impinguamento Canobbia Vecchia	0,3	
7	Q7	Ciria Vecchia	Valle derivaz Canobbia Vecchia	0,3	
8	d8	Ciria Vecchia	Scaricatore Grumone	0	11
8	Q8	Resto della rete	Portata residua rete basso cremonese	2,5	
9	d9	Ciria Nuova	Impinguamento Canobbia Nuova - Confluenza Ciria Vecchia	0,3	9
9	Q9	Canobbia Nuova	Canobbia Nuova	0,3	
10	d10	Grande	Tornacanal Grande-Ciria Nuova (Mirabello)	0	
10	Q10	Grande	Valle tornacanal di Mirabello	0,3	5,5

3.3.3 Erogazioni

Gli utenti irrigui ricevono le erogazioni dai canali della rete attraverso le bocche, munite di paratoie, che sui canali che si è deciso di modellizzare sono quasi 300. Si è deciso perciò di pensare queste erogazioni per comodità come concentrate appena a monte dei nodi di decisione e di congiunzione del sistema. Nella Tabella 3.7 sono riportati i simboli con cui si sono indicate le erogazioni, il significato e i tratti di canali a cui si riferiscono. La stagione irrigua nominale parte il 25 aprile e termina il 25 settembre, tuttavia quella effettiva è ridotta all'incirca al periodo dal 1° giugno al 20 agosto a causa dell'evoluzione dell'agricoltura, che concentra in questo tempo la domanda di irrigazione.

Tabella 3.7. Progressive chilometriche delle sezioni tra cui si valutano le erogazioni medie stagionali.

Parametri:erogazioni

Simbolo	Canale	Significato	Progressiva	
			Dal km	al km
E0	Vacchelli	Merlino-Crema	0	19,9
E1	Vacchelli	Crema-Salvirola	19,9	27,4
E2	Vacchelli	Salvirola-Genivolta (compresi Geronda e 1° diramatore)	27,4	34,1
E14	Vacchelli	Valle Genivolta	34,1	34,4
E3	Grande	Derivazioni Oglio-Genivolta	0	21,4
E4	Grande	Genivolta-Rezza	21,4	24,77
E5	Grande	Rezza-monte impinguamento Ciria Nuova	24,77	29,7
E6	Grande	Impinguamento Ciria Nuova-Mirabello	29,7	29,97
E10	Grande	Mirabello-Impinguamento Canobbia Vecchia	29,97	34,5
E7	Ciria Nuova	Inizio-Campagnola	0	8,5
E9	Ciria Nuova	Campagnola-Impinguamento Canobbia Vecchia	8,5	10,5
E13	Ciria Nuova	Impinguamento Canobbia Vecchia-confluenza Ciria Vecchia	10,5	11,34
E11	Canobbia Vecchia	Tutte	0	4,8
E12	Ciria Vecchia	Inizio-monte confluenza Ciria Nuova	0	4,285
E8	Ciria Vecchia	Confluenza Ciria Nuova-Brazzuoli	4,285	8,065
E15	Resto della rete	Brazzuoli-Resto della rete	8,065	n. a.

Nella rete sono presenti due diverse tipologie di consegna della dispensa: consegna continua, e consegna ad orario. Per poter tenere conto non solo degli utenti a consegna continua ma anche di quelli con consegna ad orario, si è deciso di assegnare un valore medio di portata erogata, calcolato a partire da uno studio effettuato per valutare l'efficienza dell'organizzazione della consegna ad orario [2]. I dati di partenza sono le portate calcolate, per ogni ora della stagione irrigua, in alcune sezioni della rete. Il risultato è la portata media erogata tra due sezioni successive di un canale, durante la stagione irrigua, mostrato in Tabella 3.8.

Tabella 3.8. Valori delle erogazioni medie stagionali presenti nel modello della rete.

Parametri: erogazioni (m³/s)

Simbolo	Canale	Significato	Stagione irrigua	Resto dell'anno
			(1 giu-20 ago)	(21 ago- 31 mag)
E0	Vacchelli	Merlino-Crema	0,49	0,0
E1	Vacchelli	Crema-Salvirola	2,83	0,0
E2	Vacchelli	Salvirola-Genivolta (compresi Geronda e 1° diramatore)	9,67	0,3 ¹
E14	Vacchelli	Valle Genivolta	2,31	0,0
E3	Grande	Derivazioni Oglio-Genivolta	6,99	0,0
E4	Grande	Genivolta-Rezza	0,52	0,0
E5	Grande	Rezza-monte impinguamento Ciria Nuova	0,76	0,0
E6	Grande	Impinguamento Ciria Nuova-Mirabello	0,10	0,0
E10	Grande	Mirabello-Impinguamento Canobbia Vecchia	1,62	0,0
E7	Ciria Nuova	Inizio-Campagnola	1,53	0,0
E9	Ciria Nuova	Campagnola-Impinguamento Canobbia Vecchia	0,36	0,0
E13	Ciria Nuova	Impinguamento Canobbia Vecchia-confluenza Ciria Vecchia	0,00	0,0
E11	Canobbia Vecchia	Tutte	0,20	0,0
E12	Ciria Vecchia	Inizio-monte confluenza Ciria Nuova	0,29	0,0
E8	Ciria Vecchia	Confluenza Ciria Nuova-Brazzuoli	2,78	0,0
E15	Resto della rete	Brazzuoli-Resto della rete	10,35	0,0
d2	Vacchelli	Impinguamento Civico a Salvirola	8,00	n.a. ²

Note:

1: Nel tratto tra Salvirola e Genivolta il Vacchelli impingua il Cavo Geronda, sul quale si impone una portata minima per tutto l'anno

2: Al di fuori della stagione irrigua si può utilizzare la derivazione di Salvirola per alimentare l'impianto di Genivolta (variabile di decisione del problema)

Si descrive il procedimento adottato tra la generica sezione i di un canale e la successiva sezione j . La differenza $Q_i(t) - Q_j(t)$, se le sezioni non sono troppo lontane¹², rappresenta il volume erogato nell'ora t -esima tra la sezione al km i (sezione i) e la sezione al km j (sezione j). Sommando tali differenze per tutte le ore della stagione irrigua, si ottiene il volume totale erogato tra le due sezioni nelle 8 decadi della stagione, e si può quindi valutare la portata media dividendo il volume per la durata della stagione irrigua, con le opportune conversioni delle unità di misura. Formalmente, la portata media stagionale E_{ij} , erogata tra la sezione i e la sezione j , vale:

$$E_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{1920} Q_i(t) - Q_j(t)}{8 \cdot 10 \cdot 24 \cdot 3600} \cdot 3600$$

¹² Ovvero se la distanza impiegata dall'acqua per arrivare dalla sezione i alla sezione j è inferiore all'ora.

Per valutare le erogazioni stagionali medie nei tratti di canale minori di quelli tra due sezioni di misura, si è effettuata una approssimazione lineare. Se si vuole valutare l'erogazione E_{ik} nel tratto i-k e E_{kj} nel successivo tratto k-j, dove k è una sezione a valle della sezione i e a monte della sezione j, valgono le seguenti relazioni:

$$E_{ij} = E_{ik} + E_{kj}$$

$$E_{ik} \cdot d_{ik} = E_{kj} \cdot d_{kj}$$

dove d_{ik} è la distanza, lungo il canale, tra la sezione i e la sezione k, e analogamente d_{kj} è la distanza lungo il canale tra la sezione k e la sezione j.

3.3.4 Impianti idroelettrici

Gli impianti idroelettrici sono posizionati lungo i canali in sezioni note (vedi Tabella 3.4) sono stati caratterizzati dalle seguenti grandezze:

- minima portata turbinabile, posta per tutti pari a zero;
- massima portata turbinabile. Per gli impianti di Rezza, Mirabello e Campagnola, è pari alla capacità dei canali su cui sono posti, per gli impianti di Crema e Grumone è pari alla capacità degli scaricatori e per l'impianto di Genivolta è pari alla somma delle massime portate derivabili rispettivamente a Salvirola (11 m³/s), allo scaricatore del Grande a Genivolta (10 m³/s) e allo scaricatore Carione del Vacchelli (3 m³/s).
- rendimento percentuale dell'impianto, posto pari a quello medio dell'impianto di Genivolta, che lavora con salti e portate dello stesso ordine di grandezza di quelle che ci aspettiamo agli impianti virtuali, e con tecnologie avanzate. Tali valori necessitano di una migliore approssimazione in una fase successiva del lavoro, per valutarne la dipendenza dalla portata transitante;
- salto motore medio, valutato secondo i dati forniti dal Consorzio. Tali valori necessitano di una migliore approssimazione in una fase successiva del lavoro, in cui si tenga conto della variazione del salto in funzione della portata transitante.

Nella Tabella 3.9 sono riportati i valori dei parametri relativi agli impianti idroelettrici.

Tabella 3.9. Parametri relativi agli impianti idroelettrici.

Parametri: caratteristiche impianti			
Impianto	Salto	Rendimento	Portata massima turbinabile
Crema	4	0,86	10
Rezza	2,5	0,86	19
Mirabello	3	0,86	11
Campagnola	2	0,86	11
Grumone	4	0,86	11
Genivolta	7,16	0,86	24

3.3.5 Convenzione di Genivolta

La convenzione tra il Consorzio e la società che gestisce l'impianto di Genivolta si basa sulla definizione di due parametri: la portata media da garantire e l'intervallo in cui è necessario garantire tale portata.

L'interpretazione più stringente è di vincolare la portata turbinata a Genivolta a $20 \text{ m}^3/\text{s}$ medi in 10 mesi, ovvero 30 decadi. Dal momento che durante la stagione irrigua l'impianto di Genivolta non è attivo, questo significa che per 8 decadi la portata turbinata è nulla: ovvero nelle 30 decadi su cui si calcola la portata media, ce ne saranno 2 in cui la portata è pari a zero.

La seconda interpretazione, meno stringente, prevede di garantire $20 \text{ m}^3/\text{s}$ medi al di fuori della stagione irrigua, ovvero per 28 decadi.

3.4 Soluzione operativa

Si è impostato il problema di ottimizzazione su un software che effettua la programmazione lineare [1], si è avviato il calcolo e si è poi effettuata la simulazione delle portate nella rete, per valutare in particolare quelle transitanti nelle 5 sezioni di interesse (curve di durata).

3.4.1 Il software ampl

Il software ampl è il motore di ottimizzazione che è stato utilizzato. Esso prende in input il modello di ottimizzazione (le variabili, l'obiettivo e i vincoli) e separatamente i parametri del modello, facilitando le operazioni di esplorazione delle soluzioni che si possono effettuare modificando i parametri. Effettua l'operazione di ottimizzazione con l'algoritmo del simplesso e fornisce in output i valori dell'obiettivo e delle variabili del problema in tutte le decadi dell'anno.

3.4.2 Il simulatore excel

Una volta ottenuti i flussi nella rete per i 7 scenari corrispondenti alle decadi caratteristiche, si è costruito un modello di simulazione su excel, che a partire dalle variabili di decisione ottime valutate con ampl, ricostruisce i flussi in tutta la rete e ne permettesse una più agevole lettura.

Il simulatore ha un valore intrinseco, indipendentemente dall'ottimizzazione, in quanto permette di valutare, attraverso un meccanismo di "try&error", come si modificano i flussi nella rete e di quanto diminuisce l'obiettivo al variare delle decisioni prese nei nodi.

3.5 Riferimenti bibliografici

[1] G.B. Danzig, Linear programming and extensions, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1963.

[2] F.Michielotto, Analisi della distribuzione temporale e spaziale della dispensa a orario del Consorzio Irrigazioni Cremonesi, 2002

Capitolo 4 Interpretazione dei risultati

4.1 Portate circolanti nella rete

I risultati ottenuti con il modello di ottimizzazione attraverso la simulazione con excel sono schematizzati nella Tabella 4.1.

Tabella 4.1. Output fornito dal simulatore excel.

Modello di simulazione dei flussi idrici nella Rete Irrigua Cremonese

Aste comprese: Vacchelli, Grande, Ciria Vecchia, Ciria Nuova, Canobbia Vecchia, Canobbia Nuova

legenda

	ingressi nella rete
	variabili decisionali
	Perdite ed erogazioni
	Portate agli impianti
	Portate residuali

Portate residuali		SCENARI							
		Stagione	Invernale	Manut Oglio	Secca Vacchelli	Manut Vacchelli	Magg-sett	Fine agosto	Irrigua
		durata	15	3	1	2	5	1	8
Simbolo	Significato	Asta	0	1	2	3	4	6	7
A	Adda	Vacchelli	30,000	30,000	0,000	15,000	30,000	30,000	38,500
B	Bonifica Mosi	Vacchelli	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576	0,576
O1	Calciana+Grande	Grande	6,000	0,000	6,000	6,000	7,680	10,243	10,243
O2	Fontanili+acque nuove	Grande	4,436	2,900	4,436	4,436	4,436	4,436	4,436
O3	Molinara+Supp	Grande	4,600	0,000	4,600	4,600	4,600	4,600	4,600
Q1	Vacchelli a Crema	Vacchelli	25,367	30,576	0,576	15,576	26,084	23,521	38,582
d1	Scarico Vacchelli nel Serio	Vacchelli	5,209	0,000	0,000	0,000	4,492	7,055	0,000
T1	Portata a Crema	Vacchelli	5,209	0,000	0,000	0,000	4,492	7,055	0,000
E0	Erogazioni Merlino-Crema	Vacchelli	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,494
E1	Erogazioni Crema-Salvirola	Vacchelli	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,825
Q2	Vacchelli a Salvirola	Vacchelli	14,367	19,576	0,576	15,576	15,084	12,521	24,757
d2	Impinguamento Civico a Salvirola	Vacchelli	11,000	11,000	0,000	0,000	11,000	11,000	11,000
E2	Erogazioni Salvirola-Genivolta (compr Geronda)	Vacchelli	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	9,670
E3	Erogazioni Oglio-Genivolta	Grande	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	6,990
Q3	Grande a Genivolta dopo lo scarico	Grande	5,036	0,000	15,036	5,036	6,716	9,279	12,289
d3	Scarico Grande a Genivolta	Grande	10,000	2,900	0,000	10,000	10,000	10,000	0,000
Q4	Vacchelli a Genivolta monte Civico	Vacchelli	0,603	0,776	0,300	1,812	3,000	3,000	7,855
d4	Grande a Genivolta dopo impinguamento Vacchelli	Grande	18,500	18,500	15,012	18,500	18,500	18,500	19,521
d5	Impinguamento Civico a Genivolta valle	Vacchelli	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,544
Q5	Fine Vacchelli (compreso Carione)	Vacchelli	0,603	0,776	0,300	1,812	3,000	3,000	2,311
E14	Erogazioni Fine Vacchelli	Vacchelli	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,311
E4	Erogazioni Genivolta-Rezza (compr.TC1 diramatore)	Grande	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,521
T2	Portata alla Rezza	Grande	18,500	18,500	15,012	18,500	18,500	18,500	19,000
E5	Erogazioni Rezza-monte derivaz.Ciria Nuova	Grande	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,763
d6	Impinguamento Ciria Nuova dal Grande	Ciria Nuova	7,500	7,500	4,012	7,500	7,500	7,500	7,140
Q6	Grande valle impinguamento Ciria Nuova	Grande	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,097
T3	Portata a Mirabello	Grande	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000
d10	Tornacale Grande-Ciria Nuova (Mirabello)	Grande	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	5,385
E6	Erogazioni Grande Ciria Nuova-Mirabello	Grande	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,097
E7	Erogazioni Ciria Nuova-Campagnola	Ciria Nuova	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,525
T4	Portata a Campagnola	Ciria Nuova	11,000	11,000	7,512	11,000	11,000	11,000	11,000
Q9	Canobbia Nuova	Canobbia Nuova	5,000	5,000	1,512	5,000	5,000	5,000	2,780
d9	Ciria Nuova-Grande	Ciria Nuova	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	8,220
E9	Erogazioni Ciria Nuova Campagnola-Canobbia Vecchia	Ciria Nuova	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,359
E10	Erogazioni Grande Mirabello-Canobbia Vecchia	Grande	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,624
d7	Impinguamento Canobbia Vecchia dal Grande	Canobbia Vecchia	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Q7	Ciria Vecchia dopo derivaz Canobbia Vecchia	Ciria Vecchia	7,200	7,200	7,200	7,200	7,200	7,200	3,691
E11	Erogazioni Canobbia Vecchia	Canobbia Vecchia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,200
E12	Erogazioni Ciria Vecchia-Ciria Nuova	Ciria Vecchia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,288
E13	Erogazioni Ciria Nuova Canobbia Vecchia-Ciria Vecchia	Ciria Nuova	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
E8	Erogazioni Ciria Vecchia Ciria Nuova-Brazzuoli	Ciria Vecchia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2,780
d8	Scarico Ciria Vecchia a Grumone	Ciria Vecchia	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	0,000
Q8	Portata residua rete basso cremonese	Resto della rete	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	2,500	11,364
T5	Portata a Grumone	Ciria Vecchia	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	11,000	0,000
T6	Contributo CILIC a Genivolta	Vacchelli	21,603	14,676	0,300	11,812	24,000	24,000	0,000
Q10	Ciria Vecchia dopo il tornacale di Mirabello	Ciria Vecchia	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	7,500	5,615
E15	Erogazioni Resto della rete	Canali valle	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	10,350

4.2 Portate turbinate ed energia prodotta

4.2.1 La stagione irrigua

La stagione irrigua si presenta con flussi simili a quelli che sono registrati tradizionalmente nella rete, come era prevedibile per come è stato costruito il modello. In particolare ci soffermiamo sulle portate transitanti nelle sezioni di interesse, riportate nella Figura 4.1. Si nota che gli impianti agli scaricatori non sono attivi, mentre degli impianti storici quello con portate più alte è la Rezza (18,50 m³/s) mentre Mirabello e Campagnola si posizionano sugli 11 m³/s, valore che corrisponde per entrambi alla massima portata turbinabile.

