

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

*Relazione per la prova finale*  
***Impianti Idroelettrici di Pompaggio  
nell'attuale sistema energetico***

Tutor universitario: Prof.ssa Anna Stoppato

Laureando: *Alvise Anniciello*

Padova, 13/07/2023

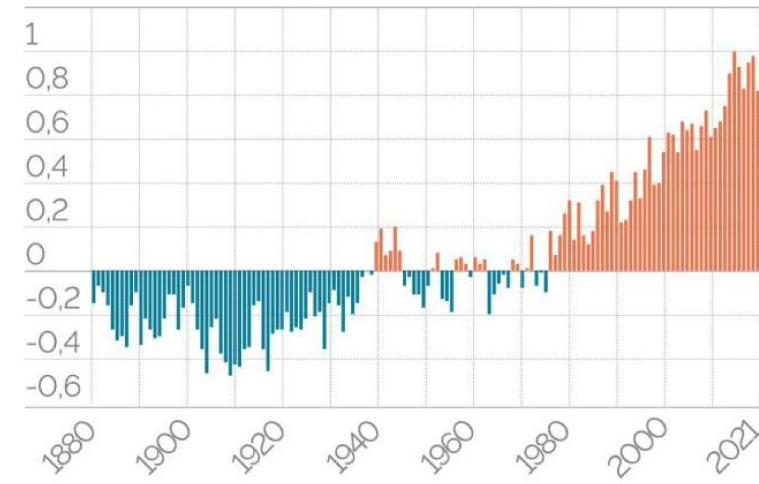
La Terra si sta surriscaldando.

La comunità scientifica è compatta nell'affermare che gli esseri umani stanno influenzando drasticamente questo processo; una delle principali cause è l'emissione di CO<sub>2</sub> prodotto in gran parte dal settore energetico.

La Cop26 di Glasgow, che si è tenuta nel novembre 2021, ha sancito l'impegno a raggiungere entro il 2050 la cosiddetta Carbon Neutrality.

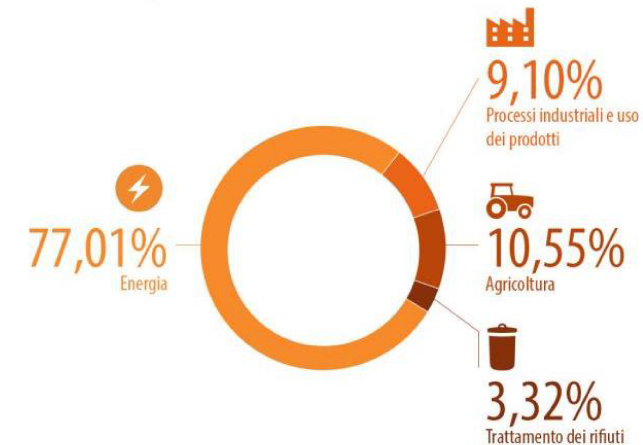
Per raggiungere questo obiettivo lo strumento principale è la transizione energetica, cioè il passaggio da un mix energetico centrato sui combustibili fossili a uno a basse o a zero emissioni di carbonio, basato sulle fonti rinnovabili.

Questo cambio importante nel settore energetico, fondamentale per la salvaguardia del nostro Pianeta, porterà molti vantaggi ma allo stesso tempo bisognerà affrontare molte difficoltà legate alla produzione e gestione dell'energia da fonti rinnovabili.



Fonte:  
NOAA

ISPI



\*Tutti i settori esclusi uso del suolo, cambiamenti di uso del suolo e silvicoltura (LULUCF)  
La percentuale totale è diversa da 100% a causa dell'arrotondamento delle cifre

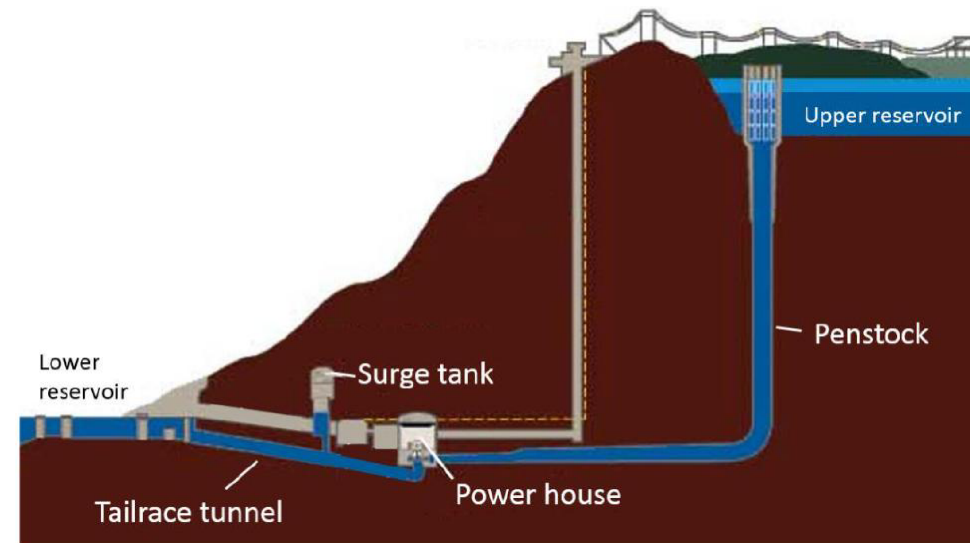
Fonte: Agenzia europea dell'ambiente (EEA)



Lo scopo di questo progetto é descrivere l'importanza dei sistemi di accumulo di energia nell'attuale e futuro sistema energetico ed in particolare gli Impianti Idroelettrici di Pompaggio.

Descrivendo di ques'ultimi:

- Componenti fondamentali
- Potenza ed efficienza
- Configurazioni e tipologie di utilizzo
- Importanza nella regolazione della frequenza

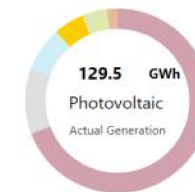


Le energie rinnovabili rappresentano l'elemento portante della transizione energetica. A rigore, l'energia utilizzata non si rinnova mai, ma si trasforma in energia elettrica. L'energia solare, insieme a quella eolica, è la grande protagonista della transizione energetica in atto.

