

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

***Relazione per la prova finale
«Evoluzione delle centrali idroelettriche a
pompaggio e questione del dispacciamento»***

Tutor universitario: Prof. Giorgio Pavesi

Laureando: *Linda Costantini*

Padova, 28/09/2023

- **Sviluppo sostenibile** «*lo sviluppo che risponde ai bisogni attuali senza compromettere alle generazioni future la possibilità di rispondere ai propri*» (definizione della Commissione Brundtland (United Nations) Report of the World Commission of Environment and Development, 11 Dicembre 1987)
- **Sustainable Development Goals (SDG)**: ottimizzazione tra acqua, energia e suolo, al fine di garantire alla società e all'economia le risorse necessarie ad un costo accessibile, minimizzando al tempo stesso gli impatti negativi sull'ambiente.
- **Incremento** delle **RES** per limitare i gas climalteranti;
- Problematiche legate alla **natura intermittente** e alla distribuzione non uniforme sul territorio;
- **Disequilibrio** tra produzione e domanda;
- Necessità di un **sistema di supporto** e di tecnologie per bilanciare la produzione e garantire sicurezza e stabilità alla fornitura;
- Tecnologie per lo **stoccaggio** dell'energia presentano un enorme potenziale per assicurare un supporto per l'integrazione delle RES in rete;
- I sistemi di stoccaggio presentano numerosi vantaggi
- **PHS** è la tecnologia più **matura**, si stima ricopra il 90-95% dell'energia immagazzinata nei sistemi di stoccaggio con una capacità installata di 170 GW;
- Diverse tipologie di PHS;
- Fondamentale la gestione delle riserve d'acqua;
- Una delle tecnologie più promettenti per la penetrazione elettrica.

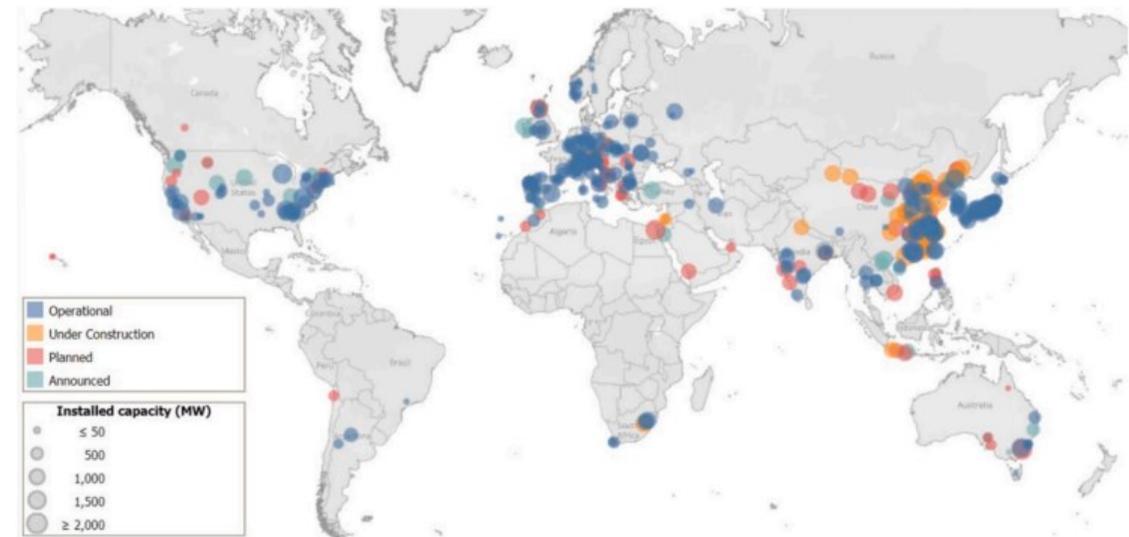


FIG. 1 Mappa mondiale con tutti gli impianti PHS operativi, in costruzione e programmati

PUMPED HYDRO STORAGE – PHS

- **Definizione e funzionamento;**
- **Evoluzione** della tecnologia PHS in diversi Paesi;
- **Classificazione;**
- **Benefici** al settore elettrico;
- **Proposte future** per una migliore integrazione;
- **Condizioni** necessarie per la **realizzazione;**
- **Adattamento ai cambiamenti climatici.**

