



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

Dispensa N. 11

Idroelettrico

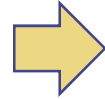
Corso di Gestione delle Risorse Energetiche
A.A. 2011/2012

*D.E.TE.C - Dipartimento di Energetica, Termofluidodinamica applicata
e Condizionamenti ambientali*

Principio fisico

- ✓ Conversione dell'energia potenziale gravitazionale di una massa d'acqua, che defluisce attraverso un dislivello, in energia meccanica e quindi in energia elettrica

$$\text{Bernoulli : } H = h + \underbrace{p / (\rho g)}_{\text{carico piezometrico}} + \frac{w^2}{2g} = \text{cost.}$$



$$P_{max} = Q \cdot H \cdot g \cdot \rho \text{ [W]}$$

con :

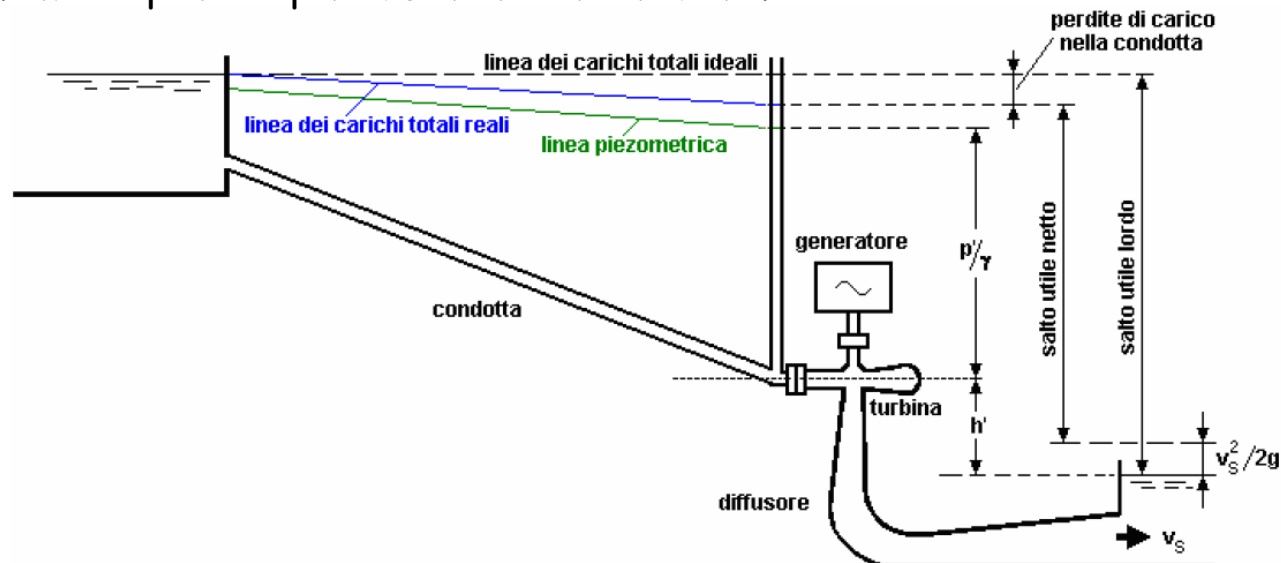
Q = portata volumetrica (m^3/s)

H = salto disponibile lordo (m)

ρ = densità dell'acqua = $1.000 \text{ kg} / m^3$

$g = 9,81 \text{ m} / s^2$

- ✓ Nella condotta, l'energia potenziale si converte (quasi) integralmente in energia di pressione; in corrispondenza della turbina, quest'energia, eventualmente convertibile in energia cinetica mediante un ugello convergente, può essere trasformata in lavoro.
- ✓ Perdite di carico ed energia cinetica della corrente allo scarico comportano una riduzione del salto effettivamente disponibile per la conversione in lavoro.



Principio fisico

✓ Potenza effettivamente erogabile:

con:

- η = rendimento globale dell'impianto
- Q = portata del corso d'acqua [m^3/s]
- H_n = salto disponibile al netto di perdite di carico e energia cinetica allo scarico [m]
- g = accelerazione di gravità [m/s^2]
- ρ = densità dell'acqua [kg/m^3]

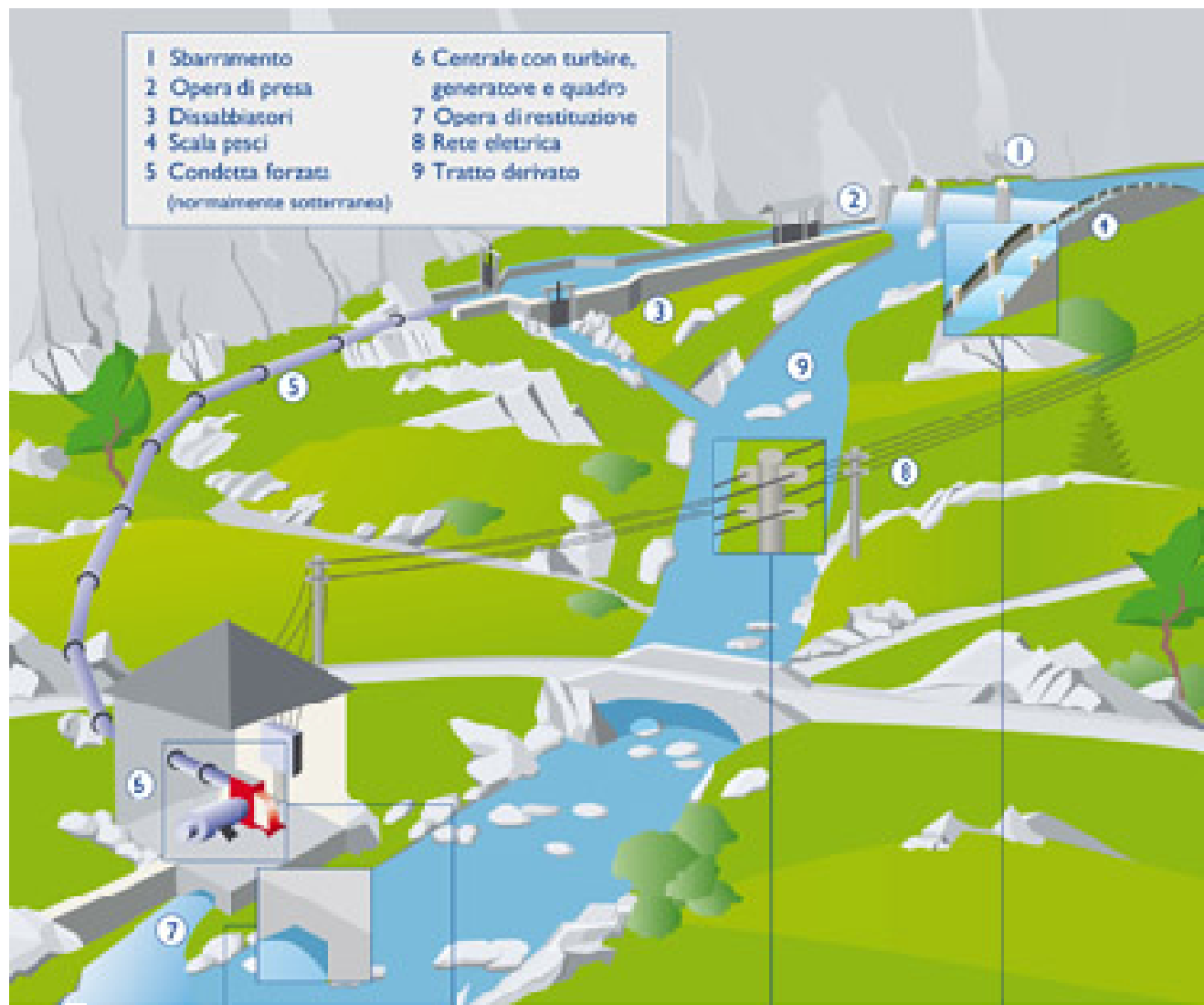
$$P = \eta \cdot Q \cdot H_n \cdot g \cdot \rho \text{ [W]}$$

✓ Rendimento globale dell'impianto:

con:

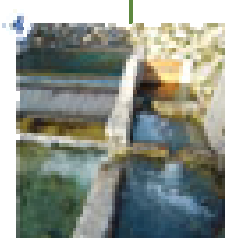
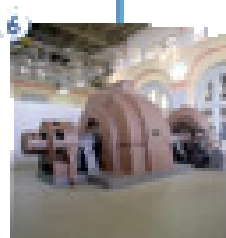
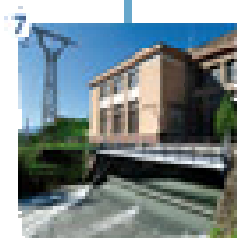
- η_g = rendimento globale turbina
- η_m = rendimento del moltiplicatore di giri
- η_{gen} = rendimento del generatore
- η_{tr} = rendimento del trasformatore

$$\eta = \eta_g \cdot \eta_m \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr}$$

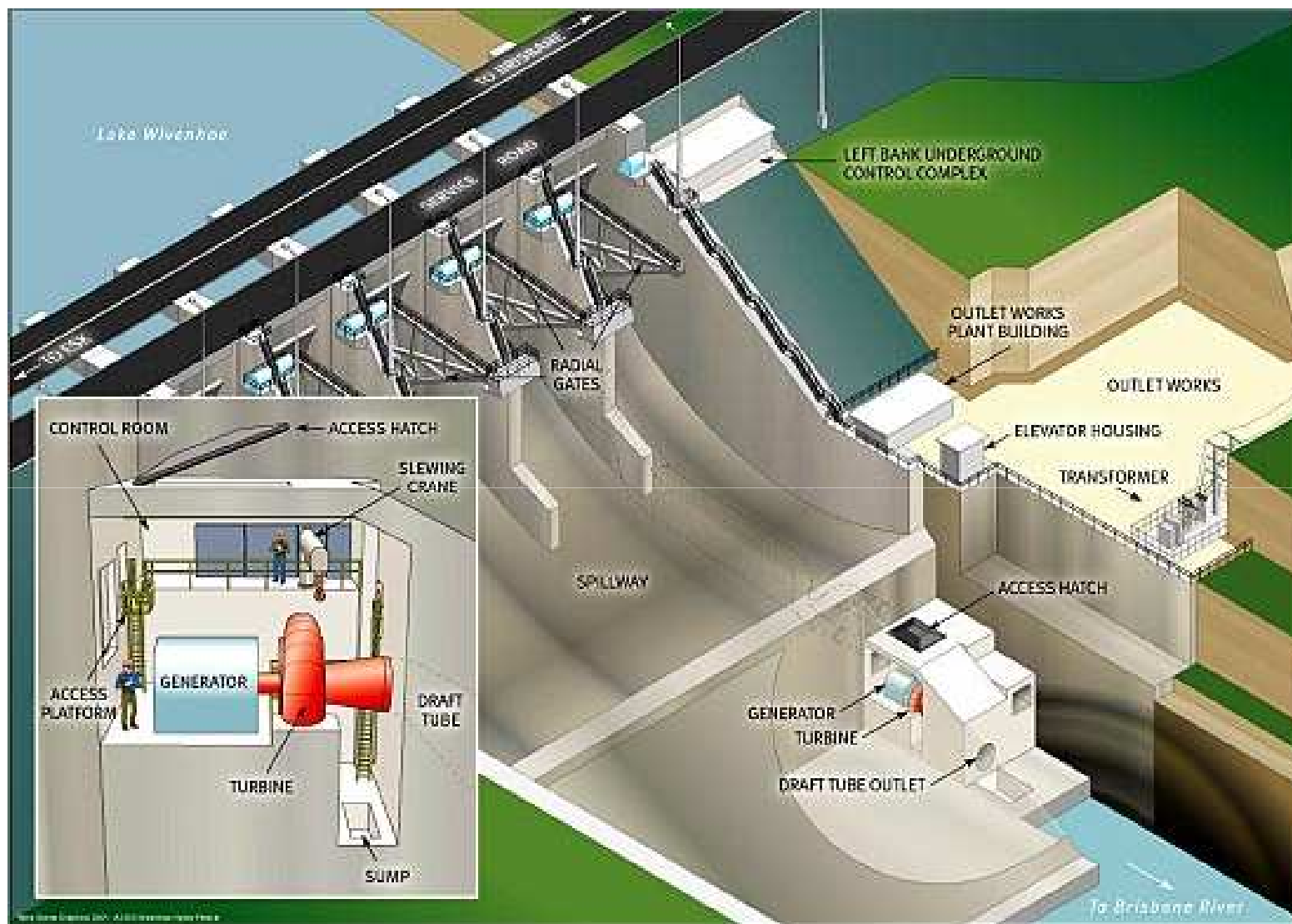


- | | |
|---|--|
| 1 Sbarramento | 6 Centrale con turbine,
generatore e quadro |
| 2 Opera di presa | 7 Opera di restituzione |
| 3 Disabbiatori | 8 Rete elettrica |
| 4 Scala pesci | 9 Tratto derivato |
| 5 Condotta forzati
(normalmente sotterranei) | |

