

energia!lab

il laboratorio per la gestione dell'energia

Scheda monografica di sintesi:
Produzione di energia da fonti rinnovabili

Energia Idroelettrica

A cura di:

lab e lab

Via Mirasole 2/2 40124 Bologna (BO)

ENERGIA IDROELETTRICA[1, 5]

Energia idroelettrica è un termine usato per definire l'energia elettrica ottenibile a partire da una caduta d'acqua, convertendo con apposito macchinario l'energia meccanica contenuta nella portata d'acqua trattata. Gli impianti idraulici, quindi, sfruttano l'energia potenziale meccanica contenuta in una portata di acqua che si trova disponibile ad una certa quota rispetto al livello cui sono posizionate le turbine. Pertanto la potenza di un impianto idraulico dipende da due termini: il *salto* (dislivello esistente fra la quota a cui è disponibile la risorsa idrica svasata e il livello a cui la stessa viene restituita dopo il passaggio attraverso la turbina) e la *portata* (la massa d'acqua che fluisce attraverso la macchina espressa per unità di tempo).

Nell'ambito dell'utilizzazione razionale delle energie cosiddette "alternative" o "integrative", lo sfruttamento dell'energia idraulica riveste sicuramente una grande importanza. I motivi del rinnovato interesse registratosi verso tale fonte di energia negli ultimi anni sono molteplici: l'elevata energia specifica, la sua diffusione sul territorio, la comprovata tecnologia presente in tale settore, il maggior desiderio di rendersi indipendenti dai servizi centralizzati di produzione e distribuzione dell'energia elettrica, l'imprevedibilità della variazione dei prezzi dei combustibili fossili tradizionali e la consapevolezza del rapido esaurimento delle riserve dei medesimi. In particolare un più ampio e diffuso impiego dell'energia idraulica in piccola scala presenta molti vantaggi di natura sia tecnica (affidabilità della fonte energetica, utilizzazione di corsi d'acqua anche modesti e marginali, rispetto degli ecosistemi naturali con impatti ambientali ridottissimi, elevato rendimento globale ottenibile, semplicità di costruzione e durata dell'impianto) che economica (investimento finanziario contenuto, costi di esercizio e di manutenzione estremamente bassi).

I luoghi in Italia e più in generale nel mondo adatti allo sviluppo dell'energia idraulica in piccola scala sono numerosi e molto varia è la tipologia dei possibili utenti costituiti, per la maggior dei casi, da semplici nuclei familiari, da borgate o da aziende agricole, artigianali e industriali vere e proprie.

STORIA[6]

Fin dall'antichità l'uomo ha capito che l'energia idraulica poteva essere utilizzata con minimo dispendio e con grande vantaggio, già i greci e i romani usavano ruote idrauliche per la macinazione del grano. Il basso costo del lavoro degli schiavi e degli animali, tuttavia, ne frenò l'applicazione su larga scala fino al XII secolo circa. Nel Medioevo furono costruite grandi ruote idrauliche di legno con un rendimento massimo di circa 50 cavalli. L'energia idraulica moderna deve il suo sviluppo all'ingegnere britannico John Smeaton, che per primo costruì ruote idrauliche di ghisa di dimensioni notevoli. All'inizio dell'Ottocento l'energia idraulica, che aveva giocato un ruolo importante nella rivoluzione industriale, diede impulso alla crescita dell'industria tessile, conciaria e meccanica. La macchina a vapore era già stata sviluppata, ma il carbone era scarso e la legna era un combustibile poco soddisfacente. L'energia idraulica contribuì allo sviluppo delle prime città industriali finché, dalla metà del XIX secolo, l'apertura dei canali navigabili rese possibile l'approvvigionamento di carbone a buon mercato. L'installazione di ruote idrauliche in serie, su un dislivello di almeno 5 m, richiede la costruzione di condotte e di grandi dighe di sbarramento difficilmente realizzabili. Questi svantaggi, uniti alla scarsità dell'afflusso d'acqua durante l'estate e l'autunno e alle gelate invernali, portarono alla sostituzione di quasi tutte le ruote idrauliche con turbine a vapore, non appena la disponibilità di carbone lo rese possibile.

Il primo impianto idroelettrico fu costruito nel 1880, nel Northumberland. Con lo sviluppo del generatore elettrico accoppiato alla turbina idraulica e con la crescente domanda di elettricità che caratterizzò l'inizio del XX secolo vi fu una rivalutazione dell'energia idraulica. La tecnologia della maggior parte dei grandi impianti è rimasta la stessa per tutto il secolo.

CLASSIFICAZIONE DEGLI IMPIANTI[1, 3, 4, 7]

In base alla taglia di potenza nominale della centrale, gli impianti idraulici si suddividono in:

- I. Micro-impianti: $P < 100$ kW;
- II. Mini-impianti: $100 < P$ (kW) < 1000 ;
- III. Piccoli-impianti: $1000 < P$ (kW) < 10000 ;
- IV. Grandi-impianti: $P > 10000$ kW.

Questa suddivisione solitamente si riscontra anche nella diversa tipologia degli impianti: mentre i grandi impianti idroelettrici richiedono solitamente la sommersione di estese superfici, con notevole impatto ambientale e sociale, un piccolo impianto idroelettrico si integra quasi perfettamente nell'ecosistema locale (si sfrutta direttamente la corrente del fiume).

Gli impianti possono essere poi:

- A. ad acqua fluente;
- B. a bacino o a accumulazione;
- C. di accumulo a mezzo pompaggio.

Le turbine delle **centrali ad acqua fluente** sono azionate dall'acqua di un fiume. Il dislivello tra l'alto e il basso corso del fiume è minimo, se paragonato a quello delle centrali ad accumulazione. Per contro, la quantità d'acqua disponibile è maggiore. Le centrali ad acqua fluente funzionano ininterrottamente, coprendo la domanda di base: sono quindi centrali di base. La produzione di elettricità dipende dalla portata del fiume: di norma queste centrali producono molto in estate e meno in inverno.

