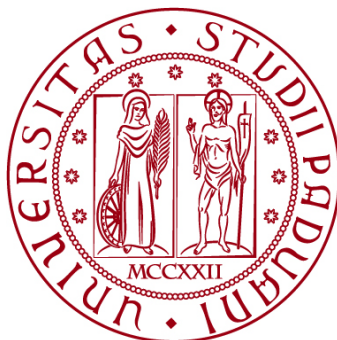


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E
AMBIENTALE

Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering

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



TESI DI LAUREA

IL SISTEMA IDROELETTRICO
PIAVE-SANTA CROCE

Relatore: Chiar.mo Prof. Daniele Pietro Viero

Laureando: Luca Favaro

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Sommario

INTRODUZIONE	1
1 INQUADRAMENTO STORICO.....	3
2 CENNI TEORICI SULLE CENTRALI IDROELETTRICHE	7
2.1 CLASSIFICAZIONE DEGLI IMPIANTI.....	8
2.1.1 <i>Impianti ad acqua fluente.....</i>	<i>10</i>
2.1.2 <i>Impianti a bacino e a serbatoio</i>	<i>10</i>
2.1.3 <i>Impianti a pompaggio</i>	<i>11</i>
2.2 OPERE DI PRESA.....	14
2.2.1 <i>Opere di sbarramento: dighe di ritenuta e traverse fluviali</i>	<i>14</i>
2.2.2 <i>Derivazione da lago artificiale</i>	<i>26</i>
2.2.3 <i>Derivazione da corso d'acqua naturale.....</i>	<i>28</i>
2.3 OPERE DI ADDUZIONE	28
2.4 CONDOTTA FORZATA.....	30
2.5 TURBINE IDRAULICHE: EFFICIENZA E RENDIMENTO	33
2.5.1 <i>Turbina Pelton</i>	<i>35</i>
2.5.2 <i>Turbine Francis.....</i>	<i>36</i>
2.5.3 <i>Turbine Kaplan</i>	<i>37</i>
2.6 OPERE DI RESTITUZIONE	39
3 CASO STUDIO: L'ASTA PIAVE-SANTA CROCE	43
3.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE	43
3.2 LE COMPONENTI DEL SISTEMA PIAVE-SANTA CROCE	46
3.2.1 <i>Lo sbarramento e il canale di adduzione di Soverzene.....</i>	<i>46</i>
3.2.2 <i>Centrale di Fadalto Nuova "Ottaviano Ghetti"</i>	<i>48</i>
3.2.3 <i>Centrale di Nove Nuova</i>	<i>50</i>
3.2.4 <i>Centrale di San Floriano nuova.....</i>	<i>52</i>
3.2.5 <i>Centrale di Castelletto e il canale Castelletto-Nervesa</i>	<i>54</i>
3.2.6 <i>Centrale di Caneva</i>	<i>57</i>
3.2.7 <i>Centrale del Livenza</i>	<i>59</i>
CONCLUSIONI	61
BIBLIOGRAFIA	65

Introduzione

Il sistema del bacino imbrifero del fiume Piave è uno dei più complessi e rilevanti in Italia dal punto di vista dello sfruttamento per la produzione di energia idroelettrica. Il fenomeno della corsa al così detto “carbone bianco” ebbe un ruolo cruciale nello sviluppo industriale ed economico che caratterizzò la prima metà del Novecento. Infatti, fino agli anni Sessanta circa tre quarti del fabbisogno energetico era soddisfatto dall'idroelettrico. In particolare, il bacino imbrifero del Piave, grazie alle sue caratteristiche idriche e morfologiche, fu particolarmente soggetto all'antropizzazione sino a divenire uno dei fiumi più artificiali d'Europa. Attualmente, infatti, circa l'80% delle sue acque scorre in condotte o canali. Il presente elaborato mira ad analizzare il funzionamento delle principali opere ed elementi che costituiscono un impianto idroelettrico, per poter meglio analizzare il sistema dell'asta Piave-Santa Croce. Si procederà con le varie classificazioni degli impianti descrivendone le caratteristiche principali. Seguirà lo studio del funzionamento delle varie opere di ingegneria idraulica che l'acqua incontra nel suo fluire da monte verso valle. Innanzitutto, verranno prese in considerazione le opere di presa, nello specifico verranno distinte le varie tipologie di sbarramenti e successivamente si analizzeranno le modalità di presa da laghi artificiali e da corsi d'acqua naturali. Una volta trattate le opere di presa si passerà all'analisi del tratto di adduzione ponendo particolarmente riguardo alle condotte forzate. Oltre a questo, verranno presi in considerazione gli elementi essenziali presenti in sala macchine che permettono nell'atto pratico la produzione di energia idroelettrica. A tal proposito verranno approfondite in modo particolare le principali tipologie di turbine idrauliche: Pelton, Francis e Kaplan.

In seconda battuta verrà analizzato il bacino del Piave, in maniera più specifica la struttura del sistema relativo all'asta Piave-S. Croce e di come quest'ultimo sfrutta le caratteristiche geomorfologiche del territorio per massimizzare la produzione di energia.

Il caso studio oggetto di questo elaborato è stato scelto in quanto il Lago di Santa Croce fu individuato dall'ingegnere Ferniani come cantiere per uno dei primi impianti nel fiume Piave, nonché uno dei più importanti del fiume, necessario a sostenere l'avvio del polo industriale di Porto Marghera. Durante il corso della sua storia, il sistema idroelettrico del Piave è sempre stato al centro dell'opinione pubblica e oggetto di scontri istituzionali, specialmente in seguito al disastro del Vajont. Tematica assai importante e di notevole interesse che verrà tuttavia trascurata nelle trattazioni del presente elaborato per poter considerare solamente l'aspetto tecnico e ingegneristico delle opere.

L'obiettivo finale è quello di trarre delle conclusioni, mettendo in luce i vantaggi e le criticità del sistema, con uno sguardo al ruolo attuale e alle prospettive future dell'idroelettrico nel panorama energetico odierno.

1 Inquadramento storico

Lo sviluppo del settore idroelettrico in Italia ha avuto inizio tra la fine del XIX secolo e i primi del Novecento, periodo di enorme sviluppo industriale. Infatti, per sostenere una tale crescita produttiva, il fabbisogno energetico fu sempre maggiore. Pertanto, venne colto l'enorme potenziale che la risorsa idrica offriva a livello energetico, tanto da essere ribattezzata sotto il nome di "carbone bianco" (D'Angelo, 2018). In particolar modo nel bacino del Piave, ma non solo, l'attecchimento di questo settore non può prescindere da una società in particolare: la SADE. La sua storia inizia il 31 gennaio 1905, quando venne costituita in Venezia con il nome di Società Adriatica di Elettricità (SADE) da un gruppo di finanzieri al cui vertice si trovava Giuseppe Volpi. La società nacque *"per la costruzione e l'esercizio di impianti per la generazione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica in Italia e all'estero"* (Pavan, 2001). Lo stesso anno viene nominato direttore della medesima Achille Gaggia a cui verrà dedicata più avanti l'omonima centrale. Lo sviluppo della SADE nei primi anni fu esponenziale, infatti rapidamente la sua rete, acquistando opere già esistenti in diverse zone dell'Italia come: Chioggia, Faenza e Venezia; e incorporando altre società; occupandosi al tempo stesso anche delle opere necessarie alla distribuzione dell'energia prodotta via via sempre maggiore (Pavan, 2001). Con l'entrata in guerra dell'Italia nel 1915, le attività della SADE vengono poste sostanzialmente al servizio del Paese e del suo esercito per far fronte alle esigenze belliche. Durante questo periodo, vi fu dunque un arresto nella realizzazione di nuovi impianti. Al termine dello scontro, iniziò una fase molto intensa di ripristino delle opere danneggiate che rimise in attività alcune centrali, tra cui quella di Nove, in tempi brevissimi. È proprio negli anni successivi, che intercorrono tra i due conflitti mondiali, che le politiche autarchiche, sempre più influenti, prediligono l'industrializzazione, portando alla costruzione della maggior parte degli impianti più rilevanti sul fiume Piave

(D'Angelo, 2018). Infatti, i lavori per la realizzazione dell'impianto di Santa Croce iniziarono nel primo dopoguerra e videro la loro conclusione attorno al 1930, quando entrò in esercizio la centrale del Livenza; l'ultima di una serie di otto centrali che sviluppano una potenza complessiva di 190 000 kW (Pavan, 2001). Nello stesso periodo, viene realizzato l'impianto Piave-Ansiei dalla Società Forze Idrauliche dell'Alto Cadore, acquistato qualche anno dopo dalla SADE.

Dato il sempre crescente fabbisogno di energia, tra il 1936 e il 1943 viene realizzato l'impianto di Medio Cordevole con le centrali di Cencenighe, Agordo e La Stanga con una potenza complessiva di 90 000 kW. In contemporanea iniziano i lavori preliminari e di preparazione per l'enorme impianto Piave-Boite-Maè-Vajont. Tuttavia, l'arrivo imminente di un nuovo conflitto mondiale, mette nuovamente la SADE di fronte al blocco dei lavori e al termine del conflitto ad affrontare le dispendiose operazioni di ricostruzione. Riprendono dunque i lavori per completare l'impianto Piave-Boite-Maè-Vajont e iniziano anche i lavori dell'alto Cordevole e Cordevole-Mis-Piave.

Nel 1949 viene completata la diga di Pieve di Cadore e successivamente nel 1951 entra in servizio la centrale di Soverzene, inizialmente con soli due gruppi dalla potenza complessiva di 110 000 kW, che in seguito all'entrata in esercizio di tutti e quattro i gruppi, passerà a una potenza di 220 000 kW nel 1955 (Pavan, 2001). Due anni dopo, verrà approvato il progetto definitivo del "Grande Vajont" dopo una lunga serie di varianti presentate per poter incrementare la capacità del bacino, si giunge all'innalzamento della diga da 200 a 266 metri, triplicando la sua capacità inizialmente concepita di 58 milioni di metri cubi. In seguito alla costruzione del Vajont e alla nazionalizzazione della produzione elettrica, nasce l'Ente Nazionale di Energia Elettrica (ENEL) che incorporerà in breve tempo la SADE, e tutti i relativi impianti, nel dicembre del 1962. Se fino a quel momento lo sviluppo e la costruzione di opere destinate alla produzione di energia idroelettrica nel corso del fiume Piave ha seguito andamenti di crescita vertiginosi, in seguito al fatidico 9 ottobre 1963, subirà un sostanziale arresto. Iniziò un periodo da cui non fu più possibile riprendersi completamente (De Bon & Petri, 2013). Dopo il disastro del Vajont, infatti, venne impedita la realizzazione di nuovi invasi, non solo di quelli già in programma, come quelli della Val Visdende e di Sappada, ma anche quelli in cui i lavori erano già partiti, come l'impianto di Digonera che *"lasciò dietro di sé i boschi spogliati, le gallerie di derivazione, la base dello sbarramento, le*

spalle di carico abbarbicate con le loro gettate di cemento sulla roccia” (Reberschak, 1985, come citato in De Bon & Petri, 2013, p.106). Nel periodo successivo al Vajont, fino ad arrivare a periodi più recenti, ci si concentrò quasi esclusivamente all’ammodernamento dei vecchi impianti per migliorarne l’efficienza e la resa (Reberschak, 1985, come citato in De Bon & Petri, 2013).

Ad oggi l’ENEL sfrutta le acque del Piave e dei suoi affluenti, dalla sorgente a 2037 m s.l.m. fino a Nervesa della Battaglia in provincia di Treviso. Nel complesso sono presenti due sbarramenti fluviali, 14 dighe e oltre 80 altre opere di captazione che permettono il funzionamento di circa 40 impianti; un sistema in grado di produrre mediamente l’energia consumata da circa due milioni di persone; tuttavia, è necessario considerare che ciò comporta lo stravolgimento di un intero bacino idrografico con conseguenti danni ad ecosistemi e l’aumento dei rischi idrogeologici.

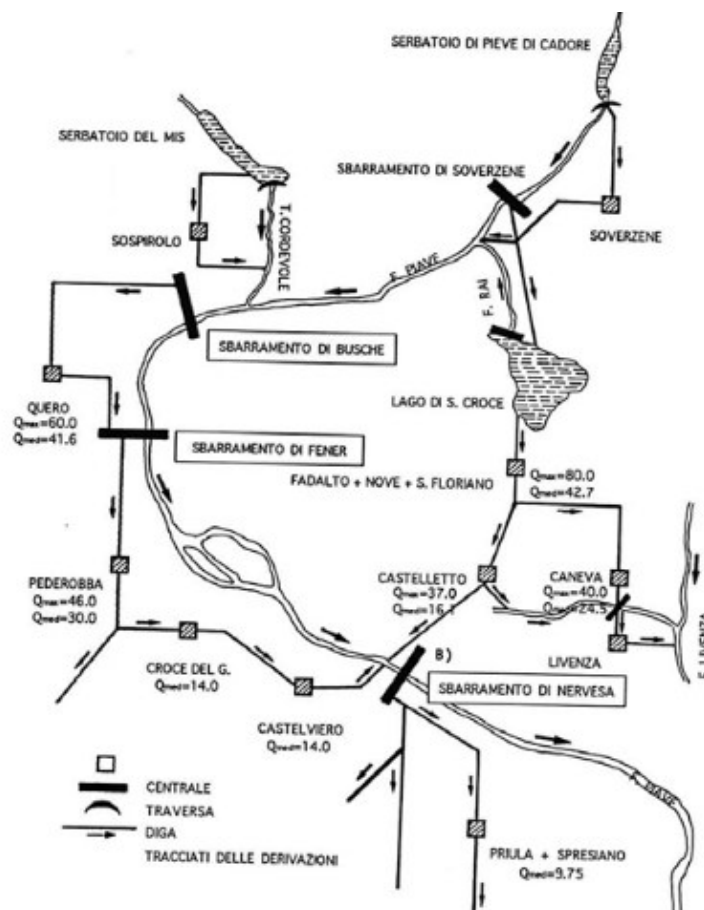


Figura 1: Disposizione generale delle principali derivazioni e degli impianti nel bacino del Piave.

2 Cenni teorici sulle centrali idroelettriche

Si definisce come impianto idroelettrico l'insieme di opere idrauliche, macchinari, edifici e servizi, destinato alla trasformazione di energia idraulica in energia elettrica. Il funzionamento di massima è quello di convertire l'energia potenziale e cinetica dell'acqua, precedentemente derivata da una corpo idrico, in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. Questo passaggio avviene grazie a opere ingegneristiche in strettissima correlazione tra loro, nel caso più generale possibile è costituito dalle seguenti opere fondamentali: le opere di sbarramento e di presa, cui seguono le opere di adduzione, tra cui troviamo il condotto deviatore, la vasca di carico (o pozzo piezometrico nel caso di adduzione in pressione) e la condotta forzata, e infine la centrale idroelettrica e le opere di restituzione (Tanzini, 2013).

Il presente capitolo ha come scopo principale quello di studiare le principali nozioni sul funzionamento di un impianto per poter proseguire nel capitolo successivo all'analisi dell'intero sistema dell'asta Piave-Santa Croce. La struttura cercherà di seguire ideologicamente il flusso che l'acqua segue da monte a valle, dalla captazione alla restituzione. In particolare, verranno descritte dapprima le varie tipologie di impianto in base al principio di funzionamento: impianti ad acqua fluente, a bacino e a pompaggio. Successivamente si passerà dalle opere di presa e adduzione per poi arrivare alla sala macchine con la trattazione delle principali tipologie di turbine idrauliche, fino a giungere alle opere di restituzione della portata sottratta. Infine, si discuterà sul rendimento e l'efficienza di una centrale andando ad evidenziare gli aspetti di influenza più significativi.

2.1 Classificazione degli impianti

Prima di analizzare le diverse tipologie di impianti in relazione a come questi ultimi sfruttano la risorsa idrica, si considera innanzitutto uno schema di massima che verrà preso come riferimento (Fig. 2).

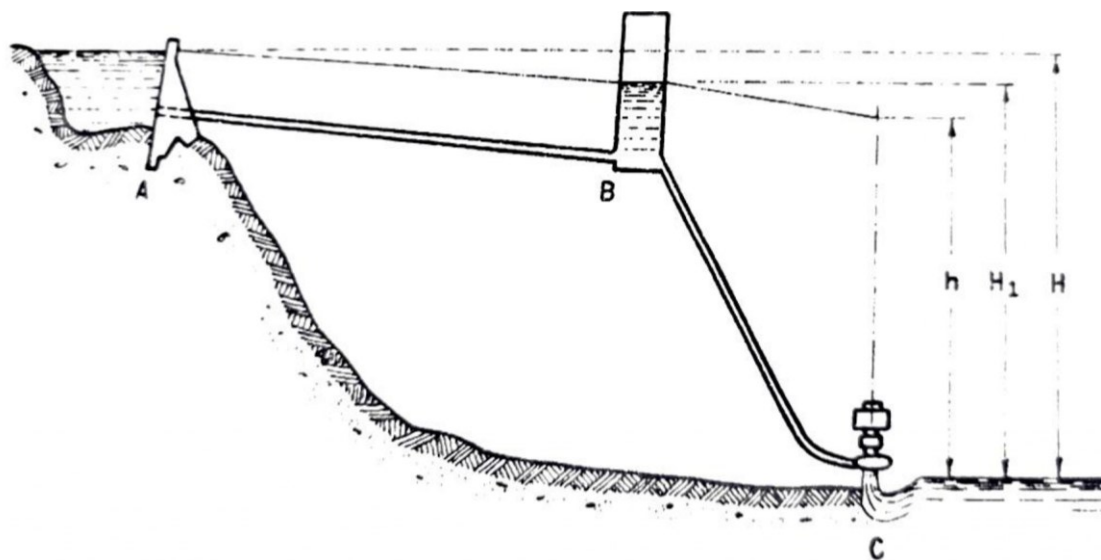


Figura 2: Impostazione schematica di un impianto idroelettrico.

Si immagini che il tratto AC rappresenti il profilo longitudinale di un corso d'acqua. In corrispondenza di A vi sono tutte quelle opere necessarie alla derivazione di una certa portata d'acqua che verrà successivamente restituita mediante specifiche opere nel punto C (Evangelisti, Impianti Idroelettrici, 1982). Il dispositivo di adduzione è l'insieme di apparecchi che permette di condurre l'acqua dalla presa alla restituzione. Il dislivello presente tra i punti A e C viene detto caduta o salto naturale dell'impianto. Le opere di adduzione hanno come obiettivo principale quello di ridurre al minimo le perdite di carico per massimizzare il salto utile lordo e conseguentemente anche il salto utile netto (Evangelisti, 1982). A questo fine l'intero dispositivo di adduzione è di norma suddiviso in due parti: la prima costituita dal tratto AB con pendenze molto basse in modo tale da poter giungere il più vicino possibile al punto C conservando il maggior dislivello possibile, la seconda parte invece più ripida possibile per poter concentrare la quasi totalità del salto complessivo. Il primo tratto AB può essere a pelo libero o in pressione, mentre il secondo deve essere necessariamente in pressione e proprio per questo motivo prende il nome di condotta forzata (Evangelisti, 1982). A seconda del fatto che il tratto

AB sia a superficie libera o in pressione, la vasca a superficie libera presente nel punto B verrà denominata e dimensionata diversamente. Quest'ultima nel caso in cui il tratto AB sia in pressione prenderà il nome di bacino di accumulazione o vasca di carico; mentre nel secondo caso verrà detta vasca d'oscillazione o pozzo piezometrico (Evangelisti, 1982).

Prima di procedere con le diverse classificazioni, è opportuno richiamare le grandezze fondamentali che governano la produzione idroelettrica. La potenza teorica producibile è funzione della portata derivata e del salto disponibile secondo la nota relazione:

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h \cdot \eta \quad (1)$$

dove ρ è la densità dell'acqua ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$), g l'accelerazione di gravità, Q la portata turbinata, h il salto netto e η il rendimento complessivo dell'impianto, dato dal prodotto dei rendimenti idraulico, meccanico ed elettrico e generalmente compreso tra 0,80 e 0,90 (Evangelisti, 1982). In tale relazione è fondamentale distinguere tra salto lordo, pari al dislivello geodetico tra il pelo libero di monte e quello di valle, e salto netto, ottenuto sottraendo al primo le perdite di carico, distribuite e localizzate, che la corrente subisce lungo le opere di adduzione. È proprio sul salto netto, e non su quello lordo, che si calcola la potenza effettivamente disponibile alle turbine. L'energia producibile in un dato intervallo temporale è invece dipendente, oltre che dalle caratteristiche dell'impianto, dalla disponibilità idrica e dalla modalità di esercizio adottata.

Avendo presente le suddette nozioni di base, secondo Tanzini (2013) è possibile classificare gli impianti in base all'altezza del salto teorico:

- impianti a bassa e bassissima caduta, con salto fino a 20 metri;
- impianto a media caduta, con salto compreso tra 20 e 200 metri;
- impianto ad alta caduta, con salto che supera i 200 metri;
- impianti ad altissima caduta, con salto superiore ai 1000 metri.