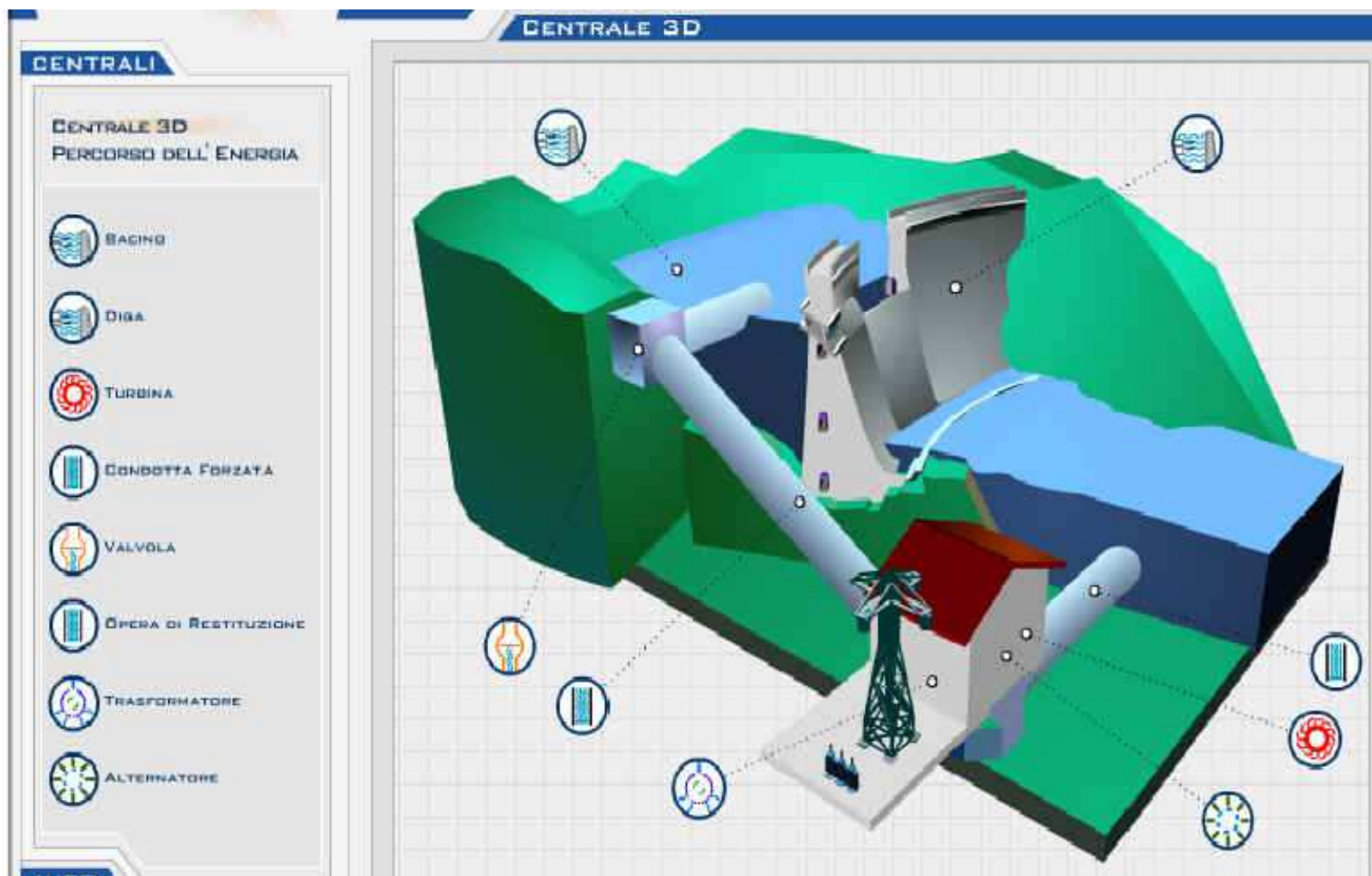
Esempi di impianti



Esempi di impianti



Esempi di impianti (fonte: Enel)



Esempi di impianti



Informazioni generali	
Denominazione e ubicazione	Centrale Semenza – Cernusco d'Adda
Tipo di centrale	Ad acqua fluente
Situazione	Operativa
Proprietario	Edison
Anno di costruzione	1917
Inizio produzione commerciale	1920
Macchinario idraulico	
Salto motore netto nominale	8 m
Portata	85 m ³ /s
Produzione elettrica	
Potenza idraulica netta	6,7 MW

Centrale di pompaggio di Presenzano (1.000 kW)



Componenti di un impianto idroelettrico

- ✓ **Opere di captazione** (dighe di sbarramento, canali di gronda,...): permettono di **raccogliere le acque** necessarie all'alimentazione dell'impianto;
- ✓ **opere di presa**: **immettono le acque nel condotto derivatore** e ne **regolano la portata**, mediante organi di chiusura e di regolazione; possono comprendere anche dispositivi di sghiaimento e di dissabbiamento (impianti ad acqua fluente);
- ✓ **opere di derivazione**: convogliano le acque, con una debole pendenza, **dalla presa al punto di inizio della tubazione in pressione (condotta forzata)**; possono essere costituite da un canale a pelo libero o da una galleria in pressione; nel primo caso, al termine si troverà una vasca di carico, nel secondo caso un pozzo piezometrico, ambedue con la funzione di serbatoio per le brusche variazioni di portata;
- ✓ **condotte forzate**: portano l'acqua **in pressione** dal fondo della vasca di carico o del pozzo piezometrico alle turbine poste in centrale;
- ✓ **turbina, alternatore, trasformatore** e altre apparecchiature necessarie alla **trasformazione dell'energia idraulica in energia elettrica**;
- ✓ **opere di restituzione** (o di scarico): convogliano le acque dall'uscita delle turbine **all'alveo del fiume** oppure alle opere di presa del salto successivo.

Alcune definizioni

- ✓ **Portata massima derivabile di un impianto idroelettrico:** è quella **complessivamente erogabile attraverso l'insieme dei motori idraulici** della centrale che possono funzionare contemporaneamente e alla quale sono commisurate le gallerie in pressione, le condotte forzate e il canale di restituzione. Se il canale derivatore è a pelo libero, esso può essere commisurato a una portata minore, quando esiste una capacità di accumulo al suo termine (bacino di carico).
- ✓ **Deflusso utilizzabile (o derivabile) in un dato intervallo di tempo:** è la **quantità di acqua**, espressa in m^3 , che può essere **utilizzata (o derivata) durante l'intervallo di tempo considerato**, in relazione con la massima portata derivabile.
- ✓ **Deflusso Minimo Vitale (DMV):** la portata minima che, in un corso d'acqua, dev'essere presente a valle delle captazioni idriche al fine di **mantenere vitali le condizioni di funzionalità e qualità degli ecosistemi interessati** => definita all'atto della concessione.
- ✓ **Portata media utilizzabile (o derivabile) in un dato intervallo di tempo:** è il rapporto fra il deflusso utilizzabile durante quell'intervallo di tempo e il tempo stesso.
- ✓ **Potenza nominale di concessione:** è la **potenza idraulica teoricamente disponibile** in relazione alla portata (Q_c) e al salto (H_c) di concessione dell'impianto idroelettrico, calcolata come:

$$P_c = \frac{\rho \cdot Q_c \cdot H_c}{102} [kW]$$

(la densità dell'acqua è considerata pari a 1.000 kg/m^3 ; il coefficiente 102 deriva da $1000/g$, con $1000 = \text{coeff. per il passaggio da W a kW}$ e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

Classificazione

✓ In base alla potenza, al salto e alla portata:

CLASSIFICAZIONE IMPIANTI IDROELETTRICI					
Potenza nominale		Salto		Portata	
Micro-impianti	$P < 100 \text{ kW}$	A bassa caduta	$H < 50 \text{ m}$	Piccola portata	$Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$
Mini-impianti	$100 < P \text{ (kW)} < 1000$	A media caduta	$H = 50 + 250 \text{ m}$	Media portata	$Q = 10 + 100 \text{ m}^3/\text{s}$
Piccoli-impianti	$1000 < P \text{ (kW)} < 10000$	Ad alta caduta	$H = 250 + 1000 \text{ m}$	Grande portata	$Q = 100 + 1000 \text{ m}^3/\text{s}$
Grandi-impianti	$P > 10000 \text{ kW}$	Ad altissima caduta	$H > 1000 \text{ m}$	Altissima portata	$Q > 1000 \text{ m}^3/\text{s}$