La capacità fotovoltaica globale è aumentata da 40 GW a 580 GW fra il 2010 e il 2019. I costi della produzione di elettricità da fotovoltaico sono diminuiti dell'82% nell'ultimo decennio. Con le nuove tecnologie si potrà aumentare l'efficienza dei pannelli solari del 30% e la produttività di oltre il 20%.

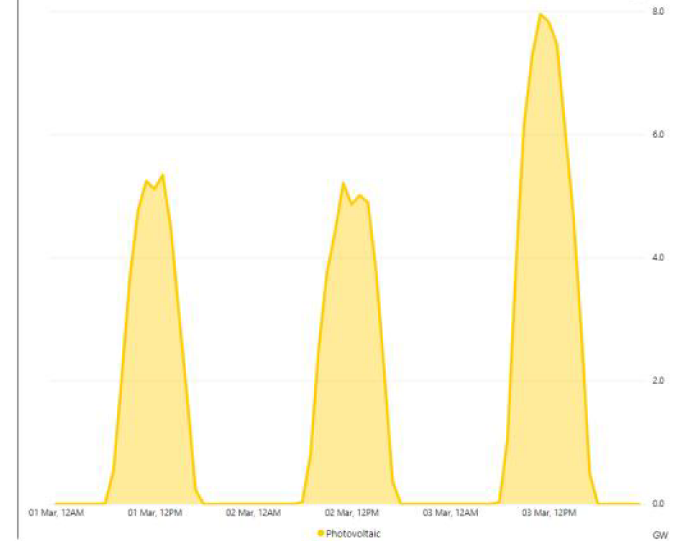
Anche nel settore dell'energia eolica la tecnologia ha fatto enormi passi in avanti: la capacità complessiva dei parchi eolici onshore è salita dai 178 GW del 2010 ai 594 GW del 2019 con le pale eoliche che arrivano a un diametro di 200 metri. E fra il 2010 e il 2019 i costi sono scesi del 39%.

From: 01/03/2023 To: 03/03/2023  
Last update: 03/03/2023 23:00

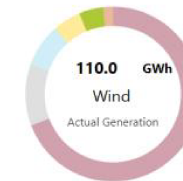


Actual Generation per primary source [GWh]

Thermal	1,707.6
Hydro	278.8
Self-consumption	197.5
Wind	129.5
Photovoltaic	110.0
Geothermal	44.3



From: 01/03/2023 To: 03/03/2023  
Last update: 03/03/2023 23:00



Actual Generation per primary source [GWh]

Thermal	1,707.6
Hydro	278.8
Self-consumption	197.5
Wind	129.5
Photovoltaic	110.0
Geothermal	44.3





Da un modello di generazione di energia del tutto programmabile, si va verso uno scenario in cui la caratteristica intrinseca è la non programmabilità.

La sfida più grande da affrontare sta nel trovare un modo di gestire le differenze quotidiane tra domanda e offerta. Impianti eolici e fotovoltaici, infatti, generano un disallineamento tra la produzione di energia e il suo consumo, in parte prevedibile e in parte dovuto alle condizioni meteorologiche.

Se proviamo a immaginare come dovrà essere la gestione energetica del futuro, è certo che servirà flessibilità.

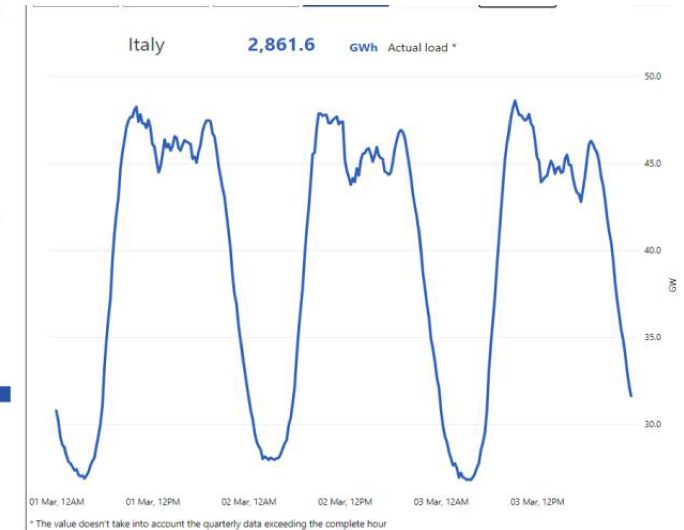
È qui che nasce la necessità di sistemi che siano in grado di accumulare grandi quantità di energia assorbendola dalla rete e rilasciarla in un momento diverso. Primi tra questi impianti sono quelli Idroelettrici di Pompaggio.