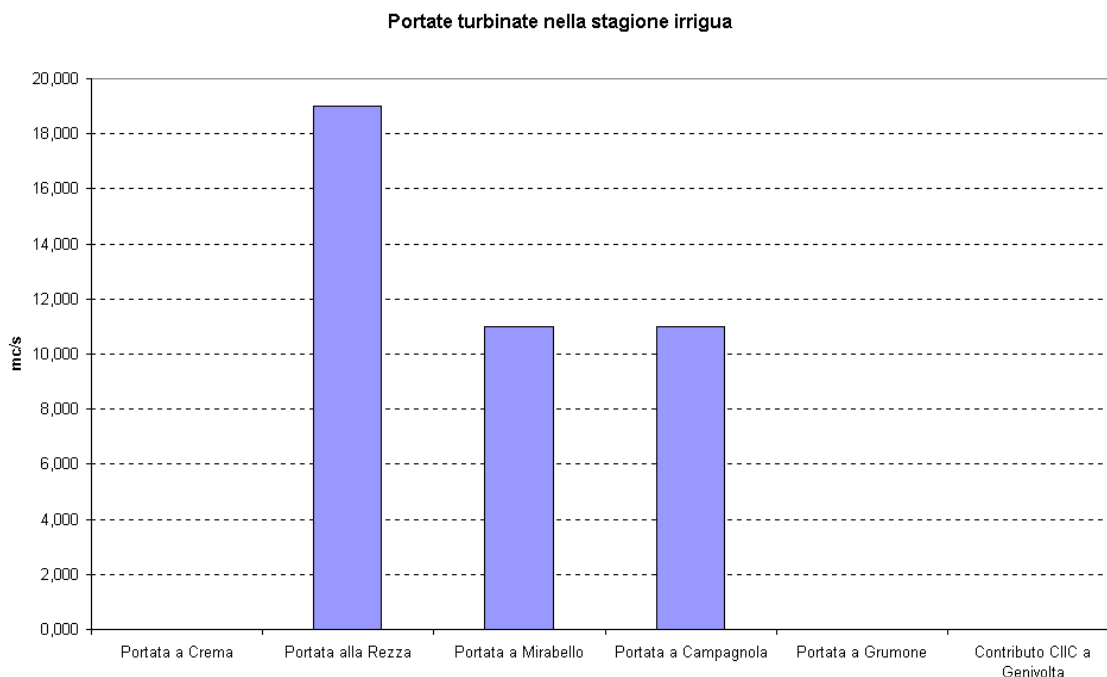


Figura 4.1. Portate turbinate dai 6 impianti durante la stagione irrigua.

4.2.2 La stagione invernale

La stagione invernale prevede tradizionalmente portate pressoché nulle nelle sezioni di interesse, a parte sugli scaricatori, dove sono previste portate non nulle durante gli eventi di pioggia. Nella Figura 4.2 sono riportate le portate turbinate durante la stagione invernale, la più lunga dell'anno (15 decadi) e quella che influenza perciò maggiormente la portata di dimensionamento degli impianti. Si noti che tutti e 6 gli impianti risultano attivi. Gli impianti di Mirabello e Campagnola continuano a posizionarsi sulla massima portata turbinabile e alla Rezza si mantengono i 18,5 m³/s.

L'impianto di Grumone si posiziona pure alla massima portata (11 m³/s), mentre quello di Crema, avendo una posizione residuale, turbinata le acque che non sono state usate per soddisfare il vincolo di Genivolta e che non sono state veicolate sugli altri 4 impianti a valle del nodo 4. La portata che turbinata è poco al di sopra dei 5 m³/s. Si noti che, se fosse possibile effettuare la manutenzione dei canali senza ridurne le portate, i valori di riferimento della stagione invernale si riferirebbero praticamente a tutto l'anno escluse le 8 decadi estive, con inoltre una maggiore disponibilità idrica nei mesi di maggio e settembre per le maggiori portate di concessione sui derivatori dal fiume Oglio.

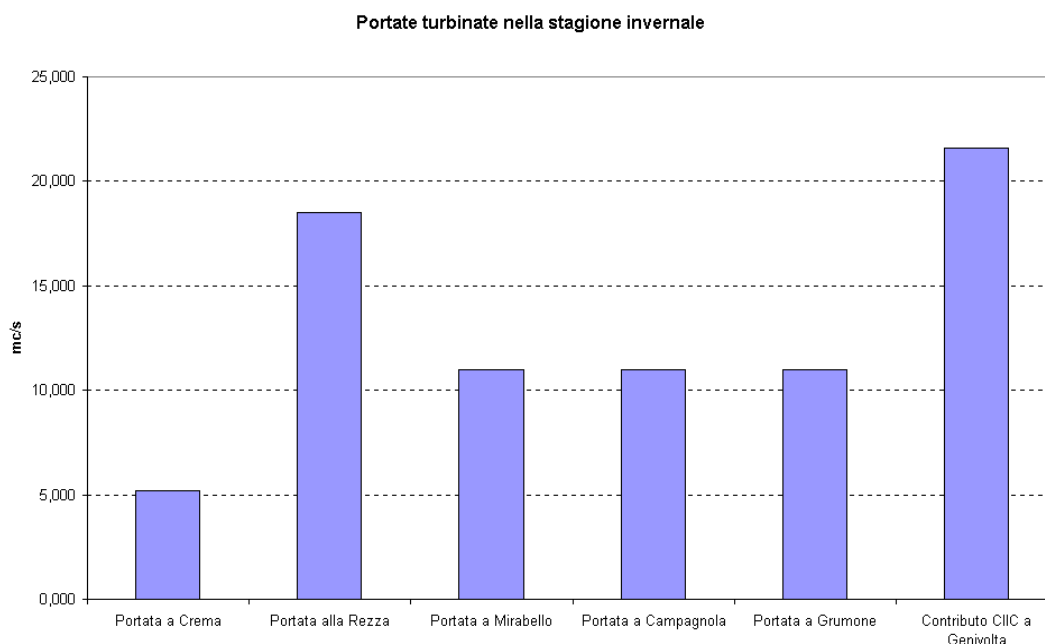


Figura 4.2. Portate turbinate nei 6 impianti della rete durante la stagione invernale.

4.2.3 Gli scenari di manutenzione dei canali

Le fasi di manutenzione dei canali rappresentano 6 delle 36 decadi dell'anno (tre per la manutenzione dei canali derivatori dal fiume Oglio, due per la manutenzione e una per la secca del Vacchelli), e presentano l'andamento riportato in Figura 4.3. Si nota come Mirabello e Grumone non risentano della manutenzione, proprio perché i due rami adduttori della rete vengono posti in asciutta in due momenti diversi. Ancora l'impianto di Crema risulta non attivo, mentre il contributo a Genivolta risente molto della secca del Vacchelli, a vantaggio degli impianti di valle.

Sia la Rezza che la Campagnola risentono pure della secca, con una riduzione di portata di circa 3 m³/s.

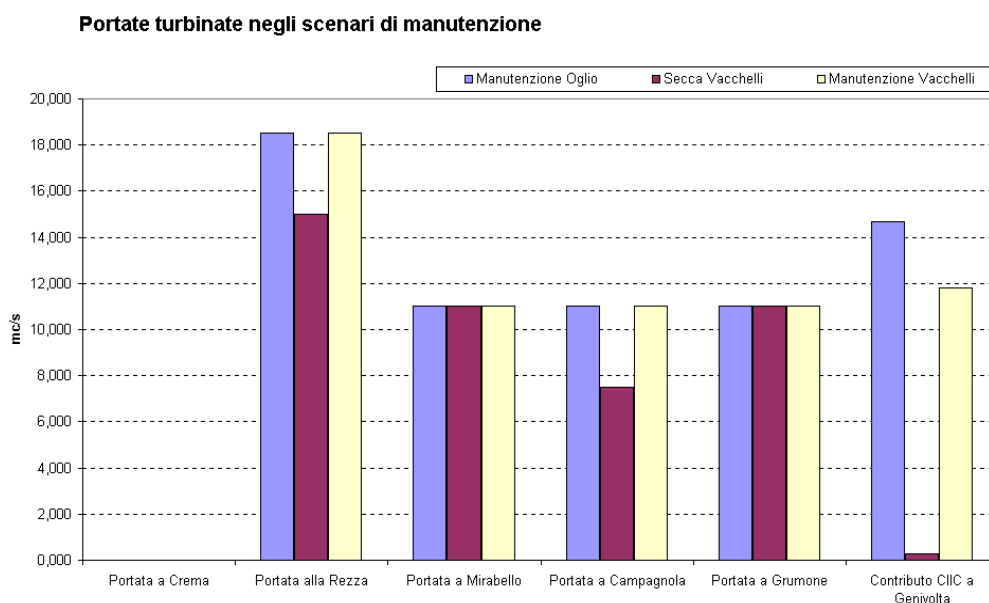


Figura 4.3. Portate turbinate nei 6 impianti della rete durante le fasi di manutenzione dei canali.

4.2.4 Le curve di durata degli impianti

Le informazioni ottenute con il modello di ottimizzazione e di simulazione permettono di costruire le curve di durata per i 5 impianti nelle sezioni di interesse, che rappresentano le portate turbinate poste in ordine decrescente, dalla massima alla minima.

Questa informazione è il punto di partenza per effettuare il dimensionamento degli impianti, per conoscere cioè la potenza da installare e l'energia annua producibile. Una caratteristica fondamentale delle portate convogliate ad un impianto idroelettrico è la stabilità, ovvero la costanza nel tempo: impianti a cui sono convogliate portate molto variabili nel tempo [1] sprecano l'energia idraulica senza riuscire a convertirla in elettrica poiché sono dimensionati sulla portata più frequente. Altra caratteristica desiderabile in una curva di durata è che la portata più frequente sia anche la portata massima, infatti questo permette di dimensionare l'impianto in modo che converta al massimo rendimento le portate massime.

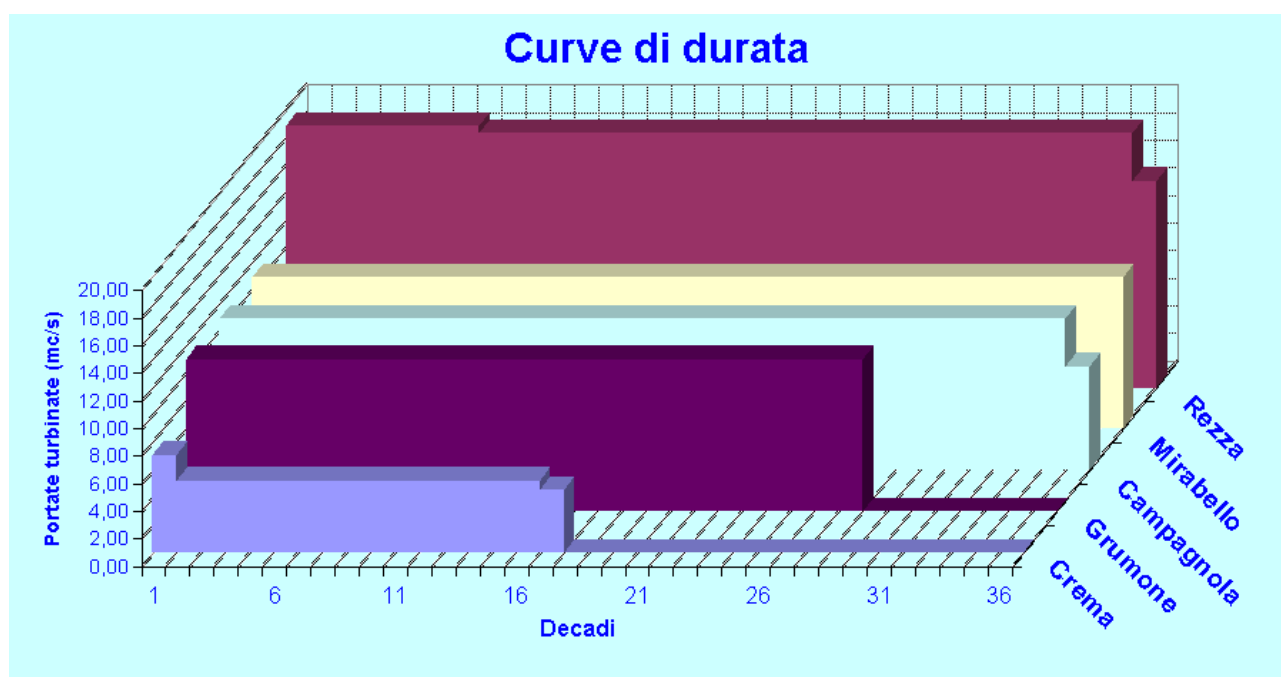


Figura 4.4. Curve di durata dei 5 impianti della rete irrigua cremonese.

Nella Figura 4.4 sono mostrate le curve di durata ottenute a partire dai risultati del modello.

Questo risultato è molto confortante, perché non solo le curve presentano una pendenza molto bassa – al limite nulla per Mirabello e Campagnola – ma anche perché nella maggior parte dei casi la portata più frequente è anche la portata massima.

Nella Tabella 4.2 sono riportate i valori numerici delle curve di durata da cui si sono ricavati i grafici della Figura 4.4.

Tabella 4.2. Curve di durata dei 5 impianti della rete irrigua cremonese e in grassetto evidenziate le portate di dimensionamento.

Impianto	Turbinata [m ³ /s]	Frequenza [decadi]
Rezza	19,00	8
	18,50	27
	15,01	1
Mirabello	11,00	36
Campagnola	11,00	35
	7,51	1
Grumone	11,00	28
	0,00	8
Crema	7,06	1
	5,21	15
	4,49	6
	0,00	14

Durante l'anno gli impianti idroelettrici necessitano di una ferma di un mese per le esigenze di manutenzione ordinaria, che dovremo includere nel calcolo delle curve di durata effettive, scegliendo per la manutenzione le 3 decadi in cui le portate sono minime. Si noti che questo non modifica la potenza da installare ma l'energia producibile annualmente.

Nella Figura 4.5 si riportano le curve di durata ricalcolate tenendo conto delle esigenze di manutenzione. Queste sono il punto di partenza per il calcolo della portata più frequente, della conseguente potenza installata (uguali a quelle ottenibili dalle curve senza manutenzione) e dell'energia annua.

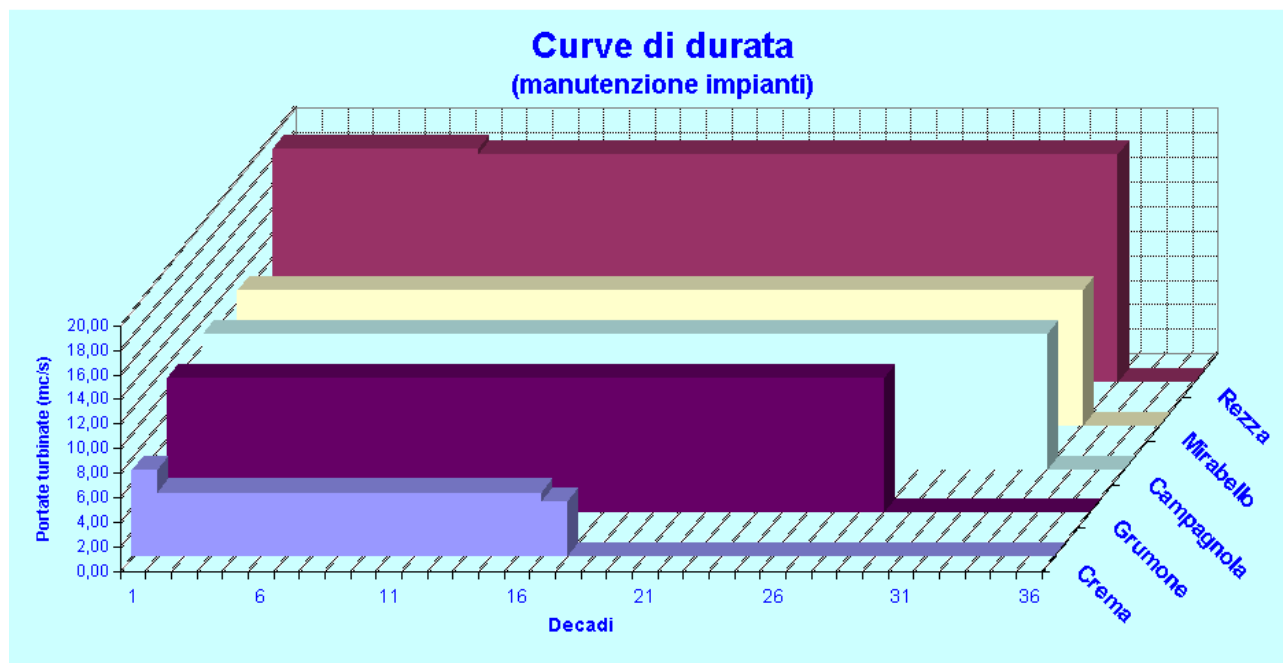


Figura 4.5. Curve di durata dei 5 impianti della rete irrigua cremonese tenendo conto della manutenzione annuale degli impianti.