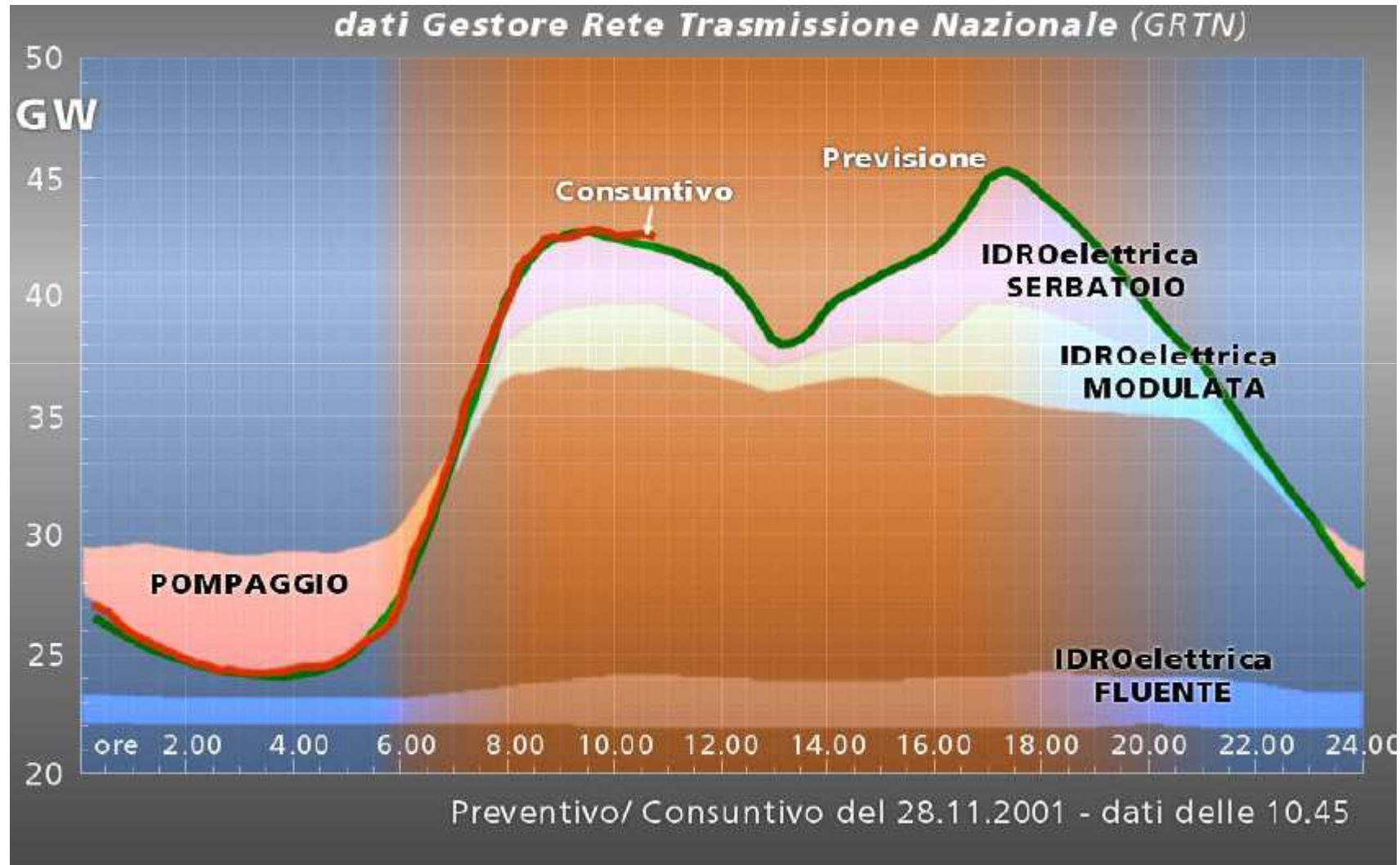
Classificazione

- ✓ In base alla durata di invaso dell'impianto (tempo necessario per fornire al serbatoio un volume d'acqua pari alla sua capacità utile con la portata media annua del corso d'acqua che in esso si riversa):
 - **impianti a serbatoio**: durata di invaso **maggiore o uguale a 400 ore**;
 - **impianti a bacino**: serbatoio classificato come "bacino di modulazione" settimanale o giornaliera, ovvero durata di invaso **minore di 400 ore e maggiore di 2 ore**;
 - **impianti ad acqua fluente**: sono quelli serbatoio con durata di invaso uguale o **minore di 2 ore**; sono generalmente posizionati sui corsi d'acqua, e la loro produzione dipende dalla portata del fiume senza capacità di regolare il flusso.

- ✓ In pratica, mentre per gli impianti a serbatoio **e a bacino è possibile regolare l'utilizzazione dell'acqua** nell'impianto tramite la capacità di accumulo creata da queste opere, gli impianti a **deflusso utilizzano direttamente la portata utile** disponibile nell'alveo del corso d'acqua senza possibilità di regolazione della portata all'impianto.

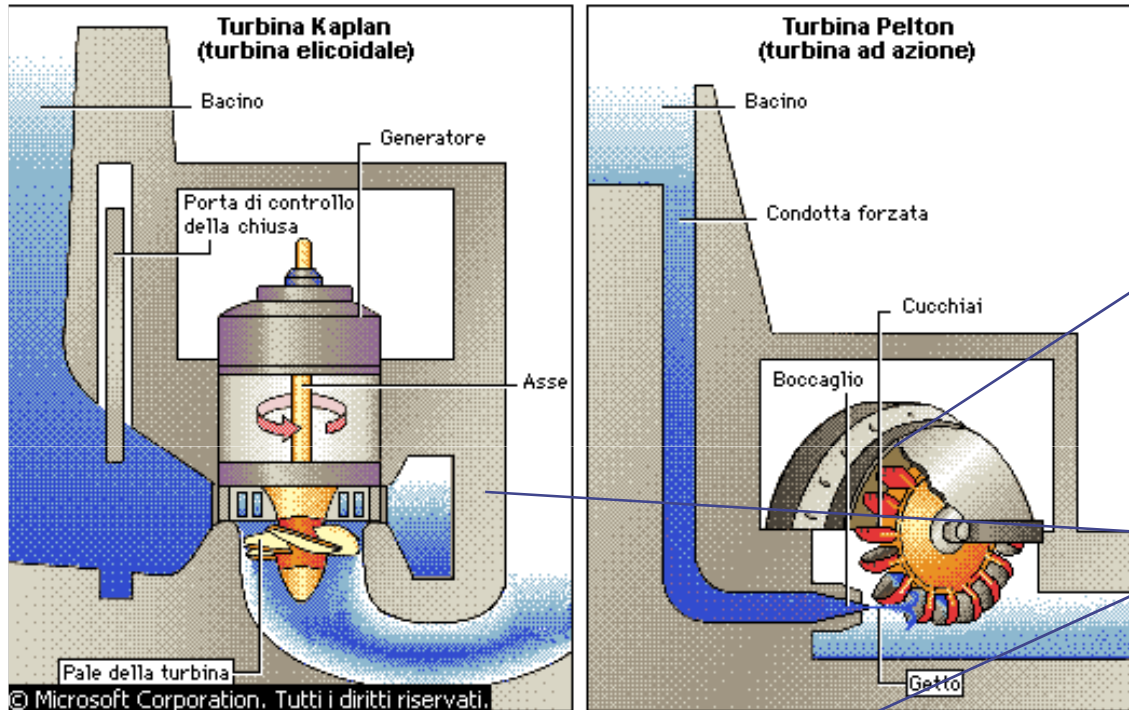
- ✓ Una categoria a parte è costituita dagli **impianti di pompaggio**: muniti di serbatoi o bacini a monte e a valle, nonché di turbine in grado di funzionare da pompe, possono accumulare energia nelle ore vuote e restituirla in quelle di picco (a meno delle perdite nella doppia conversione => efficienza complessiva dell'ordine del 70-75%), contribuendo all'equilibrio della rete elettrica nazionale. Le acque nell'invaso a monte possono in parte provenire da apporti naturali => *impianti di pompaggio misto*.

Il ruolo delle centrali idroelettriche nel sistema elettrico



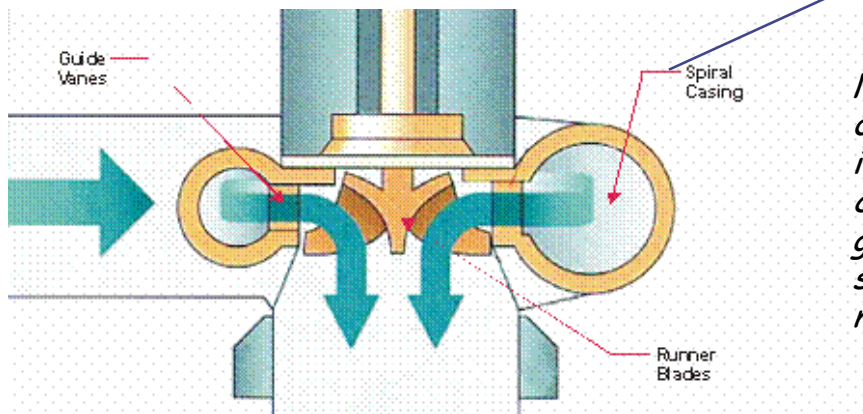
Classificazione delle turbine idrauliche

Sono essenzialmente costituite da un organo fisso, il distributore, e da uno mobile, la girante



Turbina ad **azione** (l'energia di pressione viene integralmente convertita in energia cinetica in un ugello a monte della girante). E' una turbina "**lenta**".

Turbine a **reazione** (la conversione di energia di pressione in energia cinetica avviene **in parte nello statore, in parte nella girante**); la Francis è una turbina a media velocità e ha un grado di reazione medio (0,4-0,8), la Kaplan è una turbina veloce /rapida a grado di reazione elevato (> 0,8)

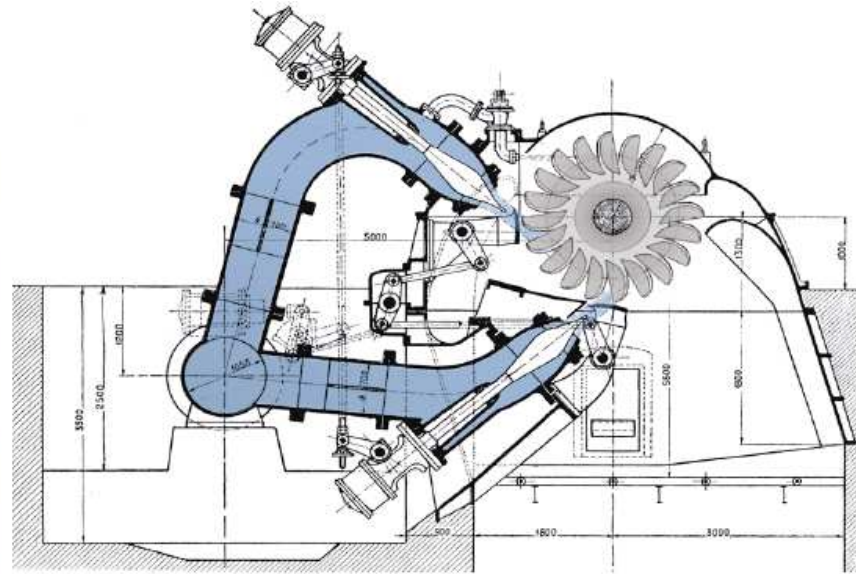


N.B.: grado di reazione, r = frazione dell'energia di pressione complessivamente disponibile tra ingresso e uscita della turbina che viene convertita in energia cinetica all'interno della girante, ovvero, indicando con 0 l'ingresso allo statore, con 1 l'uscita dallo statore e l'ingresso nella girante, con 2 l'uscita dalla girante:

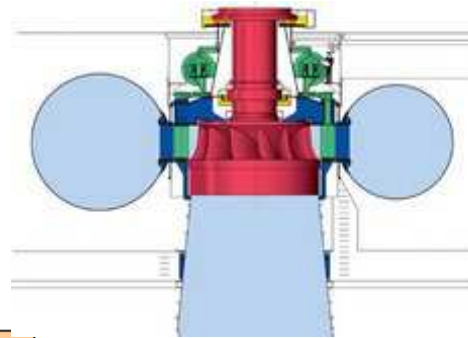
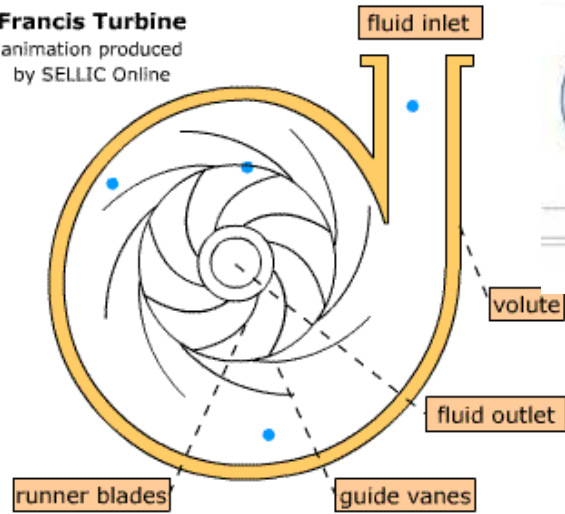
$$r = \frac{\Delta p_{1-2}}{\Delta p_{0-2}}$$