Per azionare le turbine, le **centrali ad accumulazione** sfruttano l'acqua accumulata nei laghi artificiali. Sono caratterizzate da grandi dislivelli e quindi da alte pressioni, ma da piccole portate d'acqua. A seconda del bisogno, le centrali ad accumulazione possono essere messe in esercizio e arrestate nel giro di pochi minuti. Per questo motivo, sono utilizzate soprattutto per coprire il carico durante i periodi di punta, vale a dire a mezzogiorno e in inverno.

Le **centrali di pompaggio** dispongono di un bacino di accumulazione superiore (bacino di svaso) e uno inferiore (bacino di invaso). Nei periodi di basso consumo, l'acqua è pompata nel bacino superiore: può così essere riutilizzata per la produzione di elettricità quando aumenta la domanda. Solitamente l'acqua viene pompata a monte durante la notte, in quanto le tariffe energetiche sono più economiche. Dal punto di vista energetico tali impianti rappresentano un non senso: infatti la quantità di energia necessaria a riempire il bacino di svaso è certamente superiore (a causa di tutte le dissipazioni ed i consumi ausiliari) dell'energia fornita dalla stessa quantità di acqua durante la caduta. La validità di tali impianti è prettamente economica, basandosi sul fatto che il valore commerciale dell'energia elettrica adoperata per il pompaggio (prodotta nelle ore notturne in impianti termoelettrici che funzionano tutto il giorno) è inferiore al valore commerciale dell'energia prodotta, nelle ore diurne, dalla stessa quantità di acqua in caduta: le tariffe commerciali notturne dell'energia sono inferiori a quelle diurne. Sulla base di tale criterio risulta pertanto conveniente la realizzazione di tali impianti. Nel caso di basse cadute si possono utilizzare turbine reversibili, che

nelle ore diurne lavorano come macchine motrici (turbine tipo Francis o elicoidale) e nelle ore notturne come macchine operatrici (pompa centrifuga-mista).

Il **salto** è la differenza di quota tra il punto di prelievo dell'acqua ed il punto di restituzione.

Gli impianti idroelettrici si suddividono in base al valore di questa grandezza in impianti idraulici:

1. a bassa caduta ($H < 50$ m);
2. a media caduta ($H = 50 \div 250$ m);
3. ad alta caduta ($H = 250 \div 1000$ m);
4. ad altissima caduta ($H > 1000$ m).

La **portata** derivata (cioè prelevata) da un impianto idroelettrico è il volume di acqua prelevato nell'unità di tempo [m^3/s]. In funzione della portata si parla di:

- i. piccola portata ($Q > 10$ m^3/s);
- ii. media portata ($Q = 10 \div 100$ m^3/s);
- iii. grande portata ($Q = 100 \div 1000$ m^3/s);
- iv. altissima portata ($Q > 1000$ m^3/s).

Per la misura della portata esistono vari metodi:

metodo velocità-area;

usato per fiumi medi e grandi, consiste nella misura della sezione trasversale del fiume e della velocità media dell'acqua. La sezione viene rilevata mediante metodi topografici, mentre la velocità media può essere misurata con vari strumenti: galleggiante, mulinello, misuratori elettromagnetici;

misura diretta delle portate mediante diluizione di un soluto nella corrente;

adatto per piccoli corsi di acqua caratterizzati da moto turbolento, il metodo più semplice consiste nella diluizione di sale da cucina in acqua e nella successiva misura a valle della conduttività elettrica della soluzione che si forma;

misura mediante stramazzo;

se il fiume è abbastanza piccolo si può realizzare una traversa provvisoria e far passare la portata d'acqua attraverso una sezione nota (lo stramazzo), mediante misure sulla geometria del sistema si risale alla portata;

metodo pendenza-area;

è un metodo adatto a valori elevati della portata e si basa sui principi dell'idraulica.

POTENZA E RENDIMENTO DI UN IMPIANTO[1, 5, 7]

La **potenza** effettivamente ottenibile da un impianto idraulico si esprime secondo la seguente formula:

$$P = \eta * Q * H * g * \rho$$

ove P è la potenza effettiva espressa in Watt, η rappresenta il rendimento globale dell'impianto, Q la portata espressa in m^3/s e H il salto geodetico espresso in m, g è l'accelerazione di gravità (9.81 m^2/s) e ρ è la densità dell'acqua (1000 Kg/m^3).

Durante il periodo di funzionamento dell'impianto, la portata Q utilizzata dalla turbina può essere costante (condizione presente soprattutto nel caso delle microcentrali) oppure variabile nel tempo e pertanto il salto H risulta anch'esso costante o variabile, dipendendo dal tipo di turbina e dalle perdite di carico idrico distribuite e localizzate.

Il rapporto tra la potenza immessa in rete (cioè dopo che sono avvenute tutte le perdite dovute a: rendimento della turbina, del generatore, del trasformatore e dell'eventuale moltiplicatore di giri) e la potenza teorica di un impianto idroelettrico è denominato

rendimento globale dell'impianto; nei moderni impianti idroelettrici esso va dall'80% al 90%, rappresentando un valore molto elevato (in particolare è il valore più elevato tra le varie fonti rinnovabili).

$\eta = P_e / P = P_e / (\gamma Q_v H)$ dove:

P_e [W] = potenza elettrica del generatore

P [W] = potenza teorica

γ [N/m³] = peso specifico dell'acqua

Q_v [m³/s] = portata volumetrica

H [m] = prevalenza.

PROGETTO DI UN IMPIANTO[1, 4, 5]

Il progetto di un impianto è il risultato di un complesso processo iterativo dove, avendo sempre in mente l'impatto sull'ambiente, le diverse soluzioni tecniche sono confrontate da un punto di vista economico. Gli studi che si dovrebbero condurre riguardano: topografia e geomorfologia del sito, valutazione della risorsa idrica e del suo potenziale energetico, selezione del sito e schema base d'impianto, turbine idrauliche, generatori e loro regolazione, studio di impatto ambientale, valutazione economica del progetto, procedure amministrative per ottenere le autorizzazioni.

Una delle particolarità salienti di questi impianti è legata al fatto che per tipologia impiantistica e taglia si prestano ad essere del tutto automatizzati. L'impiego di un macchinario elettromeccanico realizzato *ad hoc* consente in qualche modo di ottimizzarne i costi ma va comunque tenuto presente che i costi legati a questa voce non superano in genere il 10-15% del totale.