4.3 Potenza installata ed energia prodotta

A partire dalle informazioni della Tabella 4.2 si ottiene la portata di dimensionamento di ciascun impianto. Indicando con Q la generica portata di dimensionamento di un impianto, la potenza P installata in kW si calcola con la relazione:

$$P = 9,81 \cdot \eta \cdot h \cdot Q$$

dove:

η = rendimento dell'impianto alla portata Q

h = salto motore alla portata Q [metri]

9,81 = peso specifico dell'acqua [kN/m³]

L'energia producibile annualmente si esprime graficamente come l'area sotto l'intersezione tra la curva di durata e una retta orizzontale con intercetta pari alla portata di dimensionamento, come mostrato in Figura 4.6.

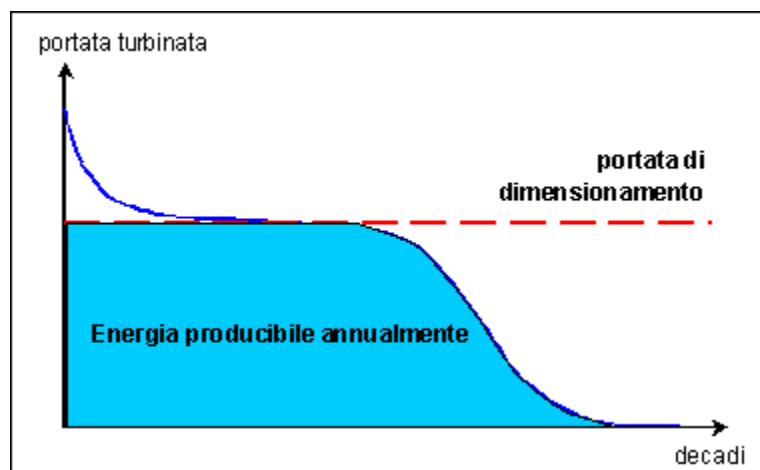


Figura 4.6. Schema di calcolo dell'energia annua producibile.

Immaginando le curve di durata come una successione di n rettangoli aventi come altezza la portata turbinata e come base la durata di tale portata, formalmente la relazione utilizzata per il calcolo dell'area è la seguente:

$$E = \sum_{i=1}^n 9,81 \cdot \eta \cdot h \cdot Q_i \cdot t_i$$

dove:

E = energia annua producibile [kWh/anno]

η = rendimento dell'impianto alla portata Q

h = salto motore alla portata Q [metri]

9,81 = peso specifico dell'acqua [kN/m³]

Q_i = portata turbinata nell'intervallo i -esimo della curva di durata [m³/s]

t_i = durata della portata Q_i [s]

Di seguito si riportano i prospetti da cui si è ottenuta la potenza installata e l'energia prodotta per i 5 impianti della rete.

Crema					
Portata	Salto	Rendimento	Potenza	Durata	Energia
[mc/s]	[m]	[-]	[kW]	[decadi]	[kWh]
5,21	4	0,86	175,8	1	42.187
5,21	4	0,86	175,8	15	632.802
4,49	4	0,86	151,6	6	218.288
0,00	4	0,86	-	14	-
Totali			175,8		893.276

Rezza					
Portata	Salto	Rendimento	Potenza	Durata	Energia
[mc/s]	[m]	[-]	[KW]	[decadi]	[KWh]
18,50	2,5	0,86	390,2	33	3.090.327
0,00	2,5	0,86	-	3	-
Totali			390,2		3.090.327

Mirabello					
Portata	Salto	Rendimento	Potenza	Durata	Energia
[mc/s]	[m]	[-]	[KW]	[decadi]	[KWh]
11,00	3	0,86	278,4	33	2.205.033
0,00	3	0,86	-	3	-
Totali			278,2		2.205.000

Campagnola					
Portata	Salto	Rendimento	Potenza	Durata	Energia
[mc/s]	[m]	[-]	[KW]	[decadi]	[KWh]
11,00	2	0,86	185,6	33	1.469.993
0,00	2	0,86	-	3	-
Totali			185,5		1.469.993

Grumone					
Portata	Salto	Rendimento	Potenza	Durata	Energia
[mc/s]	[m]	[-]	[KW]	[decadi]	[KWh]
11,00	4	0,86	371,2	26	2.316.353
0,00	4	0,86	-	10	-
Totali			371,0		2.316.353

Infine si riporta la sintesi delle potenze e delle energie e il confronto con le dimensioni dell'impianto di Genivolta (Tabella 4.1 e Figura 4.7). Si noti che i nuovi impianti coprono più della potenza e dell'energia dell'impianto esistente, ciò significa che la loro realizzazione raddoppierebbe la produzione di energia nella rete.

Tabella 4.3. Sintesi delle potenze e delle energie degli impianti della rete irrigua cremonese.

	Impianto	Potenza da installare kW	Energia annua kWh
	Rezza	390	3.090.327
	Grumone	371	2.316.353
	Mirabello	278	2.205.000
	Campagnola	185	1.469.992
	Crema	176	893.276
	Totale nuovi impianti	1.400	9.974.948
	Genivolta	927	6.520.000
	Totale impianti rete	2.327	16.494.948

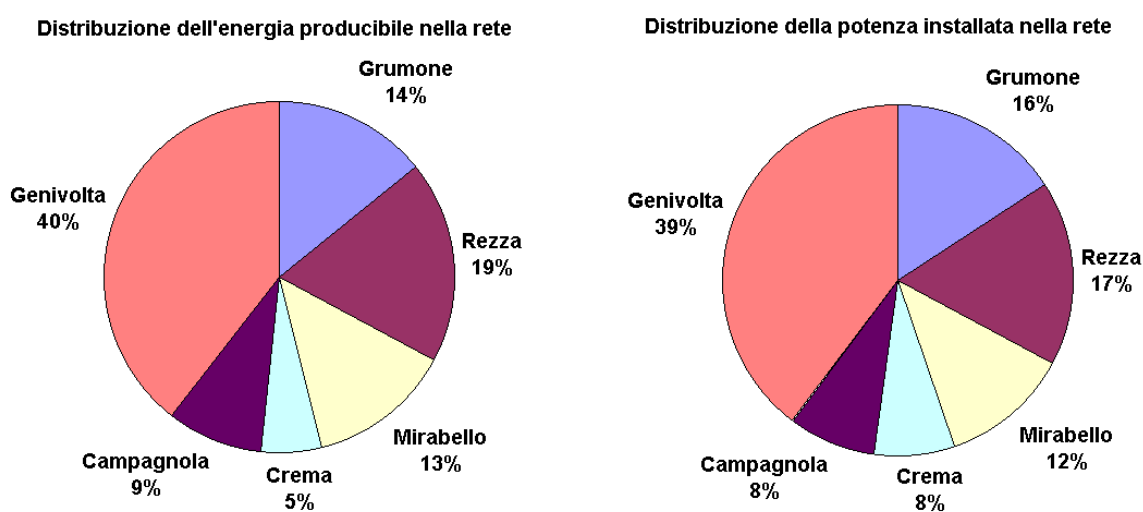


Figura 4.7. Distribuzione della potenza installata e dell'energia producibile annualmente nella rete.

4.4 Un caso particolare: progetto di riattivazione dei tre impianti storici

Si è voluto applicare il modello anche ad una particolare configurazione degli impianti: quella in cui siano attivi soltanto gli impianti storici di Rezza, Mirabello e Campagnola.

Si riportano nella Figura 4.8 le curve di durata degli impianti. Si noti che non differiscono da quelle di Figura 4.5 relativi ai medesimi impianti, a parte per la portata di 19,00 m³/s mantenuta dalla Rezza per tutto l'anno e non solo per le 8 decadi irrigue.

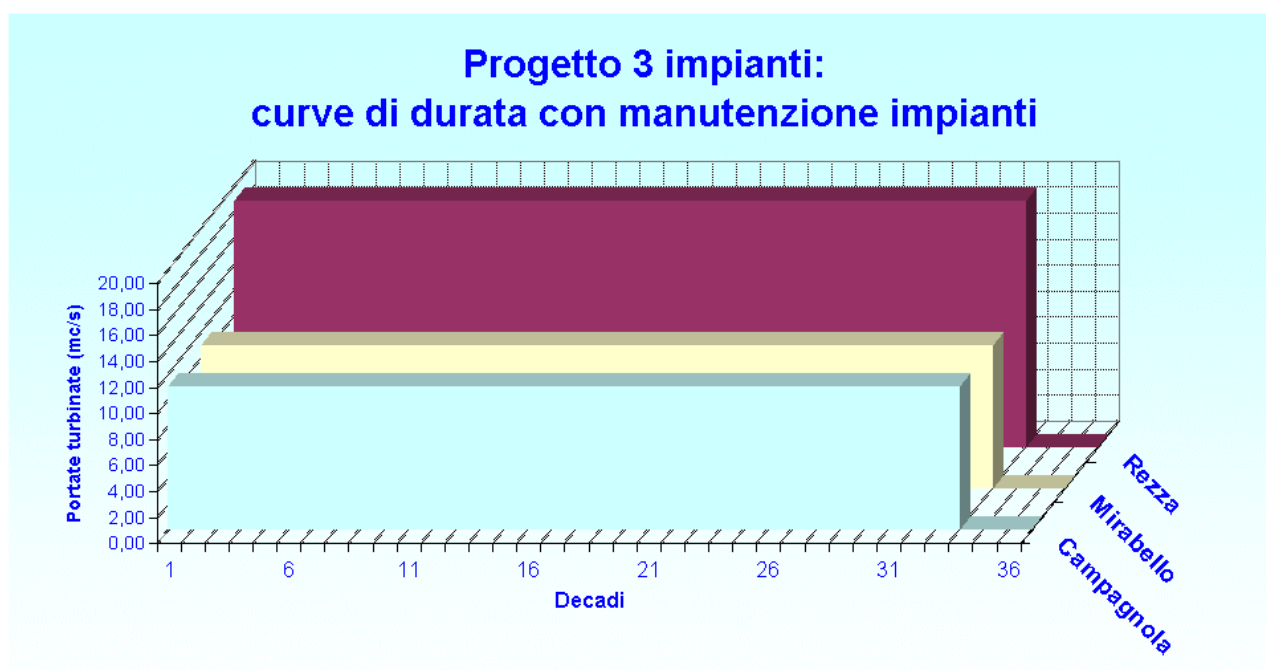


Figura 4.8. Curve di durata dei tre impianti storici della rete cremonese considerando una gestione in cui sono gli unici attivi.

Si riportano infine le potenze installate e le energie annue producibili, da cui si deduce che i tre soli impianti storici sarebbero già in grado quasi di raddoppiare la potenza e l'energia della rete.

Tabella 4.4. Potenza installata ed energia annua nella rete nel caso di attivazione dei soli impianti storici.

	Impianto	Potenza da installare kW	Energia annua kWh
	Campagnola	186	1.469.993
	Mirabello	278	2.204.990
	Rezza	401	3.173.849
	Totale nuovi impianti	865	6.848.832
	Genivolta	927	6.520.000
	Totale impianti rete	1.792	13.368.832

4.5 Riferimenti bibliografici

[1] F. Contessini, Impianti Idroelettrici, Libreria Editrice Politecnica, Milano, 1956.

Capitolo 5 Analisi della componente economica

In questo capitolo si vuole effettuare una verifica della validità delle proposte suggerite dal modello di ottimizzazione energetica i cui risultati sono stati discussi nel Capitolo 4. Lungi dal voler essere una ottimizzazione di tipo finanziario - non è detto che al massimo dell'energia prodotta annualmente corrispondano i migliori parametri di convenienza economica - questa analisi si propone comunque l'obiettivo di effettuare una verifica di convenienza economica di ogni singolo impianto e successivamente di uno studio più completo sulla economicità della realizzazione del progetto completo di realizzazione dei cinque impianti di interesse, attraverso alcune alternative che risultano essere più convenienti dal punto di vista economico.

5.1 Costi di realizzazione e manutenzione

I costi di un impianto idroelettrico, come è intuitivo, sono di due tipologie:

- costi di realizzazione, che si sostengono al momento della realizzazione dell'impianto e che comprendono le seguenti voci:
 - Progettazione, direzione lavori
 - Opere civili (opere di presa, di rilascio e di scarico, edificio centrale)
 - Apparecchiature elettromeccaniche
 - Allacciamento alla rete
 - Imprevisti (15%)
- costi operativi e di manutenzione, che si sostengono per tutta la durata dell'esercizio dell'impianto, e comprendono le seguenti voci:
 - manutenzione ordinaria
 - operazione del personale, che dipendono dal livello di automazione della centrale
 - assicurazione e UTF (Ufficio Tecnico di Finanza)
 - canone di concessione

Valutare i costi degli impianti a tale livello di dettaglio esula dagli obiettivi di questo lavoro, nel seguito si descrivono le metodologie adottate per valutare i costi a livello aggregato degli impianti della rete cremonese.

5.1.1 Costi di investimento e di gestione

I costi di investimento si sono valutati a partire dai risultati dello studio IT Power LTD Stroom Lijn, IEE Kassel (1997), presentato a Hidroenergia '97 e svolto all'interno del progetto Thermie, studio nel quale si è valutato il costo di investimento di un microimpianto a basso salto per unità di potenza installata, al variare del salto motore nominale.

Lo studio è riportato in [1] come una buona linea guida per la valutazione aggregata dei costi di investimento ai fini dell'analisi della convenienza economica per impianti con salti compresi tra 2 m e 5 m e potenze installate da 100 kW a 10.000 kW e fornisce, al variare del salto utile e della

potenza installata negli impianti, il costo di investimento unitario in ECU (= Euro) del kW installato.

Nella Figura 5.1 sono riportati i grafici tratti dalle curve, che in [1] sono fornite anche in forma tabellare (Tabella 5.1).

La parte più interessante ai fini della valutazione dei microimpianti della rete è quella relativa alle potenze installate inferiori ai 500 kW e ai salti compresi tra 2 m e 4 m . Come si può notare il costo unitario si stabilizza soltanto oltre i 5.000 kW, ed è tanto più alto quanto minore è il salto motore, con un netto distacco tra la curva dei 2 metri e quella dei 3 metri. Questo è dovuto alla preponderanza che, al di sotto dei 3 metri, assumono i costi fissi dell'impianto rispetto a quelli dipendenti dalla dimensione.

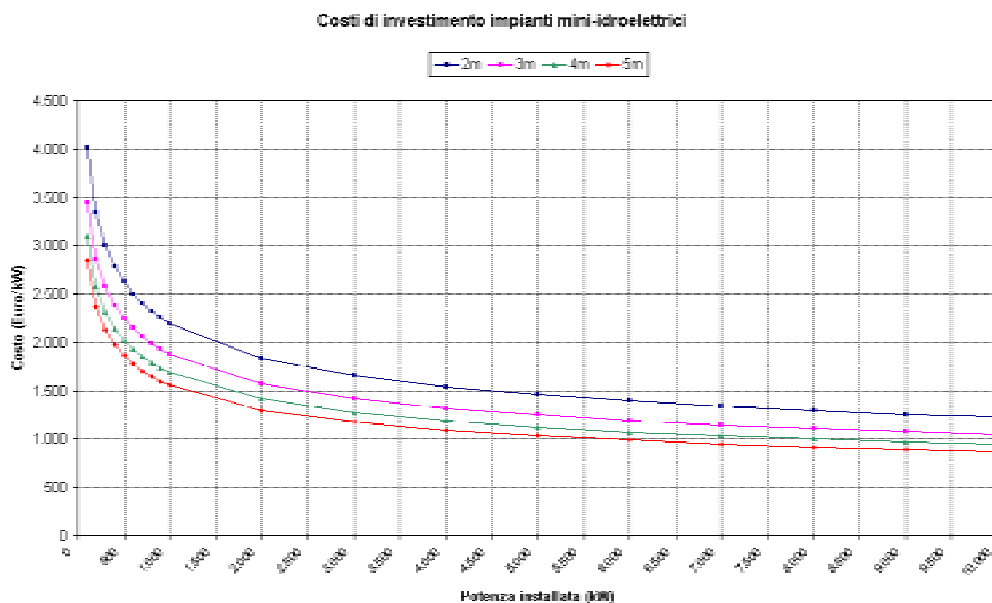


Figura 5.1. Costo di investimento unitario per kW installato [Esha]

Tabella 5.1. Costo di investimento unitario per kW installato [Esha]

Potenza [kW]	Salto motore [m]			
	2	3	4	5
100	4.023	3.447	3.097	2.854
200	3.344	2.865	2.574	2.372
300	3.004	2.574	2.313	2.131
400	2.786	2.386	2.145	1.976
500	2.628	2.251	2.023	1.864
600	2.506	2.147	1.929	1.778
700	2.407	2.063	1.853	1.708
800	2.326	1.992	1.790	1.650
900	2.256	1.933	1.737	1.600
1.000	2.196	1.881	1.690	1.558
2.000	1.839	1.575	1.416	1.304
3.000	1.659	1.422	1.277	1.177
4.000	1.543	1.322	1.188	1.095
5.000	1.460	1.251	1.124	1.036
6.000	1.395	1.195	1.074	990
7.000	1.342	1.150	1.033	952
8.000	1.299	1.113	1.000	921
9.000	1.261	1.081	971	895
10.000	1.229	1.053	946	872

La relazione funzionale che lega i due parametri è di tipo esponenziale:

$$c_{kW}(H, P) = (13,874 - 987,28 \cdot H) \cdot P^{-0,2562}$$

dove:

$c_{kW}(H, P)$ = costo di investimento al kW installato, in dipendenza dal salto H e dalla potenza P [Euro];

H = salto motore [m];

P = potenza installata [kW];

Noti i valori della potenza installata dal dimensionamento degli impianti del Capitolo 4, si ricavano così i costi unitari per impianto e di conseguenza i costi totali di investimento, riportati nella Tabella 5.2.