Un ulteriore criterio mediante cui è possibile classificare gli impianti idroelettrici è il punto di vista funzionale, nonché il principio di funzionamento e le modalità di sfruttamento della risorsa idrica. Si possono distinguere le tipologie descritte qui in seguito.

2.1.1 Impianti ad acqua fluente

Sono considerati impianti ad acqua fluente tutti quelli che sfruttano il naturale flusso di acqua all'interno di grandi fiumi, senza alterarne dunque il regime di portata naturale. Questi impianti fanno del loro punto di forza le grandi portate disponibili per sopperire agli esigui salti idraulici. In questi impianti spesso il fiume viene sbarrato grazie a una traversa fluviale nelle cui immediate vicinanze sorgono le altre opere di presa e adduzione che deviano parte della portata del fiume verso la centrale, senza che vi sia un volume di regolazione considerevole. Proprio per questo la produzione energetica di questi impianti non è costante ma dipende dalla portata istantanea del corso d'acqua, seguendo dunque l'andamento imposto dalle condizioni idrologiche naturali. Le portate derivate, una volta turbinate, vengono restituite direttamente e completamente al corpo idrico da cui erano state precedentemente sottratte, evitando di fatto delle gravi alterazioni idrologiche del corso d'acqua. È proprio questa una delle caratteristiche più rilevanti degli impianti ad acqua fluente, che li rende degli impianti a ridotto impatto ambientale rispetto alle precedenti due categorie. Tuttavia, dal punto di vista dell'efficienza produttiva viene a mancare, infatti, la possibilità di regolazione delle portate il che determina, come già detto, una forte dipendenza dalle condizioni idrologiche stagionali.

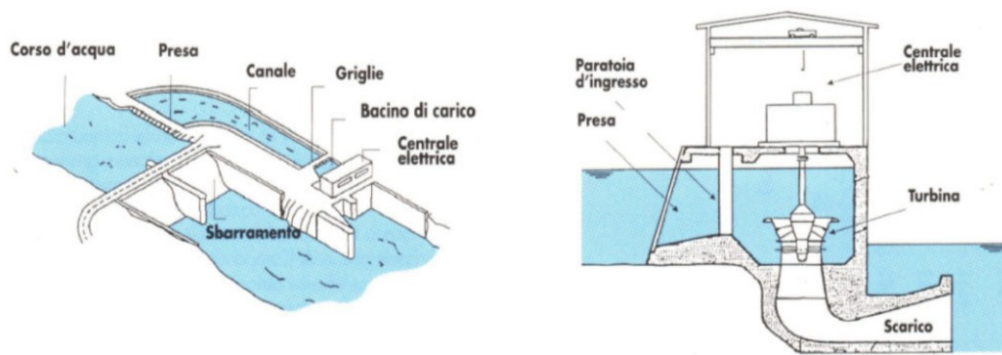


Figura 3: Schema funzionamento di un impianto ad acqua fluente.

2.1.2 Impianti a bacino e a serbatoio

Gli impianti a bacino sono tra i più classici degli impianti idroelettrici, questi sfruttano l'energia potenziale posseduta dall'acqua contenuta all'interno di un bacino di invaso, solitamente artificiale, creato grazie a uno sbarramento. Tale bacino viene alimentato da afflussi naturali, e non, e ha la funzione di dare flessibilità nella programmazione temporale della produzione energetica; questo perché permette di

accumulare la risorsa idrica nei momenti in cui è abbondante, andando a compensare la variabilità delle portate defluite nei corsi d'acqua nei momenti di secca, in modo da poterla rilasciare in un regime controllato alla centrale. In tal modo si permette la regolazione temporale della produzione di energia in relazione all'andamento della domanda sia in termini giornalieri che in termini stagionali. Per questa caratteristica peculiare gli impianti a bacino sono particolarmente adatti per la gestione dei carichi di punta. La terminologia “a bacino” e “a serbatoio” non è del tutto equivalente, infatti come si vedrà in seguito, si distingue tra l'uno e l'altro a seconda del fatto che il tempo di invaso superi o meno le 400 ore.

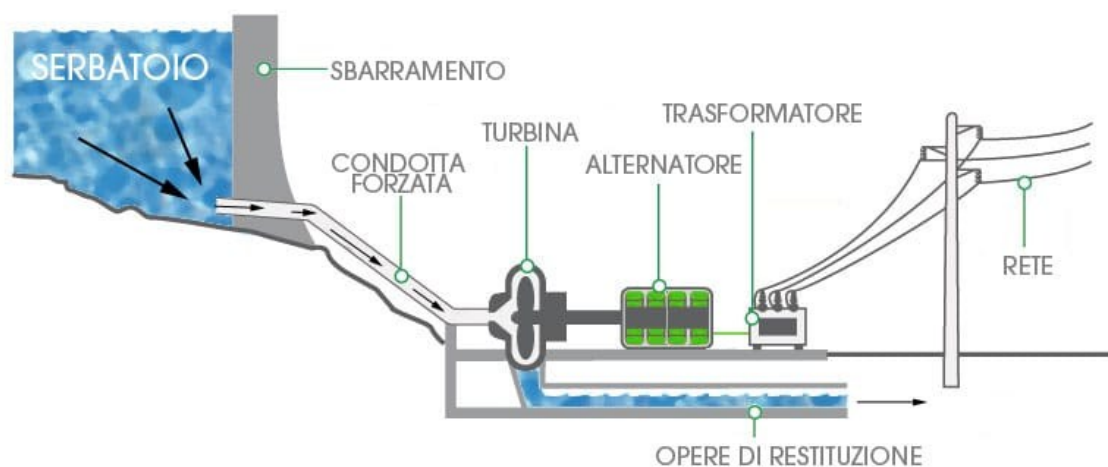


Figura 4: Schema funzionamento impianto a bacino e serbatoio.

2.1.3 Impianti a pompaggio

Possono essere definiti come dei sistemi finalizzati all'accumulo, regolazione e restituzione dell'energia elettrica mediante la movimentazione controllata di masse d'acqua tra bacini a differente quota. La principale peculiarità di questa tipologia di impianti è la capacità di poter immagazzinare energia sfruttando il dislivello tra due bacini e il *surplus* di energia prodotta nei momenti di minor domanda energetica. Infatti, il principio di funzionamento è basato su un ciclo bidirezionale: durante i periodi in cui la domanda energetica è scarsa, quella prodotta in eccesso viene sfruttata per azionare delle pompe che trasferiscono acqua dal bacino inferiore a quello superiore; accumulando di fatto energia sotto forma di energia potenziale (Manwaring, s.d.). L'acqua accumulata verrà dunque sfruttata nei periodi in cui la domanda energetica aumenta. L'acqua, infatti, è una grande fonte di accumulo e immagazzinamento di energia (International

Hydropower Association, n.d.) . La capacità gestionale della produzione è un enorme vantaggio che contribuisce all'equilibrio tra domanda e offerta di un intero sistema elettrico.

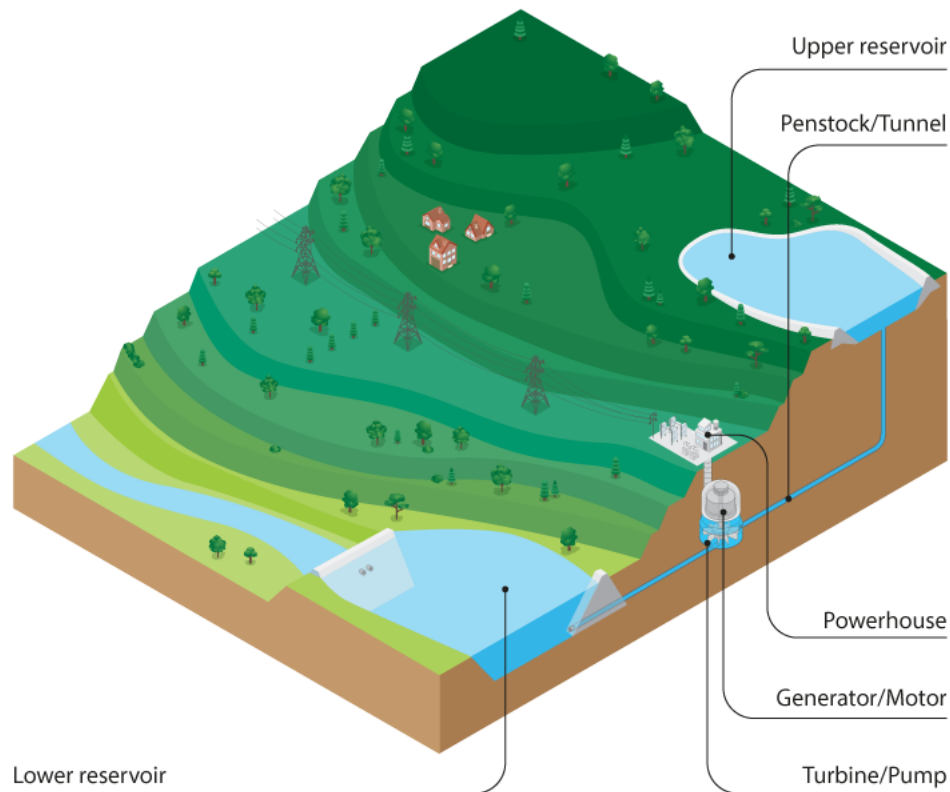


Figura5: Schema funzionamento impianto ad accumulo.

Dal punto di vista legislativo, gli impianti idroelettrici vengono classificati secondo il Decreto Ministeriale 23-06-2016, allegato 2, il quale stabilisce che *“gli impianti idroelettrici possono essere del tipo ad acqua fluente, con o senza derivazione d’acqua, a bacino e a serbatoio secondo la terminologia dell’UNIPED¹”* (Pulitano & Cavallaro, 2018, p.2) attualmente confluita nella EURELECTRIC. Di seguito viene riportata integralmente la definizione dell’UNIPED:

“Hydro-electric head installations are classified according to the use that can be made of the cumulative flow that they receive, depending on whether

¹ UNIPED: International Union of Producers and Distributors of Electrical Energy, storica associazione internazionale che definiva norme e terminologie tecniche per la produzione e distribuzione di energia elettrica, utilizzata ancora oggi per definire la classificazione degli impianti idroelettrici.

the cumulative flow must be used within a short period of time or whether it can be retained for a certain period. This criterion is based on the reservoir filling period “D” calculated using the annual characteristics mean flow.

Run-of-river head installations: These head installations normally operate in base load and use the cumulative flow continuously or receive (or use) environmental flow releases.

Storage head installations: Hydro-electric head installations storing their cumulative Flow wholly or partly in their retaining works in order to generate during hours of higher demand. According to the filling period of a reservoir it can be defined as follows: Pondage $2 \text{ hours} < D < 400 \text{ hours}$ reservoir $D \geq 400 \text{ hours}$. These head installations are normally operated in such a way as to allow load following.

By extension, when the operation of a head installation is directly related to that of a reservoir upstream and the intermediate inflows are negligible, these head installations must be considered to belong to the same category as the one which governs them”

Come riportato dalla definizione dell’ente: gli impianti idroelettrici vengono classificati in impianti ad acqua fluente e impianti ad accumulo, a seconda dell’utilizzo della portata complessiva ricevuta dall’impianto. Nel caso in cui la portata venga sfruttata in breve periodo e in modo continuativo, senza che vi sia un sistema di accumulo tra la derivazione e la restituzione, allora l’impianto ricade all’interno della categoria ad acqua fluente. Viene precisato inoltre che vengono classificati all’interno di quest’ultima categoria anche tutti quegli impianti che si trovano a valle di accumuli gestiti con finalità diverse da quelle idroelettriche in quanto non rispettano i criteri definiti per gli impianti ad accumulo (Pulitano & Cavallaro, 2018).

Un ulteriore particolare evidenziato da Pulitano & Cavallaro (2018) è la distinzione interna degli impianti ad accumulo presente nel Decreto Ministeriale del 2016. La medesima categoria, infatti, viene suddivisa ulteriormente in impianti a bacino e impianti a serbatoio. Dal punto di vista funzionale operano esattamente allo stesso modo, la differenza sostanziale risiede nel tempo di riempimento dell’invaso, D , per cui si ha che:

- se $2 < D < 400 \text{ h}$: l’impianto è considerato a bacino
- se $D \geq 400 \text{ h}$ l’impianto è considerato a serbatoio

2.2 Opere di presa

Per opere di presa si intendono tutte quelle opere dedicate alla derivazione da un corpo idrico di una determinata portata d'acqua, riducendo al minimo le perdite di carico. Rappresentano dunque la prima sezione del sistema di produzione idroelettrica: il punto di interfaccia tra l'impianto e l'ambiente. Un'ulteriore funzione, di altrettanta importanza, è quella di regolare la portata defluita, in modo da permettere ai tratti successivi di operare sotto regimi controllati (European Small Hydropower Association [ESHA], 2007). Le opere di adduzione, invece, comprendono l'insieme di tutte le infrastrutture che hanno il compito di trasportare l'acqua captata (dalle opere di presa) fino all'edificio di centrale (Evangelisti, 1951). L'ultimo tratto delle opere di adduzione, come verrà visto nei paragrafi successivi, coincide con il tratto di condotta forzata. A seconda che quest'ultima sia o meno alimentata direttamente dalla presa si distinguono le prese dirette da bacino e opere di derivazione propriamente dette. Nelle seconde la presa alimenta dei canali, a pelo libero o in pressione, che solitamente sfociano in un bacino di carico (ESHA, 2007). Anche se lieve la distinzione tra opere di presa e adduzione risulta fondamentale, in quanto il secondo gruppo di opere non interviene direttamente sulla captazione, bensì sulla minimizzazione delle perdite di carico, al fine di poter massimizzare il salto utile netto.

Di seguito verranno approfondite separatamente, nonostante la strettissima correlazione tra le due funzioni.

2.2.1 Opere di sbarramento: dighe di ritenuta e traverse fluviali

Le prime opere di interfaccia tra l'impianto e l'ambiente risultano essere le opere di ritenuta, che hanno il compito di trattenere e regolare il livello dell'acqua a monte dell'impianto. Nel caso dei più importanti impianti ad accumulo, l'invaso viene creato artificialmente tramite una diga di ritenuta, mentre nel caso di impianti ad acqua fluente la presa è garantita da una traversa fluviale che, come si vedrà in seguito, potrà essere fissa o mobile.

La normativa italiana non riporta una definizione ufficiale né della parola “diga” né di “traversa fluviale”, per questo motivo si fa riferimento alla letteratura tecnica che le fornisce per entrambe rispettivamente in maniera sostanzialmente univoca:

- Diga: “opera che, sbarrando una sezione di un corso d’acqua, ne intercetta i deflussi e ne provoca l’accumulazione temporanea nel tronco della valle che precede la sezione sbarrata” (Ghinami, n.d., p.2).
- Traversa fluviale: “uno sbarramento che determina un rigurgito contenuto nell’alveo del corso d’acqua, con la finalità di innalzare il livello di monte per favorire la derivazione delle acque” (Ghinami, n.d., p.2).

Facendo riferimento a queste due definizioni, sono soggette alla disposizione di legge sulla costruzione e sull’esercizio degli sbarramenti di ritenuta: le dighe, le traverse fluviali, le dighe di laminazione, le casse di espansione in linea, le opere di ritenuta destinate alla formazione di serbatoi idrici artificiali fuori alveo. Per i particolari casi delle dighe di laminazione e delle casse di espansione in linea, le norme regolamentari sono programmate da accordi tra le autorità idrauliche regionali e Direzione Dighe del MIT² (Ghinami, n.d.).

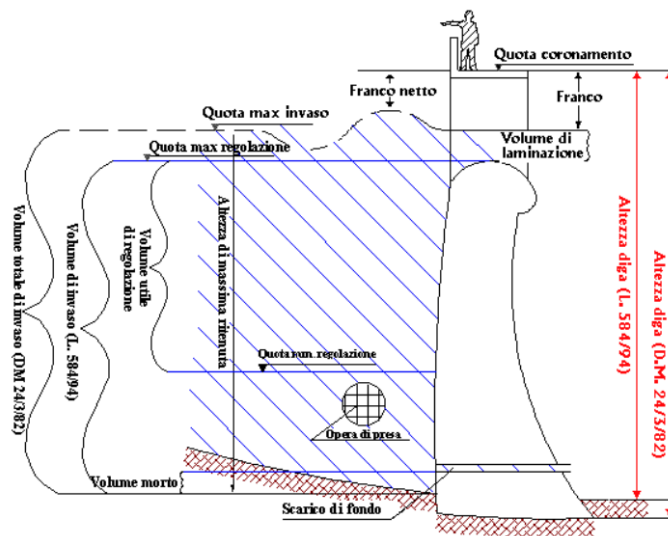


Figura 3: schematizzazione parametri di una diga.

Oltre a queste prime definizioni, per quanto concerne le disposizioni sulla costruzione e sull’esercizio degli sbarramenti di ritenuta sono di fondamentale importanza due parametri:

- l’altezza della diga, definita come “la differenza tra la quota del piano di coronamento, ovvero del ciglio più elevato di sfioro nel caso di traverse prive

² MIT: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

di coronamento, e quella del punto più depresso dei paramenti da individuare su una delle due linee di intersezione tra paramenti e piano di campagna” (Circolare P.C.M. 13 dicembre 1995, n. DSTN/2/22806)

- volume di invaso, definito come “la capacità del serbatoio compresa tra la quota più elevata delle soglie sfioranti degli scarichi, o della sommità delle eventuali paratoie (quota di massima regolazione), e la quota del punto più depresso del paramento di monte da individuare sulla linea di intersezione tra detto paramento e piano di campagna” (Circolare P.C.M. 13 dicembre 1995, n. DSTN/2/22806)

In base a questi due parametri, infatti, una diga viene inquadrata come “grande” o “piccola”, assegnandone di conseguenza la competenza e la gestione rispettivamente allo Stato nel primo caso e alle Regioni, o Province autonome, nel secondo (Calcaterra, Gambino, & Niceforo, 2025). Come riportato dalla Legge 21 ottobre 1994, n. 584, vengono identificate come grandi dighe e dunque di competenza statale *“le opere di sbarramento, dighe di ritenuta o traverse che superano 15 metri di altezza o che determinano un volume di invaso superiore a 1'000'000 di metri cubi”* (Legge 21 ottobre 1994, n. 584, art. 1); mentre la competenza delle piccole dighe *“gli sbarramenti che non superano i 15 metri di altezza e che determinano un invaso non superiore a 1'000'000 di metri cubi”* (Legge 21 ottobre 1994, n. 584, art.1) è assegnata a Regioni e province autonome.

Oltre a questa distinzione prettamente amministrativa, il Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 26 giugno 2014 (di seguito D.M. II. TT. 26 giugno 2014) definisce le “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)”. Risulta dunque il testo di legge di riferimento per prescrizioni tecniche di dettaglio relative ai parametri di dimensionamento ed esercizio delle diverse tipologie di sbarramento (Ghinami, n.d.). Di seguito si riporta la classificazione presente, dal punto di vista funzionale, delle modalità costruttive e dei materiali impiegati:

- a. Dighe di calcestruzzo
 - a.1. a gravità
 - a.1.1. ordinarie
 - a.1.2. alleggerite
 - a.2. a volta

a.2.1. ad arco

a.2.2. ad arco-gravità

a.2.3. a cupola

b. Dighe di materiali sciolti

b.1. di terra omogenea

b.2. di terra e/o pietrame, con struttura di tenuta interna

b.3. di terra e/o pietrame, con struttura di tenuta esterna

c. Traverse fluviali

d. Dighe di tipo misto e di tipo vario

Per quanto concerne le dighe di calcestruzzo, la tenuta viene garantita dal peso del corpo dello sbarramento. Solamente in casi particolari la tenuta è assicurata da ulteriori dispositivi presenti. Per le opere in calcestruzzo ordinario, e non solo, il materiale cementizio utilizzato deve avere la composizione più adatta per soddisfare la resistenza meccanica a lunga maturazione, per sopportare il calore di idratazione e per le azioni chimiche. Per questo vengono generalmente preferiti cementi pozzolanici a basso calore di idratazione, a lenta presa e lento incremento della resistenza (D.M. II. TT. 26 giugno 2014). Oltre ai calcestruzzi ordinari possono essere utilizzati anche quelli rullati. Il calcestruzzo rullato (RCC) è un conglomerato costituito da acqua, aggregati e leganti posto in opera per strati continui di spessore fisso e successivamente compattati con rulli vibranti. Gli sbarramenti in calcestruzzo, sempre secondo il D.M. II. TT. 26 giugno 2014 devono, o possono avere alcuni particolari costruttivi. Innanzitutto, devono prevedere un coronamento la cui larghezza permetta il transito di mezzi idonei sia alla sorveglianza ma anche alla manutenzione, con il minimo fissato a 4 metri e alle estremità devono essere previste delle piazzole di manovra. A seconda del fatto che la diga sia o meno tracimabile, sarà presente uno scarico di superficie in corpo diga ben sagomato, in modo tale che la vena liquida sfiorante aderisca al paramento evitando fenomeni di cavitazione. Un ulteriore particolare costruttivo obbligatorio sono i cunicoli e condotti di ispezione e drenaggio. Inoltre, per le dighe in calcestruzzo rullato dovranno essere previsti dei giunti di dilatazione i quali hanno la doppia funzione di assorbire gli eventuali movimenti della

struttura per evitare la formazione di lesioni del calcestruzzo e di impermeabilizzare la fessura di installazione (Berra et al., 2013).