Un impianto idroelettrico è costituito da un insieme organico di macchinari, di apparecchiature varie e di opere di ingegneria destinato a trasformare l'energia idraulica di un corso d'acqua naturale o artificiale in energia elettrica. In esso si possono distinguere:

- le opere di presa, di filtraggio e di convogliamento dell'acqua;
- il locale con il macchinario;
- l'opera di scarico dell'acqua;
- la linea elettrica per il trasporto e la distribuzione dell'energia elettrica.

Le opere suddette e il tipo di macchinario e di regolamentazione dipendono da fattori fisici inerenti alle condizioni di lavoro dell'impianto (quali l'orografia, il salto e la portata, la disponibilità di un bacino di accumulo idrico) e dal tipo di esercizio dell'impianto stesso (funzionamento autonomo oppure in parallelo con una rete elettrica esistente, funzionamento completamente automatico oppure con controllo periodico di un addetto, funzionamento continuativo oppure stagionale). Il numero dei diversi componenti e la loro complessità costruttiva e, conseguentemente, operativa e gestionale variano poi ancora a seconda che si sia in presenza di una micro o mini-centrale, fermo restando che comunque tutti i componenti devono ottemperare alle normative legislative, tecniche, e ambientali.

Le opere di presa d'acqua dipendono dalla tipologia del corso d'acqua intercettato e dall'orografia locale, mentre il tipo di filtro necessario e l'opportunità di automatizzarne la pulizia dipendono dalla portata derivata e dall'entità dei corpi solidi trasportati dal flusso idrico; le microcentrali usano normalmente acqua fluente, mentre per le minicentrali è più comune la presenza a monte di modesti bacini di accumulo.

Le opere di convogliamento dell'acqua alla turbina sono costituite essenzialmente da canali o da condotte forzate e anch'esse dipendono dalla orografia, dalla portata e

dalla turbina prevista. In particolare per le microcentrali ovunque sia possibile e conveniente si utilizzano tubazioni in plastica (PEAD o PVC) attualmente in grado di lavorare alla pressione ottimale di 16 bar. La convenienza generale del progetto aumenta poi qualora l'acqua convogliata serva ad altri usi oltre a quello energetico (acqua per impianti irrigui, industriali, di depurazione e per acquedotti pubblici o privati).

Il tipo di turbina dipende fundamentalmente dalla portata turbinata e dal salto motore. Il macchinario è costituito in genere da piccole turbine Francis e Pelton per gli impianti con maggiori salti. Nel campo delle portate più elevate e dei salti contenuti, si sono assai diffuse le turbine dette Banki-Mitchell che in un prossimo futuro potrebbero essere sostituite da nuovi prototipi.

A seconda dei regimi di rotazione nominali della turbina e del generatore si può poi avere un **moltiplicatore di giri**. Quando la turbina ed il generatore girano alla stessa velocità e possono essere installati assialmente, è consigliato l'accoppiamento diretto, che evita le perdite meccaniche e minimizza le manutenzioni. In generale, soprattutto con turbine di piccola potenza, le ruote girano a meno di 400 rpm (rotazioni per minuto, vale a dire sono i giri che compie la turbina in un minuto di tempo) e ciò comporta l'obbligo di ricorrere ad un moltiplicatore per raggiungere i 700-1500 rpm degli alternatori standard. Questa soluzione è più economica, nell'ambito dei piccoli impianti, rispetto a quella di adottare un generatore speciale accoppiato alla turbina.

Il **generatore** ha la funzione di trasformare in energia elettrica l'energia meccanica (di rotazione) trasmessa dalla turbina. In origine si usavano generatori a corrente continua (dinamo), attualmente si usano generatori a corrente alternata trifase. In funzione della rete che si deve alimentare il progettista può scegliere tra: **Alternatori sincroni** che generano energia alla stessa tensione, frequenza ed angolo di fase della rete grazie ad un apparato di eccitazione associato ad un regolatore di tensione. Possono anche funzionare staccati dalla rete (in isola). Sono più costosi rispetto agli asincroni e si utilizzano per alimentare piccole reti, nelle quali la potenza del generatore rappresenta una porzione sostanziale del carico del sistema o in tutti i casi in cui la potenza della turbina sia elevata; **Alternatori asincroni** che sono semplici motori ad induzione, senza possibilità di regolazione della tensione. Girano ad una velocità direttamente rapportata alla frequenza della rete cui sono collegati. Dalla rete assorbono la corrente di eccitazione e l'energia reattiva necessaria alla propria magnetizzazione; non possono generare corrente se scollegati dalla rete perché non sono in grado di provvedere alla propria corrente di eccitazione. Si usano in grandi reti, nelle quali la loro potenza rappresenta una percentuale trascurabile del carico di sistema; hanno un rendimento inferiore rispetto ai generatori sincroni.

Il **trasformatore** è quell'elemento che si interpone tra la centrale e la rete elettrica; ha la funzione di variare la tensione della corrente in uscita dall'[alternatore](#), in particolare di portare la corrente dalla tensione di uscita del generatore a quella (alta o media tensione, ad esempio 132 kV), della linea elettrica. Il trasporto della corrente elettrica avviene infatti ad alta tensione per ridurre le perdite per effetto Joule lungo la linea. Il gruppo turbina - generatore e le apparecchiature connesse vengono infine alloggiati in un locale opportunamente dimensionato e provvisto delle adeguate protezioni.

Quadri di controllo e di potenza

In tutte le nazioni, le norme per l'erogazione d'elettricità obbligano le società di distribuzione a mantenere, entro limiti molto stretti, la sicurezza e la qualità del servizio. Il produttore indipendente, se la centrale è collegata alla rete, deve gestirla in modo che il distributore possa rispettare questi obblighi. Per questo tra i morsetti del

generatore e la linea si installano dispositivi che controllando il funzionamento della macchina, la proteggono, la mettono in parallelo con la rete o la staccano dalla stessa in caso di guasto. Il controllo si realizza mediante apparati più o meno sofisticati che misurano la tensione, l'intensità e la frequenza della corrente in ognuna delle tre fasi, l'energia prodotta dal generatore, il fattore di potenza ed eventualmente il livello dell'acqua nella camera di carico. La tensione e l'intensità di corrente si misurano mediante trasformatori di misura.