Principali turbine idrauliche

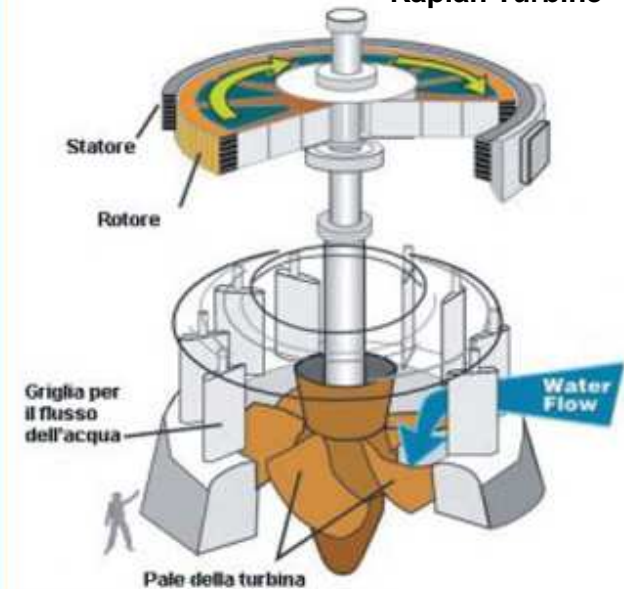
Pelton



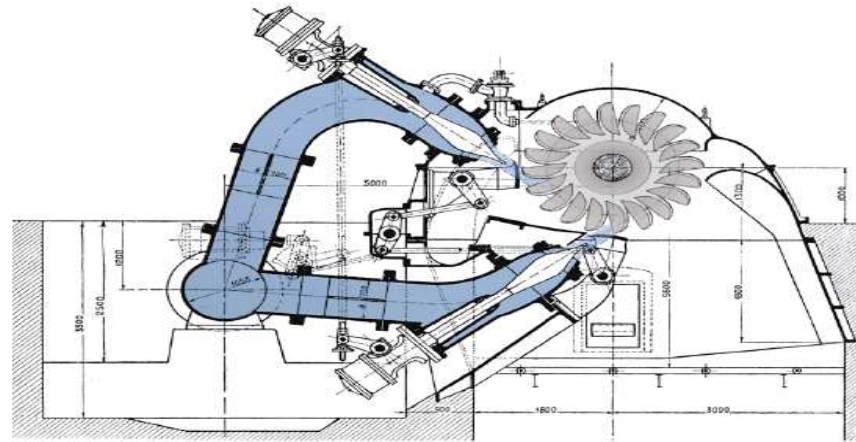
Francis Turbine
animation produced
by SELIC Online



Kaplan Turbine

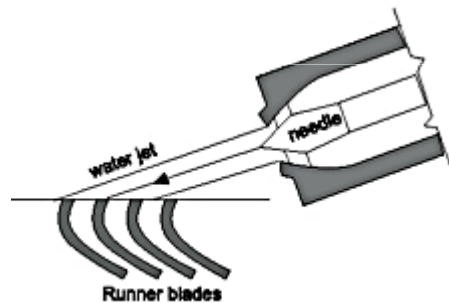
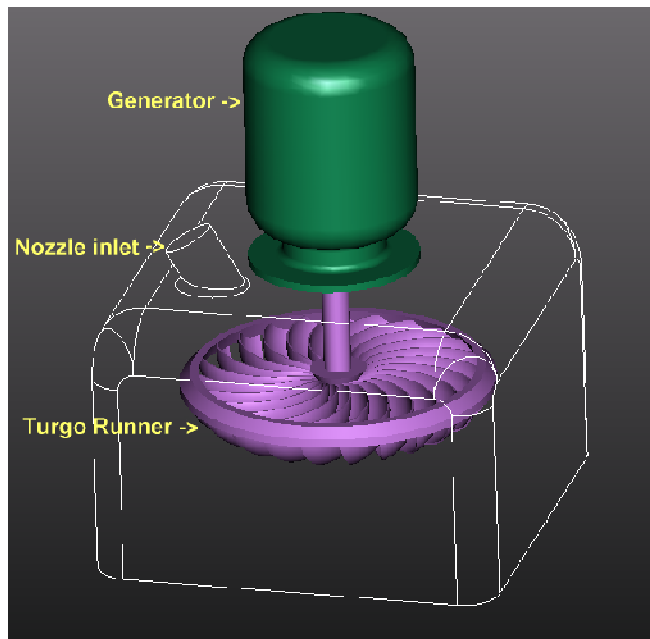


Pelton



- ✓ È utilizzata principalmente per **grandi salti**
- ✓ È una turbina **ad azione** in quanto l'energia di pressione viene integralmente trasformata in energia cinetica in un (o più) ugello che indirizza l'acqua sulle pale, determinandone la rotazione
- ✓ Il getto sulla turbina **non è** quindi **in pressione**
- ✓ La forma delle pale è di **due cucchiai appaiati**, investiti centralmente dal getto che esce lateralmente, grazie alla forma delle pale
- ✓ La massima spinta avviene a girante ferma, presenta quindi **transitori di avviamento molto brevi**
- ✓ La **regolazione è molto ampia, con rendimenti molto elevati**. Si ottiene agendo su un **otturatore (spina)** posto all'interno dell'ugello, riducendo quindi la portata di acqua che investe la girante
- ✓ Il numero di ugelli tende ad aumentare al ridursi del salto (e quindi all'aumentare della portata): in questo caso si parla di **Pelton poligetto**

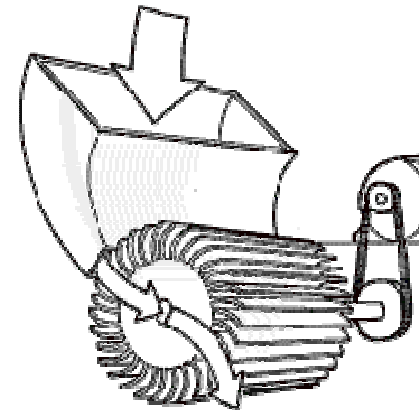
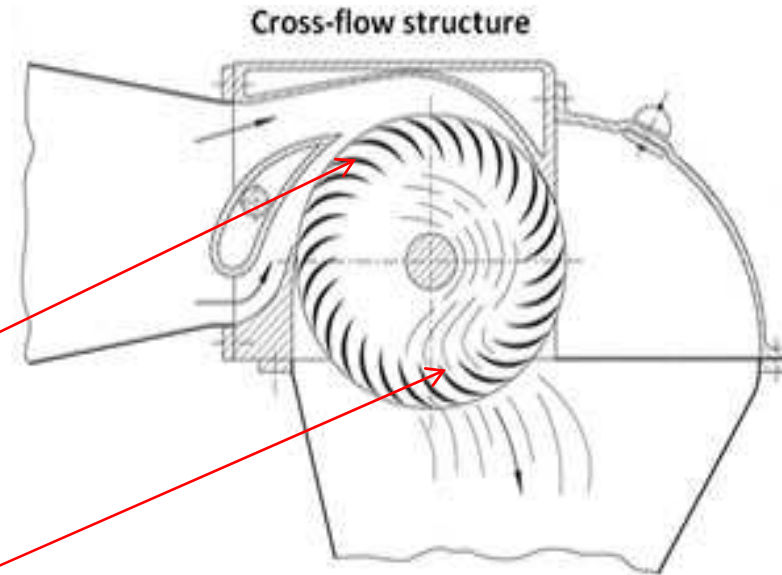
Turbina Turgo



- ✓ È utilizzata principalmente per salti tra i 15 ed i 300 m
- ✓ È una turbina **ad azione** in quanto l'energia di pressione viene integralmente trasformata in energia cinetica in un (o più) ugello che indirizza l'acqua sulle pale, determinandone la rotazione
- ✓ Il getto sulla turbina **non è quindi in pressione**
- ✓ Simili alle Pelton, ma **il getto colpisce più pale simultaneamente**; consigliate per **portate molto variabili e acqua torbide.**
- ✓ Rispetto alla Pelton, **non soffre** del problema che la portata di acqua erogabile dall'ugello sia limitata dall'eventuale **interferenza** con i flussi determinati dagli altri ugelli
- ✓ Rispetto alla Pelton ha un **diametro minore e quindi una maggiore velocità angolare**; ciò consente un **accoppiamento diretto** (senza moltiplicatore) con il generatore elettrico, con diminuzione dei costi ed aumento dell'affidabilità

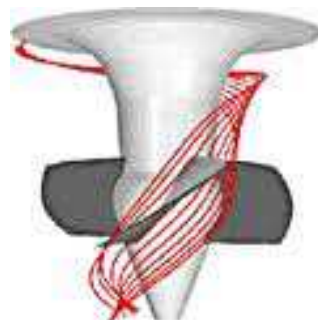
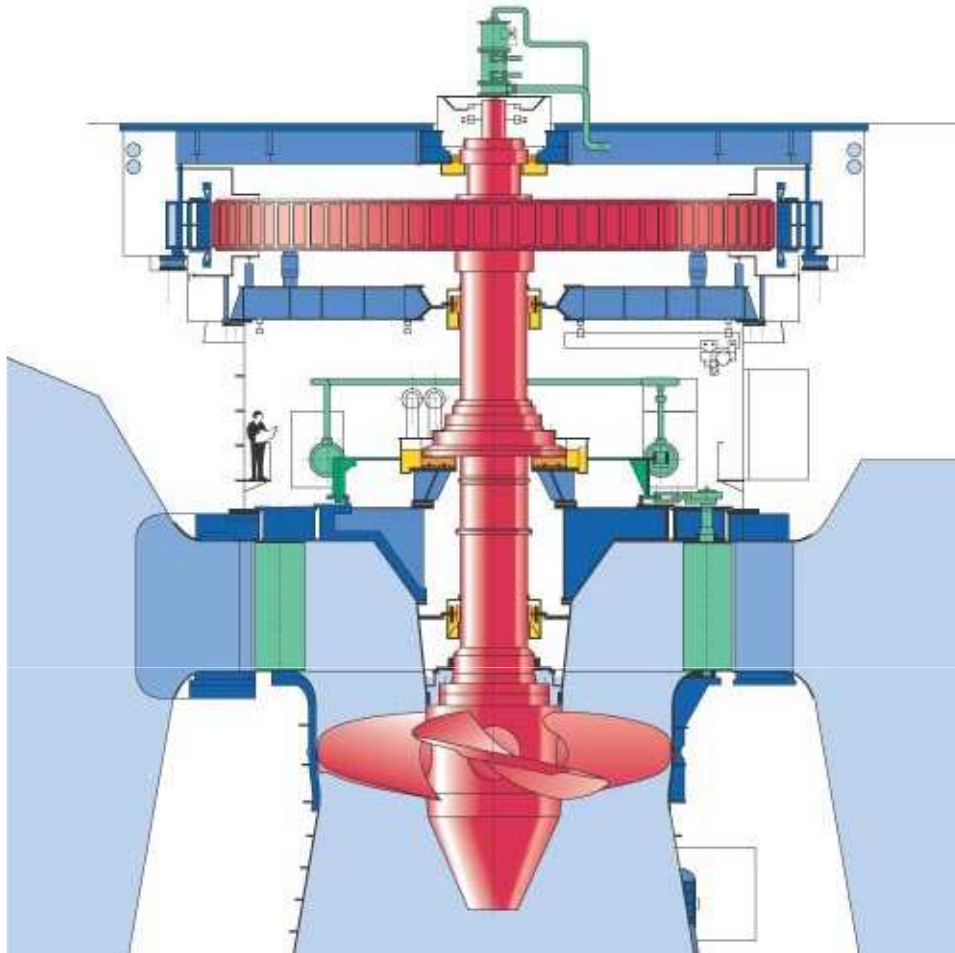
Turbina Banki-Michell (Cross Flow)

- ✓ È utilizzata **in vasto range di portate, con salti fra 5 e 200 m**
- ✓ È una turbina che opera principalmente **ad azione**
- ✓ Il rendimento massimo è circa **87 %** ma è sufficientemente costante al ridursi della portata
- ✓ L'acqua entra in contatto con la ruota una prima volta all'interno del distributore (**primo stadio**) dove il funzionamento avviene con un **piccolo grado di reazione**
- ✓ Successivamente **cambia direzione (90°)** e ritorna in contatto con la ruota con un funzionamento **completamente ad azione**
- ✓ È **molto economica** in quanto la ruota è costituita da semplici dischi paralleli, tra i quali vengono montate le pale (lamiere piegate)



A doppio stadio: $r_1 > 0$, $r_2 = 0$; semplici e poco costose, ma anche poco efficienti