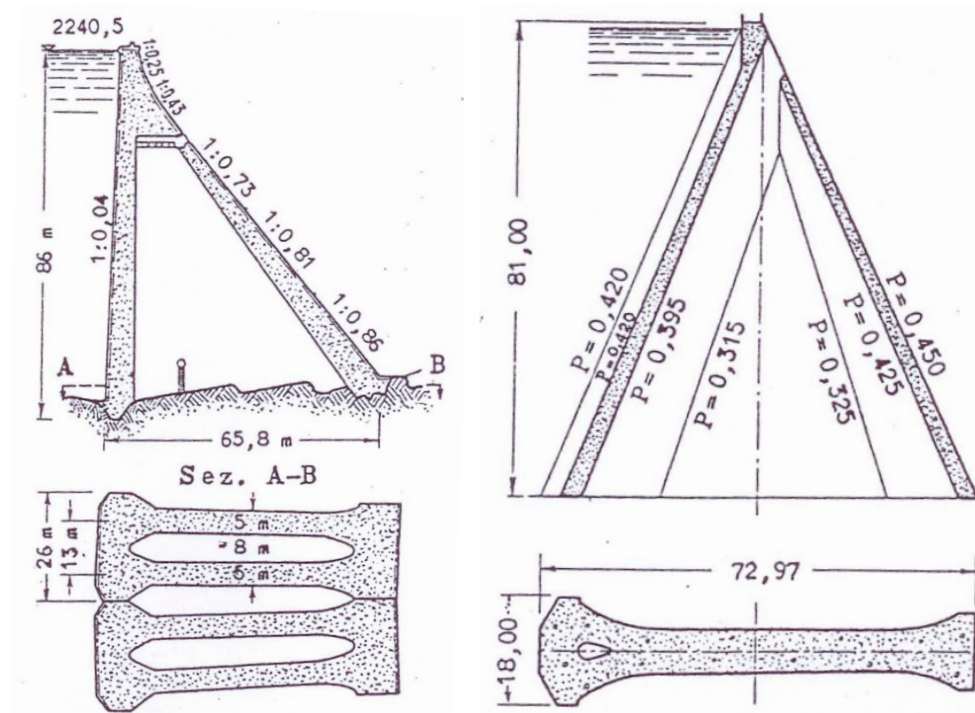


Figura 4: Esempi dighe in calcestruzzo a gravità alleggerite.

Considerando la sottocategoria delle dighe in calcestruzzo a gravità, il D.M. II. TT. 26 giugno 2014 definisce quelle a gravità ordinarie (o massicce) come “con profilo trasversale fondamentale triangolare a sezioni orizzontali piene, divise in conci da giunti permanenti, secondo piani normali al loro asse, posti a distanze sufficienti a prevenire fessurazioni da cause termiche o da ritiro” (D.M. II. TT. 26 giugno 2014, pp.43-44); mentre quelle a gravità alleggerite come “le strutture, a speroni e a vani interni, costituite da una successione di elementi indipendenti (speroni) con profilo fondamentale triangolare, a reciproco contatto lungo il paramento di monte ed, eventualmente, anche in tutto o in parte lungo quello di valle e con superfici laterali distanziate nel tratto intermedio; gli elementi possono essere pieni o cavi nel tratto mediano delle sezioni orizzontali” (D.M. II. TT. 26 giugno 2014, p.44). In quest’ultima tipologia i contrafforti hanno il ruolo fondamentale di condurre alle fondazioni gli sforzi generati dalla spinta idrostatica perpendicolare alla diga, concedendo di risparmiare una notevole quantità di materiale.

Le dighe a volta, invece, per definizione possono essere monolitiche o a conci adeguatamente bloccati, e prevedono sezioni orizzontali arcuate. La struttura inoltre viene impostata nelle pareti rocciose della gola, in modo diretto o indiretto, attraverso il pulvino³ (D.M. II. TT. 26 giugno 2014). Ovviamente questo tipo di sbarramento è ammissibile unicamente previa verifiche sulla roccia di imposta affinché sia garantita la resistenza (Evangelisti, 1982). Come visto in precedenza, il legislatore distingue dighe in calcestruzzo a volta ad arco, ad arco gravità e a cupola. Il primo tipo prevede particolari rapporti nelle sue dimensioni tali da attribuire la resistenza quasi unicamente all'effetto arco. Le dighe ad arco gravità, oltre che all'effetto arco, devono la loro resistenza in maniera rilevante al contributo del peso proprio detto effetto mensola. Le dighe a cupola invece si possono considerare come direttamente derivate dal primo tipo per un graduale incurvamento delle rette generatrici rendendole del tutto analoghe a delle piastre a doppia curvatura (Evangelisti, 1982).

Le dighe costituite da materiali sciolti sono costituite da materiali ricavati da depositi naturali idonei e messi in opera in maniera controllata al fine di raggiungere le caratteristiche prestazionali previste da progetto. Risulta evidente che le caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali deve essere dapprima verificata in fase di progetto tramite prove in sito e in laboratorio ed eventualmente supportate da modelli rappresentativi. Inoltre, in fase di costruzione dovranno essere condotti controlli sistematici per monitorare il rispetto delle specifiche progettuali come il corretto costipamento degli strati (D.M. II. TT. 26 giugno 2014). La scelta del tipo di opera dipende da vari aspetti come quelli geotecnici, la sismicità, la geomorfologia del sito, economici e costruttivi. Nel caso delle dighe in materiali sciolti ai precedenti parametri si aggiunge quello legato alla disponibilità delle risorse ovvero della presenza di depositi naturali idonei sufficientemente vicini al cantiere per poter rispettare il profilo economico previsto. Tali sbarramenti sono costituiti sostanzialmente da un rilevato che possiede un dispositivo di tenuta al suo interno oppure nel paramento di monte. Solamente nel caso

³ Pulvino: struttura di fondazione che si interpone tra il corpo della diga e la parete di roccia, lungo tutto il contorno; esso ha lo scopo di distribuire la spinta subita dalla diga sulla roccia ed anche di compensare, con la propria forma, le variazioni tra la spalla destra e sinistra in modo da rendere il profilo perfettamente simmetrico rispetto al piano verticale di mezzzeria.

di opere di minor importanza possono essere previsti dei semplici rilevati in terra a permeabilità uniforme (D.M. II. TT. 26 giugno 2014).

Per quanto riguarda gli sbarramenti fluviali il D.M. II. TT. 26 giugno 2014 li definisce come “*ogni sbarramento avente la funzione primaria di stabilizzare a un valore assegnato la quota idrica a monte*” e distingue solamente fra traverse fisse e mobili. Tuttavia, è necessario e doveroso approfondire, seppur in minima parte, l’argomento. Secondo Evangelisti (1982) la prima tipologia è costituita generalmente in materiale cementizio e per loro natura devono essere tracimabili, proprio per questo la porzione della sezione trasversale posta a valle deve essere ben sagomata in modo da permettere alla lama stramazante di adattarsi alla superficie del paramento per prevenire pericolosi fenomeni di scalzamento⁴ (problema che si presenta anche nelle dighe di ritenuta qualora siano tracimabili).

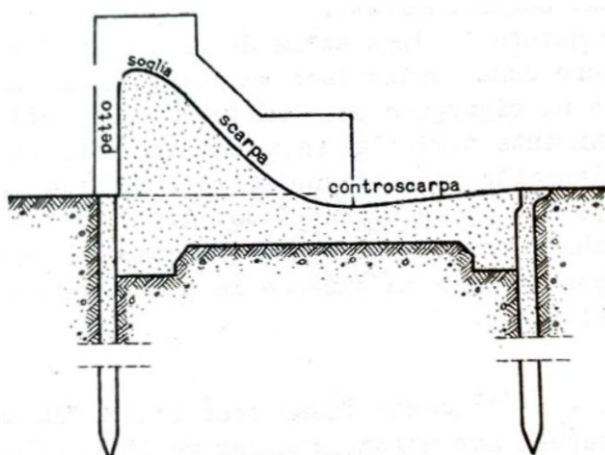


Figura 5: Schema di una sezione trasversale generica di una traversa fluviale.

Per “ben sagomata” si intende che la traversa deve seguire un profilo tale da garantire l’aderenza della lama fluente, prevenendo depressioni localizzate e gli annessi fenomeni di cavitazione. Esistono svariati profili già determinati, uno tra i più importanti e conosciuti è quello appartenente allo Scimemi. Tale profilo sagoma la soglia sfiorante secondo la forma descritta da una vena uscente da uno stramazzo in parete sottile, descritta dalla seguente equazione (Evangelisti, 1982):

⁴ Fenomeno di carattere erosivo che compromette la stabilità delle struttura a mezzo di un flusso in condizioni si elevate velocità e turbolenza.

$$\frac{y}{h_0} = K \left(\frac{x}{h_0} \right)^n \quad (2)$$

- h_0 = carico agente sulla soglia, calcolato come la differenza di quota tra il pelo libero e la cresta
- x, y = coordinate del profilo
- n = coefficiente empirico, privo di significato fisico, ma che determina la forma del profilo, influenzando la curvatura. Valori tipici si aggirano nell'intorno di 1,80
- K = coefficiente empirico che influenza la forma del profilo con un effetto scala

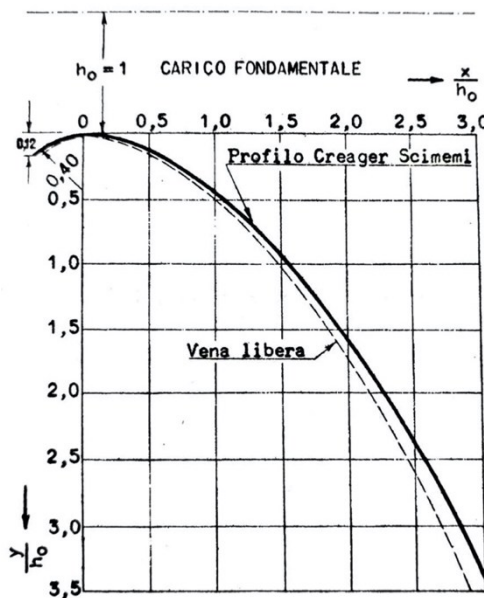


Figura 6: Confronto tra profilo Scimemi e quello della vena libera uscente da uno stramazzo in parete sottile.

Come si osserva dalla Fig.9, il profilo rispetto a quello della vena libera ha valori del rapporto $\frac{y}{h_0}$ minori e di $\frac{x}{h_0}$ maggiori determinando di conseguenza un profilo più proiettato verso valle che agisce a favore della sicurezza. Naturalmente il profilo viene determinato per i massimi valori di h_0 prevedibili e determinati a seconda del tempo di ritorno dello sbarramento e alla portata da smaltire, nonché ai dati disponibili (Evangelisti, 1982).

Tornando al fenomeno dello scalzamento, esistono vari provvedimenti per ovviare al tale problema e risultano analoghi sia per le dighe di ritenuta tracimabili sia per le traverse fluviali. I principi su cui agiscono tali accorgimenti strutturali sono

principalmente due: il primo è quello di ridurre l'energia del flusso e il secondo è di aumentare la resistenza del fondo sia delle fondazioni sia nella sezione immediatamente a valle dello sbarramento (Kamal & Sadek, 2018). Tra i principali interventi possibili si evidenzia la creazione di bacini di dissipazione con lo scopo di localizzare e forzare la formazione di un risalto idraulico che dissipi la maggior parte dell'energia della lama fluente. Ipotizzando che il canale a valle dello sfioro sia rettangolare Evangelisti (1982) propone il seguente approccio: con buona approssimazione la velocità in una sezione immediatamente a monte del risalto (sezione 1) è pari a v_1 .

$$v_1 = \sqrt{2gH} \quad (3)$$

H è pari alla caduta totale misurata dal pelo libero. Sapendo inoltre che q è la portata per unità di lunghezza della soglia, è possibile ricavare l'altezza del tirante nella sezione 1 come:

$$h_1 = \frac{q}{\sqrt{2gH}} \quad (4)$$

Conseguentemente si ricava anche l'altezza coniugata (h_2) nella sezione immediatamente successiva al risalto (sezione 2) secondo la seguente equazione:

$$h_2 = -\frac{h_1}{2} + \sqrt{\frac{2q^2}{gh_1} + \frac{h_1^2}{4}} \quad (5)$$

Il tirante nella seconda sezione, può presentarsi nel concreto in due differenti modalità a seconda delle caratteristiche idrauliche del recapito a valle, o meglio, dal fatto che il deflusso di quest'ultimo sia o meno svincolato dal funzionamento del dissipatore. Il linea generale per quanto riguarda le alte dighe tracimabili il deflusso del recapito di valle viene svincolato da quello del bacino di dissipazione tramite una piccola soglia; mentre per le traverse fluviali ciò non si verifica e risulta necessario tener conto del rigurgito da valle. In modo particolare la condizione che deve essere rispettata affinché sia garantita la formazione e la stabilità del risalto al piede dello sbarramento è:

$$h_2 + \frac{q^2}{2gh_2^2} \leq h_3 + \frac{q^2}{2gh_3^2} + a \quad (6)$$

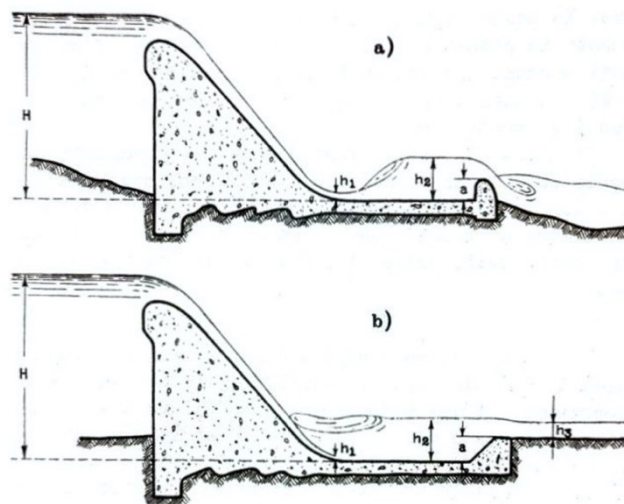


Figura 7: Due configurazioni possibili per localizzare il risalto idraulico a valle della diga.

Per incentivare l'effetto di dissipazione l'energia del flusso a valle della soglia sfiorante, una soluzione spesso adottata è l'installazione di appositi ostacoli come denti dissipatori o deflettori (Kamal & Sadek, 2018). Questo tipo di elementi vengono installati in maniera complementare al bacino di dissipazione lungo la platea o sullo spigolo a valle in modo da imprimere una certa inclinazione verso l'alto al getto in uscita (Evangelisti, 1982).

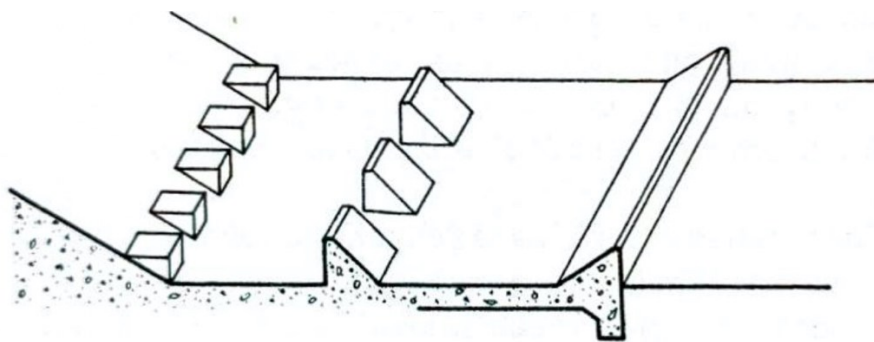


Figura 8: Diverse tipologie di denti di dissipazione.

In alternativa, ma più spesso come azioni combinate, devono essere previsti rivestimenti del fondo con massi o platee in calcestruzzo in modo tale da aumentare la resistenza del fondo all'erosione (Kamal & Sadek, 2018).

Altre problematiche, oltre quella dello scalzamento, che si presentano per questa tipologia di opere sono quelle relative a fenomeni di filtrazione che si instaurano nel sottosuolo a causa della repentina differenza di quota generata dalla traversa stessa o in generale dalle dighe di qualsiasi tipologia (Freeze & Cherry, 1979). Questi fenomeni, se

non ben controllati e monitorati, possono provocare pericolose conseguenze sulla stabilità della struttura. Il problema viene generalmente affrontato tramite il *grouting* ovvero, una tecnica che consiste nell'iniezione di un agente sigillante, detto *grout*, nei giunti permeabili delle rocce di fondazione (Freeze & Cherry, 1979). Questa operazione viene condotta per tre motivazioni: per ridurre le perdite sotto la diga, per rafforzare le fondazioni in rocce fratturate e infine per ridurre le sottospinte idrauliche. Per giungere a questi fini, vengono adottate due metodologie di *grouting*: la prima segue delle iniezioni di consolidamento delle fondazioni; mentre la seconda prevede iniezioni finalizzate alla formazione di un diaframma detto anche taglione (Freeze & Cherry, 1979). Il loro scopo è quello di influenzare il campo di moto filtrante, allungando le linee di flusso con conseguente riduzione del gradiente idraulico agendo così a favore della resistenza idraulica del sottosuolo e sulla stabilità della fondazione stessa. Come si osserva dalle Fig. 12b e 12-c, l'utilizzo dei diaframmi alterna notevolmente il reticolo di flusso e dal punto di vista teorico il profilo delle sottospinte viene significativamente ridotto. Tuttavia, anche i diaframmi possiedono una certa conducibilità idraulica, seppur di valore molto ridotto, per questo motivo i profili teorici delle sottospinte idrauliche non vengono del tutto rispettati (Casagrande, 1961). La riduzione delle sottospinte nel caso reale risulta essere significativamente inferiore rispetto a quella teorica (Freeze & Cherry, 1979). È sempre Casagrande (1961) che evidenzia la maggior efficacia dei drenaggi per l'abbattimento delle sottospinte idrauliche ma, al tempo stesso, la presenza di un drenaggio aumenterebbe le perdite dal serbatoio rispetto a quelle che si verificherebbero in condizioni inalterate. Proprio per queste considerazioni generalmente viene previsto un sistema combinato diaframma-drenaggio, per poter ridurre le sottospinte in modo efficace tramite il drenaggio senza avere perdite dal serbatoio eccessive grazie al diaframma (Freeze & Cherry, 1979).

Oltre alle traverse fluviali fisse sono molto utilizzate quelle del tipo mobile, specialmente nei casi in cui il rigurgito provocato a monte deve essere di modesta entità per ragioni di sicurezza. Questi sbarramenti trovano moltissimi impieghi nell'ingegneria idraulica, e nella maggior parte dei casi vengono infatti utilizzate anche nelle tracimazioni di molte dighe di ritenuta. A differenza di quelle di tipo fisso, concedono una certa flessibilità operativa nella regolazione delle piene (Evangelisti, 1982).

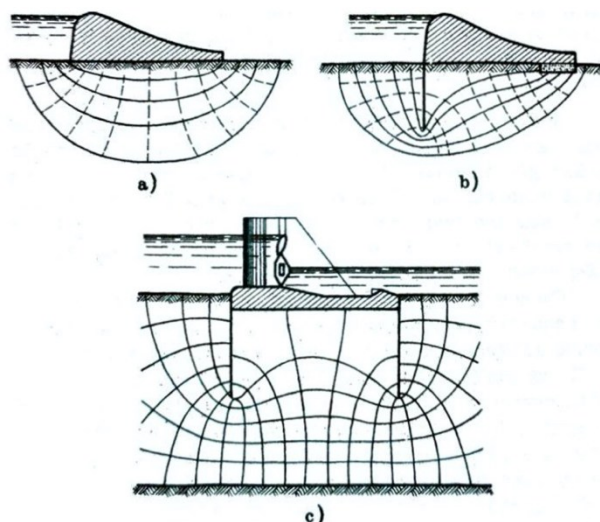


Figura 9: Esempi di reticoli di flusso con e senza diaframmi.

Di seguito vengono presentate le caratteristiche generali delle principali tipologie di paratoie mobili evidenziate da Evangelisti (1982).

- Paratoie piane: questa tipologia segue un profilo piano e solitamente sono costituite in legno o ferro. Le prime vengono impiegate in occasione di opere di minor importanza mentre nella quasi totalità degli utilizzi vengono preferite quelle in ferro.
- Paratoie cilindriche: l'organo di sbarramento risulta essere un tubo metallico orientato orizzontalmente, la cui sezione viene modificata con un becco, o scudo, nella parte inferiore rivolta verso l'alveo per permettere di aumentare l'altezza di ritenuta⁵. Il vero vantaggio di questa tipologia di paratoia mobile sta nel fatto di poter coprire luci notevoli anche con un singolo elemento, tuttavia sono adatte per ritenute modeste, che si aggirano cioè tra gli 8-9 metri. Questa proprietà è dovuta proprio alla forma della sezione trasversale che permette di avere un forte momento di inerzia, il che concede una grande predisposizione alla resistenza a flessione. È anche la forma stessa ad agevolare le manovre di sollevamento, riducendo notevolmente gli sforzi (Evangelisti, 1982).

