

# ECO APPENNINO

1<sup>a</sup> FIERA-EXPÒ TECNOLOGIE PER IL RISPARMIO ENERGETICO  
FONTI RINNOVABILI PER LA MONTAGNA  
Porretta Terme BO - 28-30 Settembre 2007

28-Settembre 2007 SEMINARIO:  
MICRO e MINI IDRO:  
Tecnologie per le piccole portate e i piccoli salti

## Turbine idrauliche: *Tradizione ed innovazione*

**Giovanni NALDI**

**Università degli studi di Bologna D.I.E.M.**  
Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni Meccaniche,  
Nucleari, Aeronautiche e di Metallurgia

1500 – (1)

# AGRICOLA -1

1556 De re metallica (1<sup>a</sup> ed.)

1563 1<sup>a</sup> ed. Italiana:

*“De l’arte de metalli”*

Georg Bauer (Glauchau - Sassonia

1494-1555)

GEORGII AGRICOLAE  
DE RE METALLICALIBRI XII. QVI.  
bus Officia, Instrumenta, Machinae, ac omnia deniq; ad Metallu-  
rum (pe)laria, non modo loculentissime describuntur, sed & per  
eligios, sine locis inferas, adhaec Latine, Germanice, — et  
linguis alijs ob oculos posuimus, ut datus tradit nosse pos-

DE ANIMARTIVS IYSTERABRII Liber ab Autore re-  
cognitum indicibus discretis, quicquid in opere tractatum est,  
pulchri decorantibus.



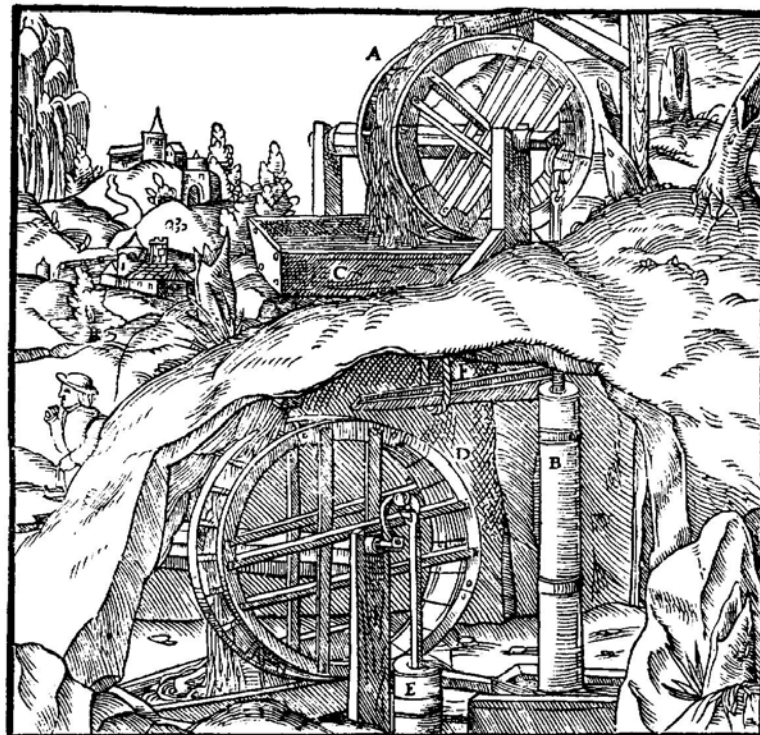
BASILEAE M<sup>o</sup> D<sup>o</sup> LVI<sup>o</sup>

Cum Privilegio Imperatoris in aeternum  
& Galliarum Regis ad Saeculatum.



bia una ruota così bassa e leggiere, che quella poca acqua possi girarla, e quella cadendo nel canale, da quello se ne scorre ne la ruota de la macchina di sotto, la quale è alta, e graue, e che con cōdotti, e trombe tira su l'acque del pozzo profondo. E perche così poca acqua nō puo sola far girar l'altra ruota, però la sua traue da principio con caucichie è girata da lauoranti: ma incontanente ch'ella uerfata hauerà ne lago l'acqua cauata cō le trōbe, la macchina di sopra cō la sua tromba la tira a se, e uerfala ne l'altro canale, dal qual coronno ne la ruota de la macchina dabasso, e fan girar la sua ruota. Hor queste acque e quelle del fiumicello per questi torti canali condotte posson molto ben far girar quella ruota piu alta, e graue de la macchina di sotto, la quale de la piu bassa parte del pozzo cō due o tre standuffi o trombe tira fuori l'acque.