From: 01/03/2023 To: 03/03/2023  
Last update: 10/06/2023 11:00



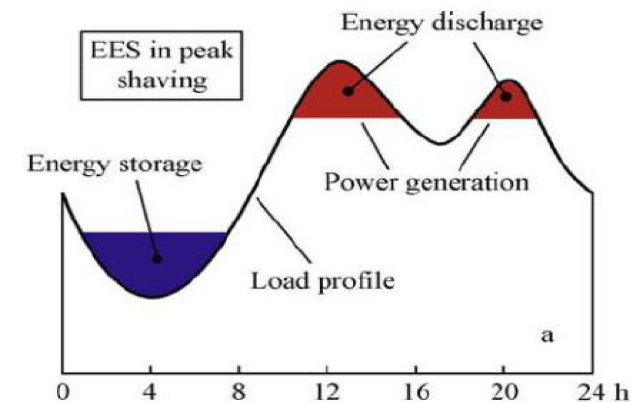
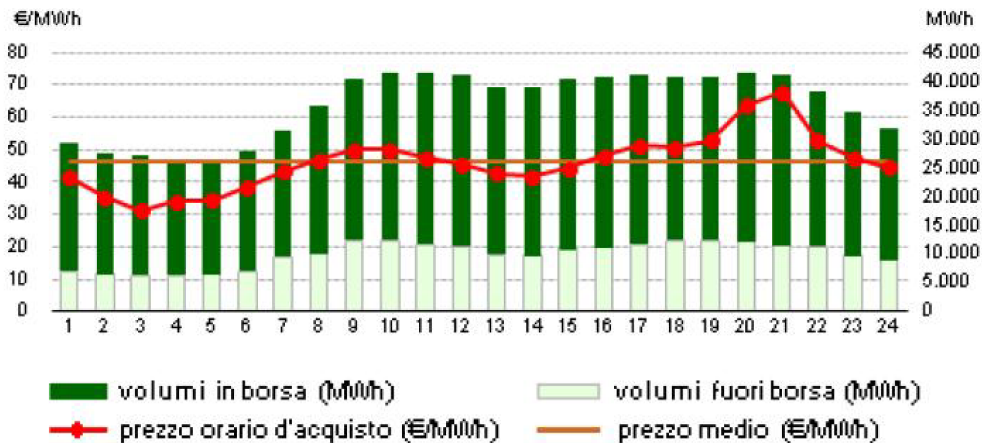
Actual load  
per bidding-zone [GWh]

North	1,641.4
Centre-South	476.3
Centre-North	264.9
South	193.5
Sicily	161.6
Sardinia	73.8
Calabria	50.1



**LOAD SHIFTING** - Questo termine significa “trasferimento del carico”, ovvero spostare la produzione di energia richiesta ad un altro momento della giornata piú favorevole.

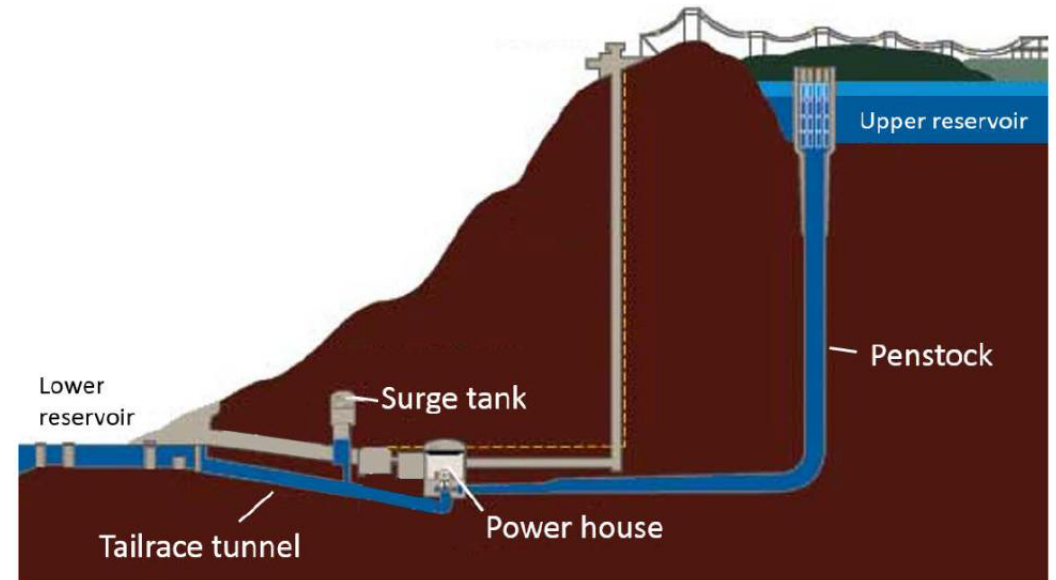
**PEAK SHAVING** - La sua traduzione é “livellamento del carico”, grazie ai sistemi di accumulo si riesce a fornire l’energia totale giornaliera diminuendo però la potenza massima che dovrebbero affrontare gli impianti di produzione durante i picchi.



Negli impianti idroelettrici di pompaggio l'energia viene accumulata sotto forma di energia potenziale gravitazionale.

Nella fase in cui si vuole accumulare energia l'acqua dal serbatoio inferiore viene pompata ad un'altitudine maggiore nel serbatoio superiore (l'energia elettrica viene assorbita dal motore che attiverà la pompa così da trasmettere tale energia all'acqua prima come cinetica ed infine come potenziale).

Quando si vuole generare energia invece l'acqua viene fatta scendere lungo la condotta fino al bacino di valle (l'energia cinetica attiva la turbina che avvierà il generatore ottenendo energia elettrica).



**Penstock (condotta forzata)** = tubazione o tunnel scavati di grande dimensione che collegano il bacino superiore fino alla pompa/turbina.

- Spesso, ma non sempre, sono rivestiti in acciaio o cemento
- La velocità del flusso è comunemente tra 1-5 m/s
- Il diametro della condotta è solitamente 5-10 m,

**Tailrace tunnel (canale di restituzione)** = condotta che collega il bacino inferiore alla pompa/turbina.

- Generalmente di dimensioni maggiori rispetto al penstock
- Bassa pressione e velocità del flusso
- Piccola pendenza in discesa verso la pompa, in questo modo la prevalenza data all'ingresso della pompa diminuisce la possibilità di cavitazione

**Surge tank (serbatoio di espansione)** = serbatoio di accumulo, con all'interno aria, con la funzione di assorbire le brusche variazioni di pressione presenti all'avviamento o durante il passaggio di modalità.