Quadri d'automazione

La maggior parte delle piccole centrali lavora senza presidio permanente di personale e funziona mediante un **sistema automatico di controllo**. Esistono dei requisiti generali che devono essere soddisfatti: tutti gli equipaggiamenti devono essere dotati di controlli manuali e misure, indipendenti dal controllo automatico, da usarsi solamente per l'avviamento iniziale dell'impianto e per le operazioni di manutenzione; il sistema deve includere i dispositivi necessari per individuare il funzionamento difettoso; i dati di funzionamento devono essere registrati; il sistema di controllo deve essere tale da permettere il funzionamento della centrale senza personale; si deve poter accedere al sistema di controllo da un punto remoto e poterne prendere il controllo.

Organi di scarico

Sono costituite da un canale a pelo libero o da una condotta in pressione che restituisce la portata d'acqua utilizzata al corso d'acqua, portando l'acqua dalla centrale al corso d'acqua.

TURBINE IDRAULICHE: CLASSIFICAZIONE [4, 7]

La turbina idraulica è quel dispositivo meccanico che trasforma l'energia potenziale e cinetica dell'acqua in energia meccanica; è essenzialmente costituita da un organo fisso, il **distributore** e da uno mobile, la **girante**. Il primo ha tre compiti essenziali: indirizza la portata in arrivo alla girante imprimendovi la direzione dovuta, regola la portata mediante organi di parzializzazione, provoca una trasformazione parziale o totale in energia cinetica dell'energia di pressione posseduta dalla portata. L'entità di questa trasformazione è l'elemento più importante per la classificazione delle turbine: quando la trasformazione da potenziale a cinetica avviene completamente nel distributore, si parla di turbine **ad azione**, altrimenti di turbine **a reazione**. La girante infine trasforma l'energia potenziale e/o cinetica dell'acqua in energia meccanica resa sull'albero motore.

Il tipo, la geometria e le dimensioni di una turbina sono condizionati essenzialmente dai seguenti parametri: salto netto, portata da turbinare, velocità di rotazione, problemi di cavitazione, velocità di fuga e costo. In funzione del salto e della portata esistono dei grafici che ci permettono di determinare quale sia il tipo di turbina più adatto al nostro corso d'acqua.

Le **Pelton** sono turbine ad azione nelle quali uno o più ugelli (una turbina ad asse verticale può avere fino a sei ugelli, con una o due giranti) trasformano totalmente la pressione dell'acqua in energia cinetica. Ogni ugello (chiamato anche boccaglio) crea un getto, la cui portata è regolata da una valvola a spillo. Solitamente sono dotate di un tegolo deflettore, che ha lo scopo di deviare il flusso dalle pale, in caso di brusco distacco di carico, in modo da evitare la fuga della turbina senza dover chiudere troppo velocemente la valvola di macchina, manovra che può causare colpi d'ariete intollerabili nella condotta. Il piano degli ugelli è sempre quello meridiano della girante

L'acqua abbandona le pale a velocità molto bassa (idealmente a velocità nulla) per cui la cassa, che contiene la ruota, non deve resistere a nessuna pressione e può quindi essere molto leggera. Sono usate per salti compresi nell'intervallo 50-1300m.

La **Turgo** è una turbina ad azione che può lavorare con salti tra i 15 ed i 300m. Rispetto alla Pelton ha pale con forma e disposizione diverse ed il getto colpisce simultaneamente più pale, similmente alle turbine a vapore. Il volume d'acqua che una turbina Pelton può elaborare è limitato dal fatto che il flusso di ogni ugello possa interferire con quelli adiacenti, mentre la turbina Turgo non soffre di questo inconveniente. Il minor diametro necessario comporta, a parità di velocità periferica della girante, una maggiore velocità angolare, che consente quindi l'accoppiamento al generatore senza il moltiplicatore, con conseguente diminuzione dei costi ed aumento dell'affidabilità.

Un altro tipo di turbina è la **CROSS-FLOW** (turbina a flusso incrociato), essa viene anche chiamata **turbina Banki-Michell**, in onore dei suoi inventori, oppure turbina Ossberger, il nome della ditta che la fabbrica da più di 50 anni. Questa turbina ad azione si utilizza con una gamma molto ampia di portate e salti tra 5 m e 200 m. Il suo rendimento massimo è inferiore all'87%, però si mantiene quasi costante quando la portata discende fino al 16% della nominale e può raggiungere una portata minima teorica inferiore al 10% della portata di progetto. L'acqua entra nella turbina attraverso un distributore e passa nel primo stadio della ruota, che funziona quasi completamente sommersa (con un piccolo grado di reazione). Il flusso che abbandona il primo stadio cambia di direzione al centro della ruota e s'infiltra nel secondo stadio, totalmente ad azione. La ruota è costituita da due o più dischi paralleli, tra i quali si montano, vicino ai bordi, le pale, costituite da semplici lamiere piegate. Queste ruote si prestano alla costruzione artigianale nei paesi in via di sviluppo, anche se, non raggiungono i rendimenti dei gruppi realizzati con tecnologie appropriate.

Le **Francis** sono turbine a reazione a flusso radiale con distributore a pale regolabili e girante a pale fisse, molto utilizzate per i medi salti (vengono usate per salti compresi nell'intervallo 10-350m).

Nelle turbine Francis veloci, l'alimentazione è sempre radiale, mentre lo scarico dell'acqua è solitamente assiale; in queste turbine l'acqua si muove come in una condotta in pressione: attraverso il distributore (organo fisso) perviene alla ruota (organo mobile) alla quale cede la sua energia, senza entrare in nessun momento in contatto con l'atmosfera. In essa l'acqua subisce una deviazione complessiva di 90°, come nella pompa centrifuga, solo che in questo caso il flusso è centripeto anziché centrifugo.