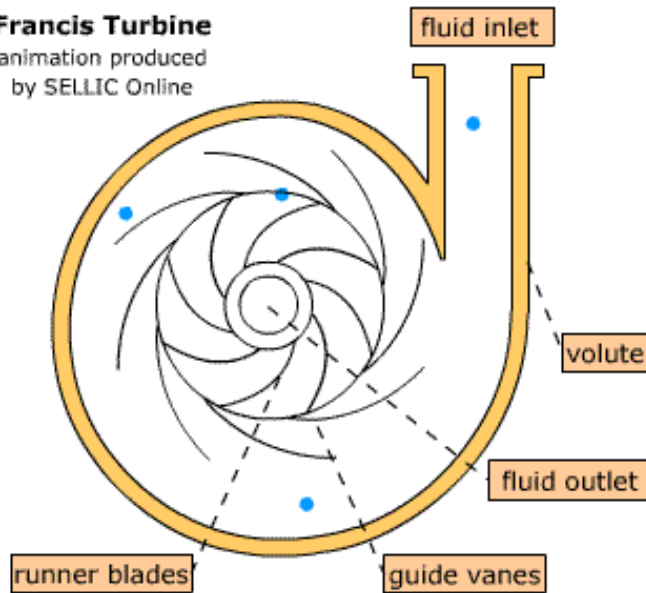
Turbina Kaplan



- ✓ È una turbina **a reazione** a **funzionamento veloce**
- ✓ Ai lati è presente un **condotto a chiocciola** e le **pale del distributore**
- ✓ Centralmente è invece presente la **girante**
- ✓ In basso è presente un **diffusore** che viene utilizzato per ridurre la pressione a valle e quindi aumentare la potenza
- ✓ Sfrutta **piccoli dislivelli**, fino a qualche decina di metri ma con **portate molto elevate**
- ✓ Le **pale** dell'elica possono essere **orientate al variare della portata**, garantendo un buon rendimento anche al ridursi della portata
- ✓ Il liquido arriva grazie ad un condotto a forma di chiocciola che alimenta tutta la circonferenza, poi attraversa un **distributore fisso** che dà al fluido un **moto vorticoso**, **ove il flusso, deviato di 90 °**, lo investe assialmente

Turbina Francis

Francis Turbine
animation produced
by SELLIC Online



- ✓ È una turbina a reazione a flusso **centripeto**
- ✓ Ai lati è presente un **condotto a chiocciola**
- ✓ L'acqua incontra prima un **distributore fisso** e quindi le pale del rotore, per poi essere scaricata dal centro della turbina
- ✓ In basso è presente un **diffusore** che viene utilizzato per ridurre la pressione a valle e quindi aumentare
- ✓ È **reversibile**: può funzionare da pompa

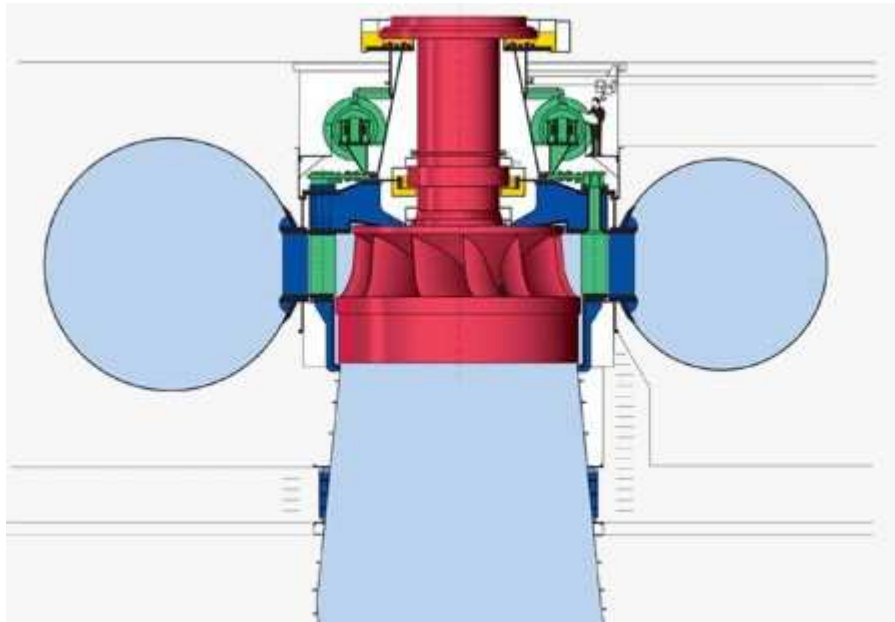


Diagramma per la selezione del tipo di turbina in funzione del salto e della portata: mini e micro-hydro

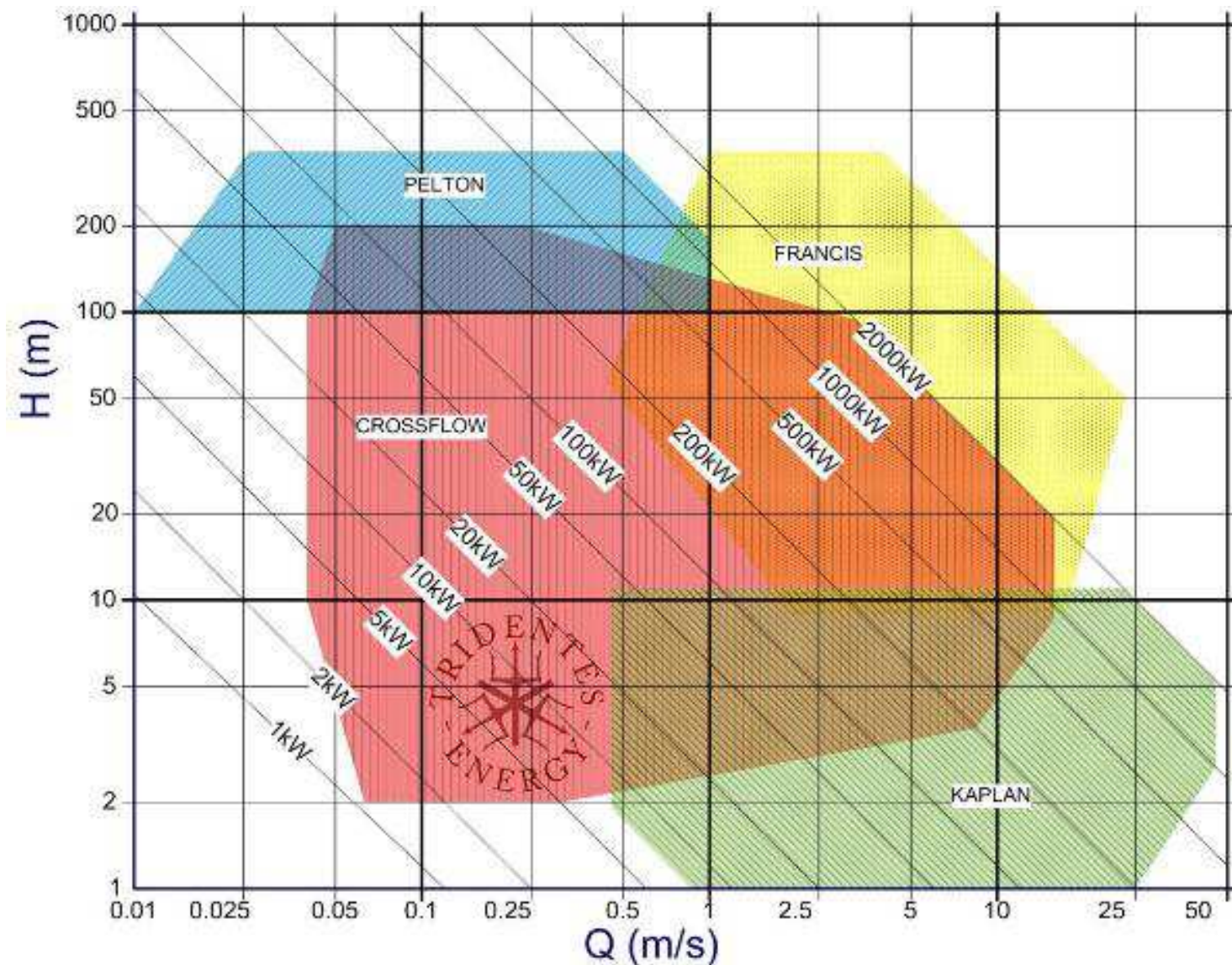
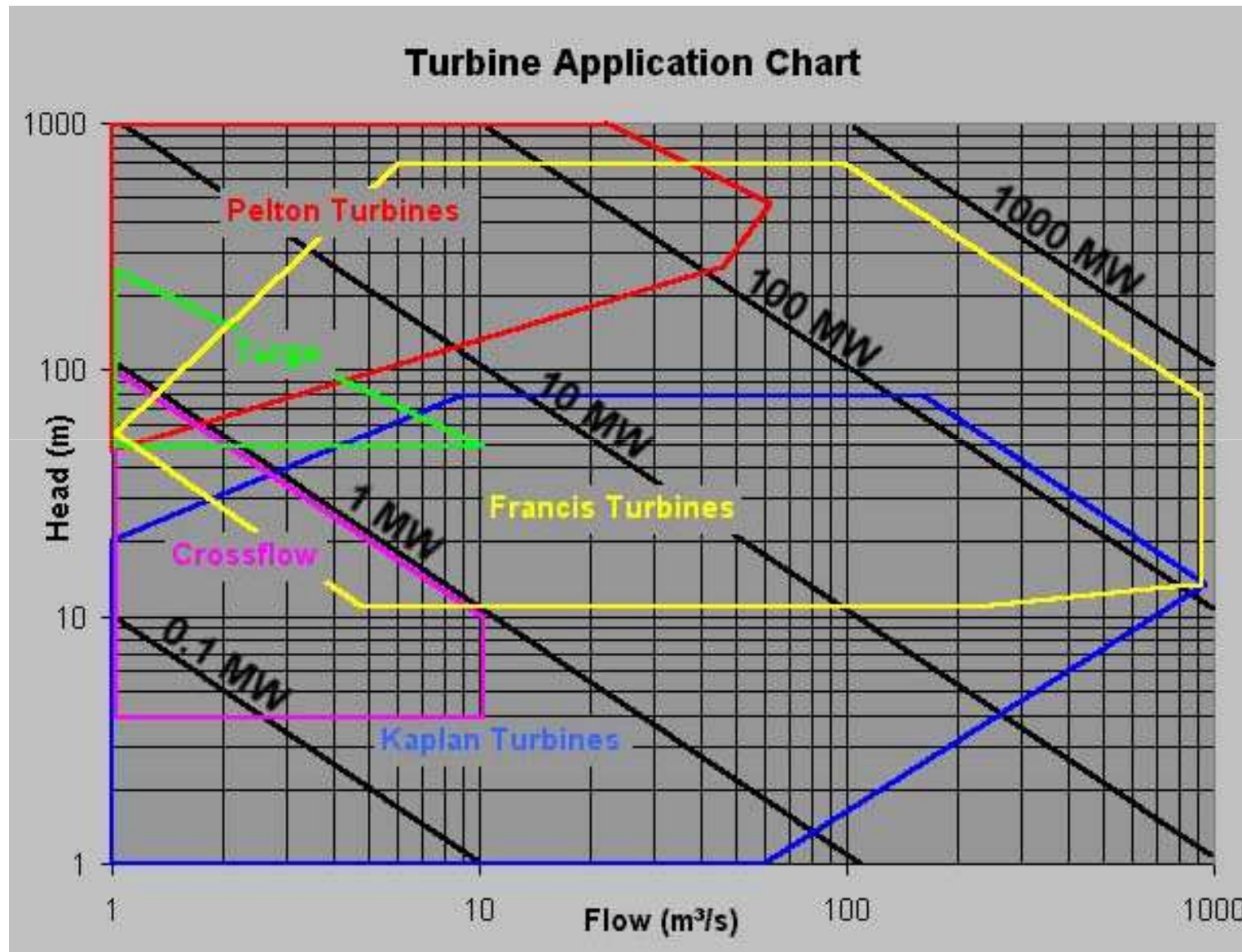
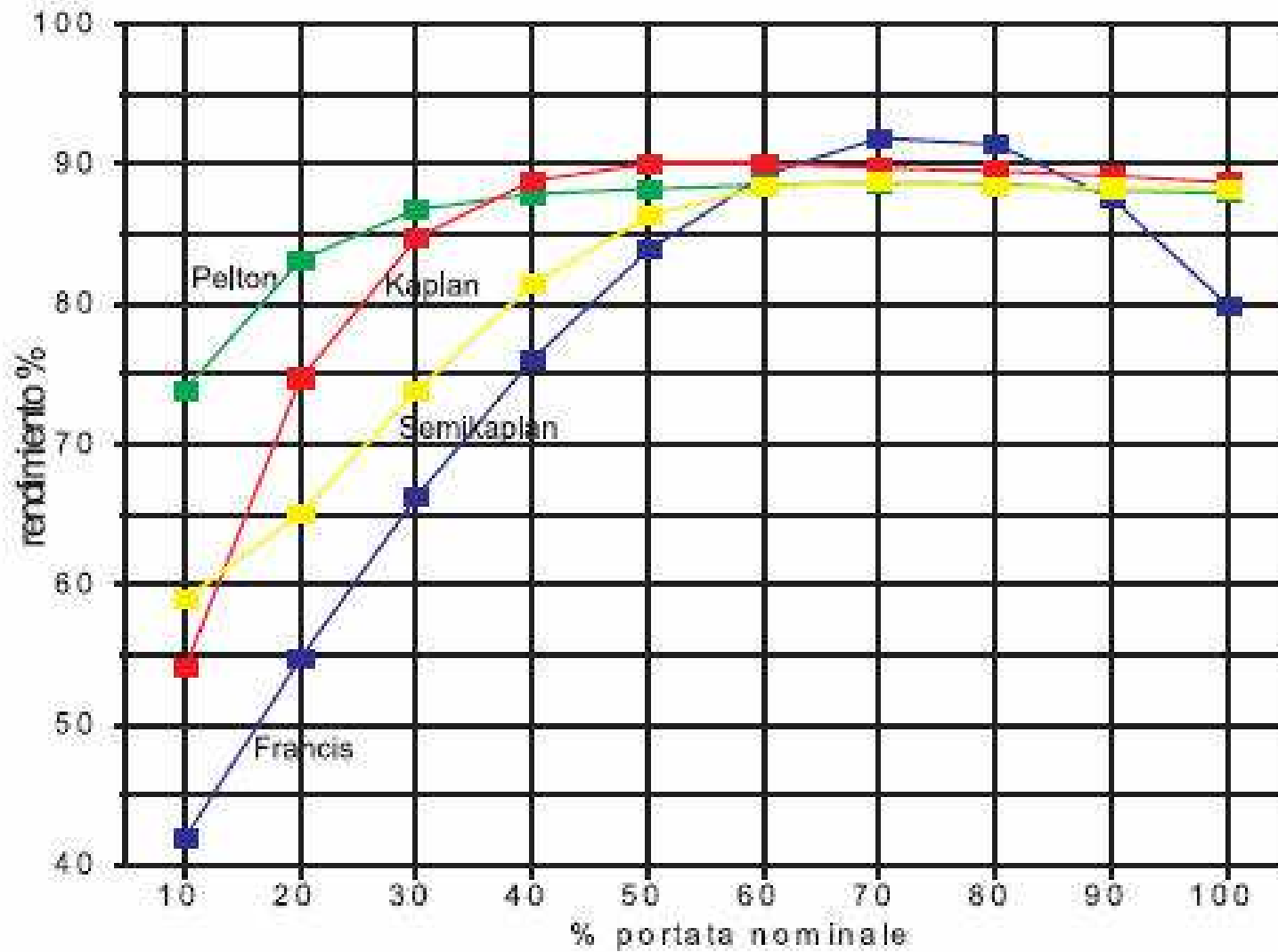