⁵ Altezza di ritenuta: differenza tra la quota del pelo libero a monte e quella di riferimento dello sbarramento.

- Paratoie a settore: la paratoia vera e propria in questo caso ha la forma di un settore circolare, in quale ruota attorno a un perno. A seconda del fatto che il suo funzionamento sia a luce sotto battente o meno possiamo chiamarle rispettivamente paratoia a settore normale e paratoia a settore rovescio. Ampiamente utilizzato nelle opere di sfioro dei laghi è proprio il primo tipo. Analogamente alle paratoie cilindriche, le operazioni di movimentazione della paratoia sono facilitate proprio dalla forma della paratoia, la quale permette di sfruttare parte della spinta idrostatica esercitata su di essa per agevolare il sollevamento (Evangelisti, 1982).
- Paratoie a ventola: la ventola risulta essere girevole attorno a un asse orizzontale incernierato sulla soglia dello scaricatore. Nella posizione di chiusura la ventola risulta essere inclinata rispetto alla verticale. Proprio tramite la regolazione di quest'angolo è possibile agire il carico idraulico⁶ applicato a monte della paratoia. Trovano ampio utilizzo come scaricatori nei coronamenti di dighe per la loro semplicità di utilizzo e per il loro vantaggio a livello economico (Evangelisti, 1982).

2.2.2 Derivazione da lago artificiale

La presa da lago artificiale può ricondurre a svariate casistiche e ogni complesso avrà le sue singolari caratteristiche, proprio per questo non vi è una soluzione univoca quanto piuttosto quella più idonea caso per caso. Va considerato che la presa deve poter garantire il deflusso minimo vitale (DMV) del lago, ovvero la portata minima che deve essere lasciata defluire a valle dello sbarramento ai fini di tutelare l'ecosistema fluviale. Proprio per la sua definizione viene anche identificato con la sigla FE ovvero flusso ecologico (Comitato Nazionale Italiano Grandi Dighe [ITCOLD], 2016). In generale, per le peculiarità che un bacino di accumulo concede, di norma, si preferisce la derivazione in pressione che, sostanzialmente, è costituita da un condotto con relativi organi di chiusura che si sviluppa all'interno della diga di ritenuta oppure all'esterno nelle pendici del lago

⁶ Carico idraulico: energia posseduta dall'acqua espressa in termini di altezza di colonna d'acqua. Il contributo è il risultato del trinomio di Bernoulli, nonché dalla somma tra i contributi del carico geodetico, carico idrostatico e il carico cinetico.

(Evangelisti, 1982). Storicamente la derivazione da lago artificiale veniva condotta in due modalità conosciute come sistema spagnolo e sistema francese (Evangelisti, 1982). Il sistema spagnolo consiste in un unico condotto con una valvola di chiusura nel tratto iniziale o terminale, in questo modo la diga non viene indebolita ma l'intero carico agisce sull'unica valvola. In passato, questo poteva risultare un problema per le operazioni di apertura e chiusura, le quali richiedevano sforzi e tempistiche troppo elevati. Quello francese, invece, prevede più condotti posti ad altezza differente in modo da effettuare la presa dal condotto più vicino al pelo libero (Evangelisti, 1982). Al contrario del sistema spagnolo, questo presenta problematiche e vantaggi opposti; infatti, le operazioni di manovra sono facilitate a discapito della robustezza dello sbarramento. Si adottarono anche soluzioni combinate, che generarono delle disposizioni dette a torre di presa secondo le quali pur avendo un unico condotto attraverso la diga, la presa veniva effettuata a diverse altezze (Evangelisti, 1982). Ovviamente i costi elevati legati a quest'ultima soluzione uniti ai progressi tecnologici, portarono ad adottare nella quasi totalità dei casi le soluzioni a unico condotto di presa. La presa inoltre è di norma protetta da una griglia per evitare l'ingresso di materiali estranei.

Oltre alla presa, esiste una serie di opere fondamentali per il funzionamento di un lago artificiale. Tra queste si trovano gli scaricatori di superficie e di fondo. I primi hanno la funzione di smaltire le onde di piena nel caso in cui il lago si già invasato mentre i secondi hanno la funzione di rimuovere le particelle di terreno con granulometria fine trasportate dal corso d'acqua fino al lago e depositate a ridosso dello sbarramento (Evangelisti, 1982). Esistono varie tipologie di scaricatori di superficie, nel caso in cui siano posti in corrispondenza della diga e quest'ultima sia tracimabile è possibile smaltire l'onda di piena grazie agli stramazzi presenti. Un altro organo è il sifone autolivellante che, grazie al suo funzionamento, entra in azione solamente negli ultimi istanti senza la necessità di componenti mobili; tuttavia, è soggetto a intasamento da parte del materiale trasportato dalla piena (Evangelisti, 1982). Esistono inoltre delle soluzioni separate dal corpo della diga e che prevedono di restituire la portata sottratta sufficientemente a valle dello sbarramento per evitare eventuali danni. Un esempio di questa tipologia di scarichi di superficie sono gli stramazzi a calice (Evangelisti, 1982).

2.2.3 Derivazione da corso d'acqua naturale

La presa dai corsi d'acqua naturali viene eseguita generalmente attraverso luci poste in fregio all'alveo. Le altre opere ausiliarie alla presa hanno il compito sostanziale di rendere le acque il più limpide possibile. In particolare, le griglie applicate alle bocche di presa evitano l'entrata di corpi grossolani e galleggianti, e per ridurre la presenza di materiali medio-fine vengono dimensionati degli appositi bacini di sedimentazione che prendono il nome di bacini di calma (Evangelisti, 1982). In sintesi, il complesso delle opere di derivazione in alveo è costituito dunque, oltre che dalla traversa di sbarramento, anche da:

- bocche di presa (munite di paratoie e griglie)
- bacini di calma (con relativi scarichi di fondo e di superficie)
- imbocco del canale derivatore, anch'esso munito di paratoie

Come accennato in precedenza, i bacini di calma hanno geometria variabile, la loro superficie dipende dallo stato di torbidità del corso d'acqua in quanto i parametri cardine del loro dimensionamento sono il tempo di sosta e la velocità dell'acqua al loro interno. Tuttavia, dal punto di vista generale Evangelisti (1982) afferma che si possono presentare sostanzialmente due casistiche principali: la prima nel caso in cui le condizioni naturali di torbidità siano già buone, in questo caso risulta sufficiente un unico bacino di calma; diversamente nel caso in cui si abbiano livelli di torbidità elevati saranno necessarie due vasche. In quest'ultimo caso nella prima vasca avviene il deposito dei materiali più grossolani, per questo motivo prende il nome di bacino sgrossatore; mentre la seconda è adibita alla sedimentazione del materiale più fine come sabbie e limi, e prende il nome di bacino di sedimentazione o anche canale moderatore. Solamente nel caso in cui nessuno di tali provvedimenti dovesse essere sufficiente si ricorre a mezzi assai più costosi ma efficaci come i dissabbiatori (Evangelisti, 1982).

2.3 Opere di adduzione

Nel presente capitolo verranno analizzati gli elementi che seguono la presa sino all'edificio di centrale. Come accennato precedentemente, l'adduzione si trova spesso a dover ricoprire lunghezze considerevoli e per questo, di norma, è divisa in due tratti. Il

primo con scarsa pendenza conduce l'acqua il più vicino possibile alla centrale cercando di minimizzare le perdite di carico. Generalmente questo tratto può essere sia in pressione che a pelo libero. Nella seconda parte dell'adduzione invece si concentra tutto il salto disponibile in una condotta in pressione chiamata condotta forzata che alimenta le turbine idrauliche in centrale (Evangelisti, 1951). Le due porzioni sono inoltre collegate tramite un bacino a pelo libero che, a seconda che il primo tratto sia o meno in pressione, prende il nome di bacino di accumulazione (o vasca di carico) nel primo caso oppure di pozzo piezometrico o vasca d'oscillazione nel secondo (Evangelisti, 1982). Eventualmente, in casi particolari in cui la centrale si trova nei pressi della presa, è possibile passare direttamente dalla presa alla condotta forzata.

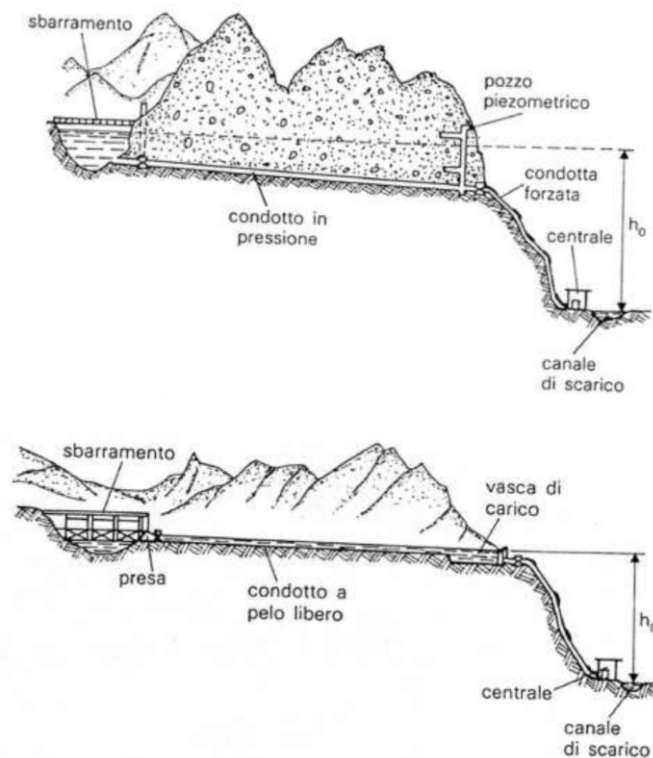


Figura 10: due possibili configurazioni dell'adduzione in relazione al fatto che il primo tratto sia a pelo libero o in pressione

Dal punto di vista prettamente idraulico l'adduzione a pelo libero, a parità di sezione liquida, permette di incrementare il perimetro bagnato e quindi di mantenere un raggio idraulico medio maggiore influenzando positivamente l'efficienza del deflusso. Oltre a questo, un ulteriore vantaggio di questa tipologia di adduzione è il costo decisamente più contenuto rispetto a quella in pressione (Evangelisti, 1951). Tuttavia, gli svantaggi sono

molteplici: primo su tutti il fatto di perdere un eventuale battente d'acqua in corrispondenza della presa, non può essere dunque sfruttato il carico creato dal bacino a monte. Inoltre, la pendenza del canale risulta essere vincolata stabilmente alla pendenza motrice per evitare eventuali rigurgiti. I canali a pelo libero rispondono con lentezza alle continue variazioni di portata conseguenti alla regolazione in centrale; tali perturbazioni, infatti, si propagano da valle verso monte con una velocità di avanzamento pari ad a con valore nell'ordine dei $6 \div 8 \text{ m/s}$ secondo la seguente relazione:

$$a = \sqrt{gh} \quad (7)$$

Differentemente accade nelle adduzioni in pressione in cui le perturbazioni di carattere elastico, dovute a fenomeni di moto vario, raggiungono anche valori nell'ordine del migliaio di metri al secondo (Evangelisti, 1951). Inoltre, quest'ultima tipologia di adduzione non presenta alcun vincolo nella pendenza a livello planimetrico e altimetrico, pertanto, riesce a sfruttare tutto il carico generato dalla diga e che agisce sulla presa (Evangelisti, 1951).

Per queste motivazioni, in generale le adduzioni con canale a pelo libero vengono preferite negli impianti privi di regolazione come quelli ad acqua fluente, nei quali lo svantaggio di perdere il battente d'acqua a monte non è particolarmente influente; mentre negli impianti a bacino, è di fondamentale importanza riuscire a sfruttare il salto generato dalla diga, per cui si preferisce il collegamento diretto fra presa e centrale (Evangelisti, 1951). In entrambe i casi il sistema risente di forti benefici dovuti all'installazione di un bacino a pelo libero che funga da intermediario tra le due tronchi dell'adduzione. Quest'ultimo permette di svincolare le portate dei due tratti, migliorando il comportamento dell'impianto nel caso di moto vario, attenuando i dannosi effetti del fenomeno del colpo d'ariete.

2.4 Condotta forzata

La condotta forzata costituisce il tratto terminale delle opere di adduzione e ha il compito di convogliare l'acqua dalla vasca di carico, o dal pozzo piezometrico, fino alle turbine in centrale (ITCOLD, 2019). È proprio in questo tratto che si concentra la quasi totalità del salto disponibile, precedentemente conservato dal tratto di adduzione a debole pendenza: l'energia di posizione dell'acqua viene gradualmente convertita in energia

cinetica (Evangelisti, 1982). Per questa ragione la condotta forzata è soggetta alle massime sollecitazioni di pressione dell'intero impianto e il suo dimensionamento, risulta di fondamentale importanza. Il tracciato può svilupparsi all'aperto, con la condotta appoggiata su selle e ancorata al terreno mediante blocchi di ancoraggio in corrispondenza dei cambi di direzione, oppure in galleria o in pozzo, soluzione frequente negli impianti di alta caduta e in quelli in caverna (Evangelisti, 1982).

Lungo il suo sviluppo la condotta è dotata di una serie di organi accessori indispensabili al corretto esercizio. Prima fra tutte la valvola a farfalla, posta a monte della condotta forzata che consente di isolarla dalla vasca di carico. Altri elementi fondamentali sono i giunti di dilatazione, indispensabili per rendere la condotta in grado di assorbire le variazioni di lunghezza dovute agli sbalzi termici; i blocchi di ancoraggio, invece, hanno lo scopo di equilibrare le spinte generate in corrispondenza delle curve; infine, le valvole di sfiato per l'immissione e l'espulsione dell'aria, che prevengono la formazione di depressioni pericolose durante le fasi di svuotamento e riempimento (ITCOLD, 2019).

Viste le condizioni operative caratteristiche di questa tipologia di opera, è assai facile che si possano presentare condizioni di moto vario e fenomeni ad esse legate. Il più importante di questi è il colpo d'ariete, fenomeno che si manifesta in una condotta in pressione a seguito di una rapida variazione della portata, tipicamente causata dalle manovre di apertura o, soprattutto, di chiusura degli organi di regolazione posti in centrale (Evangelisti, 1982). Secondo Citrini & Nosedà (1987), quando la velocità della corrente viene bruscamente ridotta, l'energia cinetica posseduta dalla massa d'acqua in movimento si converte in un incremento di pressione che si propaga lungo la condotta sotto forma di onda elastica. Il fenomeno dà luogo a una successione di sovrappressioni e depressioni che si trasmettono periodicamente tra la centrale e il serbatoio di monte smorzandosi progressivamente per effetto delle resistenze idrauliche. Tuttavia, per brevi condotte, quali le condotte forzate, la perturbazione percorre l'intero tratto nell'ordine di frazioni di secondo; tempistiche che rendono del tutto ininfluenti gli effetti delle resistenze idrauliche (Citrini & Nosedà, 1987). Nonostante ciò, i fenomeni del colpo d'ariete, relativi alle condotte forzate, hanno breve durata grazie al pozzo piezometrico che, al verificarsi del fenomeno si comporta come un serbatoio di grande capacità, impedendo alla perturbazione di propagarsi con la stessa intensità nel tratto a monte

(Citrini & Nosedà, 1987). La velocità con cui l'onda di pressione si propaga è detta celerità a , ed è pari alla velocità del suono nel sistema costituito dal mezzo liquido e dalla condotta che lo contiene (Citrini & Nosedà, 1987). La celerità delle perturbazioni all'interno della condotta forzata segue la relazione di Korteweg-Jourawsky, valida sotto le ipotesi di fluido incomprimibile, tubazione circolare poco deformabile con spessore e molto minore del diametro (circa $e < D/30$) e infine con quota piezometrica molto maggiore al contributo dell'altezza cinetica (Becciu & Paoletti, 2010).

$$a = \sqrt{\frac{\frac{\varepsilon}{\rho}}{1 + \frac{\varepsilon D}{Ee}}} \quad (8)$$

Con ε il modulo di comprimibilità dell'acqua, E il modulo elastico di Young del materiale e infine lo spessore della condotta indicato dal simbolo e (Becciu & Paoletti, 2010).

Spostando ora l'attenzione sulle sovrappressioni generate dal colpo d'ariete, è necessario considerare la durata caratteristica detta anche fase, o periodo della condotta, ovvero il tempo impiegato dalla perturbazione per percorrere la condotta dalla centrale al pozzo piezometrico e ritornare (Citrini & Nosedà, 1987).

$$\tau_0 = \frac{2L}{c} \quad (9)$$

Nel caso in cui la durata della manovra di chiusura T_m sia inferiore al periodo della condotta allora la manovra sarà detta rapida, per cui l'onda riflessa dal serbatoio non torna alla valvola prima del termine della manovra e di conseguenza la variazione del carico raggiunge il valore massimo (Becciu & Paoletti, 2010):

$$\Delta h_{\max} = \pm \frac{a}{g} v_0 \quad (10)$$

In cui v_0 è la velocità media del fluido in regime permanente prima della perturbazione. Invece nel caso in cui la manovra sia lenta, ovvero quando $T_m > \tau_0$, secondo Citrini e Nosedà (1987) le onde discendenti riflesse dal serbatoio si sovrappongono a quelle ascendenti dalla valvola. In questo caso la massima variazione di carico alla valvola è data dall'equazione di Allievi-Michaud:

$$\Delta h_L = \pm \frac{2Lv_0}{gT_m} \quad (11)$$

Da quest'ultima è possibile osservare come l'allungamento delle manovre, a parità di condizioni operative, sia uno dei principali accorgimenti per contenere gli effetti del colpo d'ariete.

2.5 Turbine idrauliche: efficienza e rendimento

Le turbine idrauliche costituiscono il cuore della sala macchine: sono le macchine motrici che convertono l'energia idraulica della corrente, sotto forma di energia di pressione e cinetica, in energia meccanica di rotazione, successivamente trasformata in energia elettrica dall'alternatore a esse accoppiato (Evangelisti, 1982). Le turbine si distinguono in due grandi famiglie: le turbine ad azione e le turbine a reazione. Nelle turbine ad azione l'intero salto disponibile viene convertito in energia cinetica negli organi fissi a monte della girante, costituiti da uno o più ugelli; la girante opera quindi a pressione atmosferica e riceve energia unicamente per effetto della variazione della quantità di moto dei getti che ne investono le pale. A questa categoria appartiene la turbina Pelton (ESHA, 2007). Nelle turbine a reazione, invece, la girante è completamente immersa nella corrente in pressione e la trasformazione di energia avviene sia per la variazione di velocità sia per la diminuzione di pressione che il fluido subisce nell'attraversare la girante stessa; la pressione, dunque, varia con continuità lungo la macchina. A questa famiglia appartengono le turbine Francis e Kaplan (Evangelisti, 1982).

Il parametro cardine che guida la scelta, è la velocità specifica, o numero di giri caratteristico di macchina, definita come (ESHA, 2007):

$$n_{QE} = \frac{n\sqrt{Q}}{E^{\frac{3}{4}}} \quad (12)$$

Dove n rappresenta la velocità di rotazione della turbina mentre il parametro E l'energia idraulica specifica per unità di massa della macchina. A parità di salto e portata, la scelta della turbina più adatta cambia a seconda della velocità specifica. Tuttavia, vi sono altri due parametri da tenere in considerazione che sono: il salto netto e la portata, dai quali dipende la potenza installabile. Come si osserva in Fig. 11, riportando tali grandezze su un diagramma salto-portata si individuano i campi di impiego tipici delle diverse macchine: le turbine Pelton occupano la regione degli alti salti e delle basse

portate, le Kaplan quella opposta dei bassi salti e delle grandi portate, mentre le Francis si collocano nella vasta fascia intermedia (ESHA, 2007). Tale suddivisione risulta infatti coerente con il parametro relativo al numero di giri caratteristico. Al suo graduale incremento, infatti, corrisponde il passaggio dalle turbine Pelton, adatte ad alti salti e piccole portate, alle Francis, per salti e portate intermedi, fino alle Kaplan, idonee a bassi salti e grandi portate (ESHA, 2007).