I costi di gestione si valutano approssimativamente pari al 4% dei costi di investimento, come proposto in [1] e sono riportati anch'essi nella Tabella 5.2.

Tabella 5.2. Costi di investimento unitari e totali e costi di gestione degli impianti della rete cremonese.

	Potenza [kW]	C_{kW} [Euro/kW]	Investimento [MEuro]	Costi gestione [Meuro/anno]
Crema	176	2.666	468,7	18,7
Rezza	390	2.495	973,0	38,9
Campagnola	185	3.148	583,9	23,4
Mirabello	278	2.604	724,5	29,0
Grumone	371	2.202	816,9	32,7
Totale	1.400		3.567,0	142,7
Costo medio		2.547		

Si noti che l'impianto di costo unitario più gravoso è quello di Campagnola, con salto e potenza installata inferiori a tutti gli altri, mentre il meno gravoso risulta Grumone, perché presenta sia il salto sia la potenza alti rispetto agli altri.

L'impianto più costoso risulta quello della Rezza, che ha un costo unitario allineato alla media ma la massima potenza installata, analogamente Crema è il meno costoso, con un costo unitario in media e la minima potenza installata.

5.1.2 Piani finanziari

Per valutare il più possibile fedelmente i flussi di cassa generati dal progetto di attivazione degli impianti, è stato deciso di modulare i costi di investimento, ipotizzando che la parte preponderante del costo di investimento sia coperta da un mutuo.

I parametri standard del piano finanziario sono stati scelti in base ai valori proposti in letteratura:

il costo di investimento si pensa distribuito su 3 anni, finanziato per il 70% da un mutuo di 10 anni al tasso di interesse del 6,5%, e per il 30% da capitale proprio. La distribuzione temporale degli

esborsi è così costituita: l'autofinanziamento è distribuito in tre parti di uguale importo nei tre anni, il terzo anno si attiva il mutuo che quindi prevede la prima rata annuale per il quarto anno. Gli esborsi sono quindi effettivi fino al 13° anno dall'inizio del progetto.

Si sono effettuate valutazioni anche con altri piani di finanziamento, di cui si valutano gli indicatori economici nei Parr.5.4.1-5.4.2-5.4.3.

I piani valutati sono, ceteris paribus:

- mutuo decennale,
- mutuo decennale dilazionato di 2 anni,
- mutuo ventennale,
- mutuo trentennale.

Il calcolo della rata annuale fissa del mutuo si è effettuato con le seguenti relazioni:

- il montante M si calcola con la seguente:

$$M = F \cdot (1 + i^T)$$

dove :

F= investimento da finanziare con il mutuo [Euro]

I= tasso di interesse

T= durata del mutuo [anni]

- la rata R annuale costante è pari a:

$$R = M \cdot \frac{i}{(1 + i^T) - 1}$$

5.2 Nuovo panorama energetico e opportunità di ricavi

Da un impianto idroelettrico si ottengono ricavi negli anni di esercizio, in funzione dell'energia prodotta. Nel caso degli impianti della rete cremonese l'energia producibile annualmente è da considerarsi costanti per tutta la durata dell'esercizio, perché le portate turbinate sono indipendenti dalla pluviometria e gli impianti mantengono a lungo la loro efficienza, se realizzati con le tecnologie attuali.

L'energia prodotta nei primi otto anni dell'esercizio, grazie ai Certificati Verdi, viene remunerata in misura superiore al valore standard.

5.2.1 Il valore economico dell'energia venduta al Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale

Per gli impianti ad acqua fluente con potenza di concessione inferiore ai 3 GW l'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG nel seguito) ha definito in una Delibera [3] il prezzo con cui remunerare l'energia venduta al Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN nel seguito),

in funzione della potenza installata e dell'energia media annua prodotta. Per impianti con potenza superiore ai 3 GW il valore dell'energia venduta è quello di mercato.

Il GRTN ha fissato i prezzi in modo che siano maggiori sia di quelli di mercato della stessa energia prodotta da combustibili fossili, sia del precedente prezzo di cessione a Enel (Vedi Tabella 5.3). Inoltre minore è la potenza installata, maggiore è il prezzo unitario dell'energia.

Soprattutto per questo motivo risultano evidenti alcune affermazioni del Capitolo 2: per un produttore di energia idroelettrica "minore" il nuovo scenario del mercato dell'energia risulta una occasione di ricavi, a prescindere dall'incentivo dei Certificati Verdi.

Nella Tabella 5.4 sono riportati i prezzi con cui il GRTN ritira l'energia prodotta dai microimpianti da acqua fluente e nella Tabella 5.5 sono riportati i prezzi unitari per i cinque impianti della rete cremonesi.

Tabella 5.3. Confronto tra i prezzi di cessione dell'energia a Enel prima del 1999 e al GRTN nel 1999 [4].

	taglia (kW)				
	<220	221-500	501-1000	1001-2000	2001-3000
	Lire/kWh	Lire/kWh	Lire/kWh	Lire/kWh	Lire/kWh
Del.n.162/98 Classe III (vecchio prezzo)	147	123	110	96	89
Del.n. 82/99 (nuovo prezzo)	155	131	117	102	95
Differenza	8	8	7	6	6

Tabella 5.4. Prezzi di cessione dell'energia al GRTN per impianti ad acqua fluente con potenza inferiore ai 3 GW [4]

Produzione energia elettrica su base annua		Anno 2000	
[Mio kWh]		L/kWh	Cent €/kWh
...	1	155	8,01
1	2	119	6,15
2	3	109	5,63
3	4	103	5,32
4	5	98	5,06
5	10	90	4,65
10 ...		82	4,23

Tabella 5.5. Prezzi unitari di cessione dell'energia al GRTN per i cinque impianti della rete cremonese e ricavo medio annuo risultante.

	Energia [kWh]	R_{kWh} [Euro/kWh]	Ricavo medio [Meuro/anno]
Crema	893.276	155	138
Rezza	1.469.992	119	175
Campagnola	2.205.000	109	240
Mirabello	2.316.353	109	252
Grumone	3.090.327	103	318
Totale	9.974.948		1.125
Ricavo medio		113	

Il 18 febbraio 2002 l'AEEG ha pubblicato un tariffario aggiornato in base al tasso di inflazione annuale 2000-2001 pubblicato dall'Istat, pari al 2,7 %. Il nuovo tariffario prevede che i prezzi fissati nel 1999 con la Delibera 82/99 ed entrati in vigore nel 2000 aumentino di un punto percentuale all'anno fino al 2002, con un incremento del 3% al 2002 rispetto a quelli della Tabella 5.5¹³. È stato deciso di mantenere comunque i prezzi della Delibera 82/99 perché a favore di sicurezza, tenendo conto, inoltre, che i costi di investimento proposti dall'ESHA sono riferiti allo stesso periodo.

Ad un livello di approssimazione successivo dell'analisi si consiglia di utilizzare i prezzi attuali, e di valutare il loro incremento medio annuo con un meccanismo simile a quello adottato dall'AEEG.

5.2.2 Il valore economico dei Certificati Verdi

Come anticipato nel Par. 2.3, durante i primi 8 anni di esercizio gli impianti che producono energia da fonti rinnovabili usufruiscono di una forma di incentivo chiamata Certificato Verde, ovvero l'Acquirente Unico ritira l'energia prodotta ai prezzi indicati nel Par. 5.2.1, e questa stessa energia può essere "etichettata" con i Certificati Verdi comprati da un produttore di energia non rinnovabile. Anche il questo caso ci si è riferiti al prezzo fissato dal Gestore del Mercato Elettrico nel 1999 dell'energia venduta e certificata, pari a 220 Lire/kWh, ovvero a 11,36 Eurocent/kWh. Il valore medio di un certificato verde nel 1999 è quindi di 5,78 Eurocent/kWh. Tenendo conto che il prezzo medio di cessione all'Acquirente Unico è di 5,58 Eurocent/kWh, si può affermare che per i primi 8 anni di esercizio l'energia vale il doppio rispetto agli anni successivi.

Anche il valore dei Certificati Verdi viene aggiornato annualmente dal Gestore del Mercato Elettrico.

5.3 Convenienza economica di ripristinare le antiche centrali e di attivare nuovi salti

Per valutare la convenienza economica sia di ogni progetto di realizzazione delle singole centrali, sia del progetto completo di realizzazione di tutte e 5, sono stati utilizzati i consueti indicatori di convenienza economica (valore attuale netto, tasso di rendimento interno, tempo di ritorno dell'investimento e rapporto benefici/costi), che si costruiscono a partire dai flussi di cassa generati durante la vita utile del progetto. Si tratta ora di definire la vita utile del progetto, adottare il piano finanziario, calcolare i flussi di cassa e di conseguenza gli indicatori, da confrontare con valori di soglia. Una volta effettuate queste operazioni per i singoli impianti, è necessario stabilire l'ordine temporale di realizzazione di ciascuno.

5.3.1 Indicatori di convenienza economica e soglie

Di seguito si riportano gli indicatori selezionati per l'analisi di convenienza economica e i valori soglia, stabiliti seguendo la traccia fornita da [1].

Si suppone di :

- calcolare per ogni anno i -esimo di vita utile T del progetto i benefici $B(i)$ e i costi $C(i)$,

¹³ Si noti che il prezzo a cui il GRTN compra l'energia è decisamente fuori mercato, poiché è di gran lunga superiore al prezzo di scambio nel mercato elettrico, in cui non si prescinde dalla fonte energetica da cui si produce.

- fissato un tasso annuo di attualizzazione pari a r .

Si riportano le definizioni degli indicatori adottati:

Il **valore attuale netto** (VAN) rappresenta il valore finanziario del progetto:

$$VAN = \sum_{i=0}^T \frac{B(i) - C(i)}{(1 + r^i)}$$

Il VAN assume valori positivi quando il progetto è finanziariamente conveniente, maggiore è il valore del VAN , maggiore è il valore finanziario che il progetto potenzialmente ha. Il termine potenzialmente è d'obbligo, in quanto il meccanismo di calcolo del VAN riporta al valore presente un denaro speso o ricavato nel futuro secondo un tasso di attualizzazione r costante, mentre questo potrebbe essere diverso da quello ipotizzato e variare nel tempo. Tuttavia il tasso r , a meno che l'economia del paese o del settore sia instabile, non supera il 10%. Accanto al VAN infatti si valuta solitamente il **tasso interno di rendimento** (TIR), ovvero il valore del tasso di attualizzazione r per cui il VAN si azzerava:

$$VAN(TIR) = \sum_{i=0}^T \frac{B(i) - C(i)}{(1 + TIR^i)} = 0$$

TIR elevati sono auspicabili, perché mostrano la robustezza della positività del VAN . Infatti se è vero che il tasso di attualizzazione r assegnato nel calcolo del VAN non è detto sia valido per tutta la vita utile del progetto, tuttavia esso non assume generalmente valori di gran lunga superiori a quello di riferimento nel presente. La soglia scelta è quella del 10 %, perciò TIR uguali o maggiori di tale valore sono da considerarsi indice di convenienza del progetto, e più alto è il valore rispetto alla soglia, maggiore è l'affidabilità del VAN calcolato.

Il **tempo di ritorno dell'investimento** T_R è la misura del numero di anni entro cui la differenza cumulata tra costi e benefici attualizzati si azzerava:

$$\sum_{i=0}^{T_R} \frac{B(i) - C(i)}{(1 + r^i)} = 0$$

Tempi di ritorno T_R piccoli sono indice di sicurezza economica, poiché dall'anno successivo al tempo di ritorno, sebbene ci possano ancora essere esborsi monetari, sono inferiori ai ricavi ottenuti. A seconda dei progetti in esame, si possono accettare diverse soglie di T_R , per esempio la costruzione di un edificio richiede di accettare un tempo di ritorno lungo (superiore ai 10 anni) poiché gli esborsi monetari iniziali sono molto ingenti e l'accumulo dei ricavi avviene a costruzione ultimata, dopo anni dagli esborsi. Nel caso di un microimpianto si accettano tempi di ritorno medi, poiché l'esborso iniziale è ingente ma i ricavi si realizzano dopo pochi anni. La soglia scelta è di 7 anni.

Si è calcolato infine il **rapporto benefici/costi** (B/C), considerati entrambi attualizzati e cumulati:

$$B/C = \frac{\sum_{i=0}^T \frac{B(i)}{(1+r)^i}}{\sum_{i=0}^T \frac{C(i)}{(1+r)^i}}$$

Ci si aspetta che un progetto economicamente conveniente presenti il rapporto B/C superiore all'unità, che è stata definita come soglia per questo indicatore.

5.3.2 Definizione dei parametri dell'analisi

I parametri dell'analisi ancora da definire sono la vita utile del progetto T , il tasso di attualizzazione r , il piano finanziario e la distribuzione temporale degli esborsi.

La **vita utile dell'impianto** è stata fissata a 30 anni, durata della concessione per l'utilizzo dell'acqua ai fini idroelettrici, come da R.D. 1775 del 1933, modificato dalla Legge 36 del 1994.

Alla fine del trentennio si considera nullo il valore residuale dell'impianto, perché non è detto che venga rinnovata la concessione e perché sarebbero comunque necessari esborsi per la manutenzione straordinaria, che prevede la sostituzione dell'equipaggiamento elettromeccanico.

Il **tasso di attualizzazione** è stato fissato al 5%, in accordo con il valore proposto in [3].

Il **piano finanziario** standard è il mutuo decennale, si propone una analisi di sensibilità nel Par.5.4.1.

Per lo studio del progetto completo di attivazione di tutti e 5 gli impianti, si valutano due **programmi di realizzazione** dei singoli impianti:

- a) realizzazione contemporanea di tutti gli impianti all'anno zero. La gestione della rete rimane quella definita per tutta la vita utile degli impianti;
- b) realizzazione in due fasi: i tre impianti storici all'anno zero e i due impianti sugli scaricatori all'anno nono, in modo da coprire il gap nei ricavi provocato dalla scadenza, all'ottavo anno, dei certificati verdi degli impianti storici. Per i primi otto anni si prevede la gestione della rete in modo da massimizzare la produzione energetica sui tre impianti storici, come indicato, dal nono anno in poi si seguono le specifiche proposte nel caso dei 5 impianti contemporaneamente attivi.

5.3.3 Convenienza economica dei singoli impianti della rete

Di seguito sono riportati i flussi di cassa attualizzati e i relativi indicatori di convenienza economica ottenuti per ciascuno dei cinque impianti della rete.