TURBINA FRANCIS

- **Componenti** della macchina;
- **Triangoli delle velocità** e ottimizzazioni;
- **Regolazione.**



FIG. 2 PHS Geesthacht



FIG. 3 Turbina Francis

- Classificazione impianti idroelettrici;
- Impianti di generazione di energia basati sul **potenziale gravitazionale**;
- **Struttura**: due serbatoi, condotta, pompa e generatore;
- **Funzionamento**: durante il periodo di stoccaggio l'acqua viene pompata al serbatoio superiore mentre viene rilasciata lungo la condotta attraverso la turbina quando è richiesta la generazione di energia;
- Potenze nominali tra **100 e 5000 MW** e capacità di accumulo superiore a 1000 MWh annuali;
- **Densità energetica** molto bassa **0,5-1,5 Wh/kg**;
- Tempi di risposta bassi e tempi di accensione relativamente veloci (3 min);
- Ciclo vita lungo: **30-50 anni**;
- **Efficienza** intorno al **70-87 %**;
- **Perdite principali** dovute alla resistenza viscosa, alle turbolenze, all'attrito nella condotta, in turbina e nella pompa, altre perdite sono date dall'energia cinetica dell'acqua non completamente recuperata e perdite elettriche nel motore e generatore;

- **Efficienza** esprimibile come funzione del **rendimento del pompaggio** e quello della **turbina**:

$$\eta_R = \frac{E^{out}}{E^{in}} = \frac{E^t}{E^p} = \eta_p * \eta_t$$

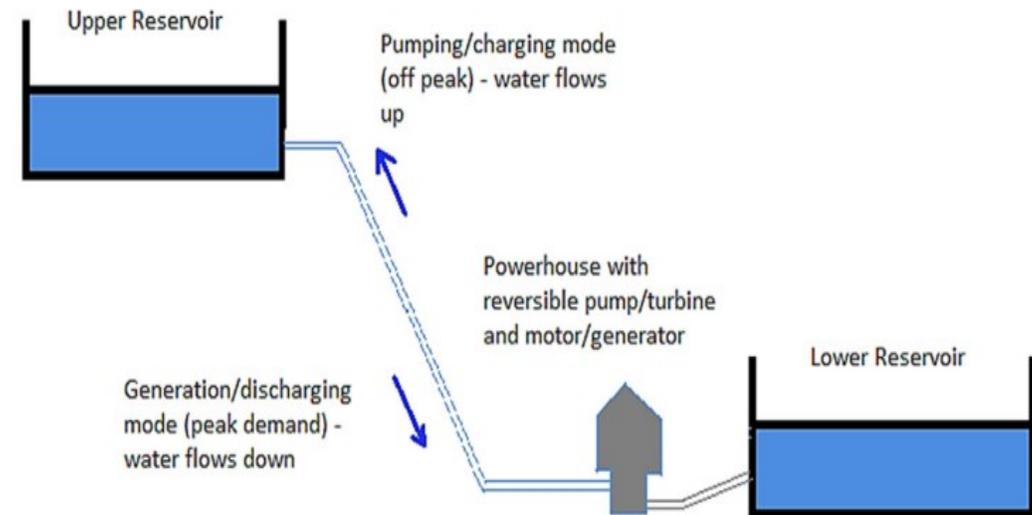


FIG. 4 Schema impianto PHS

- Primo impianto realizzato nel 1890 nella regione alpina dell’Austria, Svizzera e Italia;
- Dal 1900 si è sviluppato il sistema «single reversible pump-turbine»

EUROPA

- Ha la **maggior capacità** di PHS installata;
- In molti Paesi ha seguito l’andamento della capacità di energia nucleare;
- Tasso di sviluppo aumentato dal 2008;

GIAPPONE

- Ha incrementato l’installazione di PHS per accompagnare la crescita della **generazione da nucleare** e garantire **un’alternativa** alle fonti fossili;
- Non ha interconnessioni elettriche con altri Paesi, per questo la percentuale di capacità PHS è maggiore;
- Territorio montuoso adatto per la realizzazione;

CINA

- **Recente sviluppo** sistemi PHS;
- Carico base soddisfatto principalmente da carbone;

INDIA

- PHS per compensare i picchi;
- La maggior parte delle centrali PHS **non** è stata in grado di **lavorare al massimo** delle sue **potenzialità** a causa dell’insufficiente elettricità necessaria per il pompaggio.