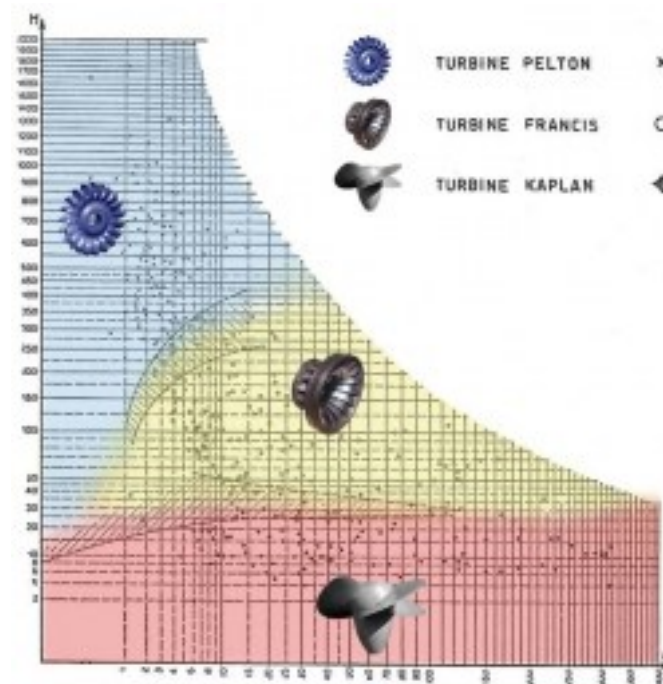


Figura 11: diagramma salto-portata e zone di applicazione delle turbine Pelton, Francis, Kaplan

A parità di salto e portata, la scelta viene condotta sulla base della velocità specifica e di considerazioni relative al comportamento ai carichi parziali. Le turbine Pelton, tutto sommato, mantengono un rendimento elevato anche per portate sensibilmente inferiori a quella nominale, presentando una curva di rendimento piatta; le turbine Francis e, in misura maggiore, quelle ad elica subiscono invece un calo di rendimento più marcato all'allontanarsi dalle condizioni di progetto (Evangelisti, 1951). Per questa ragione, in presenza di portate fortemente variabili, può risultare conveniente il frazionamento della portata su più unità. Un ulteriore criterio riguarda la cavitazione, fenomeno per cui la pressione può localmente scendere fino alla tensione di vapore, provocando la formazione e il successivo collasso di bolle con danni alle superfici della girante (ESHA, 2007). Le

turbine Pelton, operando a pressione atmosferica, sono meno soggette a tale vincolo rispetto alle turbine a reazione.

Nel sistema oggetto del presente elaborato, caratterizzato in prevalenza da salti di media entità, la tipologia Francis risulta quella più ricorrente, come si avrà modo di verificare nell'analisi delle singole centrali del capitolo successivo.

2.5.1 Turbina Pelton

La turbina Pelton è una macchina ad azione impiegata per gli alti salti, indicativamente da alcune centinaia fino a oltre mille metri, abbinati a portate relativamente modeste (Evangelisti, 1982). Il getto viene rilasciato da uno o più ugelli, fino a un massimo di sei, ed investe le pale della girante, costituite da una successione di doppi cucchiaini simmetrici separati da un tagliente centrale che divide il getto in due parti uguali, deviandole di quasi 180° (Fig. 12); è proprio questa deviazione che trasferisce l'energia alla girante (Evangelisti, 1951). Proprio per questa sua caratteristica viene definita una macchina parzializzata; infatti, solamente un numero ridotto di pale viene interessata dal getto degli ugelli. La regolazione della potenza si ottiene agendo sulla spina, che varia la portata, e, per le manovre rapide, mediante un tegolo deviatore che intercetta temporaneamente il getto allontanandolo dalla girante: in tal modo è possibile ridurre rapidamente la potenza senza chiudere bruscamente l'ugello, evitando così le sovrappressioni da colpo d'ariete nella condotta forzata (Evangelisti, 1951).

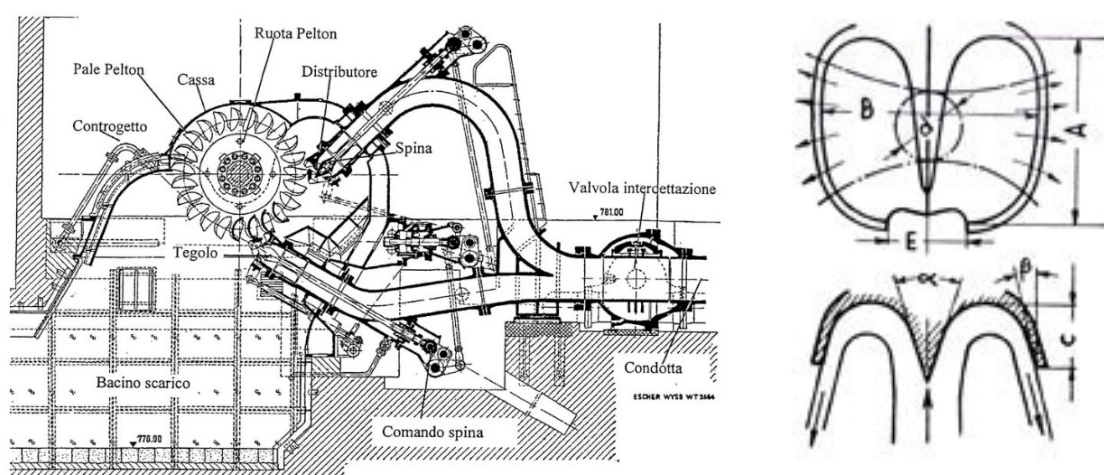


Figura 12: esempio di turbina Pelton ad asse orizzontale a due getti con sezione della palettatura.

Come sottolineato precedentemente, il loro campo di impiego è riservato principalmente alle alte ed altissime cadute perché presentano un difetto in particolare. Infatti, Evangelisti (1951) mette in evidenza come le Pelton non riescano a sfruttare completamente la caduta disponibile dato che il dislivello tra la quota del getto e il canale di scarico viene perso. Tale problematica è figlia anche del funzionamento stesso della turbina; la pressione minima in uscita infatti è pari a quella atmosferica, cosa che non accade nelle turbine a reazione, conferendo loro la possibilità di recuperare il dislivello facendo uscire l'acqua dalla girante a una pressione minore di quella atmosferica (Evangelisti, 1951).

2.5.2 Turbine Francis

La turbina Francis è una macchina a reazione a flusso misto, radiale-assiale, impiegata per i salti e le portate intermedi. È la tipologia di più ampia diffusione, grazie alla vasta gamma di condizioni di funzionamento che è in grado di coprire, indicativamente per salti compresi tra alcune decine e diverse centinaia di metri (Evangelisti, 1951).

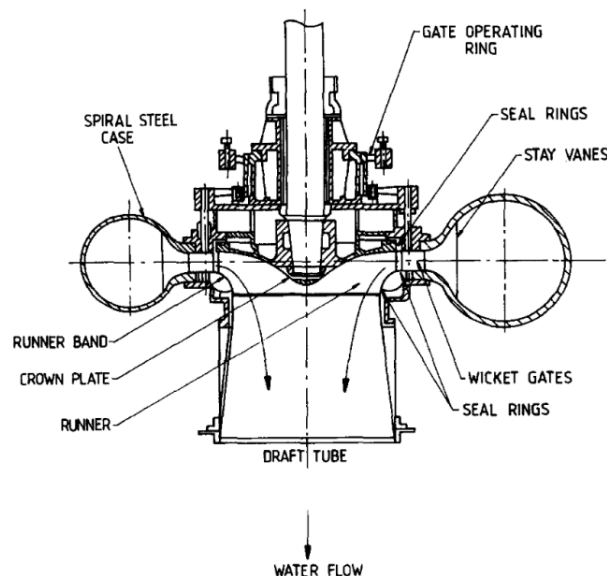


Figura 13: sezione di una turbina Francis.

La corrente proveniente dalla condotta forzata viene distribuita uniformemente lungo la periferia della girante da una cassa a spirale, detta anche chiocciola, e successivamente accelerata e indirizzata dal distributore, costituito da una corona di pale direttrici

orientabili. L'acqua entra nella girante in direzione radiale e ne esce in direzione assiale, cedendo energia sia per la riduzione di pressione sia per la variazione di velocità (Evangelisti, 1951). All'uscita della girante è installato il tubo aspiratore, o diffusore: un condotto a sezione gradualmente crescente che svolge una duplice funzione, ovvero recuperare parte dell'energia cinetica residua della corrente in uscita e consentire l'installazione della girante a una quota superiore a quella del livello di valle (Evangelisti, 1951). Secondo Evangelisti (1951) in funzione della velocità specifica, le giranti Francis si distinguono in lente, normali, veloci e ultraveloci con forme progressivamente più aperte al crescere del numero caratteristico di giri.

2.5.3 *Turbine Kaplan*

La turbina Kaplan è una macchina a reazione a flusso assiale, impiegata per i bassi salti, indicativamente fino a qualche decina di metri, e per le grandi portate (Evangelisti, 1951). La girante, simile a un'elica navale, è costituita da un numero ridotto di pale, generalmente da quattro a otto. La sua caratteristica distintiva è la doppia regolazione: oltre alle pale direttrici del distributore, sono orientabili anche le pale della girante, e la combinazione dei due movimenti consente di mantenere un elevato rendimento in un ampio intervallo di portate. Qualora le pale della girante siano fisse, la macchina prende il nome di turbina a elica. Anche per la turbina Kaplan, come nelle Francis, il tubo aspiratore riveste un ruolo essenziale nel recupero dell'energia allo scarico. Per i salti più modesti e per gli impianti ad acqua fluente sono diffuse varianti a flusso rettilineo, come le turbine a bulbo, nelle quali l'alternatore è alloggiato entro una carenatura immersa nella corrente, e le installazioni a pozzo, che riducono gli ingombri e le opere civili (ESHA, 2007).

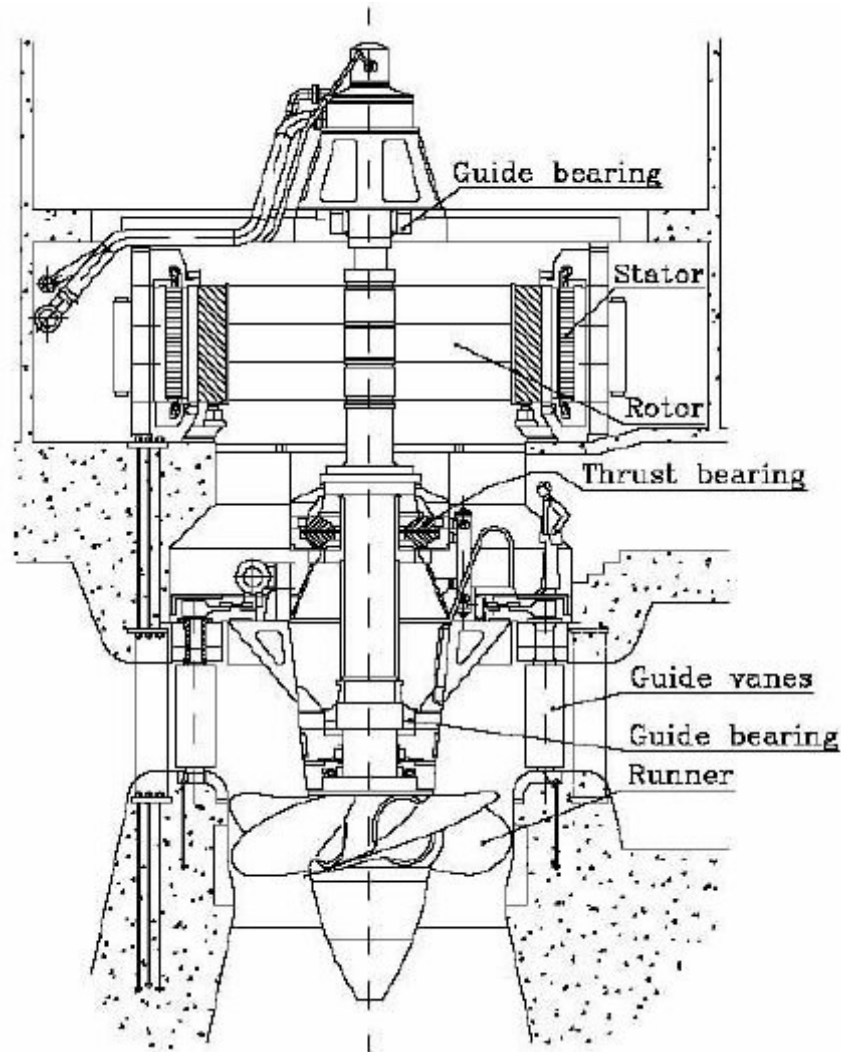


Figura 14: sezione di una turbina Kaplan.

La potenza elettrica utile erogata da una centrale idroelettrica non coincide mai con la potenza teorica posseduta dall'acqua nel punto di derivazione, calcolabile come prodotto tra portata, salto lordo disponibile e peso specifico dell'acqua. Come già visto, infatti, la potenza elettrica effettivamente prodotta dalla centrale, è data dalla seguente relazione (Della Volpe, 2002):

$$P = \eta Q H_n g \rho \quad (13)$$

In cui H_n rappresenta il salto utile netto e η il rendimento globale dell'impianto. È sul salto netto che si calcola la potenza effettivamente disponibile alla turbina, ragione per cui la minimizzazione delle perdite di carico, ricercata delle opere di adduzione, costituisce il primo fattore di efficienza dell'impianto (Evangelisti, 1982). Tuttavia, questo è solamente uno dei vari fattori di rendimento parziale che va a costituire il rendimento totale dell'impianto, ognuno dei quali è associato a una delle opere descritte

nei paragrafi precedenti. Quest'ultimo infatti viene espresso come segue (Della Volpe, 2002):

$$\eta_g = \eta_i \eta_t \eta_a \eta_{tr} \quad (14)$$

dove η_i è il rendimento idraulico relativo alle opere di adduzione e della condotta forzata, η_t quello della turbina, η_a quello dell'alternatore e η_{tr} quello del trasformatore che immette l'energia in rete. Concentrandosi sul solo rendimento di turbina, definito come rapporto tra la potenza erogata all'asse e quella posseduta dal liquido in ingresso al distributore, risente di tre distinte categorie di perdita: idrauliche, volumetriche e meccaniche. Le prime sono dovute agli urti e agli attriti tra il fluido e gli organi della macchina, oltre all'energia cinetica residua non sfruttata posseduta dall'acqua allo scarico; le seconde invece sono legate alla quota di portata che non urta la palettatura e sfugge così alla turbina senza cedere energia alla girante; mentre l'ultima tipologia è legata all'attrito tra gli organi in movimento. Il rendimento totale della turbina è quindi il prodotto del rendimento idraulico, di quello volumetrico e di quello meccanico. Una turbina moderna ben progettata, alle condizioni di progetto, può raggiungere un rendimento complessivo anche superiore al 90%, valore che tuttavia rappresenta il punto di funzionamento ottimale (*best efficiency point*), destinato a diminuire durante la vita dell'impianto. Il rendimento complessivo degli impianti a pompaggio, avendo un passaggio di conversione di energia in più, risulta essere necessariamente minore con valore compreso tra 70-75% (Università degli Studi di Napoli Federico II, s.d.). Ciò non toglie valore a questi impianti, il cui più grande pregio è la capacità di fornire flessibilità nella regolazione alla rete elettrica piuttosto che la massimizzazione del rendimento energetico in senso stretto.

2.6 Opere di restituzione

Le opere di restituzione costituiscono l'ultimo elemento di un impianto idroelettrico: il loro compito è convogliare l'acqua in uscita dalle turbine fino al recettore che, nel caso di impianti disposti in serie lungo la stessa asta fluviale, può coincidere con il medesimo corpo idrico in cui è prevista la presa del salto immediatamente a valle (Università degli Studi di Napoli Federico II, DETEC, 2012). Quest'ultima configurazione è particolarmente rilevante per i sistemi "a cascata", nei quali la restituzione di una centrale

alimenta, in tutto o parzialmente, la presa successiva. Come si vedrà nel Capitolo 4, questo è proprio lo schema adottato lungo l'asta Piave-Santa Croce.

Dal punto di vista costruttivo, l'opera di restituzione è generalmente costituita da un condotto o da un canale di scarico che raccorda la sezione di uscita delle turbine con la sezione di restituzione. La corrente restituita, dotata di una certa energia residua, può dar luogo a fenomeni erosivi in corrispondenza dello sbocco, a danno dell'alveo o delle sponde del corpo ricettore. Per questo motivo, analogamente a quanto visto per le opere di sbarramento, lo scarico viene protetto mediante rivestimenti in massi, platee in calcestruzzo o bacini di dissipazione, atti a ridurre la velocità della corrente e ad aumentare la resistenza del fondo all'erosione (Evangelisti, 1982).

Un ulteriore accorgimento progettuale rilevante per l'abbattimento dell'energia cinetica del flusso in uscita consiste nel prevedere un allargamento della sezione del canale per fare in modo che la velocità della corrente in arrivo al recettore non sia troppo elevata ma che giunga con una velocità che non superi 1-2 m/s, (Treccani, s.d.). Nei casi in cui la velocità della corrente in uscita dalle turbine resti elevata, l'opera di restituzione può includere strutture dissipatrici dell'energia cinetica residua, quali platee o vasche di calma nelle quali si realizza un risalto idraulico controllato, spesso protette con rivestimenti in massi ciclopici o scogliere in pietrame per evitare fenomeni di erosione dell'alveo e delle sponde immediatamente a valle (Evangelisti, 1982). Un secondo aspetto tecnico riguarda l'influenza del livello idrico di valle sul salto utile dell'impianto. Infatti, un eccessivo innalzamento del livello nel canale di restituzione, che si può verificare in occasione di fenomeni di piena del ricettore che provocano un rigurgito nel canale di scarico, può ridurre il salto disponibile o, nei casi più gravi, causare l'annegamento della turbina, compromettendone il funzionamento. Per questo motivo, nella progettazione delle traverse e dei canali di scarico si presta particolare attenzione a verificare che il rigurgito indotto dalle opere non comprometta il funzionamento idraulico dell'impianto né produca conseguenze a monte.

Infine, va evidenziato come le opere di restituzione rappresentino anche un punto critico dal punto di vista ambientale. Per poter salvaguardare l'ecosistema fluviale o più in generale del corpo idrico recettore, la normativa vigente impone il rilascio di un minimo di portata pari al deflusso ecologico che tiene conto anche della variabilità stagionale del regime idrologico naturale (Autorità di bacino distrettuale delle Alpi

Orientali, 2023). Inoltre, per gli stessi motivi, negli impianti di nuova realizzazione o in fase di adeguamento, ad esempio, vengono spesso previste scale di risalita che consentono ai pesci la risalita del corso d'acqua superando il dislivello creato dallo sbarramento e dalle opere di restituzione, garantendo così la continuità ecologica (ESHA, 2007).

3 Caso studio: l'asta Piave-Santa Croce

Dopo aver richiamato, nel capitolo precedente, i principi teorici e le principali opere che costituiscono un impianto idroelettrico, si analizza in questo capitolo un caso reale di particolare rilievo: il sistema idroelettrico Piave–Santa Croce, gestito da Enel Green Power. Si tratta di uno dei più importanti complessi idroelettrici dell'Italia nord-orientale, nel quale le acque del fiume Piave vengono derivate e sfruttate in successione lungo una serie di salti, fino alla restituzione finale delle acque. L'analisi inizierà da un inquadramento geografico e geomorfologico del sistema, prosegue con lo schema generale di funzionamento, scendendo successivamente nel dettaglio delle singole opere.

3.1 Inquadramento territoriale

Il Piave è un fiume a carattere prevalentemente montano, il cui bacino viene convenzionalmente considerato idrograficamente chiuso a Nervesa della Battaglia. Dopo un percorso di circa 222 km, sfocia nel mare Adriatico in corrispondenza di Porto Cortellazzo. Le sue sorgenti si collocano alle pendici del Monte Peralba a una quota di 2037 m s.l.m. Il bacino idrografico copre una superficie complessiva di oltre 4000 km², dei quali circa 3900 km² ricadono in territorio veneto; al Friuli-Venezia Giulia appartiene invece il sottobacino del torrente Vajont, tributario del Piave. Nel tratto di pianura, l'alveo è formato da materiali granulari a elevata permeabilità, quali sabbie e ghiaie, per questa ragione una porzione consistente della portata si infila nel sottosuolo, alimentando l'acquifero indifferenziato. Quest'ultimo, più a valle, restituisce parte di tali volumi sotto forma di risorgive, contribuendo così a rialimentare il corso d'acqua stesso (Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali, n.d.).



Figura 15: Bacino imbrifero del Piave.

L'elemento che rende possibile e conveniente lo sfruttamento idroelettrico è di natura geomorfologica. In corrispondenza della Sella di Fadalto, il sistema di valli che da Soverzene conduce, attraverso la conca di Santa Croce e la Val Lapisina, alla valle del Meschio, costituisce un percorso verso la pianura assai più breve di quello naturale seguito dal Piave, il quale piega bruscamente a Ponte nelle Alpi verso il Vallone Bellunese (Enel Green Power, s.d.). Questa direttrice, sede in epoca glaciale di un ramo del ghiacciaio del Piave, presenta inoltre una successione di conche e di laghi intervallivi facilmente trasformabili in serbatoi di regolazione, tra cui quello di Santa Croce e il Lago Morto. Questi due si sono infatti formati per sbarramento alluvionale, morenico e di frana. Studi geomorfologici hanno chiarito che le acque del Piave provenienti dal Cadore defluirono con continuità verso il Vallone Bellunese soltanto dopo il ritiro dei ghiacciai pleistocenici e, in particolare, dopo lo sbarramento della valle di Santa Croce determinato dalla frana di Fadalto, avvenuto circa 12-14 mila anni fa; in precedenza si ipotizza che il

fiume potesse defluire verso il mare proprio attraverso la Val Lapisina e la valle del Meschio (Pellegrini et al., 2006).