Diagramma per la selezione del tipo di turbina in funzione del salto e della portata: medie e grandi potenze

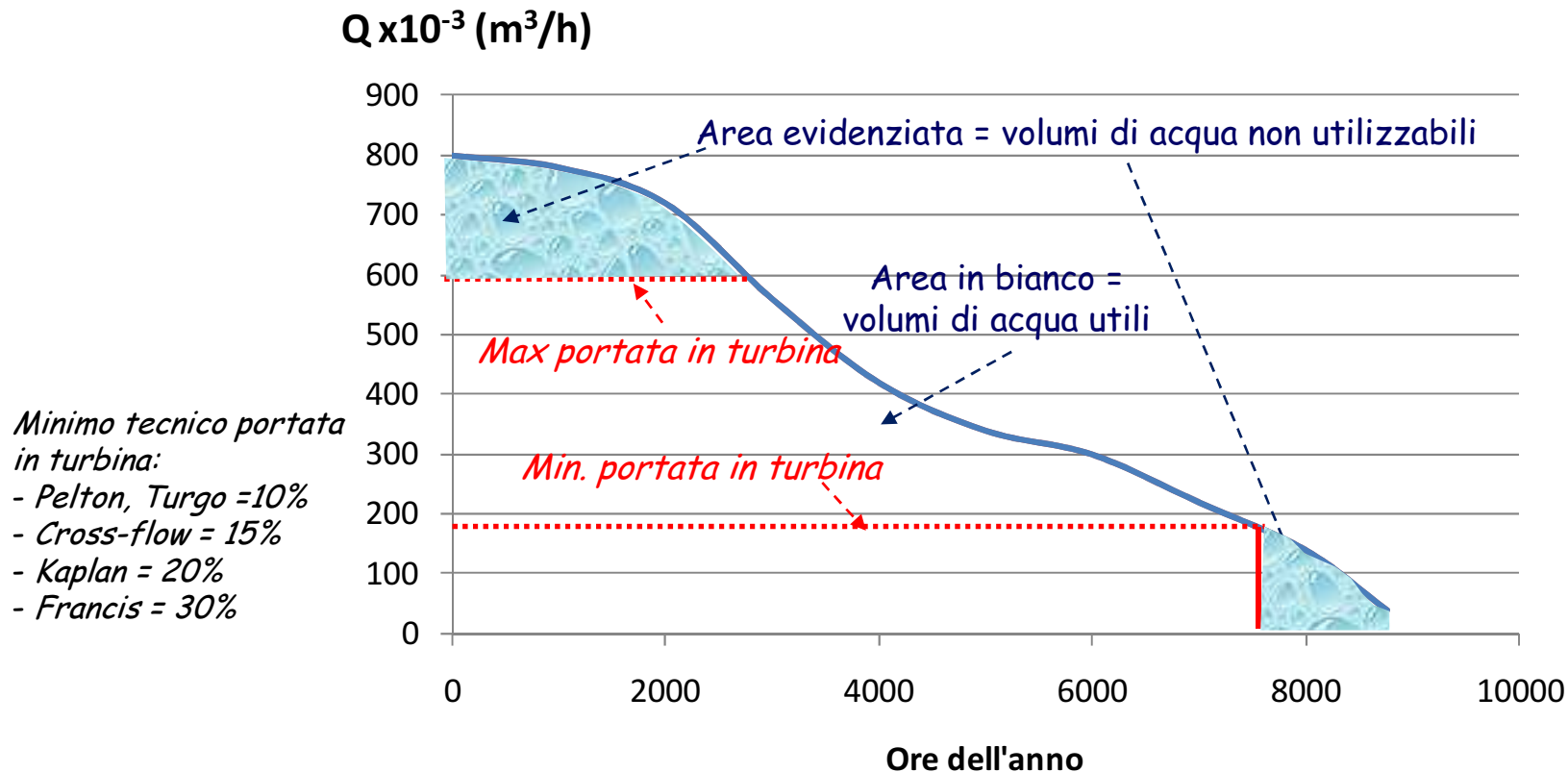


Rendimento delle turbine idrauliche



Dimensionamento in relazione alle portate disponibili

Curva di durata delle portate disponibili, al netto del DMV



✓ Energia elettrica producibile in un dato intervallo di tempo τ , in kWh:



$$E(\tau) = g \cdot H_n \cdot \int_0^{\tau} Q(\tau) \cdot \eta(\tau) \cdot d\tau / 3600$$

H_n = salto netto, in m

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Q = portata in m³/s (oppure in m³/h)

τ = tempo, in s (oppure in h)

con i vincoli:

- se $Q \geq Q_{max} \Rightarrow Q = Q_{max}$

- se $Q \leq Q_{min} \Rightarrow Q = 0$

Dimensionamento in relazione alle portate disponibili

✓ *All'aumentare della taglia nominale della turbina:*

CONTRO

- aumentano le ore di funzionamento a carico parziale della turbina => minore efficienza media;
- aumentano i volumi non "turbinabili" perché corrispondenti a portate inferiori al minimo tecnico;

PRO

- diminuiscono i costi specifici dell'impianto e aumentano i rendimenti nominali

✓ *Al diminuire della taglia nominale della turbina:*

CONTRO

- aumentano i volumi non "turbinabili" perché corrispondenti a portate superiori a quella max.;
- aumentano i costi specifici e diminuiscono i rendimenti nominali;

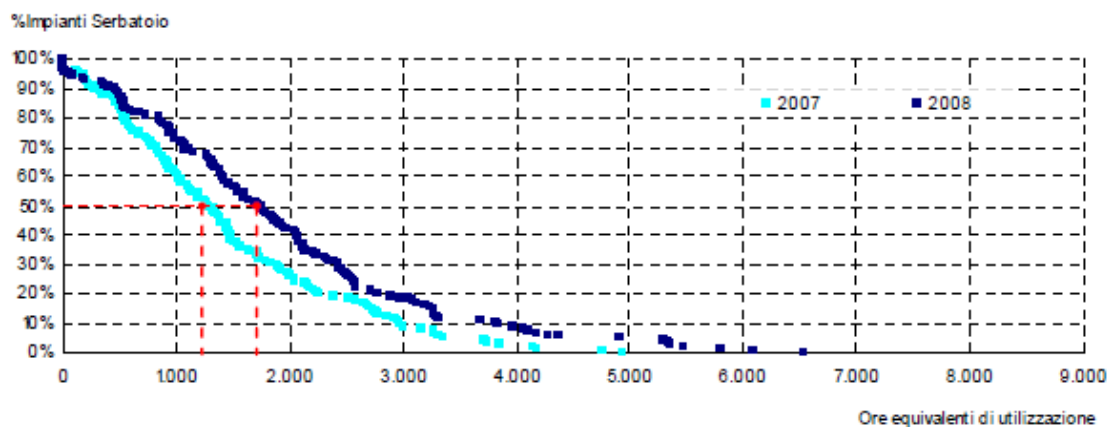
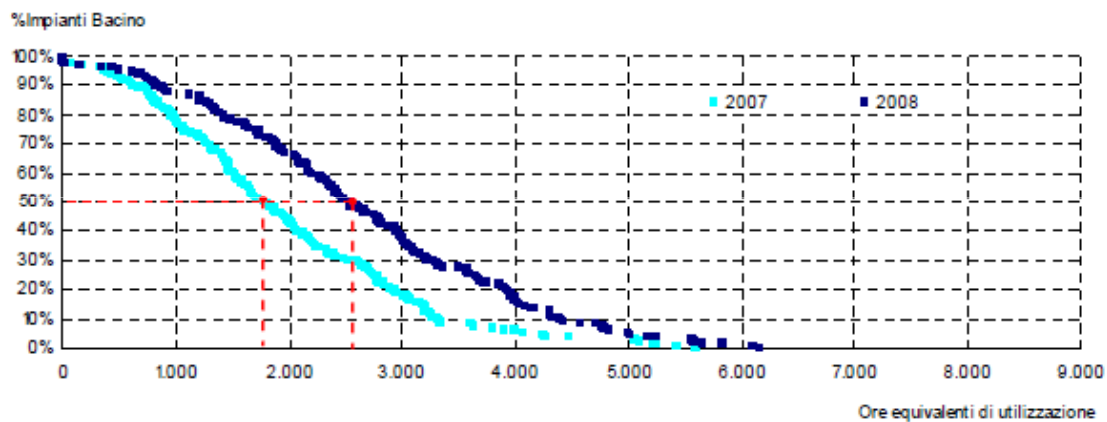
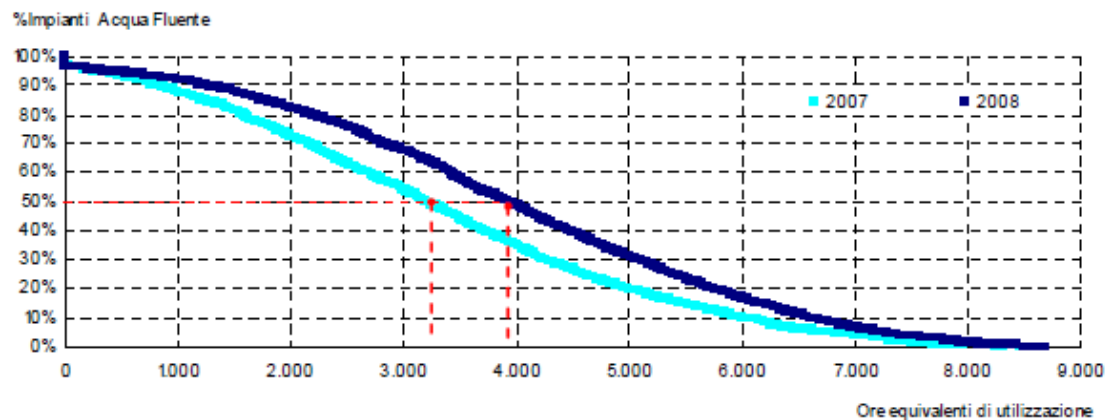
PRO