USA

- Ha seguito l’andamento della **capacità nucleare** ma è stato anche influenzato dalla crisi degli anni ’70;
- L’aumento dei prezzi di petrolio e gas ha portato a investire sulla tecnologia PHS;
- **Crescita in pausa** a causa della diminuzione dei prezzi di gas e carbone.

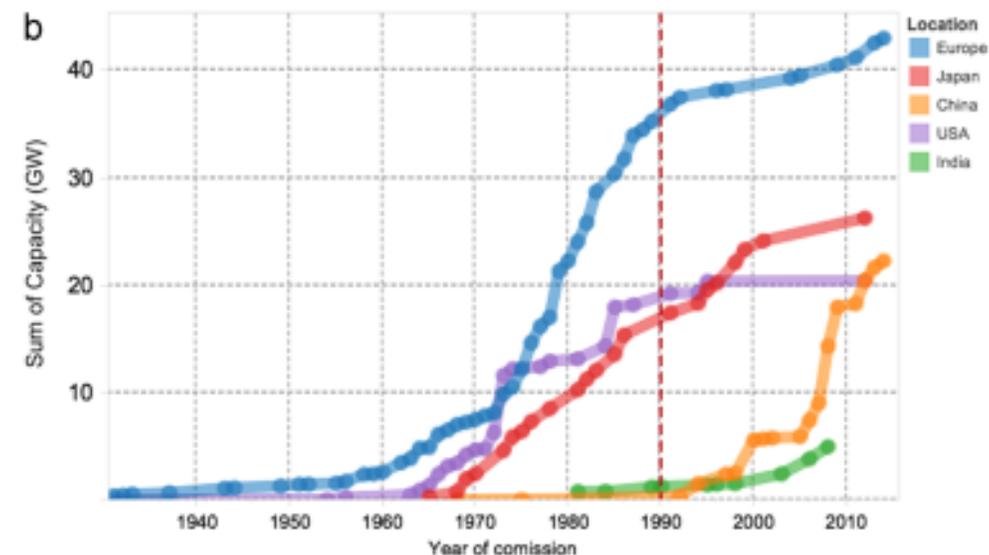


FIG. 5 Sviluppo storico dei sistemi PHS in Europa, Giappone, Cina, Usa e India

1- CONDOTTA FORZATA

- Direzione e controlla il flusso;
- Schema **singolo** e schema **doppio**;

2- SERBATOIO

- Circuito **chiuso**, serbatoio superiore isolato fisicamente dal corso d'acqua, ne riceve solo tramite il pompaggio;
- Circuito **aperto**, serbatoio superiore collegato al fiume;

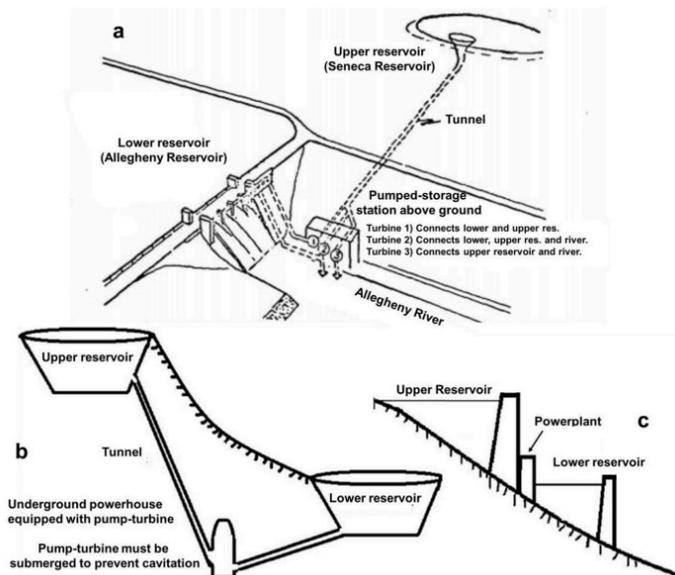


FIG. 6 Schemi impianti PHS (a) circuito aperto, (b) circuito chiuso, (c) circuito chiuso senza necessità di scavo