- Può essere situato nel Penstock o nel Tailrace tunnel
- Molto importante per condotte lunghe

**Power house (sezione di potenza)** = parte dell'impianto dove viene spesa o generata la potenza elettrica.

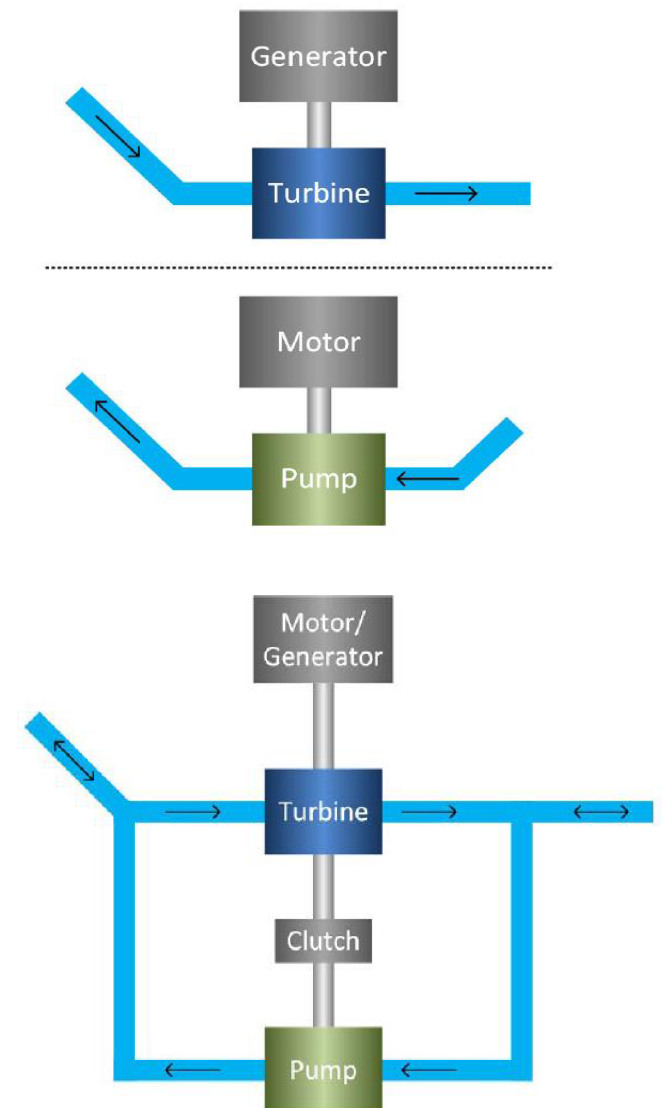
- Nella maggiorparte dei casi questa sezione è sotterranea
- Come già detto spesso si trova ad un livello inferiore rispetto al bacino di valle
- Ci possono essere diverse configurazioni che verranno descritte in seguito (binary set, ternary set, quaternary set)

## Quaternary set

- La pompa collegata al motore e la turbina collegata invece al generatore sono completamente separate
- Le condotte penstock e tailrace possono essere separate
- I costi per la costruzione di tale configurazione sono elevati
- I rendimenti sono molto alti, infatti la pompa e la turbina sono progettate individualmente per avere alte efficienze
- Comunemente adottate fino al 1920

## Ternary set

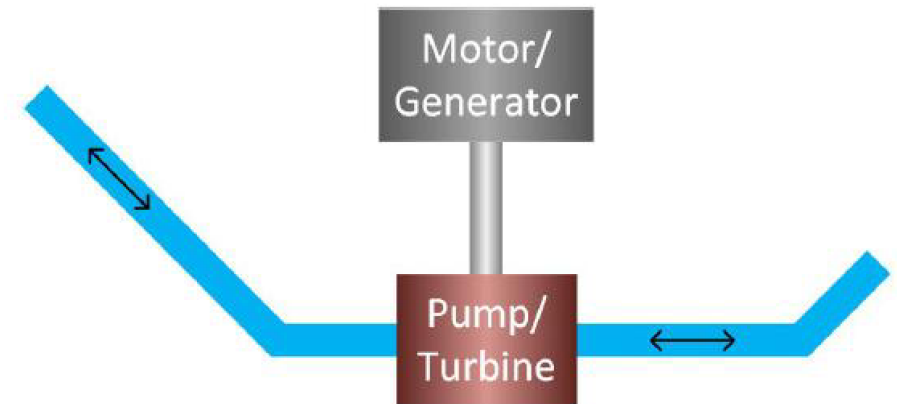
- La pompa e la turbina sono collegate attraverso lo stesso albero
- Durante la fase di avviamento per il pompaggio può essere utilizzata la turbina per portare la pompa alla velocità di rotazione sincronizzata con la rete
- Pompa e turbina possono essere ottimizzate individualmente
- Configurazione utilizzata quando la prevalenza supera i limiti di utilizzo di una pompa/turbina monostadio





## Binary set

- Viene utilizzata una singola pompa/turbina reversibile accoppiata ad un unico motore/generatore
  - É la configurazione piú utilizzata per i moderni sistemi PHES
  - Minori costi di installazione (minor numero di componenti e organi di controllo, percorsi idraulici semplificati)
  - Minor efficienza, per il dimensionamento ed il design va scelto un compromesso tra le performance della pompa e quelle della turbina
  - Il funzionamento da pompa o turbina implica sensi di rotazione opposti, questo si riflette in un tempo necessario piú lungo per cambiare modalitá di lavoro
  - Durante l'avviamento va svuotata la condotta per raggiungere la velocitá di sincronismo



Assumendo  $V_u$  il volume di acqua nella riserva superiore ed  $h$  la prevalenza (dislivello) tra i due bacini. L'**energia totale immagazzinata** é:

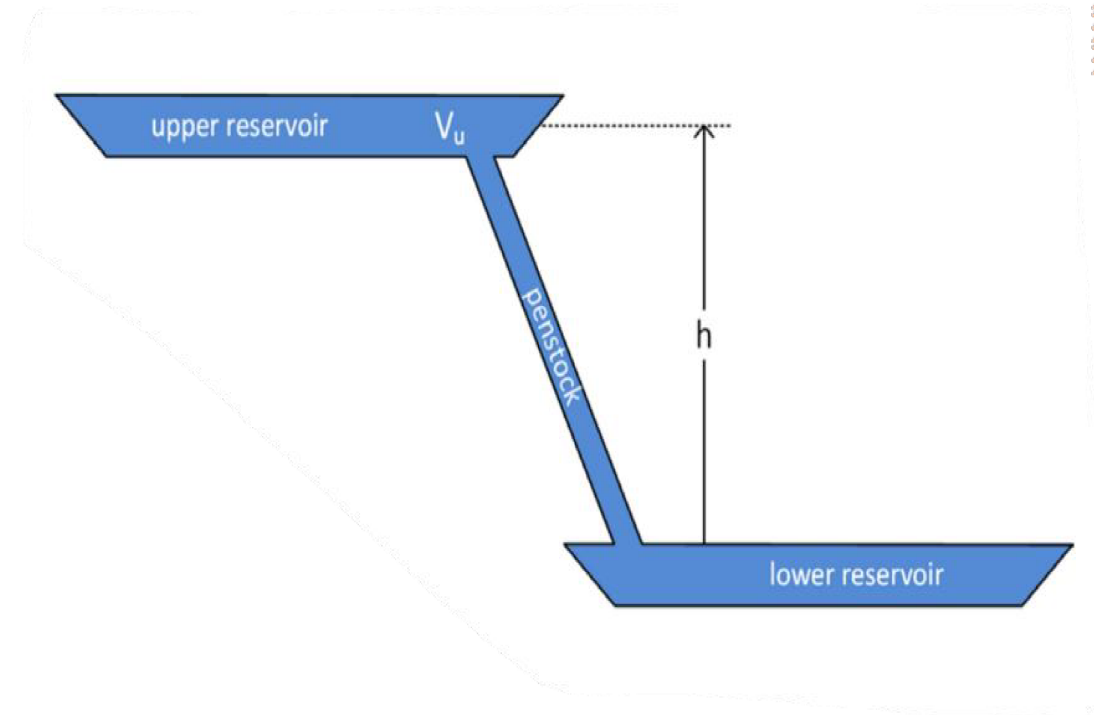
$$E_s = mgh = V_u \rho gh \quad \text{con } \rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ (H}_2\text{O)}$$

La **densità di energia** (energia per unità di volume) che corrisponde alla pressione idrostatica  $p$  al livello del bacino inferiore é:

$$e_v = E_s / V_u = \rho gh = p$$

La **potenza massima estraibile** dall'acqua é così definita:

$$P = e_v Q = pQ = \rho ghQ \quad \text{con } Q = \text{portata volumetrica}$$



**Trasformatore perdite:**

- Resistenza degli avvolgimenti
- Flussi di dispersione
- Isteresi e correnti parassite nel nucleo
- Corrente di magnetizzazione
- Perdite tot.  $\approx 0,5\%$

**Motore/Generatore**

- Perdite resistive
- Perdite nel ferro
- Perdite meccaniche
- Perdite tot.  $\approx 2\%$

**Pompa/Turbina**

- Perdite volumetriche
- Perdite idrauliche
- Perdite meccaniche
- Perdite tot.  $\approx 7-10\%$

**Penstock perdite:**

- Velocità del flusso
- Diametro, lunghezza, rivestimento della condotta
- Perdite tot.  $\approx 1\%$

L'efficienza dell'operazione di **pompaggio** é:

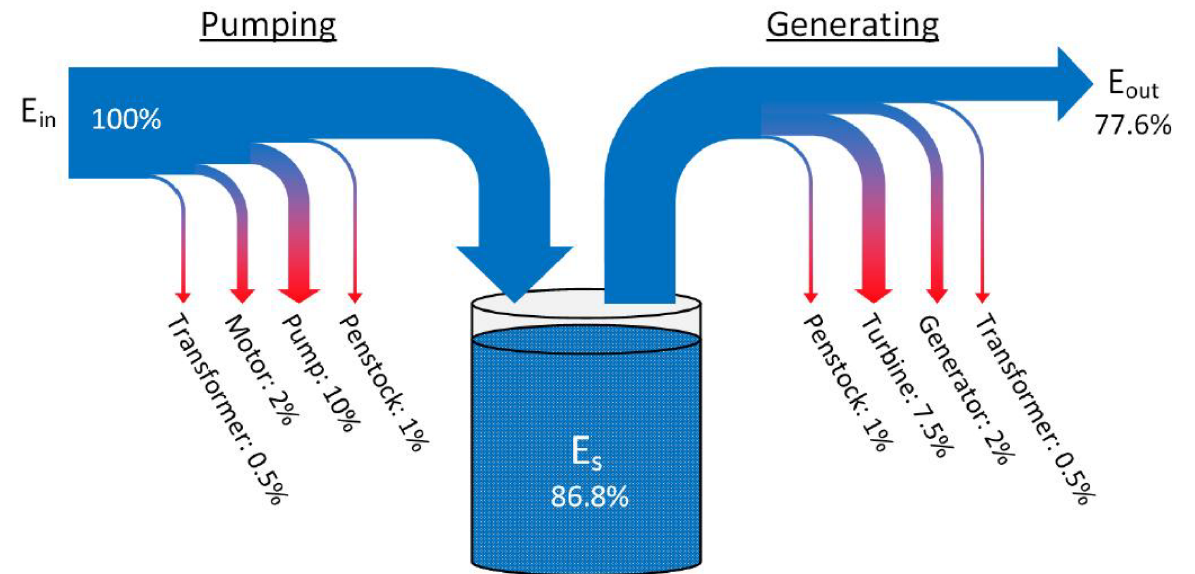
$$\eta_p = \eta_{trasf} \eta_{motor} \eta_{pump} \eta_{pens}$$

L'efficienza dell'operazione di **generazione** é:

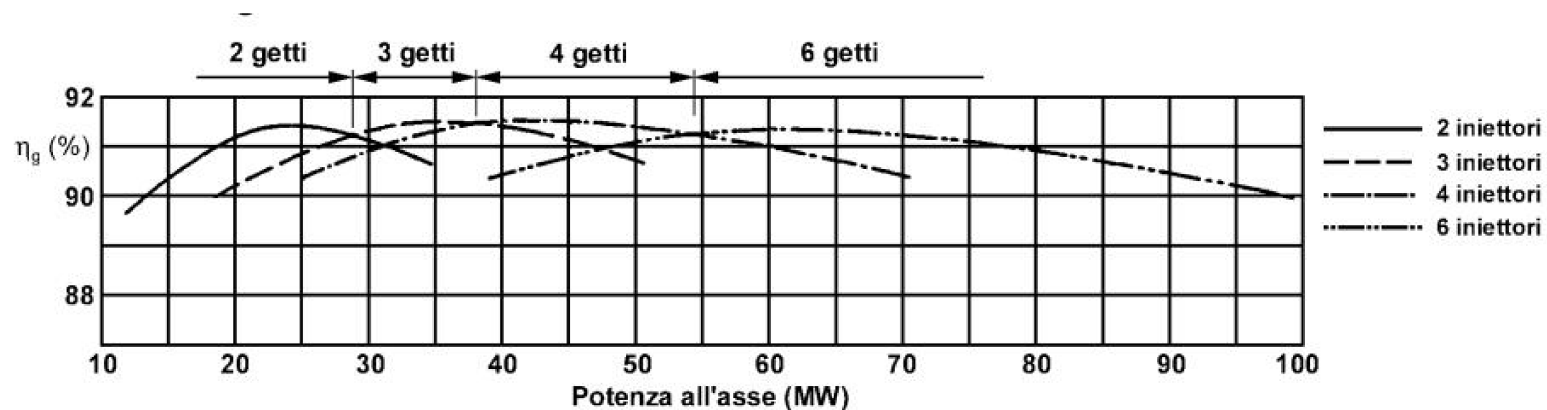
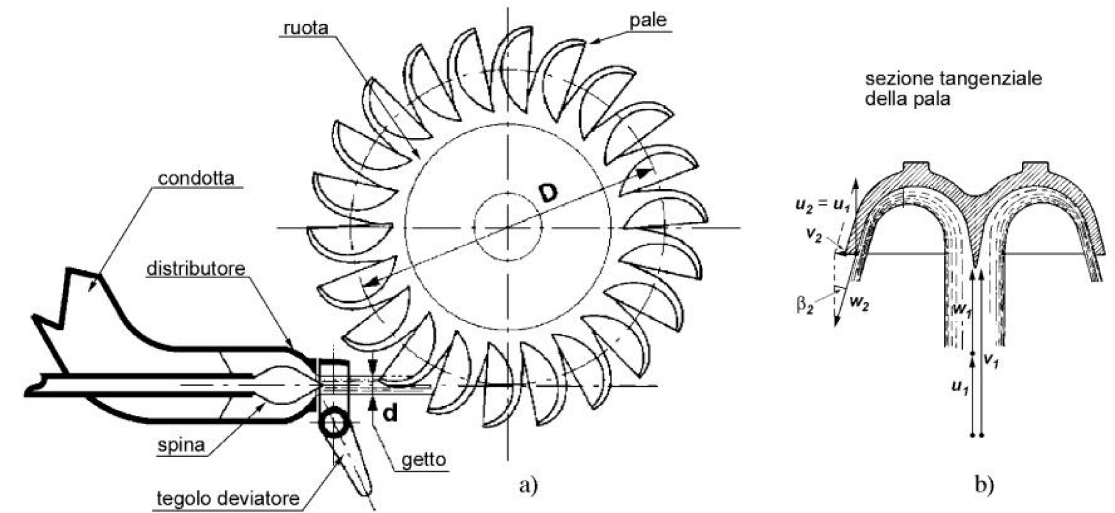
$$\eta_g = \eta_{pens} \eta_{turb} \eta_{gen} \eta_{trasf}$$

L'efficienza complessiva di andata e ritorno (overall round-trip) sarà quindi:

$$\eta_{rt} = \eta_p \eta_g$$



La **turbina Pelton** è una tipologia di turbina ad azione, l'acqua incanalata per mezzo di una condotta, giunge al livello della macchina in condizioni di elevata pressione che viene trasformata in energia cinetica nella parte terminale del distributore (ugello), che scarica in aria alla pressione atmosferica. Nella maggior parte dei casi vengono utilizzate turbine pluri-getto, in queste ciascun getto può essere regolato indipendentemente e la loro alimentazione può essere interrotta riducendo proporzionalmente la portata senza sensibili cadute di rendimento

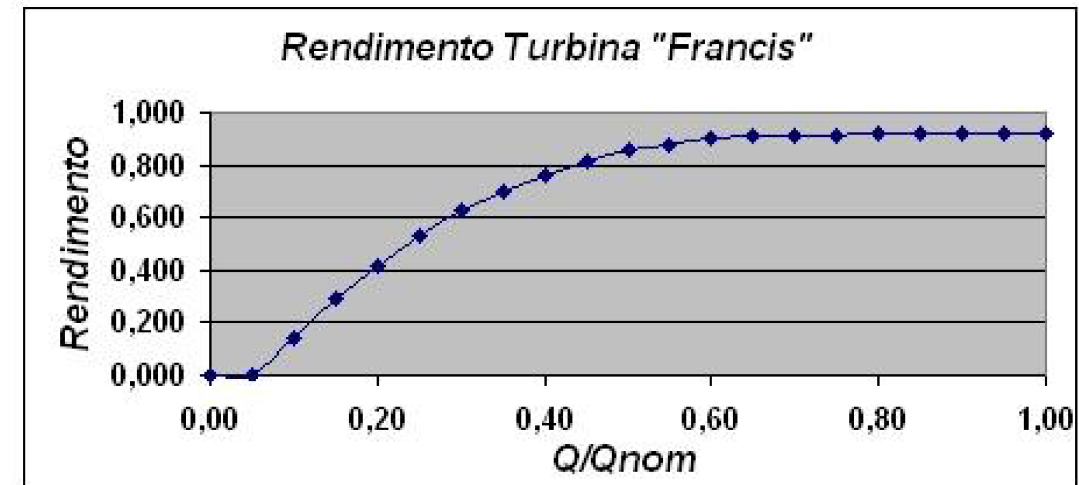
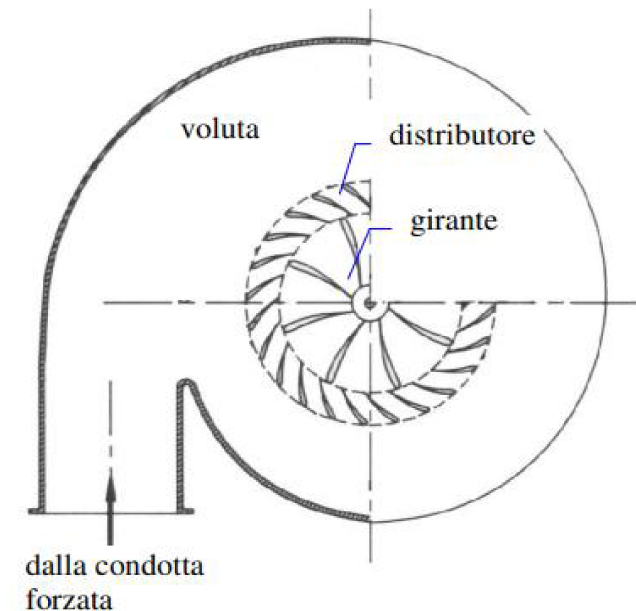