- diminuiscono le ore di funzionamento a carico parziale della turbina => maggiore efficienza media

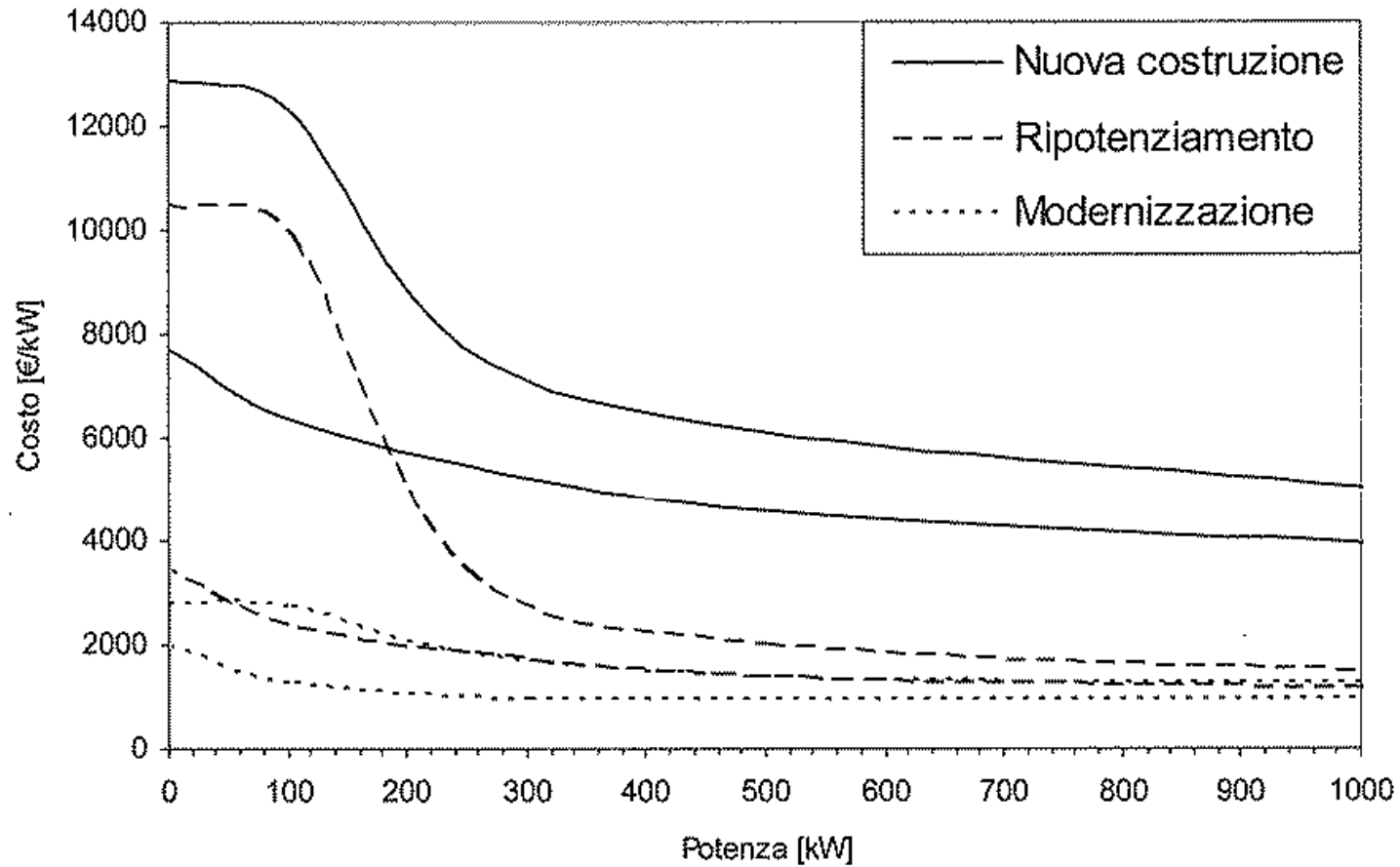


Possibilità di ottimizzare la taglia dell'impianto, dal punto di vista termoeconomico

Ore equivalenti di utilizzo della potenza installata (fonte: GSE)



Costi minimi e massimi di impianti mini-idro



Fonte: Bartolazzi A., *Le energie rinnovabili*, Hoepli

Esempio di analisi di prefattibilità per mini-idro, $P_e = 200 \text{ kW}$, $5.000 \text{ h}_{eq}/\text{anno}$, costo impianto 1.000 k€

✓ Energia elettrica prodotta = $200 \times 5.000 = 1.000.000 \text{ kWh/anno} = 1.000 \text{ MWh/anno}$

✓ Ricavi da cessione al mercato (a 80 €/MWh) = $1.000 \times 80 = 80.000 \text{ €/anno}$

✓ *Costi di esercizio:*

• *Canone concessione (20 €/kW) = 4.000 €/anno*

• *Oneri di manutenzione ($0,5\%$ dell'investimento) = 5.000 €/anno*

• *Oneri di personale = 10.000 €/anno*

• *Assicurazioni ($0,5\%$ dell'investimento) = 5.000 €/anno*

Totale costi = 24.000 €/anno

✓ Margine lordo = ricavi - costi = $80.000 - 24.000 = 56.000 \text{ €/anno}$



✓ Periodo di recupero del capitale = $1.000/56 = 17,8 \text{ anni}$

✓ VAN (20 anni, $\alpha = 5\%$) = $56 \times 12,5 - 1.000 = -300 \text{ k€} < 0$

✓ Indice di Profitto = VAN / Investimento = $-0,30 < 0$



✓ Incentivazione in conto energia minima per pay-back = 5 anni =>

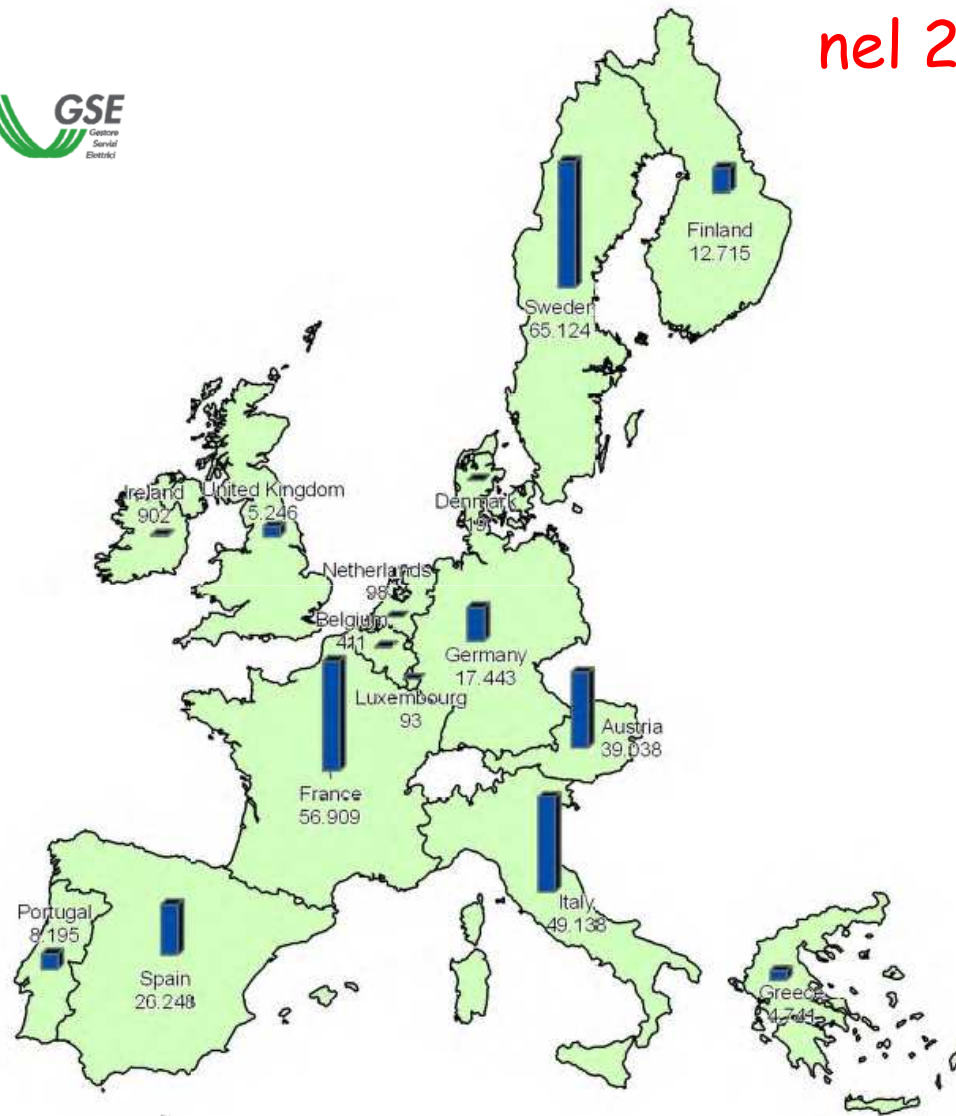
=> Ricavo minimo = $1.000/5 = 200 \text{ k€/anno} =>$

=> Incentivazione minima = $200 - 56 = 144 \text{ k€/anno} => 144/1.000 = 0,144 \text{ €/kWh}$