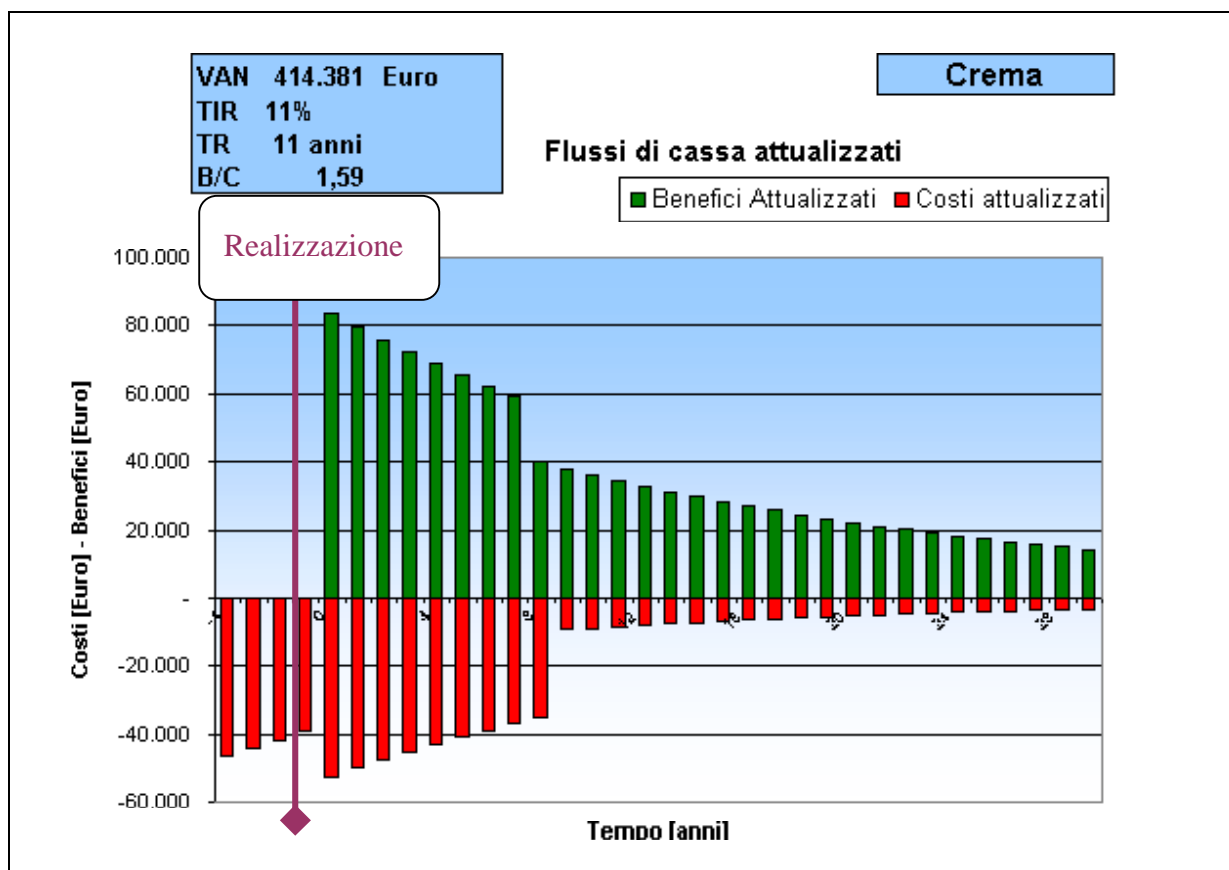


Figura 5.2. Impianto di Crema: flussi di cassa attualizzati e indicatori di convenienza economica.

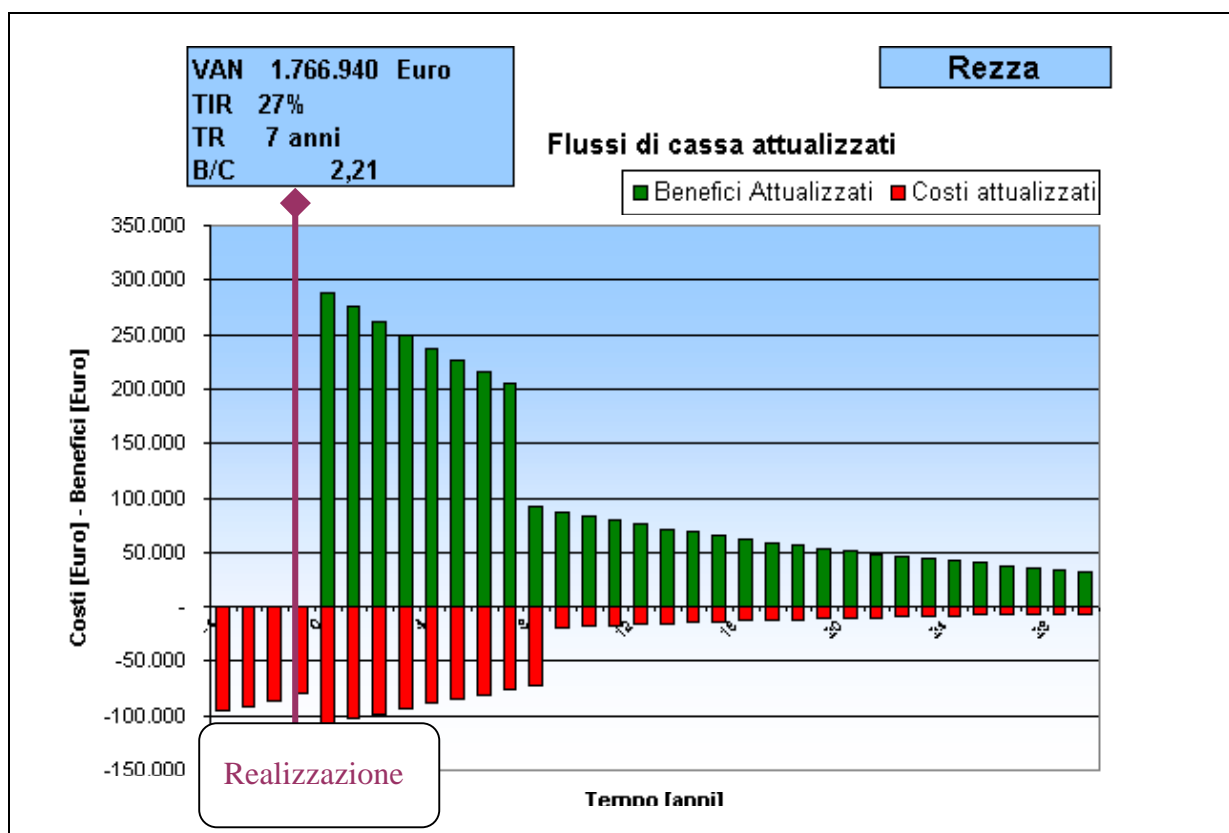


Figura 5.3. Impianto di Rezza: flussi di cassa attualizzati e indicatori di convenienza economica.

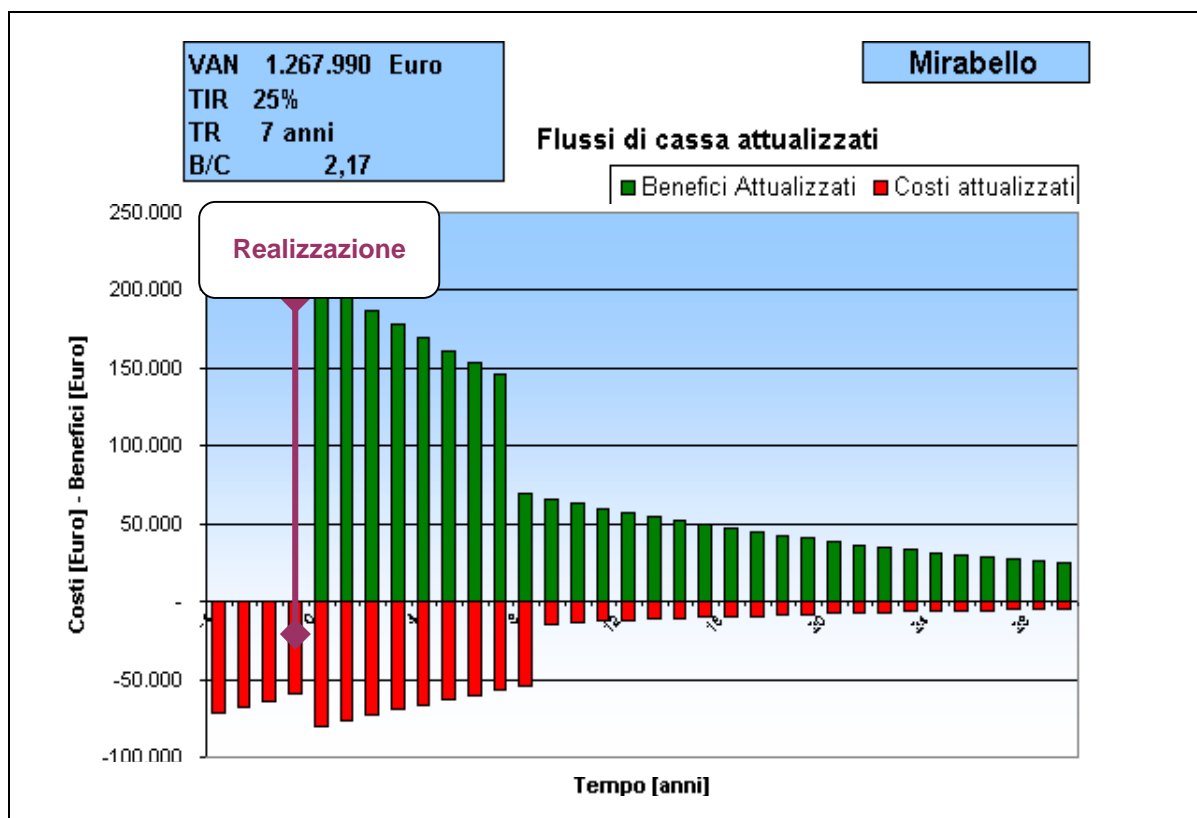


Figura 5.4 Impianto di Mirabello: flussi di cassa attualizzati e indicatori di convenienza economica.

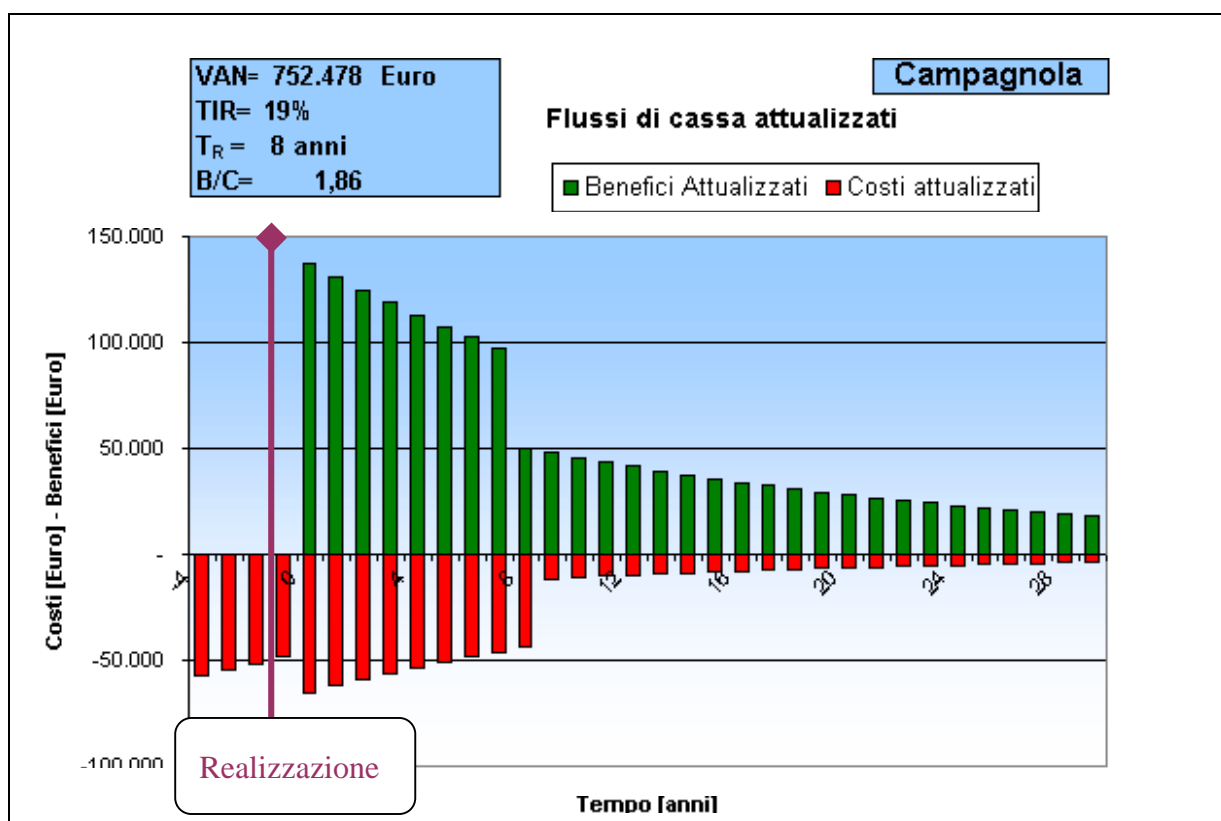


Figura 5.5. Impianto di Campagnola: flussi di cassa attualizzati e indicatori di convenienza economica.

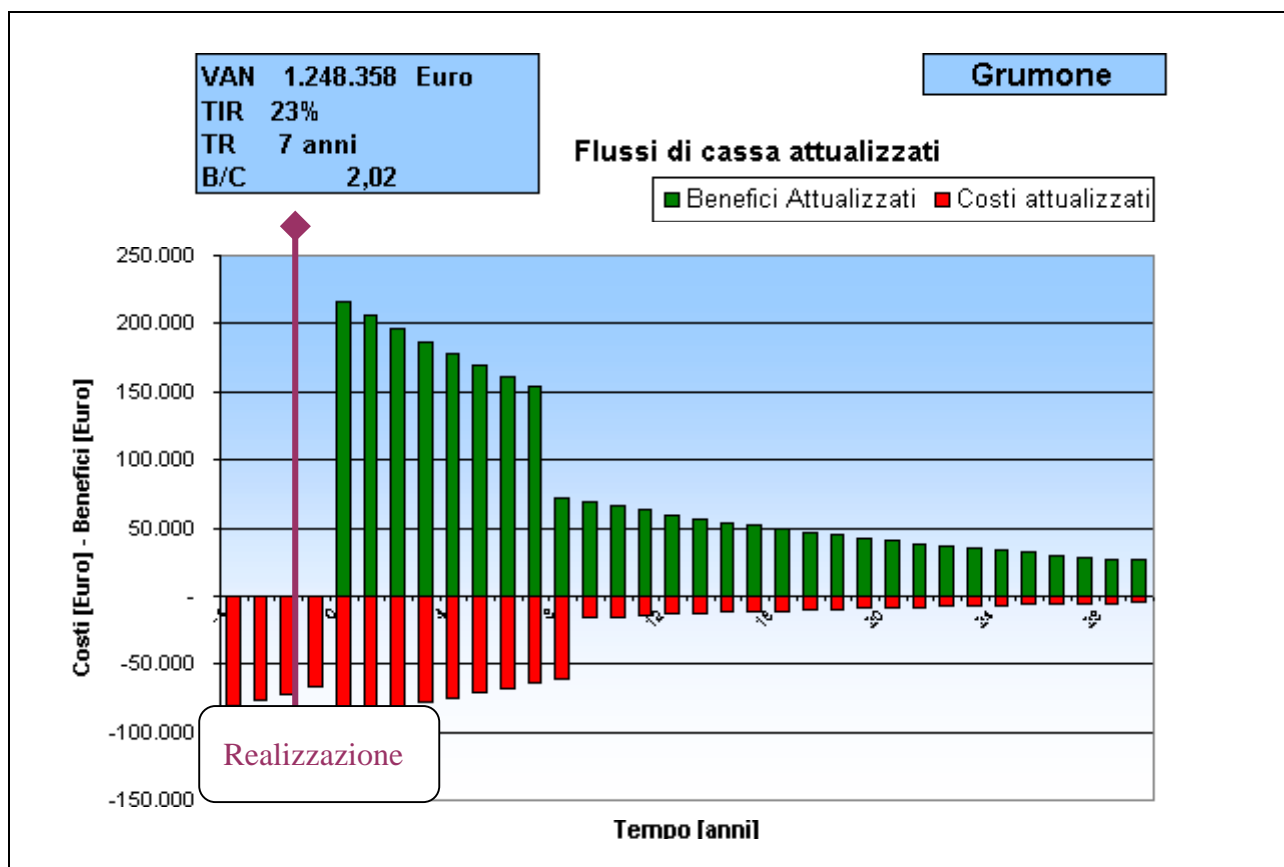


Figura 5.6. Impianto di Grumone: flussi di cassa attualizzati e indicatori di convenienza economica.

Nella Tabella 5.6 si riportano i valori degli indicatori economici: gli impianti che presentano i migliori indicatori sono Rezza, Mirabello e Grumone, decisamente al di sopra di tutte le soglie stabilite.

Per Campagnola e Crema il tempo di ritorno dell'investimento si presenta più vicino al lungo periodo che al medio periodo, ma non si tratta di risultati insoddisfacenti, in quanto gli altri tre indicatori sono sopra le soglie..

Si può quindi affermare che, sotto le ipotesi definite, tutti gli impianti risultano convenienti economicamente. Si tratta ora di capire quanto la soluzione calcolata sia robusta al variare dei parametri e in quale ordine cronologico realizzarli. Senza vincoli di natura economica, tutti gli impianti risultano quindi prioritari, tuttavia in caso di vincoli di capitale da investire, conviene leggere l'ordine con cui sono posti nella tabella come un ordine di priorità, sebbene alla realizzazione di ognuno sarebbe necessario modificare la gestione della rete, ottenendo sicuramente, nel transitorio in cui non tutti gli impianti sono attivi, performance ancora migliori per gli impianti attivi, perché possono sfruttare tutta la risorsa a disposizione. Tuttavia non si è effettuata una analisi di tale complessità perché nel dimensionamento è stato evidenziato che per tutti gli impianti si è molto vicini alle portate massime turbinabili in base alla capacità dei canali su cui sono poste, risulterebbe quindi necessario modificare la struttura idraulica della rete, eventualità che in questo studio non viene contemplata.