3- TIPOLOGIA DI MACCHINA OPERATIVA

- Turbine e pompe possono essere dedicate **separatamente** alla generazione ed al pompaggio, oppure possono rientrare in un unico componente (**PHS reversibile**);
- Turbine a velocità **costante**, attualmente le più impiegate nei sistemi reversibili, potenza regolata tramite il pre-distributore;
- Turbine a velocità **variabile**, risposta in potenza più rapida, la potenza consumata in pompaggio può variare in un range di valori, costano il 30 % in più;
- Sistema **ternario**, motore/generatore calettato allo stesso albero a turbina e pompa separate tra loro;
- **Tail Water Depression Mode (TWD)**

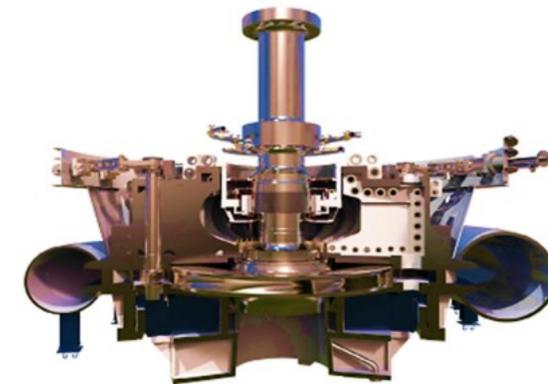


FIG. 7 Tipica turbina reversibile

Bilanciamento del carico e copertura dei picchi

- Le **tecnologie** che soddisfano il **carico base** operano in modo economicamente conveniente quando generano energia a un valore fissato ottimale, il PHS viene impiegato per **rimediare** alla loro **inflexibilità**;
- **Livellano** il **carico** o **compensano** i **picchi**, consumando energia durante i periodi non di punta e generando in prossimità dei picchi;
- Riduzione costi complessivi di generazione;
- Funzionamento **analogo** con le **RES**, pompaggio quando c'è un eccesso di produzione e generazione quando la RES non produce;

Stabilizzazione della rete:

- L'impianto di alimentazione riesce a **mantenere costante** la **frequenza** anche in seguito all'interruzione o la distruzione del sistema;
- PHS caratterizzati da **risposta rapida** alla **variazione** del carico;

Partenza da zero

- Capacità di **avviare** la propria **generazione senza il supporto** della rete;
- Può essere garantita se il **serbatoio superiore** dispone di **acqua** sufficiente.

Rapidità e flessibilità;

- I progressi nello sviluppo dei sistemi PHS, come ad esempio le turbine a velocità variabile, consentono di essere **molto flessibili**, ovvero aumentare o diminuire la generazione sulla base della variazione di carico;
- La rapida risposta contrasta le fluttuazioni dovute alle RES;
- **Piena capacità** in meno di **30 s**;

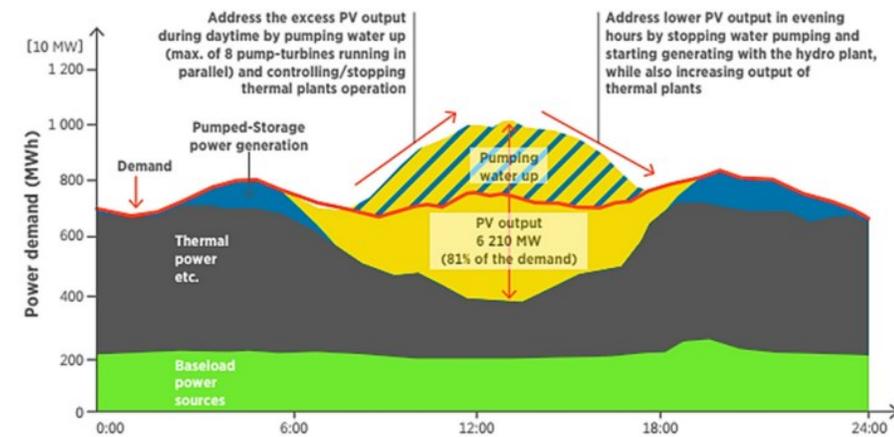


FIG. 8 Bilanciamento carico nell'impianto Kyushu, Giappone (IRENA, 2020)