Le **Kaplan e a elica** sono turbine a reazione a flusso assiale, utilizzate generalmente per bassi salti (2-20m). Esse non presentano componente radiale di velocità, sono meccanicamente analoghe e si differenziano solo per il disegno idrodinamico delle pale. La potenza massima oggi raggiunta dalle turbine Kaplan è di circa 200.000 kW in alcune turbine impiegate in impianti brasiliani. Le pale della ruota nella Kaplan sono sempre regolabili, mentre quelle del distributore possono essere fisse o regolabili. Quando sia le pale della turbina sia quelle del distributore sono regolabili, la turbina è una vera Kaplan (o a doppia regolazione); se sono regolabili solo le pale della ruota, la turbina è una semi-Kaplan (o a singola regolazione). Le pale della ruota si muovono girando intorno ad un perno solidale con un sistema di bielle-manovelle collegate ad un tirante verticale (posto all'interno dell'albero cavo della turbina) che è azionato da un servomotore idraulico. Le turbine ad elica hanno distributore e ruota a pale fisse e sono utilizzate quando il salto e la portata sono praticamente costanti.

Passando dalla Pelton, alla Francis e infine alla Kaplan diminuisce il salto motore utile ma aumenta la portata.

La turbina **a bulbo** è una turbina a reazione che deriva dalla Kaplan, con il generatore ed il moltiplicatore (se esiste) contenuti in una cassa impermeabile, a forma di bulbo, immersa nell'acqua.

Le turbine sono progettate per un salto ed una portata predeterminata. Qualunque variazione di questi parametri deve essere compensata aprendo o chiudendo i dispositivi di regolazione della portata, come le pale direttrici, valvole o paratoie, la fine di mantenere costante, qualsiasi sia la potenza di uscita sulla rete, il livello dell'acqua nel bacino di carico o la portata che attraversa la turbina. In impianti che alimentano reti isolate, il parametro da controllare è la velocità della ruota, direttamente proporzionale alla frequenza di generazione della corrente elettrica. All'aumentare della richiesta di energia, il generatore si sovraccarica e rallenta; viceversa quando avviene un distacco di carico. Esistono due modi per regolare la velocità in queste situazioni: variare la portata di ingresso nella turbina (metodo convenzionale, attuato mediante dispositivi detti regolatori di velocità) o dissipare l'eccesso di potenza prodotta in banchi di resistenze. Nel caso di generatore asincrono, inserito in una grande rete di distribuzione, la rete stessa regola la frequenza, per cui non è necessario installare un regolatore di velocità.

IMPATTO AMBIENTALE [1, 4]

La produzione di energia idroelettrica non provoca emissioni gassose o liquide che possano inquinare l'aria o l'acqua. Gli impianti mini-idroelettrici in molti casi, con la sistemazione idraulica che viene eseguita per la loro realizzazione, portano invece notevoli benefici al corso d'acqua (in particolare la regolazione e regimazione delle piene sui corpi idrici a regime torrentizio, specie in aree montane ove esista degrado e dissesto del suolo e, quindi, possono contribuire efficacemente alla difesa e salvaguardia del territorio). I grandi impianti idroelettrici a bacino possono presentare qualche problema in più, dal punto di vista dell'inserimento ambientale, e necessitano quindi di opportune valutazioni di impatto ambientale, tese a garantire l'assenza di interferenze con l'ambiente naturale. Se si realizza una diga per un impianto a bacino si hanno le seguenti conseguenze: a monte dello sbarramento si forma un invaso, e si trasforma, quindi, un ambiente di acque correnti (acque lotiche) in un ambiente di acque ferme (acque lentiche), con un tempo di ricambio delle acque più lungo e con possibili ricadute sull'ecosistema. A valle dello sbarramento, fino al punto in cui viene rilasciata l'acqua utilizzata dalla centrale, il corso d'acqua potrebbe andare in secca per alcuni periodi se non viene garantito un rilascio continuo affinché il fiume abbia, anche in quel tratto, una portata minima adeguata; la portata minima (da garantire per legge) che garantisce all'ecosistema fluviale il naturale svolgimento di tutti i processi biologici e fisici viene **denominata "Deflusso minimo vitale"**. L'impiego tecnico di un criterio di progetto basato su tale parametro non è facile, in quanto lo stesso può essere valutato sulla base di due diversi punti di vista: quello idrologico e quello basato sugli equilibri biologici (*microhabitat*) del corpo idrico in esame. Fra i due esiste una notevole diversità. In ogni caso la stima del DMV è assai delicata ed il parametro va impiegato con notevole cautela.

Tutti questi aspetti devono essere presi in considerazione durante lo studio dell'impianto a bacino. Per questi motivi vengono fatte delle opportune scelte in fase progettuale e vengono prese delle opportune precauzioni per evitare qualsiasi danno all'ecosistema.

L'**inquinamento acustico** proveniente da una centrale dipende prevalentemente dalle turbine e dagli eventuali meccanismi di moltiplicazione dei giri. Attualmente il rumore può essere ridotto fino a 70 dB (A) all'interno della centrale, e fino a livelli praticamente impercettibili all'esterno. Ad esempio l'impianto di Fiskbey 1 a Norrköping, in Svezia, fa registrare una rumorosità interna a pieno carico di 80 dB (A) e di 40 dB (A) all'esterno a 100 m di distanza, valore ampiamente accettabile. La rumorosità è quindi una questione facilmente risolvibile.

Inquinamento estetico. La pubblica opinione è riluttante ad accettare l'installazione di impianti che modifichino le caratteristiche visuali dei siti, in particolar modo se si tratta di impianti idroelettrici d'alta quota od inseriti in un centro urbano. Per quanto riguarda i grossi impianti a bacino, qui l'impatto visivo è evidente e difficilmente mascherabile, in questo caso è necessaria una attenta valutazione dell'impatto dell'impianto sul territorio; ed in questo caso si deve anche valutare una possibile valorizzazione estetica che può essere data a questi impianti, rappresentativa comunque di un modo pulito di fare energia. Ognuno degli elementi di un impianto (opere di presa, sbarramento, centrale, opere di restituzione, sottostazione elettrica) può determinare un cambiamento nell'impatto visuale del sito. Per diminuire l'impatto si possono mascherare alcuni di questi elementi mediante la vegetazione, usare colori che meglio si integrino con quelli del paesaggio ed eventualmente costruire nel sottosuolo una parte degli impianti (ad esempio la centrale).