In tale contesto, le acque del Piave vengono derivate poco a valle dell'abitato di Soverzene, alla quota di circa 390 m s.l.m., mediante una traversa lunga circa un chilometro, e immesse nel cosiddetto Canale Cellina, lungo 10 km e realizzato in parte in galleria e in parte all'aperto, che le convoglia nel lago di Santa Croce. Dal lago, attraverso gallerie in pressione, l'acqua alimenta in successione le centrali di Fadalto, Nove e San Floriano, che scaricano rispettivamente nel Lago Morto, nel lago del Restello e in quello di Negrisiola; da qui la portata viene nuovamente incanalata verso le centrali di Castelletto e di Caneva, per essere infine restituita in parte al Piave, nei pressi di Colfosco, e in parte al fiume Livenza, nei pressi di Francenigo, dopo l'ultima utilizzazione nella centrale di Livenza (Pavan, 2001).

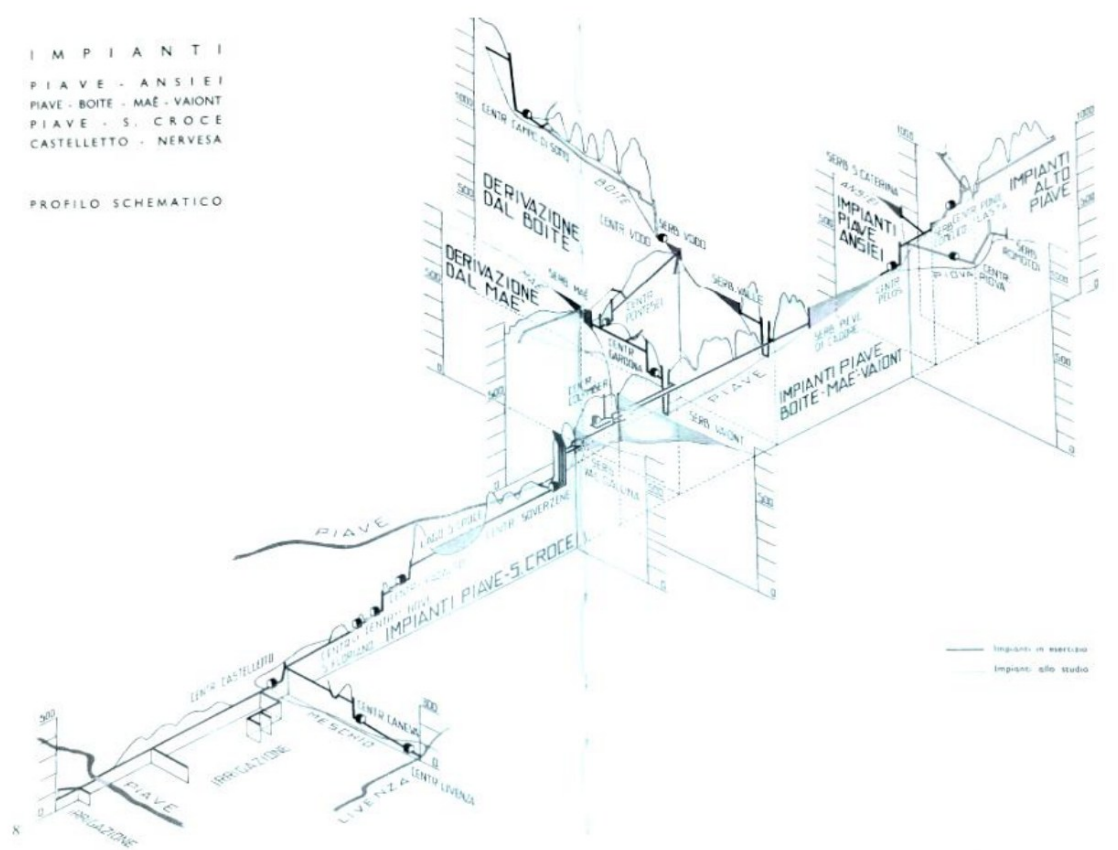


Figura 16: Profilo piano altimetrico dei sistemi idroelettrici del Piave.

Il principio che caratterizza il sistema è dunque il riuso della medesima risorsa lungo salti consecutivi: l'acqua restituita da ciascuna centrale costituisce l'alimentazione della

successiva. Complessivamente le centrali sviluppano una potenza efficiente di 338,4 MW e una produzione media annua di circa 1029 GWh, cui si aggiungono i circa 210 MW e gli oltre 700 GWh della centrale di Soverzene posta a monte (Pavan, 2001). La gran parte delle acque, esaurita la funzione idroelettrica, è infine destinata all'irrigazione della pianura trevigiana e pordenonese.

3.2 Le componenti del sistema Piave-Santa Croce

3.2.1 Lo sbarramento e il canale di adduzione di Soverzene

L'opera di Soverzene nasce all'inizio degli anni '20 del Novecento per iniziativa della Società Idroelettrica Veneta (poi confluita nella SADE), con l'obiettivo di ampliare il bacino imbrifero utile alle centrali di Fadalto e Nove, all'epoca alimentate dal solo bacino proprio del lago di Santa Croce di appena 150 km² (Bona, 2021-a). Con l'inaugurazione dello sbarramento e del canale, avvenuta nel 1929, la parte superiore del bacino imbrifero del Piave venne collegato al lago di Santa Croce, che fu adeguatamente sistemato a serbatoio di regolazione, elevandone la quota di massimo invaso tramite la costruzione di una diga in materiale sciolto (Bona, 2021-b).

La traversa che permette la derivazione delle acque del Piave sorge poco a valle dell'abitato di Soverzene, in un punto in cui il fiume è largo poco più di un chilometro, ed è collocata immediatamente a monte della gola di Fadalto (Balasso, 2017). La traversa, procedendo da destra a sinistra idrografica, in passato era composta da: un argine insommergibile lungo 670 m; una traversa sommergibile in calcestruzzo rivestita in pietra da taglio, alta 4 m con taglione di valle, destinata a entrare in funzione soprattutto durante le piene; uno scivolo per il passaggio delle zattere di legname; e tre grandi bocche di scarico e sghiaimento, di 12 m per 4 m ciascuna, munite di paratoie automatiche (Bona, 2021-b). Ad oggi l'opera si configura nel seguente modo: è costituita da una parte fissa e una mobile; la soglia fissa è lunga 269,5 m e passa linearmente da quota 391 a 390,5 m s.l.m., sorreggendo tramite 17 pile la strada soprastante, le quali restringono ulteriormente la sezione utile al deflusso; la parte mobile invece è formata da tre luci, ciascuna di 12 m di larghezza, presidiate da paratoie a settore circolare metalliche, con soglia di base a quota 386,6 m s.l.m. (Balasso, 2017). È ben possibile notare dunque che l'opera, pur

mantenendo l'impostazione generale di traversa mista fissa-mobile, sia stata nel tempo oggetto di rifacimenti. A valle delle soglie sono presenti le vere e proprie opere di presa, articolate in due bacini successivi di captazione e decantazione separati da griglie e paratoie di immissione, e terminanti in un bacino di calma dotato di un lungo sfioratore di troppo pieno, da cui si diramano gli imbocchi del canale derivatore (Bona, 2021-b).

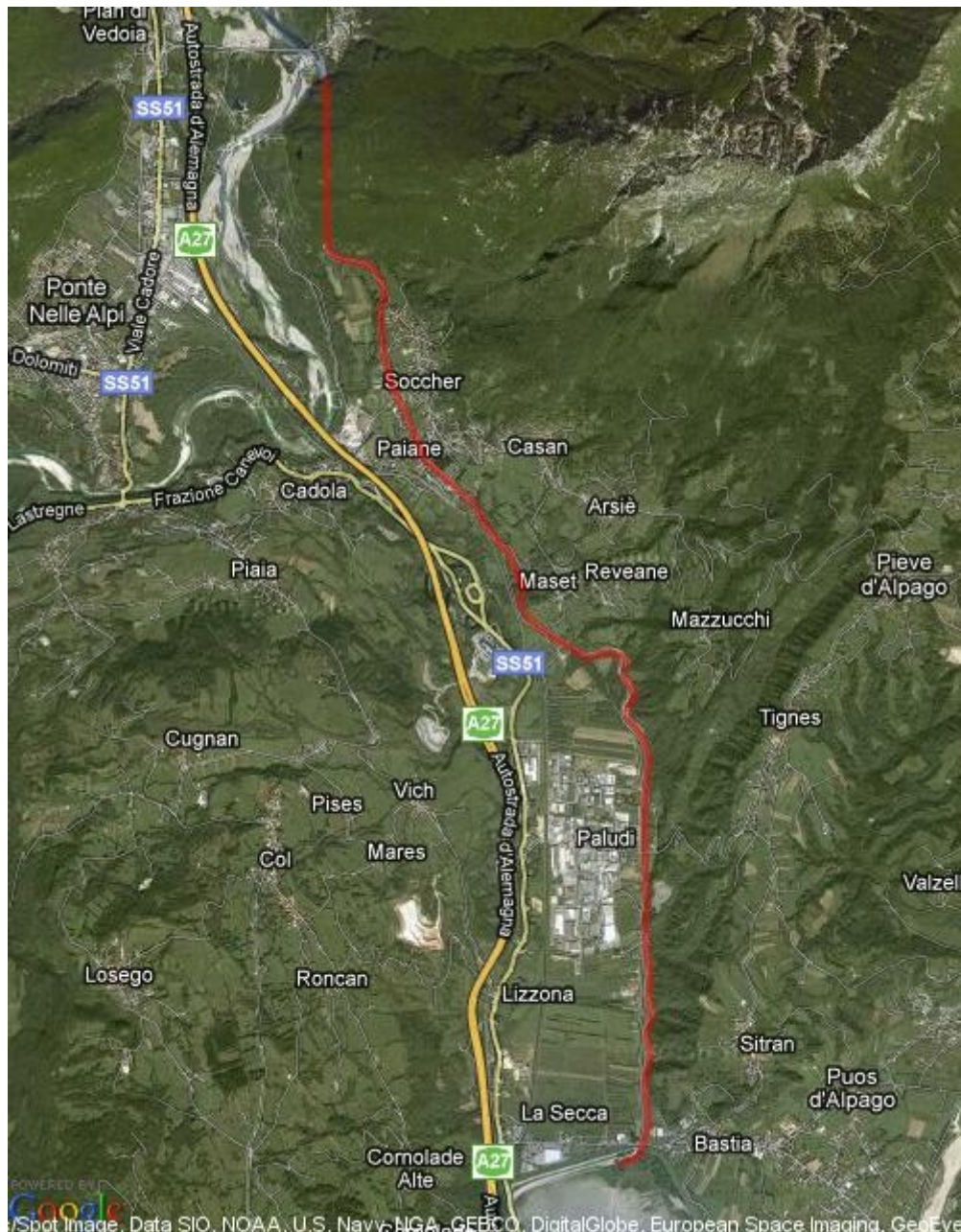


Figura 17: sviluppo del canale derivatore dalla traversa di Soverzene al lago di Santa Croce.

Il canale derivatore che collega lo sbarramento al lago di Santa Croce è un'opera mista, tipica delle grandi derivazioni di inizio Novecento: il primo tratto di circa 1 km, è

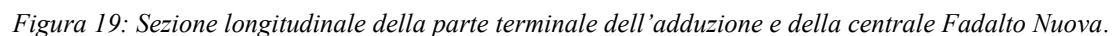
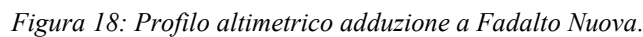
costituito da due gallerie parallele che attraversano lo sperone roccioso di Sant'Augusta; segue un tratto di circa un chilometro realizzato in muratura; il percorso prosegue poi come canale a cielo aperto fino a un sifone che immette infine le acque nel lago di Santa Croce (ProgettoDighe, 2010). Nel complesso si sviluppa per una lunghezza totale di circa 11 km (Bona, 2021-b). Il canale fu dimensionato per una derivazione continua di progetto di 30 m³/s, con un minimo di 8 m³/s nei periodi di secca e punte fino a 80 m³/s nei periodi di piena (ProgettoDighe, 2010). I dati storici di esercizio riportano, alla presa di Soverzene, una portata media naturale del Piave di circa 51 m³/s; sommando il contributo medio del bacino proprio del lago, stimato in circa 3 m³/s, si ottiene una portata media complessivamente derivata di circa 33 m³/s per l'alimentazione del sistema a cascata (Bona, 2021-b). Va infine ricordato, per inquadrare il ruolo cruciale di quest'opera dal punto di vista idraulico nell'ambito dell'intero sistema, che le acque derivate a Soverzene vengono in parte restituite al Piave a quota 75,20 m s.l.m. tramite il canale irriguo Castelletto-Nervesa, e in parte scaricate nel fiume Livenza, a sud di Sacile, a quota 13 m s.l.m. dopo aver attraversato l'intera cascata di centrali che sarà oggetto dei paragrafi successivi (Bona, 2021-b).

3.2.2 Centrale di Fadalto Nuova “Ottaviano Ghetti”

La centrale Fadalto Nuova nasce da un intervento di completo rinnovamento della precedente centrale, avviato nel 1967 e concluso tra il 1971 e il 1972 (ProgettoDighe, 2026-a). Si tratta di una centrale in caverna, tipologia scelta per ottimizzare l'inserimento paesaggistico e sfruttare la resistenza della roccia circostante: l'accesso avviene tramite una galleria lunga 84,55 m con sezione di 6 m per 5 m, che conduce alla caverna vera e propria, ottenuta scavando circa 80000 m³ di roccia e misurante 69,6 m di lunghezza, 29,57 m di larghezza e 57,3 m di profondità. L'adduzione avviene dal lago di Santa Croce mediante una galleria in pressione lunga circa 2,5 km (ProgettoDighe, 2026-a).

Un elemento distintivo della centrale Fadalto Nuova, che la differenzia da un semplice impianto a caduta, è la presenza di gruppi ternari reversibili pompa-turbina-alternatore ad asse verticale, con turbine di tipo Francis: la particolare disposizione altimetrica tra il lago di Santa Croce e il sottostante lago Morto (nel quale la centrale scarica le acque turbinate) ha infatti suggerito l'installazione di pompe capaci di risollevare l'acqua da un bacino all'altro nelle ore di minor richiesta energetica,

I dati più recenti relativi alla potenza e portata, riportano un valore di 210 MW, una portata massima di 250 m³/s, un salto compreso tra 96-107 m con una produzione media annua di 346,8 GWh, rendendo Fadalto Nuova la centrale più potente dell'intero sistema Piave-Santa Croce (ProgettoDighe, 2026-a).



Le acque turbinate dalla centrale di Fadalto Nuova vengono scaricate nel sottostante lago Morto, che a sua volta alimenta la centrale di Nove. Oltre alla funzione di produzione energetica, l'impianto di Fadalto, come gli altri impianti dell'asta, effettua rilasci per l'irrigazione a favore delle utenze del Consorzio Irriguo di Bonifica del Piave e concorre alla sicurezza idraulica delle aree densamente popolate attorno al lago di Santa Croce e lungo la valle del Meschio (Enel Green Power, s.d.).

3.2.3 Centrale di Nove Nuova

A Nove, la produzione idroelettrica è passata attraverso la costruzione di tre impianti successivi, di cui gli ultimi due tuttora esistenti e in parte operativi (ProgettoDighe, 2023-a). Il primo impianto detto Nove 1914 entrò in esercizio nel 1914, sfruttando un salto medio di 99 m e una portata massima di 15 m³/s derivata dal lago Morto tra le quote di 272 e 276 m s.l.m. (ProgettoDighe, 2023-a). Il secondo impianto, "Nove 1925", entrò gradualmente in funzione tra il 1925 e il 1929, raggiungendo una portata massima complessiva di 80 m³/s (ProgettoDighe, 2026-b). L'opera di presa, distinta da quella della precedente centrale, a quota 271,5 m s.l.m. sul lago Morto, alimenta una galleria a pelo libero di 100 m e successivamente una galleria in pressione lunga 3.500 m e del diametro di 4 m, che raggiunge un bacino di carico costituito da un pozzo verticale di 8 m di diametro sfociante in una vasca alta circa 10 m (ProgettoDighe, 2026-b). Questo impianto, pur superato dal successivo, è tuttora mantenuto in efficienza come riserva.

L'attuale centrale di Nove Nuova fu realizzata da Enel nel 1971 come impianto in caverna, affiancando una nuova opera di presa a quella storica del 1925, sul lago Morto (ProgettoDighe, 2026-c). La presa è regolata da una coppia di paratoie piane in serie, di dimensioni 3,55 m per 4,90 m (ProgettoDighe, 2026-c). Da qui si diparte una nuova galleria di alimentazione lunga circa 3,5 km e del diametro di 4,9 m, realizzata affiancando quella esistente del 1925: le due condotte confluiscono alla base di un nuovo pozzo piezometrico cilindrico, di 30 m di diametro e 17 716 m³ di volume, consentendo una portata massima complessiva di 80 m³/s (ProgettoDighe, 2026-c). La sala macchine, raggiungibile tramite una galleria di accesso lunga 54,2 m di sezione 4,44 m per 5,5 m, ospita un singolo gruppo Francis ad asse verticale in grado di sviluppare una potenza di 64 MW, sfruttando la portata massima di 80 m³/s con un salto variabile tra 100,1 e 89,6 metri in funzione del livello del pelo libero del lago Morto (ProgettoDighe, 2026-c). Il

canale di scarico, lungo complessivamente 110,8 m, è realizzato in un primo tratto in galleria e il secondo in un canale artificiale formato da due luci rettangolari di 7,3 m di larghezza e 8 m di altezza, dimensionate per smaltire la portata massima con il livello del serbatoio di valle compreso tra 174 e 179 m s.l.m. (ProgettoDighe, 2026-c).

Il quadro tecnico attribuisce alla centrale di Nove Nuova una potenza efficiente di 64 MW, una produzione media annua di 295,2 GWh, una portata massima di 80 m³/s e un salto compreso tra 89,6 e 100,1 m (ProgettoDighe, 2026-c).

La centrale di Nove Nuova riceve dunque le acque dal lago Morto e le restituisce turbinando nel lago del Restello, che costituisce il serbatoio di alimentazione della successiva centrale di San Floriano Nuova, oggetto del seguente paragrafo.

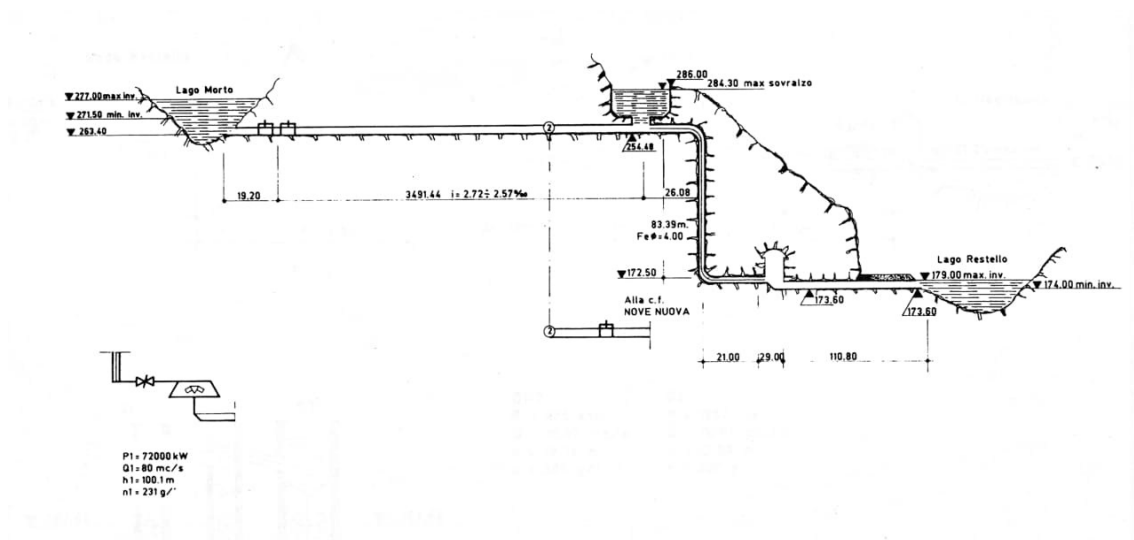


Figura 20: Profilo altimetrico adduzione a Nove Nuova.