Tabella 5.6. Sintesi dei valori assunti dagli indicatori di performance economica per gli impianti della rete cremonese.

Impianto	Potenza installata [kW]	Energia annua [MWh]	VAN [Mio Euro]	TIR	TR [anni]	B/C
Rezza	390	3.090	1,8	27%	7	2,2
Mirabello	278	2.205	1,3	25%	7	2,2
Grumone	371	2.316	1,2	23%	7	2,0
Campagnola	185	1.470	0,8	19%	8	1,9
Crema	176	893	0,4	11%	11	1,6

5.3.4 Convenienza economica del progetto completo

È opportuno ora valutare la convenienza economica del progetto completo di realizzazione degli impianti, il modo più semplice per farlo è quello di ipotizzare la sequenza temporale a) di pag.55, ovvero la realizzazione contemporanea di tutti gli impianti. Questo scenario si può considerare in un certo senso prudentiale, per il futuro dei Certificati Verdi che assumeranno ragionevolmente un valore nel tempo sempre minore man mano che verrà saturata la quota di energia rinnovabile che devono coprire.

I risultati sono riportati nella Figura 5.1, e ricalcano quelli ottenuti per i singoli impianti.

Il risultato complessivo presenta tutti i valori ampiamente al di sopra delle soglie, probabilmente perché i valori decisamente positivi degli impianti di Rezza, Mirabello e Grumone, compensano le prestazioni più deboli di Campagnola e Crema.

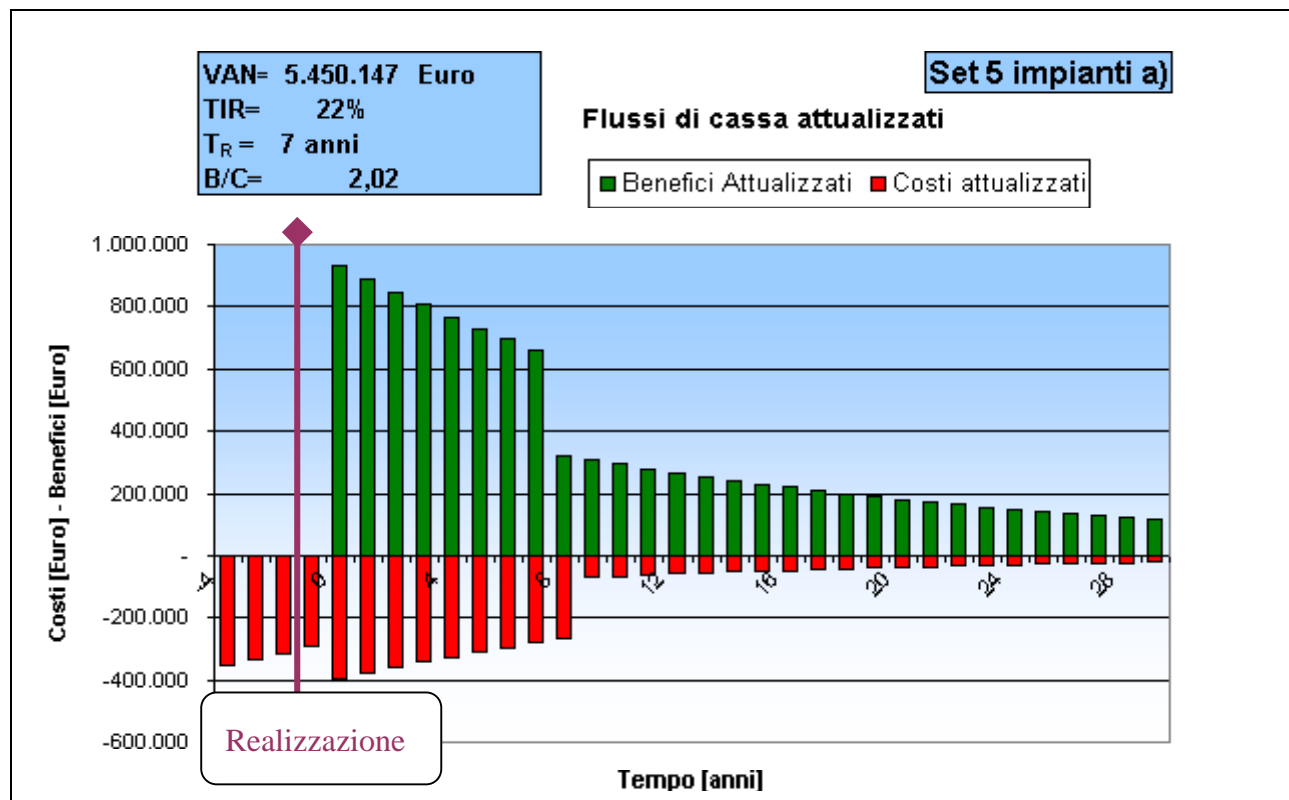


Figura 5.7. Indicatori economici e prospetto dei flussi di cassa per il set dei 5 impianti realizzati contemporaneamente.

5.3.5 Confronto con la realizzazione di un impianto equivalente per potenza ed energia

La prova della convenienza dei microimpianti si può rafforzare confrontando le prestazioni del progetto completo con il progetto - che si può considerare come riferimento - di realizzazione di un impianto equivalente, con salto pari al salto medio, potenza installata pari alla potenza totale ed energia pari all'energia totale. Il risultato è che è più conveniente realizzare più impianti più piccoli che uno solo equivalente in potenza ed energia, in quanto a fronte di una riduzione dei costi unitari dell'8 %, per via delle economie di scala, si verifica una forte riduzione dei ricavi unitari (-35%), per come è valorizzato il prezzo dell'energia venduta.

5.3.6 Convenienza economica del progetto di riattivazione degli impianti storici

Dal momento che due dei tre impianti con le prestazioni migliori (vedi Tabella 5.6) appartengono al gruppo degli impianti storici, si è voluto valutare quali siano le performance economiche dei soli impianti storici, che vengono riportate nella Figura 5.8. Mettendo a confronto il risultato con quello del set di 5 impianti in Figura 5.7, si nota che a parte il VAN, gli altri valori sono uguali (il tempo di ritorno) o addirittura maggiori (tasso interno di rendimento e rapporto benefici costi).

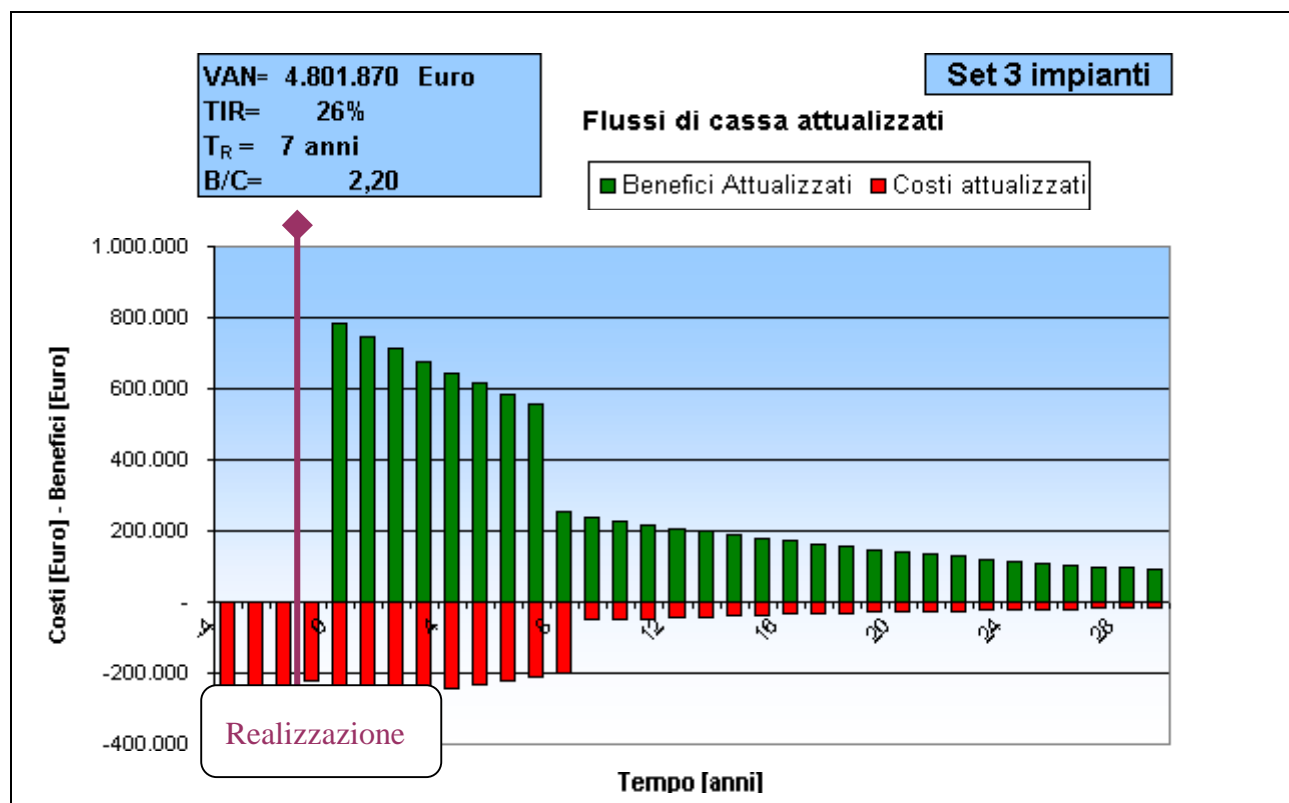


Figura 5.8. Flussi di cassa attualizzati e indicatori di convenienza economica per il set di impianti storici.

5.4 Sensibilità dei parametri della valutazione economica

Per valutare la robustezza dei risultati calcolati si è eseguita una analisi di sensibilità sui parametri più incerti (tasso di interesse del mutuo) e sulle possibili distribuzioni temporali degli esborsi monetari (piano finanziario, quota di finanziamento). Infine, dal momento che la stima dei costi di investimento è stata effettuata a partire da un valore medio europeo (vedi Tabella 5.1), si è

analizzato anche il caso peggiore, ovvero quello in cui i costi di investimento siano superiori a quelli previsti in misura del 20% e del 50%.

La configurazione di partenza è quella standard: realizzazione del set dei 5 impianti finanziati al 70% da un mutuo decennale al 6,5%, con tasso di attualizzazione del 5%.

Per ognuno dei parametri analizzati si riporta graficamente l'indicatore che presenta una maggiore variabilità.

5.4.1 Sensibilità della soluzione al tipo di piano finanziario

Nella Tabella 5.7 è riportata la sensibilità della soluzione a seconda del piano finanziario adottato, dal mutuo decennale a quello trentennale, e nella Figura 5.9 è riportato graficamente il parametro che presenta una maggiore variazione percentuale, ovvero il TIR. Si può notare che tutti gli indicatori si mantengono al di sopra delle soglie, con un miglioramento per il tempo di ritorno, che comunque insieme al rapporto benefici costi e al VAN non si discosta molto dal valore di partenza.

Tabella 5.7. Variabilità dei risultati al variare del piano finanziario adottato.

Piano finanziario	Tasso attualizzazione	Quota di finanziamento	Tasso di interesse mutuo	VAN [Euro]	TIR	T _R [anni]	B/C
Mutuo 10 anni	5,0%	70%	6,5%	5.450.147	22%	7	2,02
Mutuo 10 anni dilazionato 2				5.402.589	25%	6	2,00
Mutuo 20 anni				5.321.293	26%	6	1,97
Mutuo 30 anni				5.216.758	28%	6	1,93
Variabilità percentuale				4%	-26%	14%	4%

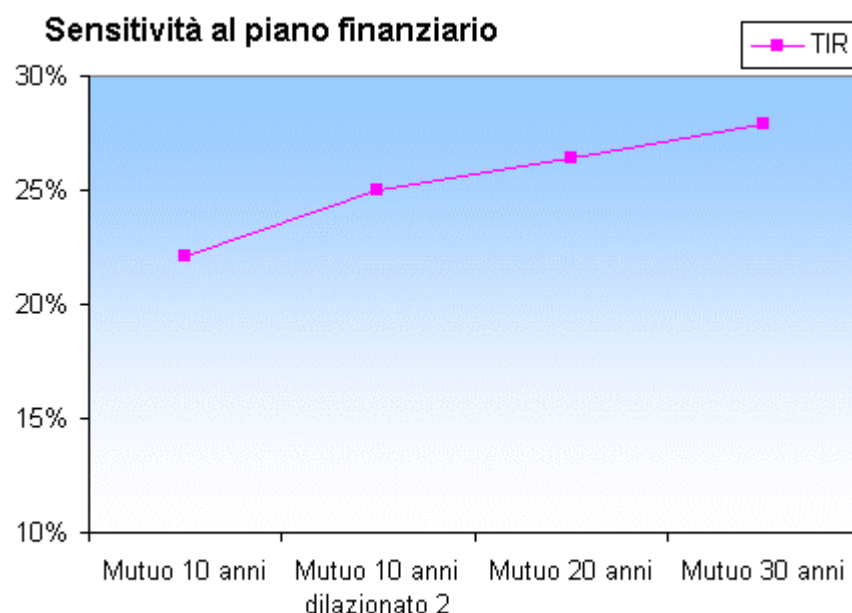


Figura 5.9. Variabilità del TIR al variare del piano finanziario adottato.

5.4.2 Sensibilità della soluzione al tasso di interesse

Nella Tabella 5.8 è riportata la sensibilità della soluzione al tasso di interesse del mutuo, dal 6,5% al 10% e nella Figura 5.10 è riportato graficamente il parametro che presenta una maggiore variazione percentuale, ovvero il TIR. Anche questo caso tutti gli indicatori si mantengono al di sopra delle soglie, con una variabilità minore rispetto ai precedenti. Il TIR, all'interno dei valori di riferimento, presenta una tendenza lineare negativa.

Tabella 5.8. Variabilità dei risultati al variare del tasso di interesse del mutuo.

Piano finanziario	Tasso attualizzazione	Quota di finanziamento	Tasso di interesse mutuo	VAN [Euro]	TIR	T _R [anni]	B/C
Mutuo 10 anni	5,0%	70%	6,5%	5.450.147	22%	7	2,02
			7,0%	5.392.913	22%	7	2,00
			8,0%	5.276.585	21%	7	1,96
			9,0%	5.157.833	20%	7	1,91
			10,0%	5.036.725	20%	7	1,87
Variabilità percentuale				8%	11%	0%	7%

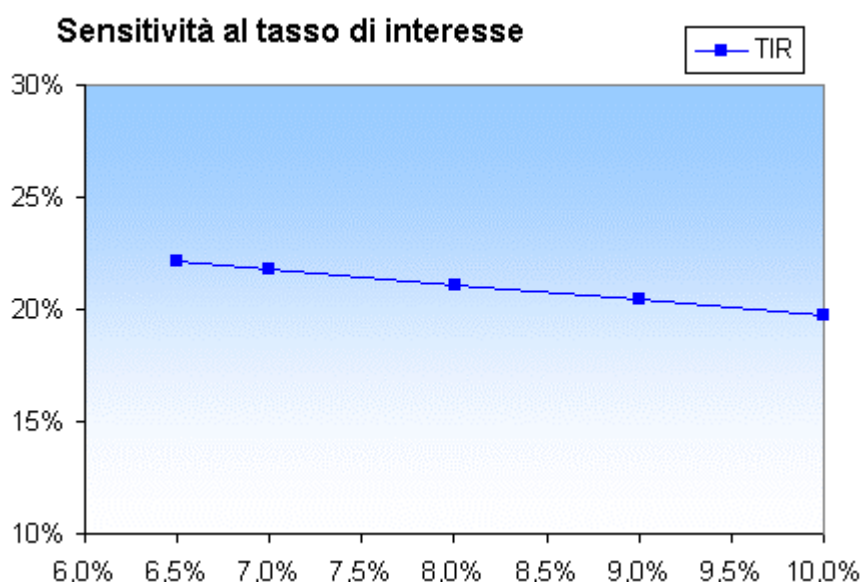


Figura 5.10. Variabilità del TIR al variare del tasso di interesse del mutuo.

5.4.3 Sensibilità della soluzione alla quota di finanziamento

Nella Tabella 5.7 è riportata la sensibilità della soluzione alla quota di finanziamento che si vuole coprire con il mutuo, dal 70% allo 0% (progetto realizzato interamente con capitale proprio) e nella Figura 5.11 è riportato graficamente il parametro che presenta una maggiore variazione percentuale, ovvero il TIR. Si può notare che tutti gli indicatori si mantengono al di sopra delle soglie e tempo di ritorno e rapporto benefici costi non si discostano molto dal valore di partenza. In particolare questo parametro si dimostra essere quello che meno incide, di quelli analizzati, sulla variabilità della soluzione.

Il TIR, all'interno dei valori di riferimento, presenta una tendenza parabolica. È interessante notare come al crescere della quota di investimento finanziata con il mutuo, il TIR cresca, migliorando quindi le prestazioni della soluzione.

Tabella 5.9. Sensibilità della soluzione al variare della quota di investimento finanziata con il mutuo.