Il **rapporto con gli ecosistemi** è un aspetto fondamentale da tenere presente nella progettazione di un impianto idroelettrico; esistono due aspetti che sono strettamente collegati con il prelievo di acque superficiali e che possono generare impatti di due diversi ordini:

a) impatto relativo alla variazione (diminuzione) della quantità dell'acqua, con possibili conseguenze conflittuali per gli utilizzatori ed effetti sulla fauna acquatica;

b) impatto relativo alla variazione di qualità dell'acqua in conseguenza di variazioni di quantità ed anche in conseguenza di possibili modificazioni della vegetazione riparia.

La diminuzione della portata di acqua non deve quindi essere eccessiva e deve essere rispettato il valore del deflusso minimo vitale (DMV), altrimenti si possono recare danni alla deposizione, incubazione, la crescita ed il transito dei pesci; per quanto riguarda quest'ultimo aspetto si deve prendere in considerazione il movimento dei pesci che risalgono la corrente e quelli che la discendono, realizzando gli opportuni passaggi e installare le opportune reti che evitino che i pesci entrino nelle opere di presa e che passino nella turbina (alcuni tipi di turbine possono essere causa di mortalità della fauna ittica).

La generazione di energia elettrica per via idroelettrica presenta l'indiscutibile **vantaggio ambientale** di non immettere nell'ecosfera sostanze inquinanti, polveri, calore, come invece accade nel caso dei metodi tradizionali di generazione per via termoelettrica. In particolare si riducono le emissioni di anidride carbonica (CO₂) di 670 g per ogni kWh di energia prodotta. A parità di energia prodotta, una centrale idroelettrica che genera 6 GWh permette di ridurre l'emissione di anidride carbonica di 4.000 t/anno rispetto ad una centrale a carbone. Per una generazione di 1.900 GWh/anno, quale quella che si realizzerebbe sviluppando il potenziale prima detto, si avrebbe una riduzione di 1,27 Mt/anno di diossido di carbonio e 3.800 t di ossidi di azoto oltre a 535 t di particolati vari.

Altri benefici sono, come per le altre rinnovabili, la minore dipendenza dalle fonti energetiche estere, la diversificazione delle fonti e la riorganizzazione a livello regionale della produzione di energie.

PRATICHE ATTUALI DI MITIGAZIONE AMBIENTALE [7, 8]

Di seguito è riportato il riassunto di uno studio compiuto negli USA dal NREL (National Renewable Energy Laboratory) su questo argomento.

L'obiettivo principale delle mitigazioni ambientali nelle centrali idroelettriche è quello di minimizzare l'impatto relativo alla loro costruzione e al ciclo produttivo. Tali accorgimenti comportano generalmente un aumento dei costi, una riduzione dei profitti e della produzione di energia elettrica. Soprattutto negli USA l'applicazione di queste pratiche di mitigazione è molto diffusa per ragioni normative, ma anche sociali; essa è estesa sia a centrali idroelettriche statali che private. Nello specifico la mitigazione ambientale riguarda:

- la qualità dell'acqua, in particolare l'ossigeno in essa disciolto
- il deflusso minimo vitale (DMV)
- il passaggio di pesci a monte ed a valle dell'impianto.

Si è già definito in precedenza il concetto di DMV e si è evidenziata la difficoltà nella sua valutazione. Uno dei metodi utilizzati per la stima del DMV è l'IFIM (Instream Flow Incremental Methodology): la sua applicazione è molto costosa e complicata.

Spesso i flussi d'acqua rilasciati dalle centrali idroelettriche contengono concentrazioni piuttosto modeste di ossigeno disciolto (OD): tale circostanza è più frequente in tutti gli impianti nei periodi estivi, mentre il problema si acuisce nelle grandi centrali, che sono dotate di bacini profondi, con basse velocità di efflusso, le quali limitano il processo diffusivo (il coefficiente di diffusività dell'ossigeno nell'acqua, in sistemi a basse velocità di trasferimento di materia, dipende dal numero di Schmidt e di Reynolds, quest'ultimo definito come $\rho \cdot v \cdot D / \mu$, ove ρ è la densità del fluido, v è la velocità media, D il diametro della tubazione e μ è la viscosità del fluido) e nelle centrali ubicate in climi caldi. Un'opportuna concentrazione di OD è indispensabile per la vita dei microrganismi acquatici. Sono stati adottati molti metodi in proposito, tra cui i più importanti, diffusi ed efficaci sono:

- tecniche di aerazione dei canali di scarico dalle turbine idrauliche, con l'impiego di diffusori d'aria e di aeratori superficiali
- tecniche di aerazione della centrale elettrica, usando gli sfiati delle turbine e l'aerazione del tubo d'aspirazione delle turbine a reazione
- tecniche operazionali, come la regolazione della portata di overflow e delle caratteristiche operative delle turbine.

Attualmente, oltre 56 impianti idroelettrici coinvolti nello studio adottano la mitigazione ambientale dell'aumento di OD: oltre il 60% di esse ha scelto il metodo delle tecniche operazionali, mentre il 30% preferisce le tecniche di aerazione artificiale dell'aria, che attraversa le turbine. Un punto lacunoso di tali accorgimenti risiede nel fatto che spesso gli addetti alle centrali operano un monitoraggio solo della qualità dell'acqua (in particolare della temperatura e della concentrazione di OD), senza effettuare controlli sul sistema biologico, sul quale non si possono valutare gli eventuali giovamenti prodotti dalle suddette pratiche di mitigazione ambientale.