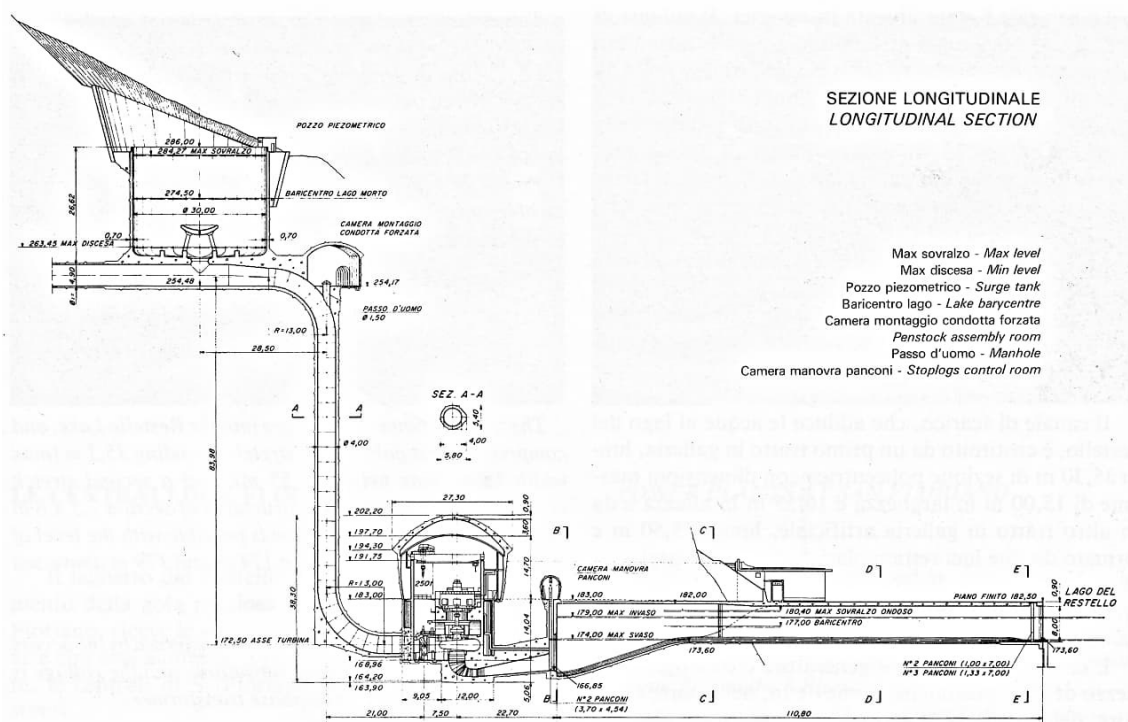


Figura 21: Sezione longitudinale della parte terminale dell'adduzione e della centrale Nove Nuova.

3.2.4 Centrale di San Floriano nuova

Anche a San Floriano coesistono due centrali di generazioni diverse, entrambe alimentate dal lago del Restello e con recapito nel lago di Negrisiola (ProgettoDighe, 2023-b). La più antica, San Floriano Vecchia, risale al 1919 ed è tuttora mantenuta operativa come riserva, da attivare quando la centrale Nuova viene fermata per manutenzione. L'opera di presa di San Floriano Vecchia è costruita direttamente sullo sbarramento del lago del Restello, affiancata a due sifoni da 40 m³/s ciascuno e una luce di 5,2 m per 4 m (ProgettoDighe, 2023-b). La galleria di derivazione si compone di un primo tratto di 45 m in tubo di cemento armato, seguito da un secondo tratto di 169 m scavato in roccia e rivestito in calcestruzzo, fino al bacino di carico costituito da una vasca in cemento armato di 10 m di altezza e 15 m per 15 m di pianta, che funge anche da pozzo piezometrico (ProgettoDighe, 2023-b). La struttura era stata originariamente predisposta per quattro condotte forzate interrato da 2,25 m di diametro, passanti sotto la SS. 51 Alemagna; ne furono inizialmente realizzate solo due, per le prime due macchine, mentre in un secondo tempo fu aggiunta un'unica condotta più grande, da 3,8 m di diametro, per alimentare un terzo gruppo (ProgettoDighe, 2023-b).

La centrale attualmente in funzione San Floriano Nuova fu realizzata dalla SADE nel 1961, in concomitanza con la costruzione del canale Castelletto-Nervesa (ProgettoDighe, 2023-c). L'alimentazione avviene, dal lago del Restello, tramite una presa affiancata allo sbarramento e una galleria in pressione lunga 375 m (ProgettoDighe, 2023-c). A differenza della centrale precedente, la scelta della turbina ricade sul tipo Kaplan, preferito alle turbine Francis adottate nella centrale precedente (ProgettoDighe, 2023-c). Date le condizioni operativi che mostrano un salto contenuto a fronte di una portata massima relativamente ampia, tale scelta non sorprende coerentemente con quanto visto nei capitoli precedenti.

Per quanto riguarda l'aspetto tecnico la centrale di San Floriano Nuova ha una potenza efficiente di 9 MW, una produzione media annua di 54 GWh, una portata massima di 62 m³/s e un salto di soli 16,5 m (Pavan, 2001) si tratta della centrale meno potente dell'intera asta Piave-Santa Croce e anche quella che opera con il salto motore più contenuto. Le acque turbinate confluiscono nel lago di Negrisiola, da cui parte la captazione per l'alimentazione delle successive centrali di Castelletto e di Caneva.

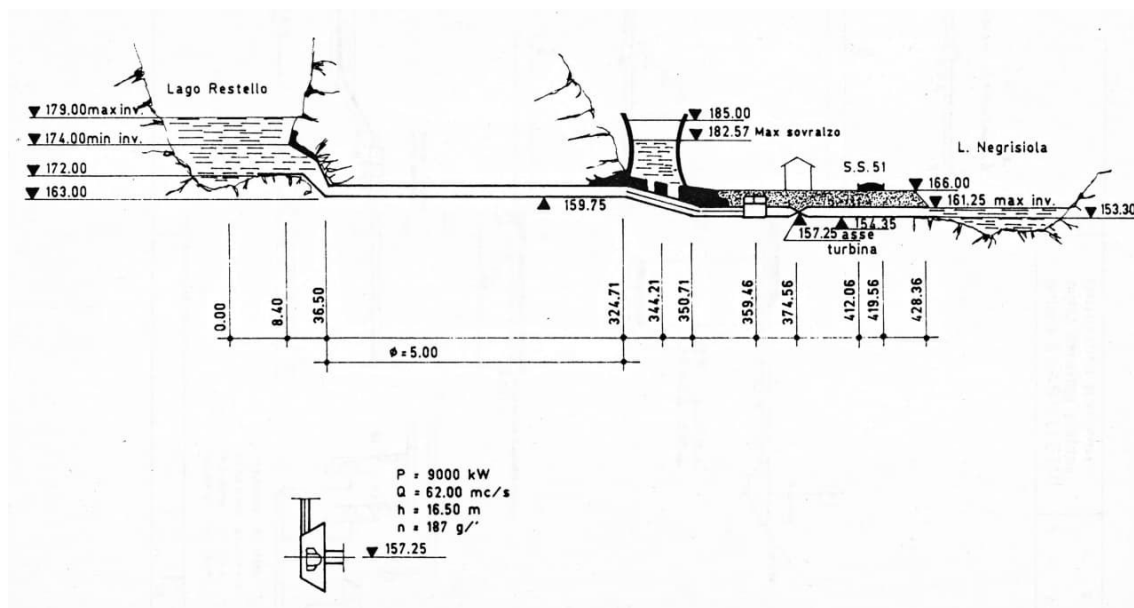


Figura 22: Profilo altimetrico della presa e adduzione di San Floriano Nuova.

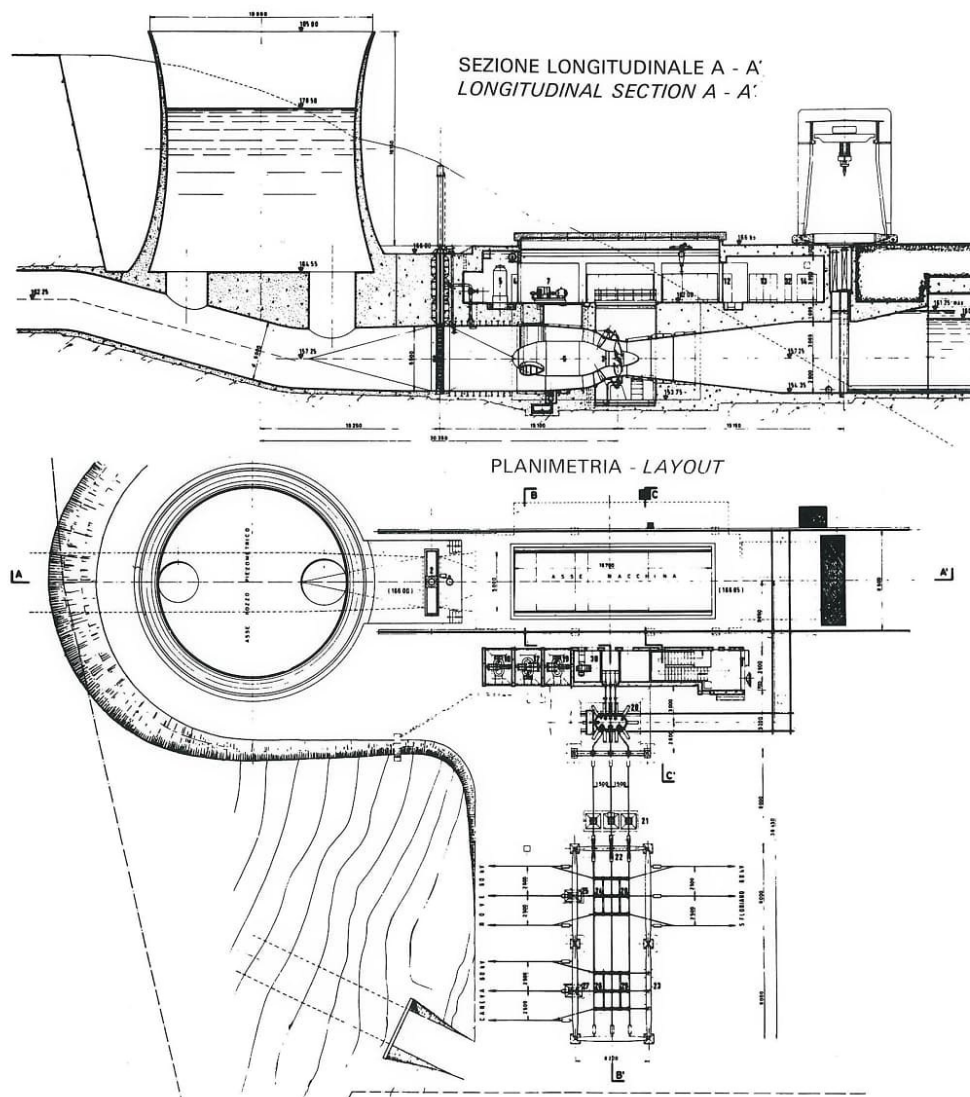


Figura 23: Sezione longitudinale della parte terminale dell'adduzione e della centrale di San Floriano Nuova.

3.2.5 Centrale di Castelletto e il canale Castelletto-Nervesa

L'impianto fu realizzato dalla SADE nel 1923, in stretta connessione con lo sfruttamento irriguo della Sinistra Piave (ProgettoDighe, 2026-d). La centrale si è sviluppata in due fasi costruttive: l'impianto originale del 1923, con due macchine Francis, e un ampliamento del 1962 per l'installazione di una turbina Kaplan (ProgettoDighe, 2026-d).

L'alimentazione della centrale è particolarmente articolata, poiché combina le acque del lago di Negrisiola assieme a una quota derivata direttamente del fiume Meschio (ProgettoDighe, 2026-d). Le acque captate a monte di Vittorio Veneto raggiungono l'impianto tramite due canali distinti: il primo, costruito nel 1922, lungo complessivamente 6 580 m, con una portata di 40 m³/s; il secondo, detto "la diretta", costruito nel 1939, interamente in galleria per 5 408 m, con una portata di 24 m³/s (ProgettoDighe, 2026-d). All'uscita dei due canali si trova il partitore Carron, dotato di due sifoni tipo Gregotti capaci di gestire un portata complessiva di 15 m³/s per lo smaltimento delle portate in eccesso verso l'omonimo torrente Carron sottostante, e di una paratoia per la messa in asciutta dell'intero canale per eventuali interventi di manutenzione (ProgettoDighe, 2026-d). Da qui le acque si dividono in due rami: una parte che segue la presa della centrale Castelletto procedendo a valle lungo il canale Castelletto-Nervesa fino alla restituzione al Piave, mentre l'altra prosegue verso il fiume Livenza attraverso le centrali di Caneva e Livenza.

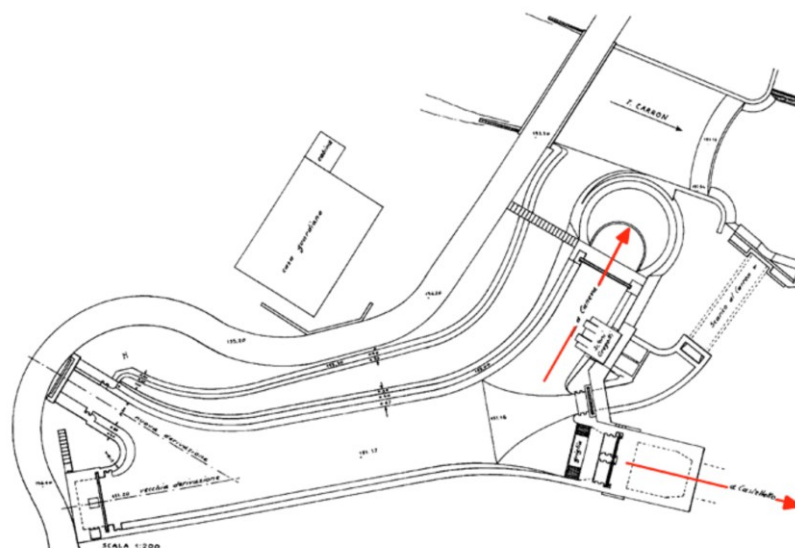


Figura 24: Vista in pianta del partitore Carron con l'arrivo dei due canali e la separazione delle portate.

In maniera più specifica la presa dedicate alla centrale di Castelletto si divide a sua volta in due differenti: una più piccola e storica che deriva 14 m³/s tramite un canale chiuso del diametro di 2,42 m e lungo 1 540 m, che termina in un pozzo piezometrico dal diametro massimo di 15 m; e quella più grande, realizzata negli anni '60 in occasione dell'ampliamento, deriva invece 25 m³/s tramite un canale aperto che raggiunge il medesimo pozzo piezometrico. Da quest'ultimo parte una condotta forzata di 2,1 m di

diametro e 156 m di lunghezza per alimentare le due turbine Francis e una seconda dedicata all'alimentazione della sola turbina Kaplan (ProgettoDighe, 2026-d). Nel complesso la centrale, con le sue due turbine Francis e la singola Kaplan, sfruttando una portata massima di $37 \text{ m}^3/\text{s}$ e un salto di 60 m, sviluppa una potenza efficiente di 18,6 MW con una produzione media annua che si attesta attorno ai 39 GWh (Pavan, 2001).

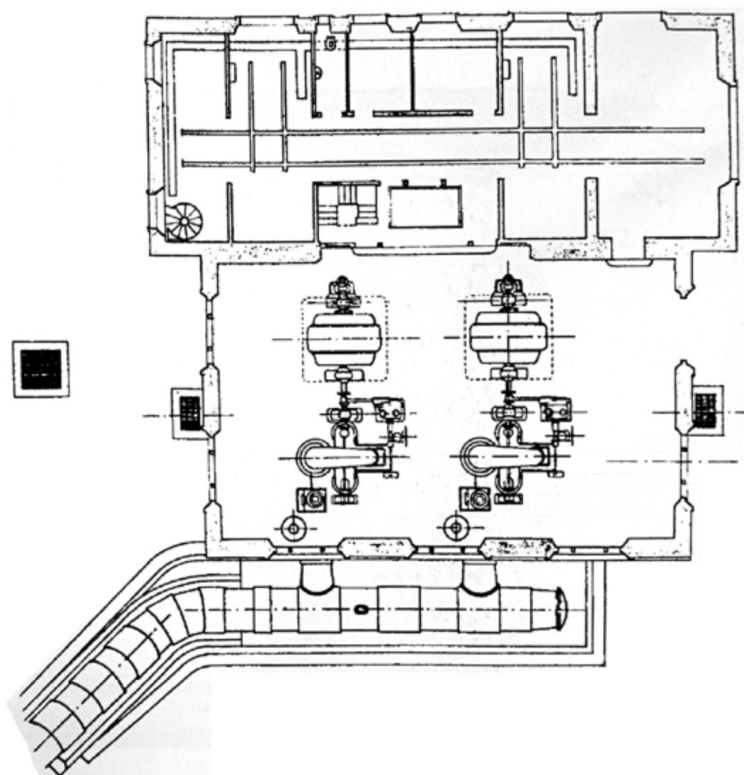


Figura 25: Vista in pianta della centrale di Castelletto.

Lo scarico della centrale avviene nel canale Castelletto-Nervesa, un canale lungo più di 20 km, che attraversa il Piave poco a nord di Nervesa della Battaglia mediante una traversa sifone con diametro di 3,4 m posato nel greto del fiume che sfocia all'inizio del Canale della Vittoria alimentandolo la derivazione presente in quest'ultimo con una portata di $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Favero, 2019). Il canale Castelletto è una delle due vie di restituzione finale delle acque del sistema Piave-Santa Croce. Per questa ragione la centrale di Castelletto occupa una posizione particolare nella scala dell'intero sistema Piave-Santa Croce rappresentando il nodo centrale del ramo irriguo del sistema (ProgettoDighe, 2026-d).

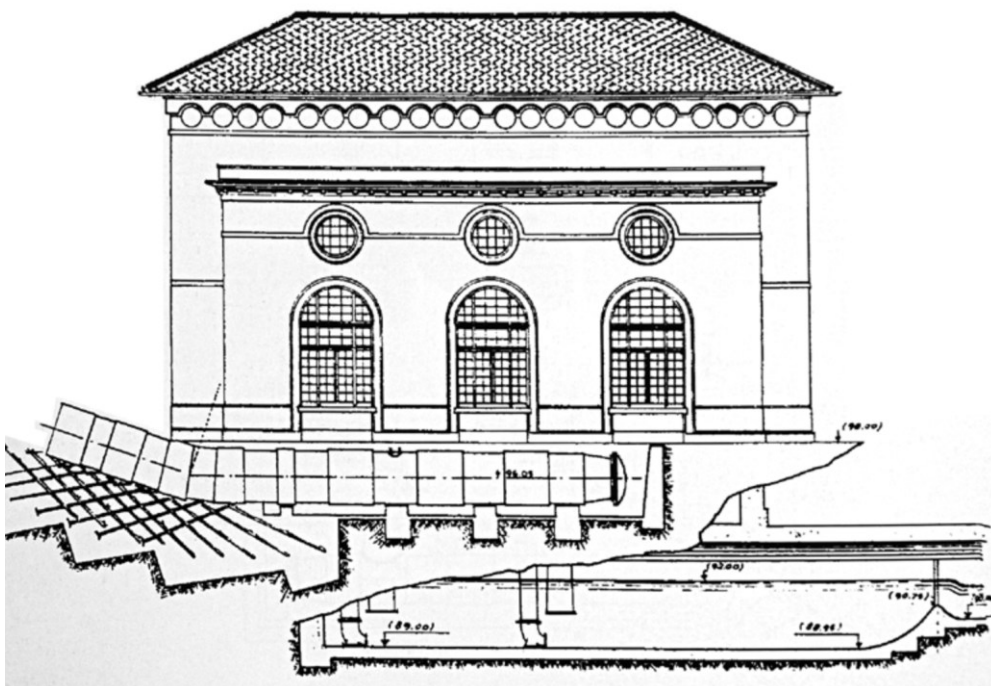


Figura 26: Prospetto con quote di adduzione e restituzione della centrale di Castelletto

3.2.6 Centrale di Caneva

La centrale di Caneva sorge nella frazione di Stevenà, nel comune di Caneva (PN), e fu progettata dalla SADE sul finire degli anni '20 del Novecento. L'edificio si articola in tre corpi di fabbrica: la sala macchine, l'edificio dedicato alla trasformazione dell'energia, e un ampliamento realizzato negli anni '60 per l'estensione della sala macchine. Come visto in precedenza, le acque scaricate dalla centrale di San Floriano confluiscono nel lago di Negrisiola; da qui, insieme a una quota derivata del fiume Meschio, l'acqua raggiunge il cosiddetto partitore Carron, un manufatto di ripartizione dei deflussi tra gli impianti di Castelletto e di Caneva (ProgettoDighe, 2021-b). Dal partitore Carron si sviluppano quindi due canali: il canale Castelletto che si sviluppa per oltre 20 km che si dirige a sud e ritorna al fiume Piave, e un canale lungo 7.750 m che procede verso la centrale di Caneva. Quest'ultimo è dotato di proprie opere di scarico verso il sottostante torrente Carron costituite da due sifoni di tipo Gregotti, con portata complessiva di $15 \text{ m}^3/\text{s}$ per la gestione delle portate in eccesso e di una paratoia che consente di mettere in asciutta l'intero canale per manutenzione (ProgettoDighe, 2021-a). Un'opera singolare lungo questo percorso è l'attraversamento del torrente Friga, superato per mezzo di un sifone in calcestruzzo armato lungo 370 m, al cui interno corre una

condotta forzata del diametro di 4 m (ProgettoDighe, 2021-b). Nella sala macchine sono oggi installati due gruppi orizzontali equipaggiati con tre turbine Francis, che assorbono complessivamente una portata massima di 43 m³/s la quale affronta un salto di 96 m (ProgettoDighe, 2021-b). Nel complesso la centrale sviluppa una potenza efficiente di 32 MW con una produzione media annua di 222 GWh (Pavan, 2001). Le acque turbinate dalla centrale di Caneva, infine, vengono restituite al fiume Meschio, dal quale sono nuovamente captate poco più a valle, tra Sacile e Cordignano, per alimentare la centrale, quella del Livenza a Cavolano.