La **turbina Francis** è una turbina a reazione, ovvero non sfrutta solo la velocità ma anche la pressione del getto d'acqua che poi viene convertita in energia meccanica (e poi in elettrica dal generatore).

Queste sono adatte anche a lavorare da pompa.

La girante è la parte rotorica della turbina composta da pale, quando il flusso arriva alla girante man mano che la percorre viene estratta l'energia di pressione.

Le turbine Francis vengono progettate per avere il massimo rendimento intorno all'ottanta per cento della portata nominale, allontanandosi quindi da questo valore si notano dei repentini cali di prestazione, soprattutto ai bassi carichi.





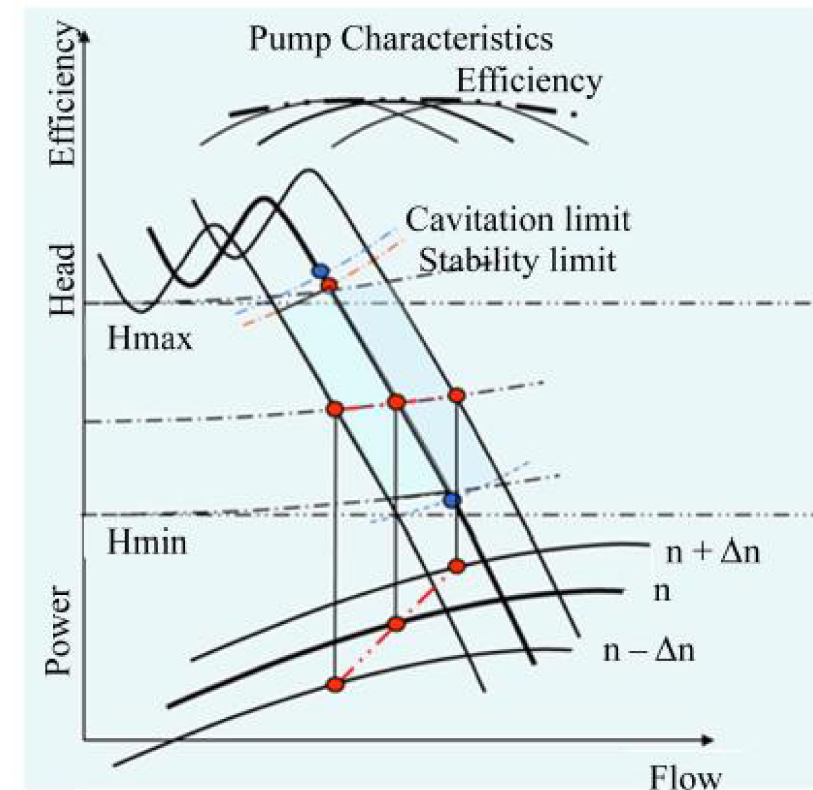
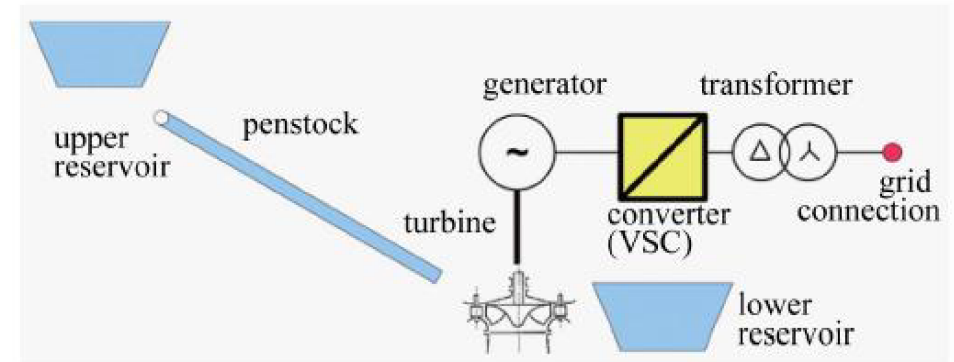
Una pompa-turbina è sempre sovradimensionata per il funzionamento come turbina.

Le migliori efficienze delle caratteristiche della turbina sono perciò al di fuori dell'effettivo campo operativo della macchina.

Un altro problema è che, se mentre nel funzionamento da turbina si può regolare la palettatura in ingresso nel funzionamento da pompa non è possibile.