Le migrazioni ittiche controcorrente di pesci anadromi, come il salmone, e di pesci stanziali, come le anguille e le trote, sono spesso influenzate negativamente dalla presenza delle dighe e degli sbarramenti in genere. In particolare la deposizione delle uova è danneggiata in modo rilevante: pertanto sono necessarie delle soluzioni in merito, sia in fase costruttiva che operativa. I sistemi più utilizzati per far fronte a questa emergenza sono la scala di monta e gli ascensori: la prima consiste in una serie

di cassette o di deflettori a gradini, che veicolano l'acqua nei dintorni dello sbarramento, agevolando così la migrazione dei pesci; i secondi sono dei montacarichi, che agiscono pescando da valle e scaricando a monte, fungendo così da mezzi di trasporto per i pesci migratori. Tempo fa la pratica più in voga era quella di catturare i pesci a valle, caricarli su camion e liberarli a monte della diga nelle acque comunemente scelte dai pesci per deporre le uova. In fase costruttiva sono previsti dei passaggi preferenziali idonei alla migrazione della fauna ittica e in fase post operam, nel 60% dei casi, si effettua il monitoraggio della situazione (conteggio del numero di pesci transitati; in casi rari si ricorre addirittura al censimento delle tipologie di pesci migrati).

Per evitare che i pesci, nei loro spostamenti in equicorrente (verso valle), finiscano nelle turbine idrauliche, sono previste delle apparecchiature di controllo. Inoltre le misure di mitigazione in questo caso sono simili a quelle adottate per incrementare l'OD: infatti la portata di stramazzo e il DMV rappresentano delle soluzioni efficaci per limitare la morte dei pesci all'interno delle turbine. Queste portate d'acqua sono da considerare "nonpower water release", vale a dire efflussi idrici non utilizzati a scopi produttivi d'energia, ma finalizzati ad agevolare e a favorire il transito della fauna ittica. Oltre a questi semplici accorgimenti "naturali" sono in fase di studio altre soluzioni tecnologiche più sofisticate, come il passaggio guidato dei pesci utilizzando una luce od un segnale acustico, cercando allo stesso tempo di limitare le perdite d'acqua sfruttabile per la produzione di corrente elettrica. Per verificare l'efficacia di tali accorgimenti si adottano vari sistemi di misurazione: uno dei più diffusi è la griglia di presa a barre angolari, in cui la griglia per intercettare i detriti è posta con una certa angolazione rispetto al flusso d'aspirazione e le relative barre sono poco distanziate (circa 2 cm). Le altre tipologie di griglie di protezione frequentemente utilizzate sono rappresentate dai modelli modificati rispetto a quelli tradizionali di cui sopra (barre ancora più fitte e meno distanziate), e dai sistemi più innovativi, che prevedono in aspirazione griglie di protezione con fili metallici a cuneo. Tutte le griglie di protezione sono progettate in relazione ad una velocità massima di aspirazione e necessitano di canali di scolo o di percorsi con bypass. Si evidenzia tuttavia che circa l'80% delle centrali idroelettriche incluse nello studio del NREL non effettuano studi sulla mortalità dei pesci.

MERCATO [1, 4]

L'energia idroelettrica è tra le rinnovabili quella che probabilmente ha maggior impatto sugli ecosistemi ma che, d'altro canto, fornisce i migliori rendimenti e permette (al pari dell'eolico) di installare grosse potenze; a livello mondiale è, tra le rinnovabili, quella che maggiormente contribuisce alla produzione di energia elettrica. Permette di ottenere, come gli impianti eolici, energia meccanica facilmente trasformabile in energia elettrica.

Dai dati relativi alla produzione energetica in Italia da fonte idroelettrica si può rilevare nel periodo 1963-2000 il passaggio da circa 42.000 GWh a 51.000 GWh, quindi un aumento sensibile della produzione (21%); contemporaneamente la quota di energia idroelettrica rispetto al totale è andata rapidamente calando, a causa dell'aumento della domanda energetica a cui si è fatto fronte principalmente con fonte termoelettrica. La quota dell'idroelettrico è infatti passata dal 65% del totale dell'energia prodotta in Italia nel 1963 al 19% del 2000

Secondo le analisi condotte da TONDI ed altri (1999) esistono quote significative di possibile crescita per gli impianti idraulici in Italia, e tali stime trovano conferma

anche nelle valutazioni dell'ENEA (1998) secondo cui sarebbe possibile realizzare in Italia, entro il 2010, 850 MW di impianti idraulici ($P < 10$ MW), avendone messi in funzione per circa 311 MW entro il 2001 insieme a 450 MW di impianti di taglia superiore a 10 MW.

Nel mondo l'energia idroelettrica ha, come le altre fonti rinnovabili, dei livelli di utilizzo diversi se si prendono in considerazione i paesi industrializzati e quelli in via di sviluppo. In quelli industrializzati sono oramai presenti i grandi impianti e l'ambito di sviluppo è quello del mini-idroelettrico. Invece in molti paesi in via di sviluppo la fonte idroelettrica non è ancora molto utilizzata, rappresentando comunque una discreta fonte potenziale di energia. Si stima una potenza installata di 47.000 MW nel mondo; in Europa la potenza installata è pari a 9500 MW.

In molti paesi, quali ad esempio Norvegia, Repubblica democratica del Congo e Brasile, rappresenta la fonte principale di energia elettrica. L'impianto Itaipu sul Rio Paraná, tra Brasile e Paraguay, ufficialmente inaugurato nel 1982, ha la più grande capacità del mondo (12.600 megawatt a pieno regime).

APPLICAZIONI [1, 4]

L'idroelettrico è, rispetto alle altre fonti rinnovabili, già arrivato ad un valore molto elevato di utilizzo delle risorse. I grandi impianti idroelettrici sono infatti oramai quasi tutti realizzati ed i margini di un ulteriore sviluppo si possono avere nella realizzazione dei piccoli impianti (mini-hydro)

In genere molti impianti di *piccola taglia* si trovano realizzati in aree montane su corsi d'acqua a regime torrentizio o permanente e l'introduzione del telecontrollo, telesorveglianza e telecomando consentono di recuperarli ad una piena produttività, risparmiando sui costi del personale di gestione, che in genere si limita alla sola manutenzione ordinaria con semplici operazioni periodiche (ad es. la sostituzione dell'olio per la lubrificazione delle parti). Molti impianti di piccola taglia attuano il cosiddetto *recupero energetico*. I sistemi idrici nei quali esistono possibilità di recupero sono assai diversi e possono essere indicativamente raggruppati nelle seguenti tipologie:

- a. acquedotti locali o reti acquedottistiche complesse;
- b. sistemi idrici ad uso plurimo (potabile, industriale, irriguo, ricreativo, etc.);
- c. sistemi di canali di bonifica o irrigui;
- d. canali o condotte di deflusso per i superi di portata;
- e. circuiti di raffreddamento di condensatori di impianti motori termici.