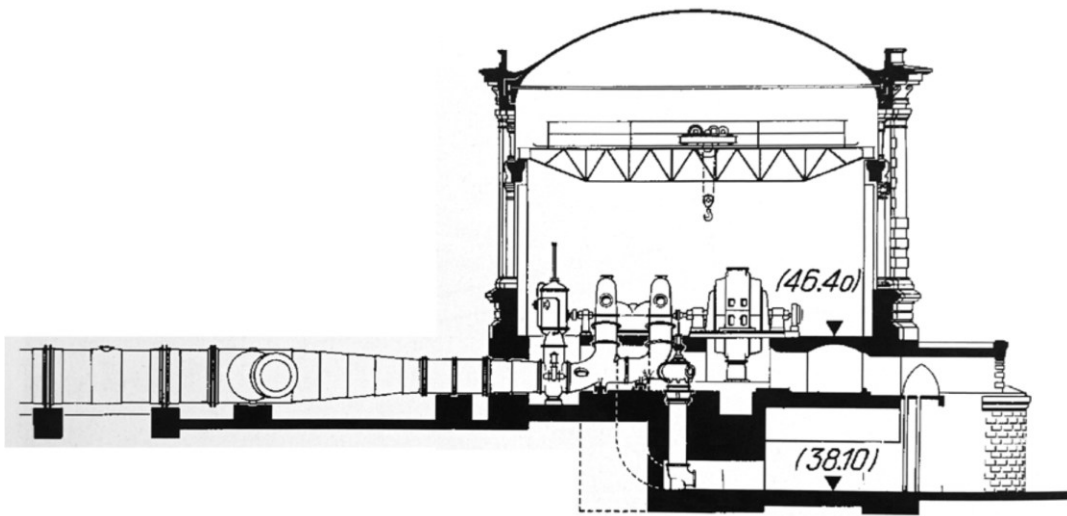


Figura 27: Sezione longitudinale della centrale di Caneva.

sette considerando anche quello della centrale di Castelletto geograficamente localizzato più a monte rispetto a quello appena trattato.

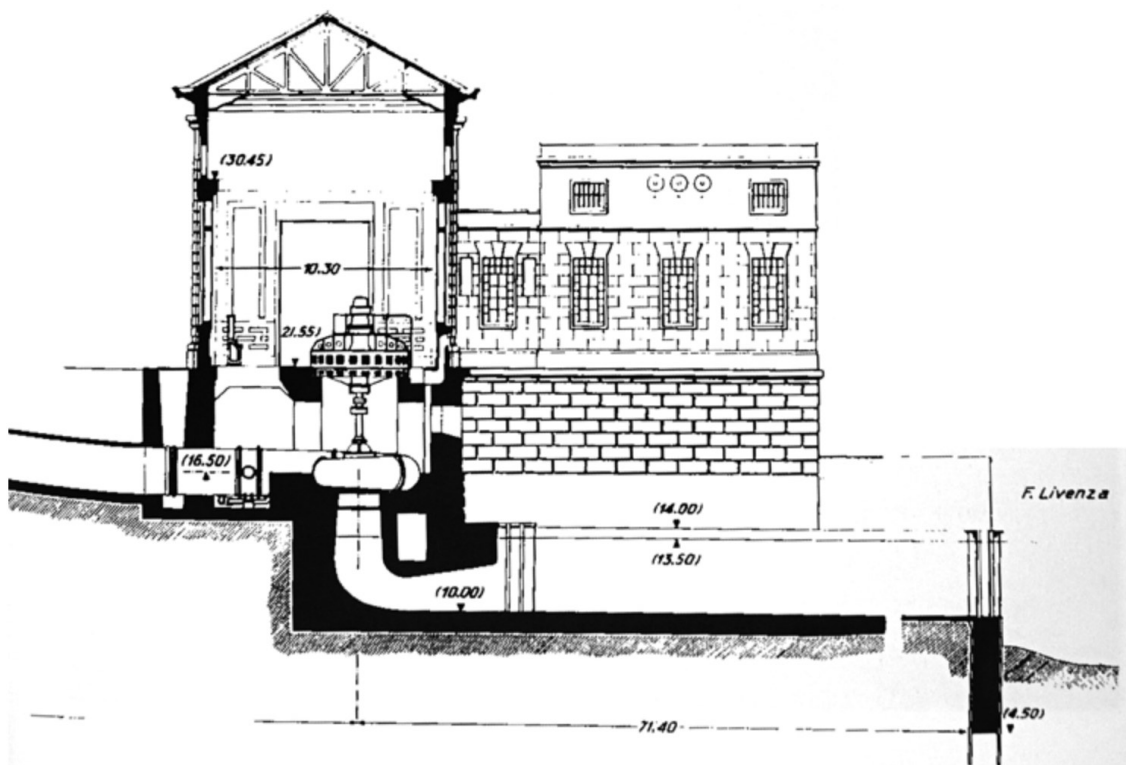


Figura 29: Sezione longitudinale della centrale del Livenza con le quote di adduzione e restituzione.

Conclusioni

Il presente elaborato ha permesso di studiare il sistema idroelettrico Piave-Santa Croce ripercorrendo le sue principali opere. Dapprima si è fornito un inquadramento storico dello sviluppo idroelettrico nel fiume Piave; dai primi impianti costruiti dalla Società Idroelettrica Veneta e dalla Società Cellina nei primi anni del Novecento, la nascita e lo sviluppo della SADE fino ai grandi rinnovamenti Enel del secondo dopoguerra e degli anni Sessanta e Settanta. A questo è seguita una trattazione teorica, dedicata a fornire le principali nozioni relative alle opere che costituiscono un impianto idroelettrico per poter affrontare successivamente l'analisi del caso studio in esame. Si sono distinte le varie tipologie di impianti e in seguito sono state approfondite le opere di sbarramento, presa, adduzione, le condotte forzate e infine le turbine idrauliche e l'efficienza di un impianto. Una volta terminata la parte nozionistica si è trattato il caso studio, presentando inizialmente il quadro territoriale del bacino del Piave, scendendo successivamente nel dettaglio dell'asta Piave-Santa Croce descrivendo ognuna delle opere più rilevanti presenti: dallo sbarramento a Soverzene fino alla restituzione in parte al Piave e in parte al Livenza.

Tuttavia, oltre alle considerazioni di carattere strutturale e idraulico, emergono alcune questioni di particolare interesse.

In primo luogo, si sottolinea la rappresentatività del caso scelto. Nel corso della storia, l'intero bacino del Piave, ha rappresentato un caso simbolo dell'ambizione ingegneristica italiana di inizio Novecento. In particolare, l'evoluzione del sistema Piave-Santa Croce è rappresentativa, su scala locale, della storia dell'industria idroelettrica italiana: un settore nato per rispondere ai bisogni di elettrificazione e alle sempre crescenti richieste energetiche necessarie per lo sviluppo industriale. Un sistema che negli anni ha

progressivamente assunto un ruolo sempre più complesso passato da quello prettamente energetico a quello irriguo e di difesa idraulica del territorio.

In secondo luogo, oltre alla grandezza e l'importanza del caso trattato, va riconosciuta tuttavia una prima grande criticità ovvero che il contesto storico e normativo in cui è nato e si è sviluppato era privo delle attenzioni e sensibilizzazioni ambientali odierne. Le sue opere, infatti, furono progettate quasi esclusivamente in funzione della massimizzazione della resa energetica, senza alcune considerazioni, per esempio, relative alla continuità ecologica dei corsi d'acqua interessati.

Un aspetto forse ancor più critico e delicato, come accennato in precedenza, è quello paesaggistico e ambientale. È su questo fronte che il sistema Piave-Santa Croce, come qualunque grande derivazione idroelettrica, ha comportato conseguenze permanenti nonché una radicale alterazione del regime idrologico naturale dei corsi d'acqua coinvolti. A questo si aggiunge il fenomeno dell'*hydropeaking*, ossia il rapido rilascio di acqua a valle di serbatoi e centrali, che genera brusche e innaturali fluttuazioni di portata nei tratti fluviali riceventi; un fenomeno legato alle necessità di regolazione dell'invaso che ne comporta notevoli abbassamenti.

Inoltre, sempre sul piano paesaggistico, da un lato vi è quello che è stato definito da D'Angelo (2018) un "*paesaggio di recinzioni*", fatto di barriere e aree private che limitano l'accessibilità del territorio montano; nato dalla necessità di proteggere le opere. Un costo sociale spesso sottovalutato rispetto a quello ambientale che paradossalmente, nella maggior parte dei casi, è ben più evidente. Dall'altro lato, invece, le stesse infrastrutture sono diventate, con il tempo, un patrimonio di archeologia industriale riconosciuto e in parte valorizzato, capace di raccontare la storia tecnica e sociale di questi territori alpini (D'Angelo, 2018).

L'aspetto che però rende l'idroelettrico una fonte rinnovabile così valida e competitiva in grado di sopperire, almeno in parte, alle criticità appena presentate è la sua programmabilità. Il contesto attuale, tuttavia, rischia di restituire un quadro generale poco nitido. Nel 2025 l'idroelettrico ha coperto circa il 12,8% della domanda elettrica nazionale, a fronte di un calo produttivo del -21,2% sul 2024 a causa del minor riempimento degli invasi (QualEnergia.it, 2026a). Per la prima volta nella sua storia, il fotovoltaico ha superato l'idroelettrico come prima fonte rinnovabile nazionale. Questo dato, per quanto negativo, non è indice di un declino settoriale in quanto a differenza del

solare e dell'eolico, che dipendono da variabili meteorologiche di breve periodo, l'idroelettrico dipende dal riempimento pluriennale di grandi serbatoi ed è quindi particolarmente esposto alla variabilità idrologica nel lungo periodo. È proprio questa capacità di accumulo a rimanere il vantaggio più competitivo che nessun'altra delle principali fonti rinnovabili possiede oggi. La programmabilità continua a rendere l'idroelettrico una fonte rinnovabile molto raffinata.

Guardando in avanti, il futuro dell'idroelettrico alpino, e con esso quello del sistema Piave-Santa Croce, è fortemente dipendente da svariati fattori in stretta relazione fra loro. Primo su tutti è senza dubbio quello climatico. L'aumento delle temperature nelle Alpi sta riducendo l'apporto glaciale ai fiumi alpini e sta rendendo il regime idrologico più irregolare rendendo sempre più frequenti eventi estremi di piena e lunghi periodi di siccità. Si introduce così un ulteriore elemento di incertezza nella pianificazione di lungo periodo di sistemi di regolazione stagionale, tra cui si trova quello di Santa Croce. Un secondo fattore, invece, è normativo e riguarda il nodo relativo al rinnovo delle concessioni sulle grandi derivazioni idroelettriche. La maggior parte delle concessioni italiane risulta scaduto o in prossimità di scadenza. Questa incertezza sta di fatto rallentando gli investimenti di ammodernamento degli impianti esistenti, nonostante le stime di settore indichino un potenziale di crescita della producibilità tra il 10% e il 20% attraverso interventi di *repowering*.

Per concludere, è ormai evidente come le grandi infrastrutture idroelettriche non possano più essere valutate solo con i criteri tecnico-economici che ne hanno guidato la costruzione. Sono ad oggi dei sistemi socio-ecologici complessi, in cui la produzione programmabile di energia rinnovabile convive, con la tutela della continuità ecologica dei fiumi, con la sicurezza idraulica dei territori di monte e di valle, con il valore paesaggistico-culturale che le stesse opere hanno progressivamente acquisito, e con vincoli di risorsa idrica sempre più condizionati dal cambiamento climatico. La vera sfida non sarà quella di costruire nuove grandi derivazioni sul modello di quelle analizzate in questa tesi, quanto piuttosto saper gestire, valorizzare e rendere più sostenibile un patrimonio infrastrutturale già esistente e ricco di storia.

Bibliografia

- Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto. (2019). *Relazione annuale sullo stato delle acque interne in provincia di Belluno – Anno 2018*. ARPAV. <https://www.arpa.veneto.it/>
- Autorità di bacino distrettuale delle Alpi Orientali. (2023). *Piano di gestione delle acque del distretto idrografico delle Alpi Orientali 2022–2027 – Volume 6d: Direttiva Deflussi Ecologici*. https://distrettoalpiorientali.it/wp-content/uploads/2023/02/PDG_22_27_Vol_6d.pdf
- Autorità di Bacino Distrettuale delle Alpi Orientali. (n.d.). *Piano di gestione dei bacini idrografici delle Alpi Orientali: Bacino del fiume Piave. Capitolo 1 – Descrizione generale delle caratteristiche del bacino idrografico*. https://distrettoalpiorientali.it/wp-content/uploads/2023/02/PG_Piave_1_Corpi_Idrici_rev01.pdf
- Balasso, F. (2017). *Sulla mitigazione del rischio idraulico del fiume Piave* [tesi di laurea magistrale, Dipartimento ICEA, Università degli Studi di Padova] https://thesis.unipd.it/retrieve/348558d4-cd3e-4ff6-8bca-1ad415917cad/LM_1040305_Federico_Balasso.pdf
- Baldin, M., & Francescon, O. (2023). *Il caso del Vajont: cosa resta dopo più di sessant'anni?* (Cap. III). Collegio degli Ingegneri di Venezia. https://www.collegioingegnerivenezias.it/upload/collegioingegnerivenezias_whoihma2vg/media/Articoli_Pubblicazioni/Vajont_documenti/5-230908-CollegioIngVE-Vajont-VisitaTecnica-Testo.pdf
- Becciu, G., & Paoletti, A. (2010). *Fondamenti di costruzioni idrauliche*. UTET Scienze Tecniche.

- Bona, R. (2021-a). *Gli impianti del Piave sistema nord-orientale: da Soverzene-Santa Croce al Trevigiano e Sacile*. <https://www.radiopiu.net/wordpress/gli-impianti-del-piave-sistema-nord-orientale-da-soverzene-santa-croce-al-trevigiano-e-sacile/>
- Bona, R. (2021-b). *La società idroelettrica veneta e gli impianti Piave e Santa Croce*. <https://www.radiopiu.net/wordpress/la-societa-idroelettrica-veneta-e-gli-impianti-piave-e-santa-croce/>
- Bonardo, V. (2018). *L'idroelettrico ai tempi dei cambiamenti climatici*. RiEnergia. <https://rienergia.staffettaonline.com/articolo/33115/L%E2%80%99idroelettrico+ai+tempi+dei+cambiamenti+climatici/Bonardo>
- Calcaterra, S., Gambino, P., & Niceforo, D. (2025). *Invasi artificiali*. Indicatori ambientali ISPRA. indicatoriambientali.isprambiente.it
- Casagrande, A. (1961). Control of seepage through foundations and abutments of dams. *Géotechnique*, 11(3), 161–182. <https://doi.org/10.1680/geot.1961.11.3.161>
- Citrini, D., & Nosedà, G. (1987). *Idraulica* (2^a ed.). Casa Editrice Ambrosiana
- Comitato Nazionale Italiano Grandi Dighe [ITCOLD]. (2016). *DMV – Deflusso minimo vitale (FE – Flusso ecologico)*. <https://www.itcold.it/wp-content/uploads/2016/07/RAPPFIN-GdLDMV-feb2016.pdf>
- Comitato Nazionale Italiano Grandi Dighe [ITCOLD]. (2019). *Condotte forzate*. <https://www.itcold.it/wp-content/uploads/2019/03/RAPPFIN-Condotte-forzate-2019.pdf>
- D'Angelo, F., (2018). Paesaggi idroelettrici domestici. Progetti e riflessioni nel bacino della Piave. *Ri-Vista. Research for Landscape Architecture*, 16(2), 86-110. <https://doi.org/10.13128/RV-23716>
- De Bon, L., & Petri, R. (2013). La linea del Piave. Pianura e montagna venete orientali in un secolo di contenziosi attorno all'uso dell'acqua. *Venetica*, 28, 97–140. <https://edizioni.cierrenet.it/wp-content/uploads/2018/06/05-acque-2013.pdf>
- Decreto Min. II. TT. 26 giugno 2014, Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 156

- Della Volpe, R. (2002). *Macchine*. Feltrinelli.
- Enel Green Power. (s.d.). *Centrale idroelettrica di Fadalto*. Recuperato il 4 luglio 2026, da <https://www.enelgreenpower.com/it/impianti/operativi/centrale-idroelettrica-fadalto>
- European Small Hydropower Association. (2007). *Guida alla realizzazione di un piccolo impianto idroelettrico*. ESHA. https://hydraulics.unibs.it/hydraulics/wp-content/uploads/2011/12/Guida_Italiana.pdf
- Evangelisti, G. (1951). *Impianti idroelettrici* (Vol. 2, 2^a ed.). Pàtron Editore
- Evangelisti, G. (1982). *Impianti idroelettrici* (Vol. 1, 4^a ed.). Pàtron Editore
- Favero, C. (2019). *La Piavesella di Nervesa e il Canale della Vittoria*. Consorzio di bonifica Piave. <https://consorziopiave.it/approfondimenti/la-piavesella-di-nervesa-e-il-canale-della-vittoria/>
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. <https://fc79.gw-project.org/about/>
- Ghinami, L. A. (n.d.). *Normativa su dighe e traverse*. Dighe.eu. https://www.dighe.eu/normativa/normativa_esposizione.htm
- International Hydropower Association, (2022). *Pumped storage hydropower*. <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage>
- Kamal, N., & Sadek, N. (2018). Evaluating and analyzing navigation efficiency for the River Nile (Case study: Ensa–Naga Hamady reach). *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 2649–2669. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.08.006>
- Legge 21 ottobre 1994, n. 584. *Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 8 agosto 1994, n. 507, recante misure urgenti in materia di dighe*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana n. 255.
- Manwaring, M. (s.d.). *Challenges and Opportunities For New Pumped Storage Development*. NHA. https://hydro.org/wp-content/uploads/2017/08/NHA_PumpedStorage_071212b1.pdf
- Pavan, C. (2001). *Le dighe e le centrali idroelettriche del bacino del Piave*. Camillo Pavan Editore

- Pellegrini, G. B., Albanese, D., Bertoldi, R., & Surian, N. (2006). Landslide activity in response to alpine deglaciation: the case of the Belluno Prealps (Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 29(2), 185-196.
<https://www.gfdq.glaciologia.it/index.php/GFDQ/article/view/353/372>
- ProgettoDighe, (2010). *Canale Soverzene - Santa Croce*
<https://progettodighe.it/forum/viewtopic.php?t=1151>
- ProgettoDighe. (2021-a). *Castelletto – Cappella Maggiore (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/castelletto-cappella-maggiore-tv/>
- ProgettoDighe. (2021-b). *Caneva – Caneva (PN)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/caneva-caneva-pn/>
- ProgettoDighe. (2023-a). *Nove 1914 – Nove (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/nove-1914-nove-tv/>
- ProgettoDighe. (2023-b). *San Floriano Vecchia – Vittorio Veneto (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/san-floriano-vittorio-veneto-tv/>
- ProgettoDighe. (2023-c). *San Floriano Nuova – Vittorio Veneto (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/san-floriano-nuova-vittorio-veneto-tv/>
- ProgettoDighe. (2026-a). *Fadalto 1972 – Fadalto (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/fadalto-1972-tv/>
- ProgettoDighe. (2026-b). *Nove 1925 – Nove (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/nove-1925-nove-tv/>
- ProgettoDighe. (2026-c). *Nove 1971 – Nove (TV)*. Le centrali.
<https://www.progettodighe.it/main/le-centrali/article/centrale-di-nove-1971-nove-tv>
- ProgettoDighe. (2026-d). *Castelletto – Cappella Maggiore (TV)*. Le centrali.
<https://progettodighe.it/centrali/castelletto-cappella-maggiore-tv/>
- Pulitano, C., & Cavallaro, D. (2018). *Studio sulla classificazione degli impianti idroelettrici*. Energy & Strategy.
- QualEnergia.it. (2026). *L'energia idroelettrica in Italia a fine 2025*.
<https://www.qualenergia.it/articoli/energia-idroelettrica-italia-fine-2025/>

Tanzini, M. (2013). Impianti idroelettrici. Progettazione e costruzione. Dario Flaccovio Editore

Treccani. (s.d.). *Idroelettrico, impianto*. Enciclopedia Treccani online, Istituto della Enciclopedia Italiana. <https://www.treccani.it/enciclopedia/impianto-idroelettrico/>

Università degli Studi di Napoli Federico II, DETEC. (2012). *Dispensa n. 11 – Idroelettrico*. Corso di Gestione delle Risorse Energetiche, A.A. 2011/2012. <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/257948>

Università degli Studi di Napoli Federico II. (s.d.). *Dispensa N. 11 – Idroelettrico*. Corso di Gestione delle Risorse Energetiche, Dipartimento di Energetica (DETEC). <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/257948>