Tratte da IRENA, 2020:

- **PHS accoppiato con PV galleggiante** (Kruonis, Lituania);
- **PHS accoppiato con eolico on-shore** (Gaildorf, Germania);
- PHS abbinato con tecnologia eolica e fotovoltaica (Kidstone, Australia);
- PHS accoppiato con tecnologia PV (Deserto di Atacama, Cile);
- PHS abbinato con tecnologia PV (Hatta, Emirati Arabi)
- PHS con turbina a velocità variabile (con convertitore complete di frequenza) (Z'Mutte, Svizzera)
- PHS con turbine a velocità variabile e circuito idraulico breve (Frades II, Portogallo)
- PHS con circuito idraulico breve sfruttando macchine a velocità costante e apparecchiature ottimizzate (Grand Maison, Francia; Alqueva, Portogallo)

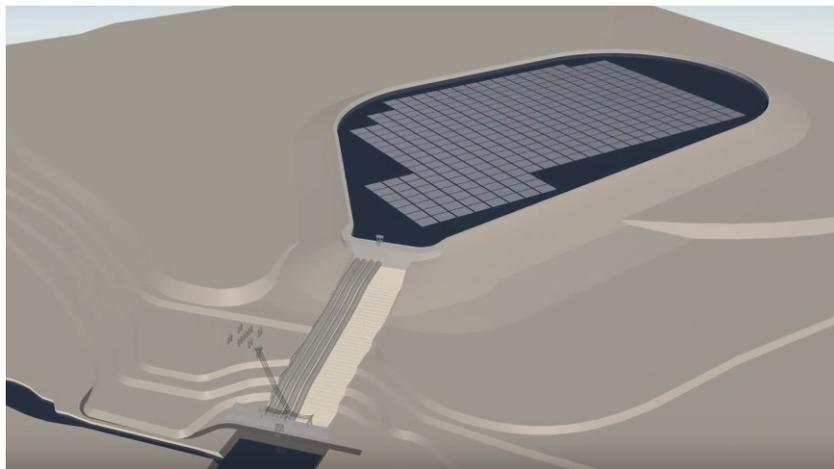


FIG. 9 PHS accoppiato con PV galleggiante (Kruonis, Lituania)



FIG. 10 PHS accoppiato con eolico on-shore (Gaildorf, Germania)

CONDIZIONI PER LA REALIZZAZIONE:

- **Fattori geografici e ingegneristici**, è necessaria un'adeguata valutazione dell'ubicazione. Il sito deve poter immagazzinare un volume d'acqua adeguato e deve esserci una differenza di quota tra i due serbatoi;
- **Fattori ambientali**, bisogna tenere conto dell'alterazione del livello dell'acqua, la superficie incontaminata del terreno, la copertura del suolo, l'irraggiamento solare locale e la velocità del vento locale.
- **Fattori economici** tra i quali abbiamo la vicinanza alla linea elettrica, l'accesso alla rete stradale, le condizioni geologiche del sito, il rapporto tra prevalenza e distanza, la prevalenza lorda (ne limita la capacità), la complessità delle opere civili coinvolte e le considerazioni sismiche;
- **Fattori sociali** come la vicinanza ad un centro urbano, l'insediamento, l'uso del suolo e il potenziale danno latente

ADATTAMENTO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI

- Il cambiamento climatico può **influenzare** lo **sviluppo** dell'**energia idroelettrica** attraverso cambiamenti nelle precipitazioni, nella disponibilità di acqua e in variazioni significative nei regimi di temperatura;
- Temperature più calde **aumentano l'evaporazione** dalla superficie terrestre, peggiorando le condizioni di siccità;
- Generalmente le valutazioni tecniche in fase iniziale si basano su registrazioni idrometeorologiche storiche, la vita in genere lunga di queste infrastrutture espone la loro operatività al grave impatto della variabilità climatica e idrologica dovuta ai cambiamenti climatici;
- La produzione di energia da impianti ad acqua fluente è più sensibile alla variazione del flusso rispetto agli impianti stoccaggio, questo perché non dispongono di una quantità di acqua immagazzinata;
- Esigenza di **pianificare** e **progettare** gli impianti idroelettrici in modo tale da **assorbire** lo **stress** imposto dalla variabilità climatica e idrologica;
- Resilienza climatica a breve e lungo termine.