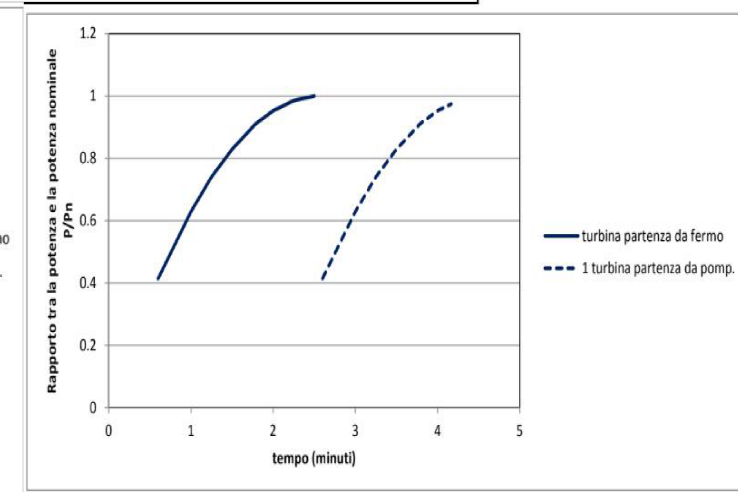
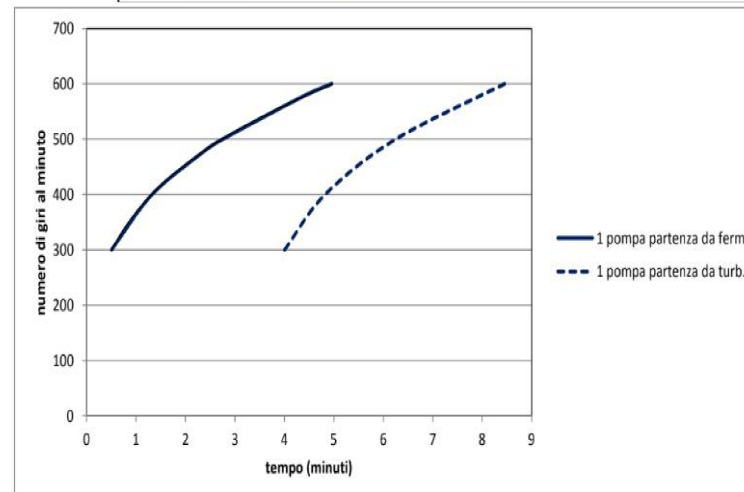
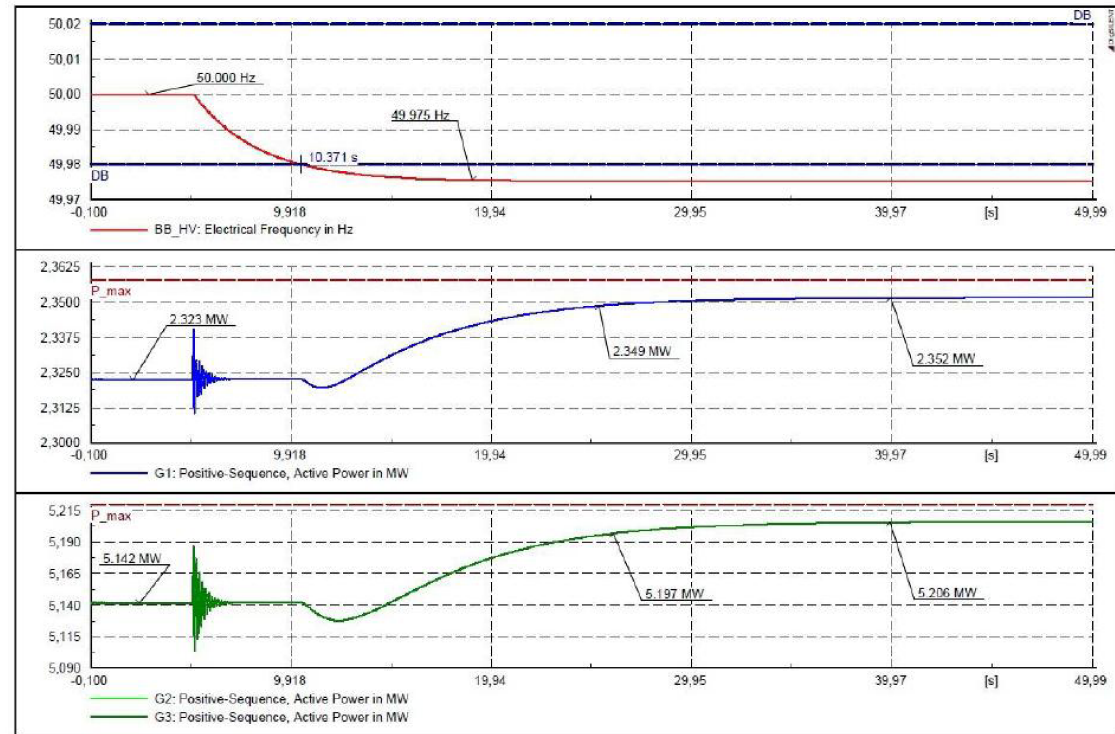
Potendo cambiare la velocità si spostano le curve caratteristiche in modo da avere una maggior regolazione della portata ed un'efficienza complessiva maggiore.

Per ottenere una velocità variabile il modo più semplice, ed il più utilizzato, è attraverso un converter accoppiato ad una macchina sincrona



Quando la rete subisce una perturbazione, che può essere semplicemente la variazione del carico, prima di raggiungere di nuovo la stabilità passerà per un periodo transitorio dove la frequenza si discosterà dal valore nominale (50 Hz nel nostro sistema). Gli impianti idroelettrici di pompaggio si prestano alla regolazione della frequenza grazie alla loro velocità di risposta e perché possiedono un'inerzia delle masse rotanti.

Caratteristiche fondamentali per questi impianti sono che l'avviamento da fermo e il cambio di modalità di lavoro (pompa  $\Rightarrow$  turbina o turbina  $\Rightarrow$  pompa) devono essere veloci.



Come già evidenziato le fonti rinnovabili hanno dei problemi da gestire, primo tra tutti l'impossibilità di programmare la produzione, così è di fondamentale importanza sviluppare sistemi che siano in grado di gestire questo sbilancio tra richiesta e produzione di energia.

Una fonte di energia rinnovabile che rappresenta un grande patrimonio è l'energia idroelettrica. Gli impianti Idroelettrici di Pompaggio sono considerati una comprovata tecnologia di accumulo.

Studiando questi impianti si può notare come sono e saranno fondamentali per la transizione energetica, sia nel nostro Paese che nel resto del Mondo, ed è quindi fondamentale continuarne lo sviluppo e l'installazione.