Piano finanziario	Tasso attualizzazione	Quota di finanziamento	Tasso di interesse mutuo	VAN [Euro]	TIR	T _R [anni]	B/C
Mutuo 10 anni	5,0%	70%	6,5%	5.450.147	22%	7	2,02
		60%		5.457.684	19%	7	2,02
		50%		5.465.221	17%	8	2,02
		40%		5.472.758	15%	8	2,03
		0%		6.035.603	14%	8	2,11
Variabilità percentuale				-11%	36%	-14%	-5%

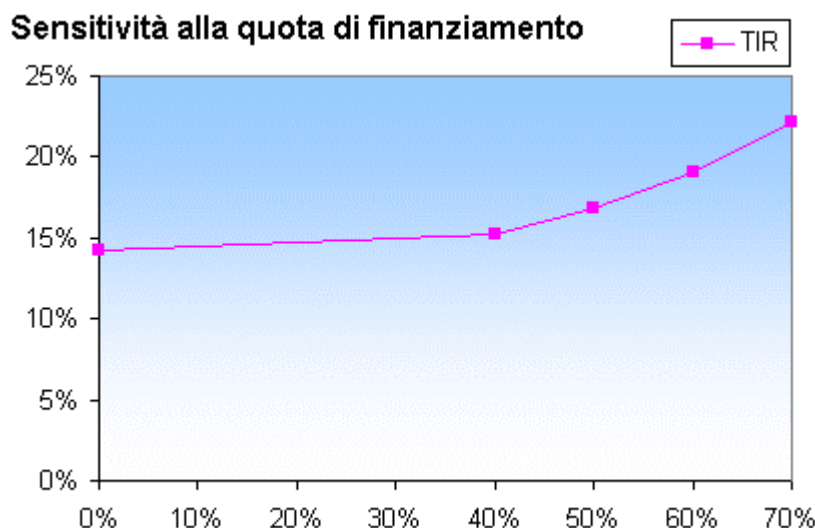


Figura 5.11. Variabilità del TIR al variare della quota di investimento finanziata con il mutuo.

5.4.4 Analisi del caso peggiore

Dal momento che i costi di investimento sono stati stimati a partire da medie europee e non dai singoli casi specifici, si è voluto valutare l'effetto sugli indicatori di un incremento del costo di investimento del 20% e del 50%.

I risultati sono riportati nella Tabella 5.10, dove si evidenzia che le soluzioni dei casi peggiori presentano prestazioni ovviamente meno brillanti del caso standard, ma ancora decisamente buone su tutti e quattro gli indicatori per il caso con aumento del 20% e su 2 indicatori per il caso con aumento del 50%.

Tabella 5.10. Prestazioni del progetto completo valutando aumenti dei costi.

Scenario	Costo unitario [euro/kW]	VAN [Euro]	TIR	T _R [anni]	B/C
Scenario standard	2.547	5.450.147	22%	7	2,02
Costi aumentati del 20%	3.056	4.380.701	16%	8	1,68
Costi aumentati del 50%	3.821	2.776.532	8%	11	1,35

5.5 Alcune alternative di realizzazione del progetto completo

Per rendere sempre più esaustiva delle possibili casistiche l'analisi economica, si propongono due alternative di realizzazione del progetto.

La prima vuole valutare quant'è la migliororia operata nella rete con la riattivazione del bypass a valle dell'impianto di Mirabello, che è attualmente in disuso, e il cui costo di riattivazione non è stato incluso nei costi del progetto fino ad ora. Questa analisi, mettendo a confronto le prestazioni economiche della gestione ottima della rete nello stato attuale e nello stato in cui il bypass risulti attivo, vuole fornire un riferimento da confrontare con i costi di attivazione del canale: se questi sono maggiori della differenza tra i VAN dei due casi a confronto, non risulta conveniente riattivarlo.

La seconda analisi ipotizza una sequenza temporale di attivazione degli impianti che, lontano dall'essere l'ottimo, vuole incrementare le prestazioni ottenute con il progetto completo standard, che prevede la realizzazione di tutti gli impianti in contemporanea. Naturalmente la sequenza temporale risultante è una buona indicazione qualora si decida di affidare il progetto completo ad un solo attore, mentre se gli attori sono molteplici la soluzione standard sembra essere la migliore, poiché per ogni attore il valore del progetto può solo essere quello del singolo impianto.

5.5.1 Opportunità di realizzazione del bypass di Mirabello

Per valutare l'opportunità di realizzazione del bypass di Mirabello è stata ricondotta l'ottimizzazione della rete ponendo nullo il flusso nel bypass, in modo da valutare le portate risultanti, le potenze da installare e le energie medie annue producibili.

Le curve di durata, mostrate in Figura 5.12, a confronto con quelle della gestione ottima con il bypass attivo, presentate nel Capitolo 4, mostrano le seguenti differenze:

- la Rezza riesce a saturare la propria capacità energetica, passando da una portata di dimensionamento di $18,50 \text{ m}^3/\text{s}$ ad una di $19,00 \text{ m}^3/\text{s}$,
- la portata di dimensionamento della Campagnola si riduce, come era prevedibile, da $11 \text{ m}^3/\text{s}$ a $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Del resto la funzione principale del bypass è di permettere alle acque turbinate da Mirabello di essere disponibili a Campagnola, che senza il bypass riceve soltanto le acque che dal Grande impingano la Ciria Nuova.

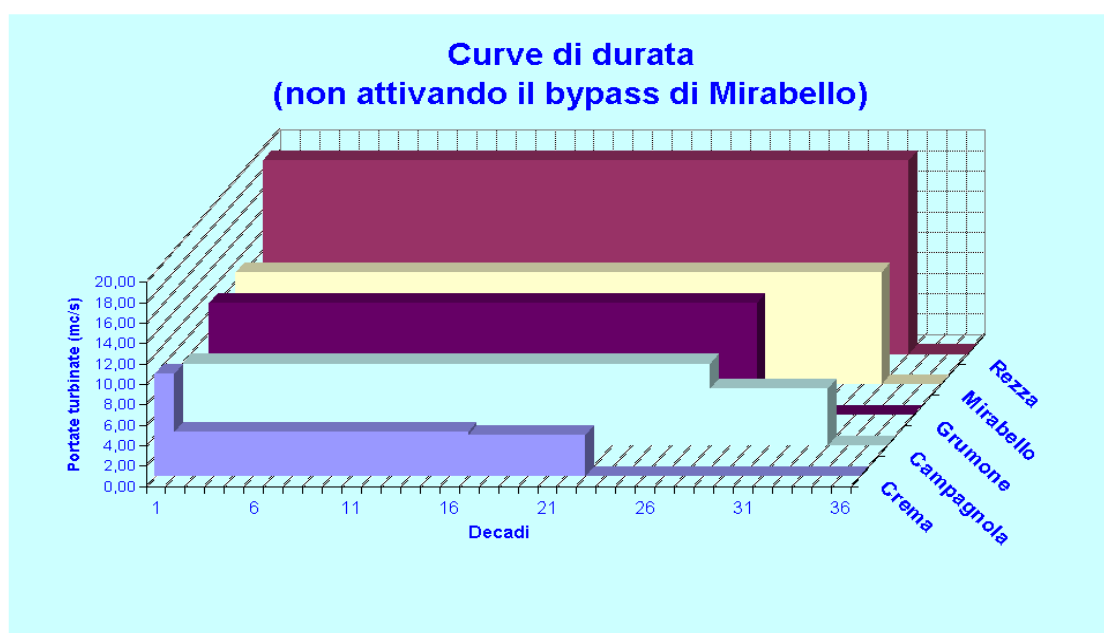


Figura 5.12. Curve di durata degli impianti della rete cremonese nell'ipotesi di non attivare il bypass di Mirabello.

Nelle Tabella 5.11 e Tabella 5.12 si evidenziano le differenze in potenza ed energia per i cinque impianti: l'introduzione del bypass permette un incremento modesto della potenza (+70 kW) e un discreto aumento dell'energia producibile (+ 516 kWh circa), a fronte di un modesto miglioramento delle prestazioni economiche globali e a risultati sempre al di sopra di tre delle quattro soglie per i singoli impianti.

Tabella 5.11. Prestazioni del progetto completo con l'attivazione del bypass.

Impianto	Potenza installata [kW]	Energia annua [MWh]	VAN [Mio Euro]	TIR	T _R [anni]	B/C
Crema	176	893.276	414.381	11%	11	1,6
Rezza	390	3.090.327	1.766.940	27%	7	2,2
Mirabello	278	2.205.000	1.267.990	25%	7	2,2
Campagnola	185	1.469.992	752.478	19%	8	1,9
Grumone	371	2.316.353	1.248.358	23%	7	2,0
Progetto completo con bypass	1.400	9.974.948	5.450.147	22,1%	7	2,019

Tabella 5.12. Prestazioni del progetto completo senza l'attivazione del bypass.

Impianto	Potenza installata [kW]	Energia annua [MWh]	VAN [Mio Euro]	TIR	T _R [anni]	B/C
Crema	146	752.827	330.827	10%	12	1,5
Rezza	400	3.173.849	1.824.895	27%	7	2,2
Mirabello	278	2.205.000	1.267.990	25%	7	2,2
Campagnola	135	1.011.136	428.970	14%	9	1,6
Grumone	371	2.316.353	1.248.358	23%	7	2,0
Progetto completo senza bypass	1.330	9.459.165	5.101.040	21,9%	7	2,000

In definitiva la realizzazione del bypass non sembra di priorità primaria.

5.5.2 Realizzazione del progetto in due fasi

Una seconda analisi supplementare si è effettuata supponendo di realizzare gli impianti in due diverse fasi: nella prima fase all'anno -1 si suppone di realizzare gli impianti storici, all'8° anno di esercizio di questi si suppone di realizzare gli impianti sugli scaricatori, in modo che siano attivi dal 9° anno e permettano di coprire il salto negativo nei ricavi dovuto alla scadenza dei certificati verdi dei primi impianti realizzati. È evidente che si ipotizza, per i primi 8 anni, la gestione ottima analizzata nel Par.4.2, mentre dal 9° al 30 anno si mantiene la gestione della rete focalizzata sui 5 impianti.

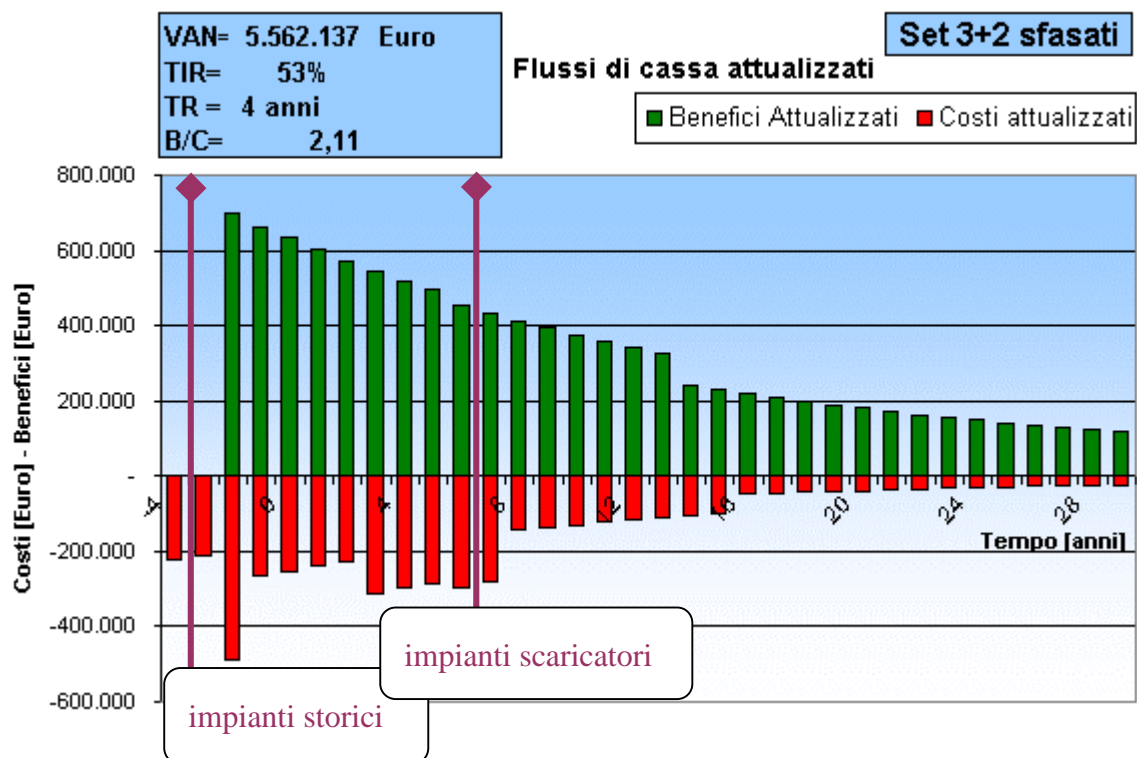


Figura 5.13. Flussi di cassa e indicatori di convenienza economica nel caso di realizzazione degli impianti con uno sfasamento di 9 anni.

Come si può osservare nella

Figura 5.13 i risultati sono migliori del caso precedente, in particolare il tempo di ritorno si riduce drasticamente a 4 anni. Ne consegue che l'ipotesi di realizzazione degli impianti in due fasi separate risulta più conveniente di quella di realizzarli tutti in una volta.

5.6 Riferimenti bibliografici

- [1] European Small Hydropower Association, Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site, 1998
- [3] Delibera AEEG num.92dell'8/06/99
- [4] Relazione tecnica Delibera AEEG, 1999

Conclusioni

La risposta alla domanda posta nella premessa è quindi che è possibile ed economicamente conveniente installare potenza idroelettrica nella rete irrigua cremonese, il tutto con risultati quantitativi molto interessanti. Rispettando i vincoli delle utenze attuali della rete, la potenza installata si può più che raddoppiare, così come l'energia prodotta, con un reddito netto approssimativo dell'ordine dei milioni di Euro.

Pur tuttavia a valle di questo lavoro, prima di procedere ai progetti preliminari degli impianti, sono sicuramente necessari alcuni approfondimenti:

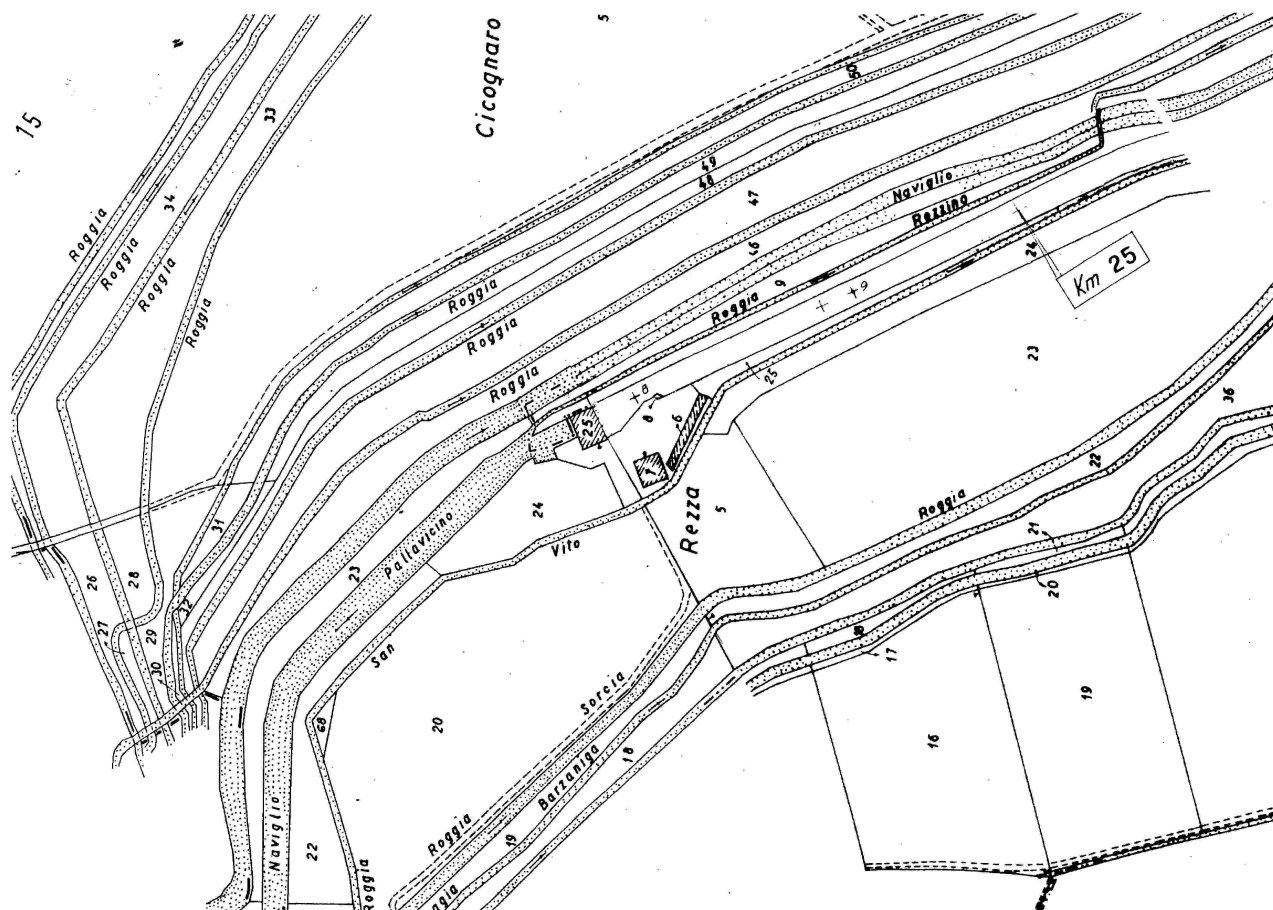
- La costruzione di un modello idraulico della rete, che permetta di comprendere più precisamente i valori delle capacità dei canali e dei salti motori alle sezioni di interesse in funzione delle portate transitanti;
- Una metodica campagna di misura delle portate nella rete, per ottenere una validazione sul campo del modello attuale e del modello idraulico;
- La definizione di nuove modalità di gestione della rete, dal momento che l'ottimizzazione idroelettrica impone una gestione diversa dall'attuale con conseguenti aggiustamenti di diverso ordine (tecnici, amministrativi e contrattuali).