- Turbina a **reazione**; solo una parte del salto di pressione disponibile viene convertito in energia cinetica allo scarico dello statore, quindi la pressione varierà anche durante l'attraversamento della girante;
- Numero tipico di macchina $0,25 < K < 2,5$;
- Salto compreso tra **25m e 700m** e portate tra **10 e 700m³/s**.

Cassa a spirale (voluta):

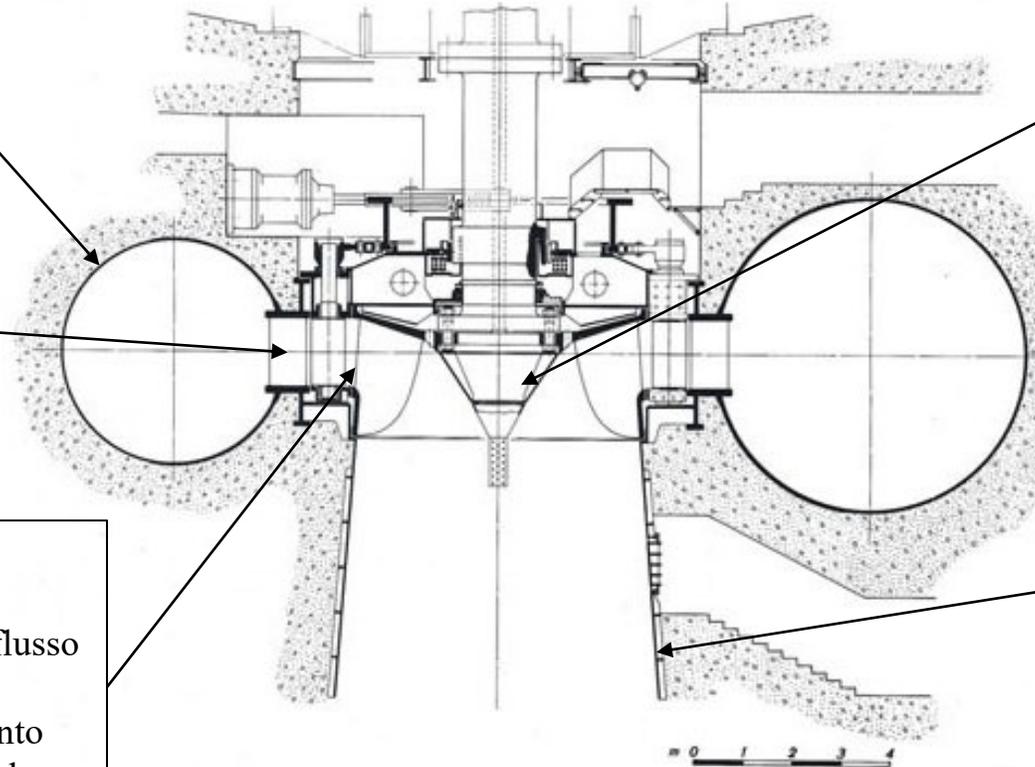
alimenta statore e rotore con una pressione in ingresso uniforme.

Pale pre-distributore:

- Duplice funzione;
- Elementi strutturali e pre-orientano il fluido

Pale distributore:

- Statore della macchina;
- Orientano in modo opportuno il flusso verso la girante;
- Possibilità di variare il calettamento delle pale in modo da modificare la portata.



Girante:

- Elemento principale della macchina;
- Geometria complessa;
- Variazione del numero di giri caratteristico è accompagnato da una variazione della forma della girante.

Diffusore:

- Recupera parte dell'energia cinetica che ha l'acqua all'uscita della girante;
- Depressione all'uscita dello scarico che consente di aspirare l'acqua dalla girante;
- Rischio cavitazione.