In linea generale, nei sistemi idrici in cui esistono punti di controllo e regolazione della portata derivata o distribuita all'utenza, come pure dei livelli piezometrici, attraverso organi del tipo di paratoie, valvole, opere idrauliche (vasche di disconnessione, sfioratori, traverse, partitori), cioè sistemi di tipo dissipativo, è possibile installare turbine idrauliche che siano in grado di recuperare salti altrimenti perduti.

Si può dire che esiste la convenienza a realizzare impianti di piccola taglia ove le condotte già esistano insieme a salti e portate interessanti, sotto questo punto di vista gli acquedotti rappresentano una significativa possibilità di sfruttamento.

CONSIDERAZIONI ECONOMICHE[5]

Per procedere alla valutazione economica dell'impianto idroelettrico, appurato l'andamento della potenza generabile e dell'energia effettivamente utilizzabile nel

periodo di funzionamento dell'impianto stesso, si procede alla definizione di tutte le voci di costo ripartite in

- **costi di investimento**: opere civili, materiali vari, macchinari, manodopera, progetto e permessi;
- **oneri di gestione** : consumi, costi di manutenzione e fissi.

Per quanto concerne i benefici ricavabili vi è sovente una notevole diversità a seconda che l'impianto sia autonomo o lavori in parallelo con la rete elettrica pubblica. In ogni caso in tali valutazioni occorre procedere il più dettagliatamente possibile ed è chiaro che la convenienza economica cresce quanto più si utilizza l'energia prodotta dall'impianto. Vi sono parecchi metodi per valutare la convenienza suddetta: alcuni metodi confrontano globalmente il costo dell'investimento con il risparmio energetico ottenibile, mentre altri metodi confrontano il costo unitario globale dell'energia auto prodotta con quello dell'energia altrimenti prevista, energia quest'ultima fornita dalla rete pubblica o da altre fonti energetiche (gruppo elettrogeno a olio combustibile, impianto a energia solare, eolica, ecc.). L'analisi economica viene estesa al tempo di vita dell'investimento e viene effettuata applicando un opportuno tasso di attualizzazione ai valori dei diversi anni.

Il costo unitario dell'energia prodotta, ossia il costo del chilowattora C , va calcolato con la formula seguente:

$$C = [I / NE] + [I / E] * i + [G / E]$$

Dove i parametri rappresentano:

- **I**= investimento iniziale;
- **N**= numero di anni d'ammortamento (solitamente diverso per le opere civili e per i macchinari)
- **E** = energia utilizzata annualmente;
- **i** = tasso d'interesse;
- **G** = costo totale annuo di esercizio e di manutenzione.

Sinteticamente si può affermare che mentre il costo del macchinario è più facilmente definibile a priori, i costi relativi alle opere civili risultano fortemente variabili in funzione delle caratteristiche dei siti e degli eventuali imprevisti tecnico-burocratici che si possono incontrare in fase di esecuzione dei lavori. L'esperienza comunque conferma che l'idroelettricità in piccola scala risulta normalmente competitiva rispetto alle altre fonti energetiche rinnovabili e sovente anche nei confronti delle fonti tradizionali soprattutto quando per queste ultime vengono calcolati gli "effettivi" costi globali unitari. Infine, considerata l'importanza del rispetto ambientale, valore emerso con particolare evidenza in questi tempi e per il quale è auspicabile un interesse sempre più ampio anche per il futuro, si può certamente confermare che le micro e mini-centrali presentano ampie garanzie in tal senso, tenuto conto delle loro stesse caratteristiche intrinseche di installazione e di funzionamento.

ASPETTI NORMATIVI [5]

Per procedere alla installazione di una micro o mini-centrale idroelettrica occorre innanzitutto essere in possesso della concessione per la derivazione delle acque, la cui domanda va inoltrata alla Regione interessata mediante l'Ufficio del Genio Civile che deve esaminare il progetto dell'impianto. Una copia di tale progetto deve essere presentata alla Sovrintendenza di beni territoriali, qualora l'impianto venga installato in una zona soggetta a vincoli ambientali. Occorre anche inoltrare una comunicazione scritta al Ministero dell'Industria, Commercio e Artigianato, all'ENEL e all'Ufficio tecnico delle imposte di fabbricazione della provincia (UTIF) e, se necessario si deve

presentare domanda al Corpo Forestale dello Stato nel caso di esecuzione di sterri. Il Comune di appartenenza deve infine essere interessato in merito alle strutture edili previste nel progetto. Alcune delle domande suddette possono essere eliminate nel corso di ricostruzione di un impianto obsoleto o di ammodernamento di un impianto già funzionante.

Per quanto riguarda l'energia elettrica prodotta essa può essere utilizzata completamente per i consumi interni dell'autoproduttore oppure può essere ceduta interamente o in parte all'ENEL che ha la funzione di banca d'energia e che stipula con l'autoproduttore un vero e proprio contratto commerciale, la cui tipologia viene solitamente definita in base alla potenza generata e alla configurazione dei consumi effettuati dall'autoproduttore stesso (contratto di cessione totale o parziale, scambio, vettoriamento, integrazione, soccorso, riserva programmata, ecc.).

FONTI E RIFERIMENTI

[1]: <http://www.isesitalia.it/>

[2]: http://www.novanet.it/vvol/scuola/sc_inf/sc_media_mquadrio/alunni/idro/index_e_i.htm

[3]: <http://www.strom.ch/italiano/home/home.asp>

[4]: <http://enelgreenpower.enel.it/it/>

[5]: <http://www.confartigianato.it/energia/documenti/Servizi/prontuario/idroel.htm>

[6]: <http://www.skuola.net/chimica/energie.asp>

[7]: energia!lab (ingg. Doria, Forni, Andretta, Puglioli)

[8]: U.S. DOE (Department of Energy)