=> VAN (20 anni, $\alpha = 5\%$) = $200 \times 12,5 - 1.000 = 1.500 \text{ k€}$

=> Indice di Profitto = VAN / Investimento = $1,50$

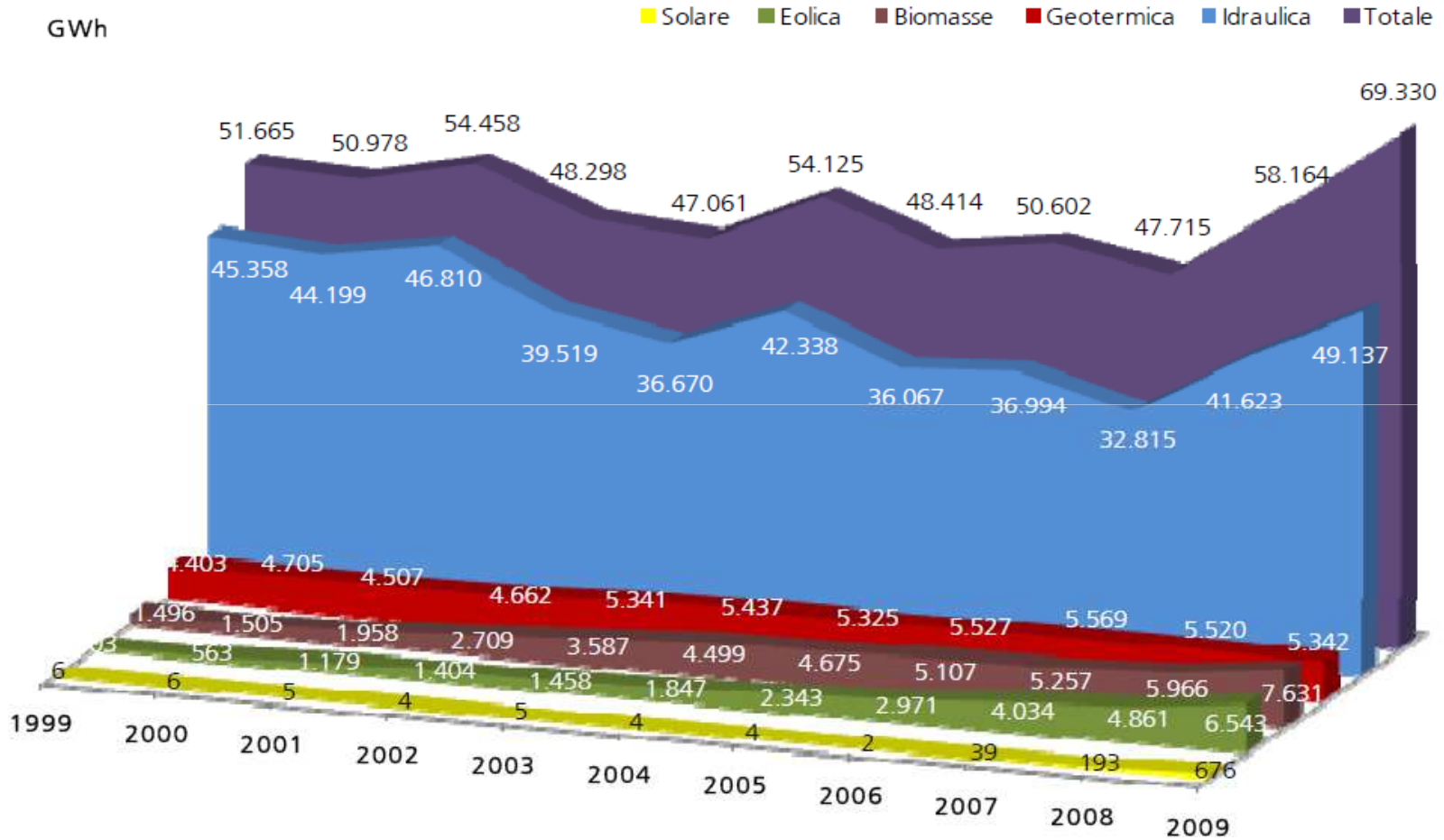
Gli impianti idroelettrici in UE nel 2009 (produzione in MWh)



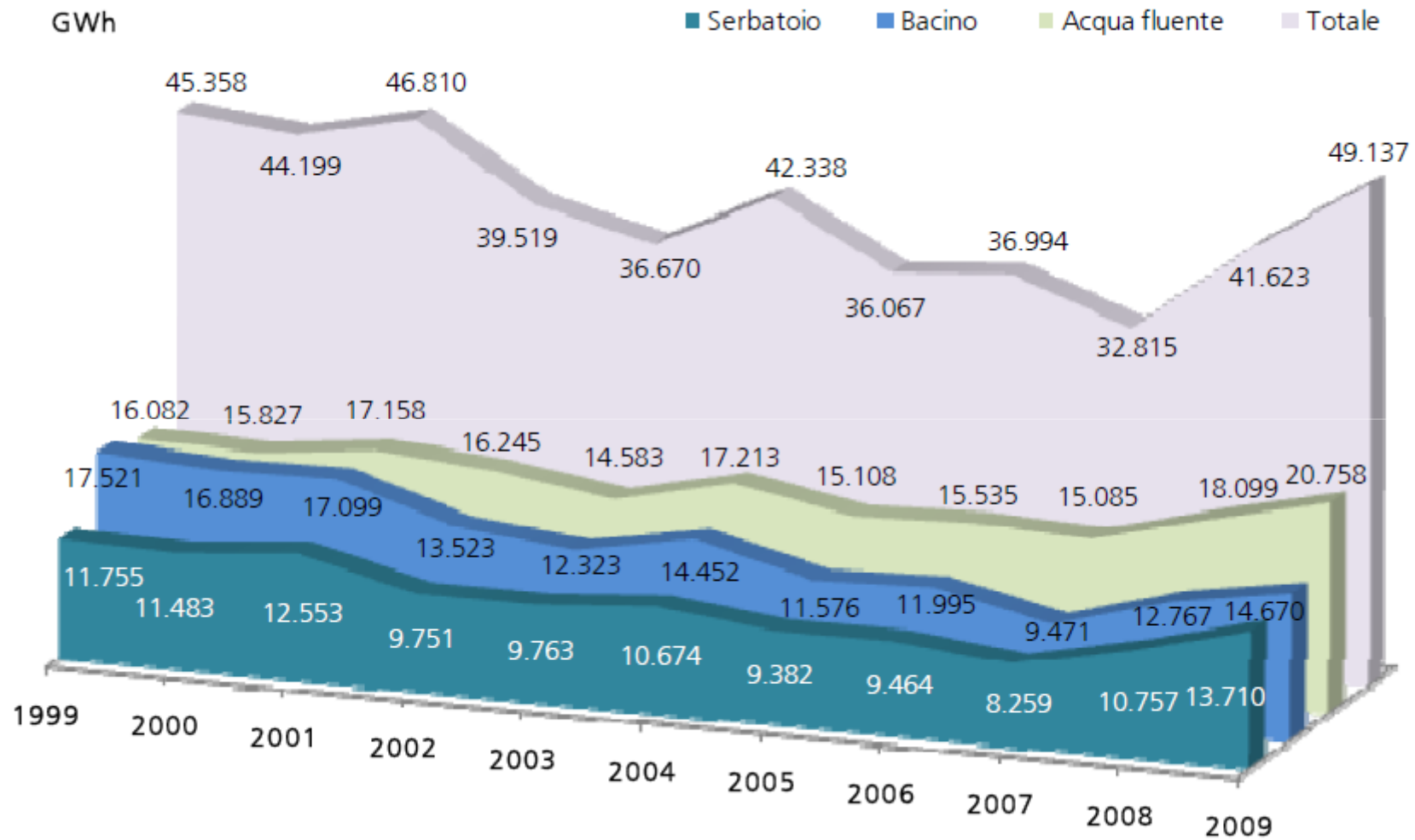
Fonte IEA



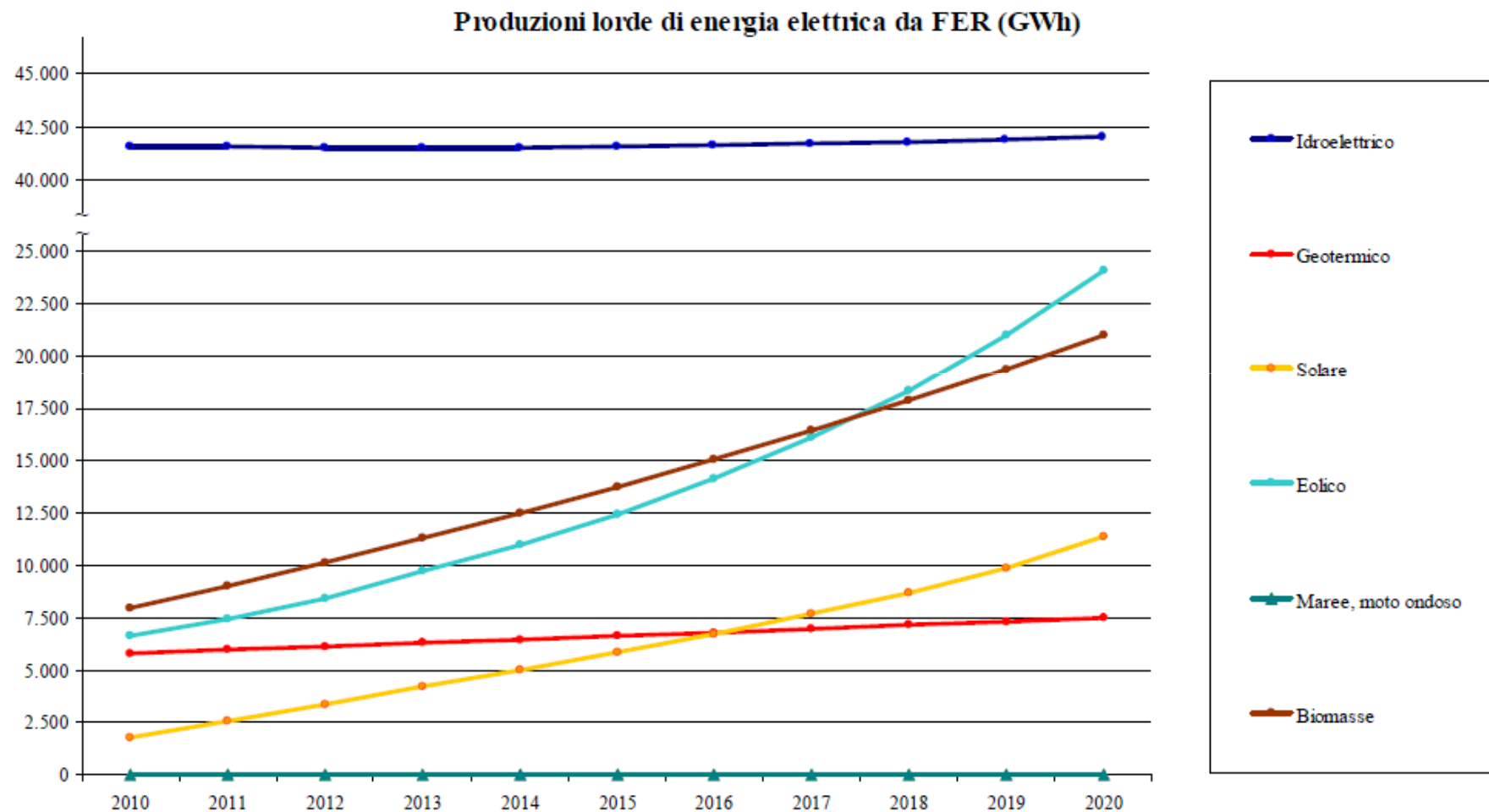
Produzione da fonte rinnovabile in Italia dal 1999 al 2009



Gli impianti idroelettrici in Italia nel 2009



Il Piano d'Azione Nazionale per le Energie Rinnovabili (giugno 2010)



Alcuni riferimenti bibliografici

- ✓ Bartolazzi A. Le energie rinnovabili, Hoepli, 2006
- ✓ Kaltschmitt et al. Renewable Energy. Springer ed., 2007
- ✓ Kreith and Goswami (ed.). Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, CRC Press, 2007.