- **Angolo di calettamento** della pala α_1 generalmente compreso tra 15° e 40° ;
- Angolo in ingresso al rotore β_1 ;
- L'accelerazione del flusso nello statore, continua nel rotore portando ad un significativo aumento della componente relativa \underline{w}_2 all'uscita della girante

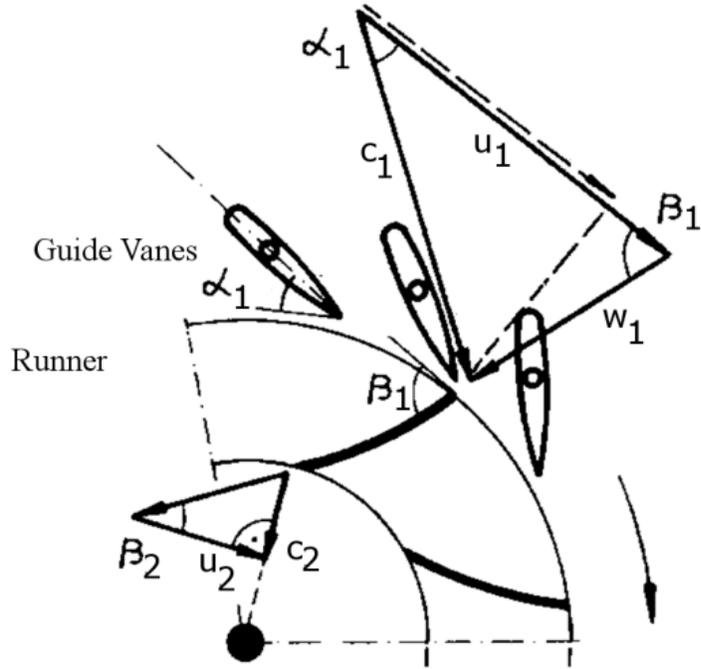


FIG. 11 Vista circonferenziale turbina Francis con in evidenza i triangoli delle velocità

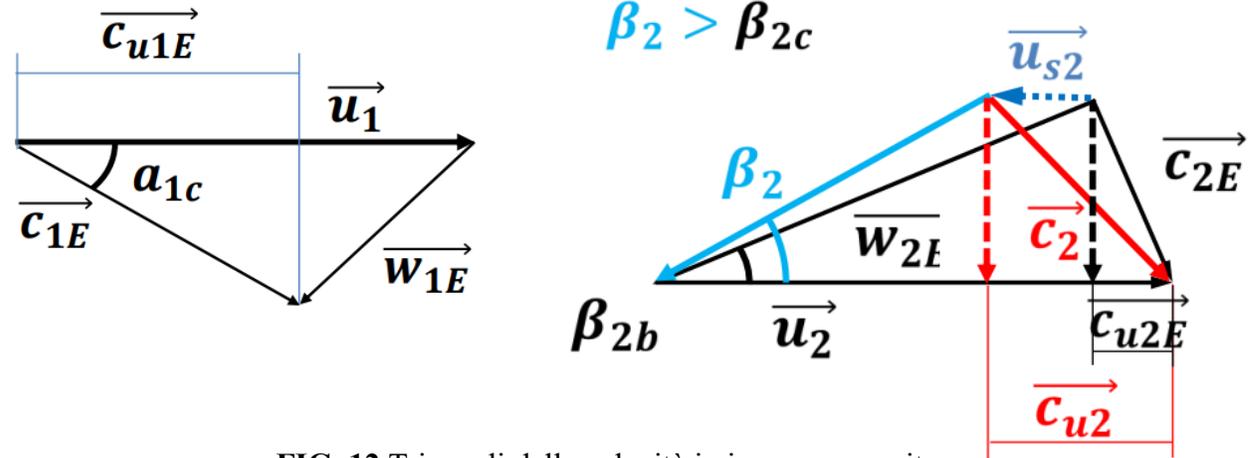


FIG. 12 Triangoli delle velocità in ingresso e uscita

Scambio energetico:

- **Lavoro estratto** dalla macchina

$$gh_t = Cu_1 * U_1 - Cu_2 * U_2 = -U_2^2 * \left(1 + \frac{U_{s2}}{U_2}\right) + U_1 Cm_1 \cot \alpha_1 + U_2 Cm_2 \cot \beta_{2c}$$

- **Energia** posseduta dal **fluido** a monte della turbina gh ;
- Rendimento della macchina $\eta_{idr} = gh_t / gh$;
- L'**ottimizzazione** della macchina richiede l'**annullamento** della **componente tangenziale** allo scarico della girante (Cu_2), condizione imposta dalla forma della palettatura rotorica allo scarico, ovvero tramite la **scelta opportuna** di β_{2c}