Si sottolinea infine un sicuro margine di miglioramento dei risultati ottenuti: l'ipotesi che gli afflussi alla rete siano le attuali portate di concessione può essere il punto di partenza per comprendere di quanto sia possibile richiedere una maggiorazione di tali portate di concessione al di fuori della stagione irrigua, in particolare per i canali derivatori dal fiume Oglio, le cui concessioni sono scadute nella seconda metà degli anni '80.

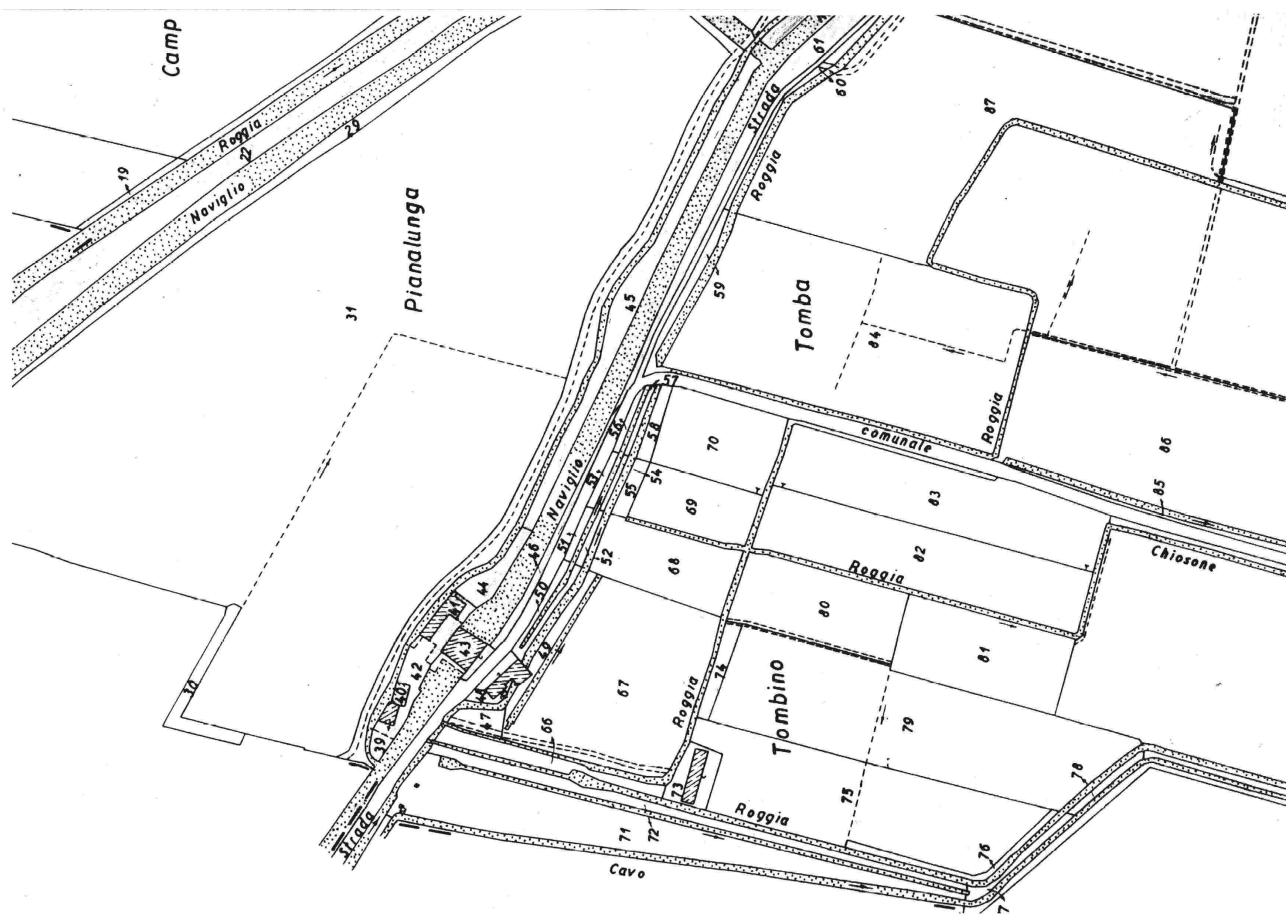
Appendice 1: sezioni di interesse

Si riportano le planimetrie delle sezioni di interesse, escluso Grumone, con riferimento all'impianto, al canale e alla progressiva chilometrica, dalla carta catastale in scala 1:20.000.

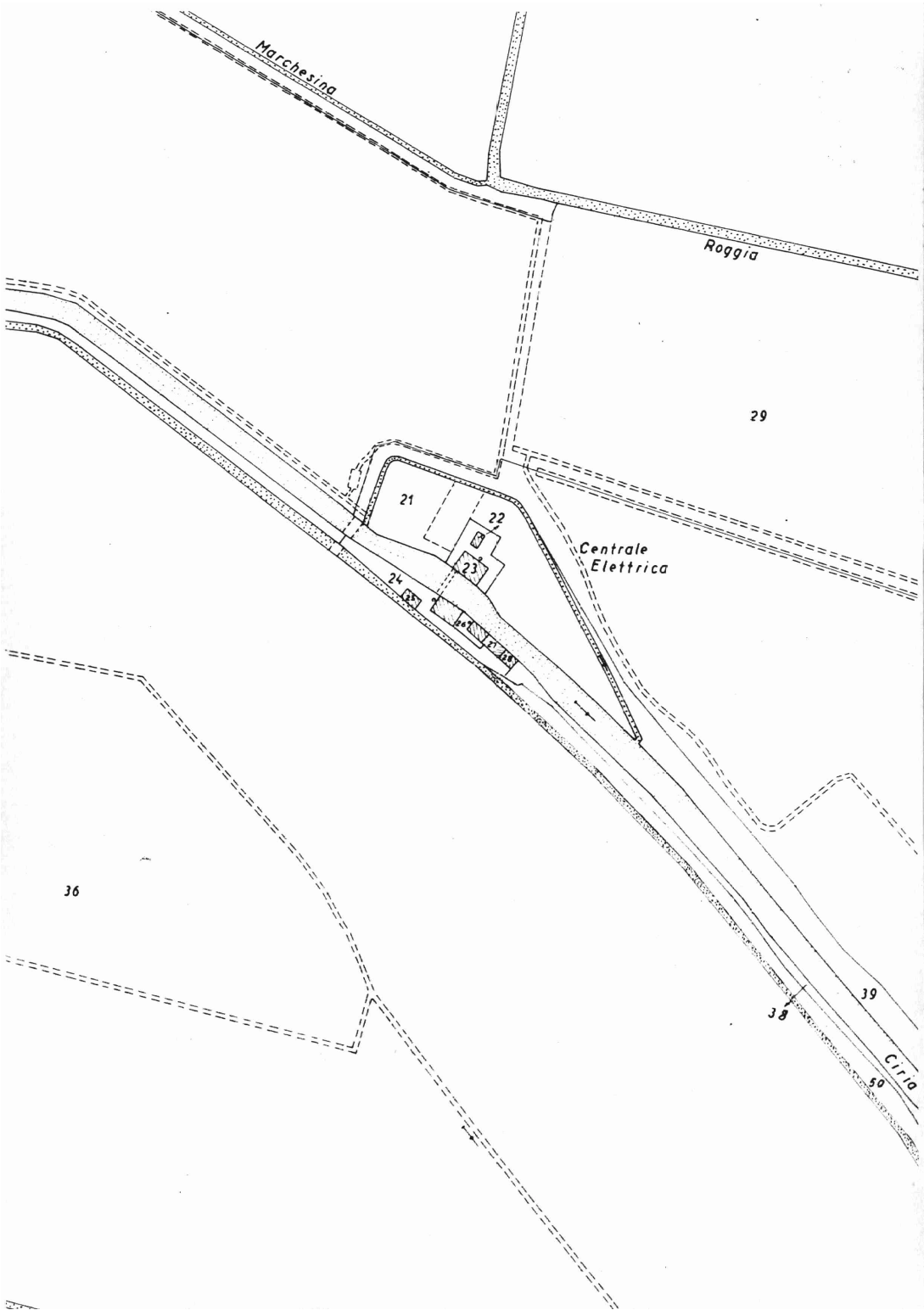
Rezza. Naviglio Grande, km 24,77



Mirabello. Naviglio Grande, km 29,97

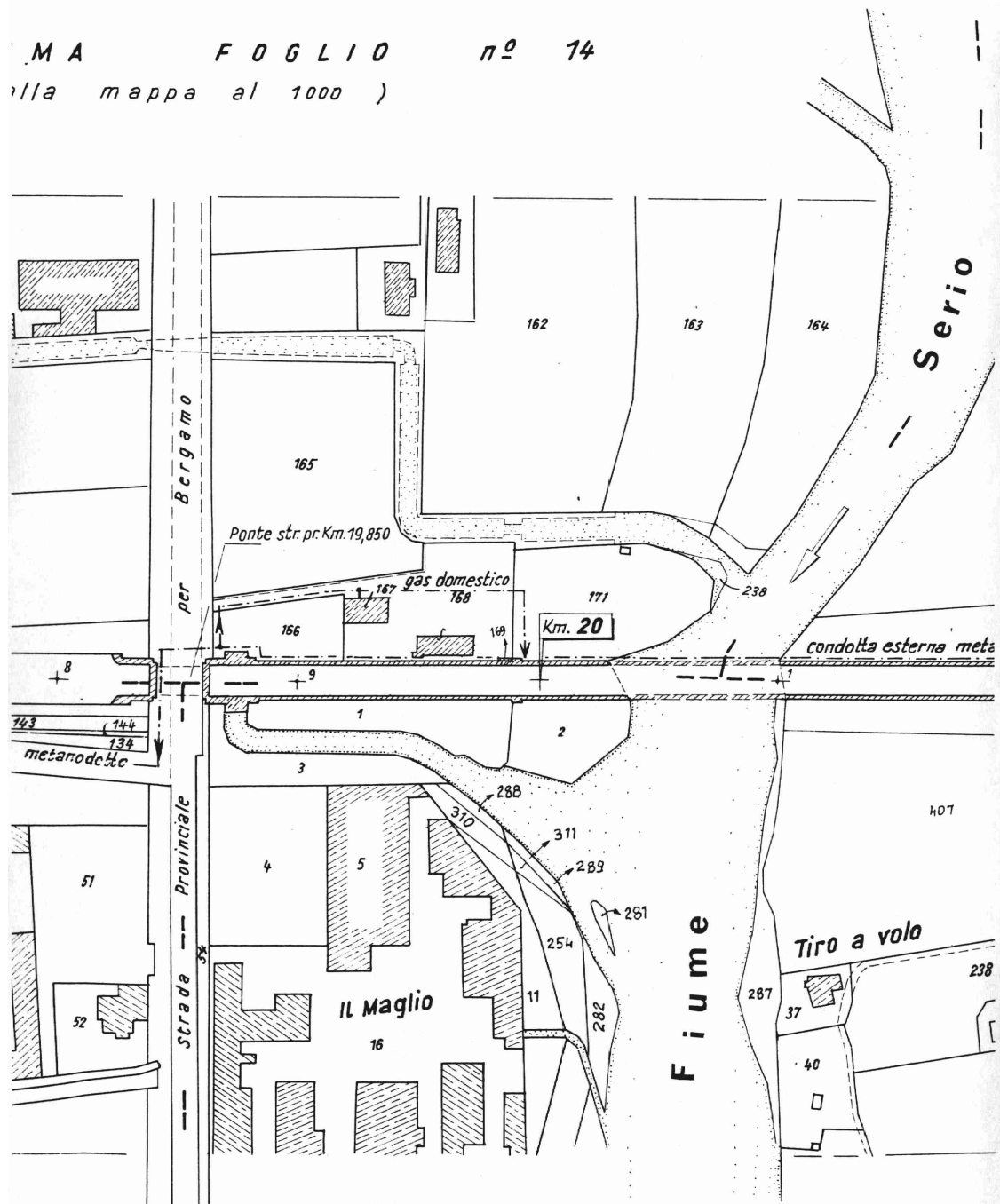


Campagnola. Ciria Nuova, km 8,50



Crema. Vacchelli, km 19,9

MA FOGLIO n° 14
 alla mappa al 1000)



COMUNE DI CREMA FOGLIO n° 2
 (Ridotto dalla mappa al 1000)

Appendice 2: misure di portata

Si riportano le elaborazioni sulle portate misurate e presenti nell'archivio cartaceo del Consorzio.

Riepilogo portate medie misurate nella rete irrigua CIIC

Unità di misura: mc/s

Fonte: archivio cartaceo Consorzio Irrigazioni Cremonesi, rilevazioni effettuate durante la stagione irrigua dal 1979 al 2002

Anno	(Tutto)								
Media di Portata		Mese							
Canale	Sezione	MAG	GIU	LUG	AGO	SET	Min	Max	Num oss
Vacchelli	Passerella alla presa			38,11	32,39		30,70	38,68	5
	Passerella valle Lagazzone				36,48		36,48	36,48	1
	Pass. T.s. Libera	23,51	35,15	37,92	31,09	17,68	13,38	42,89	23
	Ponte canale sul Serio		38,44	36,60			36,47	39,04	4
	Casc.to Stadiotti			18,26			18,26	18,26	1
	Ex-bocca Ravara		16,77	15,28			14,11	16,77	3
Nuovo	Ponte strada Cumignano-Genivolta					5,35	5,35	5,35	1
Grande	Monte Gorgo Rotondo				11,84		11,78	11,90	2
	Passerella valle T.s. Gabriela		16,05	16,98			15,86	19,19	7
	Ponte Brugnano		19,23	17,06			17,06	19,23	2
	Ponte del Convento	4,57		5,54			4,57	5,54	2
Tornacanal	Primo diramatore Vacchelli-Grande			0,90			0,90	0,90	1
Canobbia Nuova	Passerella Guameri			2,57			2,54	2,59	3
	Sifone Talamazzino			2,34			2,34	2,34	1
Canobbia Vecchia	Ponte strada km.3,150			3,38			3,38	3,38	1
Ciria Nuova	Ponte Canale Roggia Cignana		10,10				10,10	10,10	1
	Ponte Canale sul Civico	5,03	8,78	10,75			3,42	10,75	4
	Salto di Campagnola	3,45					3,45	3,45	1
Ciria Vecchia	Ponte dei sospiri			12,56			12,56	12,56	1
	Consorzio Oglio				12,55		12,55	12,55	1
	Incastrone di Brazzuoli			10,80	11,08		9,45	12,70	4
	Passerella valle bocche Mezzadri			3,63		1,55	1,55	3,63	2
Scaricatore Grumone	Ex sottopasso Quistro Brazzuoli	6,81					6,37	7,24	2

Bibliografia generale

1. Bruno Loffi, Consorzio Irrigazioni Cremonesi Cento Anni, 1987
2. Profilo della Provincia di Cremona a cura della Camera di Commercio Industria e Artigianato della Provincia di Cremona, tratto dal Censimento 2000 dell'Agricoltura
3. Ersal, carta della capacità d'uso dei suoli, 2000
4. Statuto del Consorzio Irrigazioni Cremonesi , Art.1
5. Decreto Legislativo 16 marzo 1999, n.79
6. Sito web del Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale www.grtn.it
7. European Small Hydropower Association, Layman's Guidebook on how to develop a small hydro site, 1998
8. European Small Hydropower Association, Blue energy for a Green Europe, 1998
9. Sito web di RETScreen International Renewable Energy Decision Support Centre www.retscreen.net
10. G.B. Danzig, Linear programming and extentions, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1963.
11. F.Michielotto, Analisi della distribuzione temporale e spaziale della dispensa a orario del Consorzio Irrigazioni Cremonesi, 2002
12. F. Contessini, Impianti Idroelettrici, Libreria Editrice Politecnica, Milano, 1956
13. Delibera AEEG num.92dell'8/06/99
14. Relazione tecnica Delibera AEEG, 1999