- L'**ottimizzazione** della turbina si verifica per **una sola condizione** del funzionamento della macchina;
 - La **regolazione** in portata e quindi in potenza è affidata alla possibilità di intervenire sull'**angolo di calettamento** delle pale del distributore;
 - Al variare del calettamento dello statore, variano contemporaneamente sia l'angolo del flusso che investe la girante, sia la sezione di passaggio minima (gola «a»);
 - Man mano che la giacitura delle pale diviene più tangenziale, la portata diminuisce così come la potenza:
- $$P_{kW} = \frac{g \rho H Q}{1000} \eta_t$$
- H è praticamente costante, η_t invariato e il più alto possibile nelle varie condizioni di carico, quindi la **regolazione** della potenza può essere effettuata solo agendo sulla **portata Q**

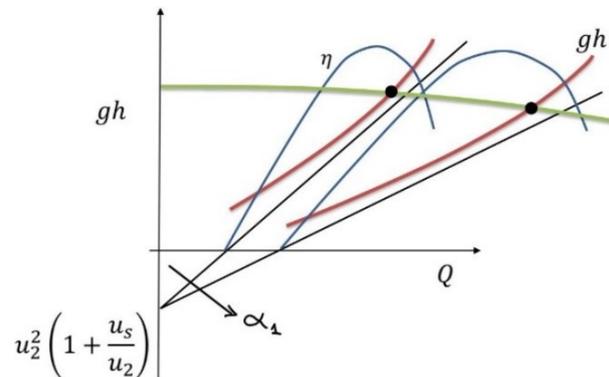


FIG. 14 Andamento del rendimento in funzione della portata

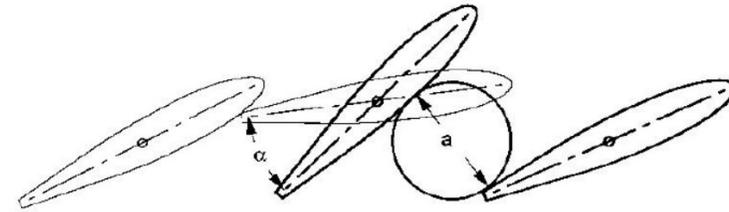


FIG. 13 Regolazione pale del distributore

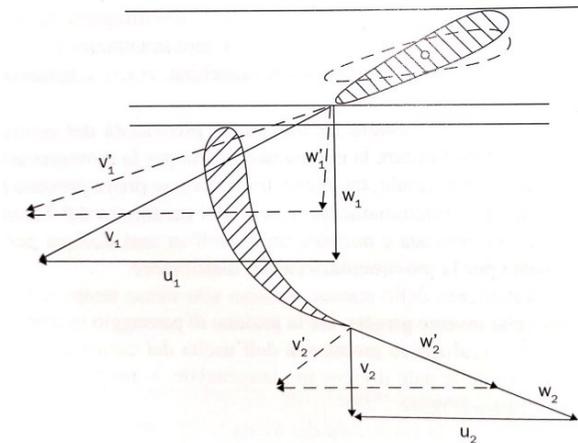


FIG. 15 Variazione dei triangoli delle velocità al variare dell'angolo di calettamento

- Spostandosi dal punto di progetto, il rendimento della macchina tende anch'esso a diminuire;
- La **macchina** viene allora **ottimizzata** per una **portata inferiore** al fine di contenere la penalizzazione di rendimento ai carichi parziali.

- PHS tecnologia matura che si renderà particolarmente **utile** per la **transizione energetica**;
- Efficienza impianto **70-87%**;
- Evoluzione storica differente a seconda del Paese;
- Modalità diverse di funzionamento;
- **Numerosi benefici per il settore elettrico**;
- Necessità di condizioni specifiche per la sua realizzazione, non solo di tipo geografico ma anche economico e sociale;
- Funzionamento della turbina Francis, quella maggiormente impiegata negli impianti PHS;
- Necessità di avere una giusta integrazione di tutte le tecnologie a nostra disposizione;
- Ottimo **accoppiamento** con le **RES**.



FIG. 16 Centrale idroelettrica Vranduk