Ruota de la macchina di sopra A. Standuffo di quella B. Canale de la medesima C. Ruota de la macchina di sotto D. Standuffi di quella :E. Altro canale F.



Ma se il fiumicello habbia tanta abbōdanza d'acqua, che possa subito uol-  
tar la ruota graue, & alta, a una de le teste de la traue si fa una ruota dentata, la  
qual girando, fa girar la ruota fatta a fusa de l'altra traue, ch'è sotto di quella:  
e ad abedue le teste de la traue di sotto si fa un ferro tōdo, e torto come corna  
lunate: il qual è molto in uso in così fatte macchine. Hor questa per hauer da  
ogni banda i condotti, e gli standuffi per ordine, tira su gran copia d'acqua.  
Traue



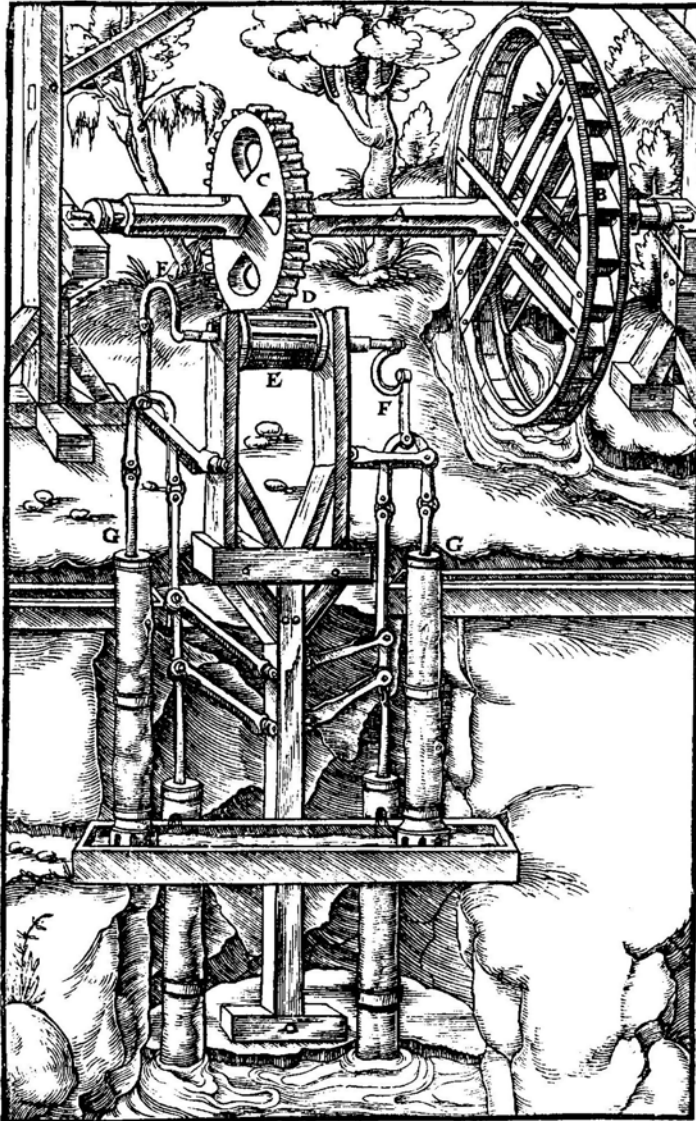
# 1500 – (1)

# AGRICOLA -2

LIBRO SESTO.

163

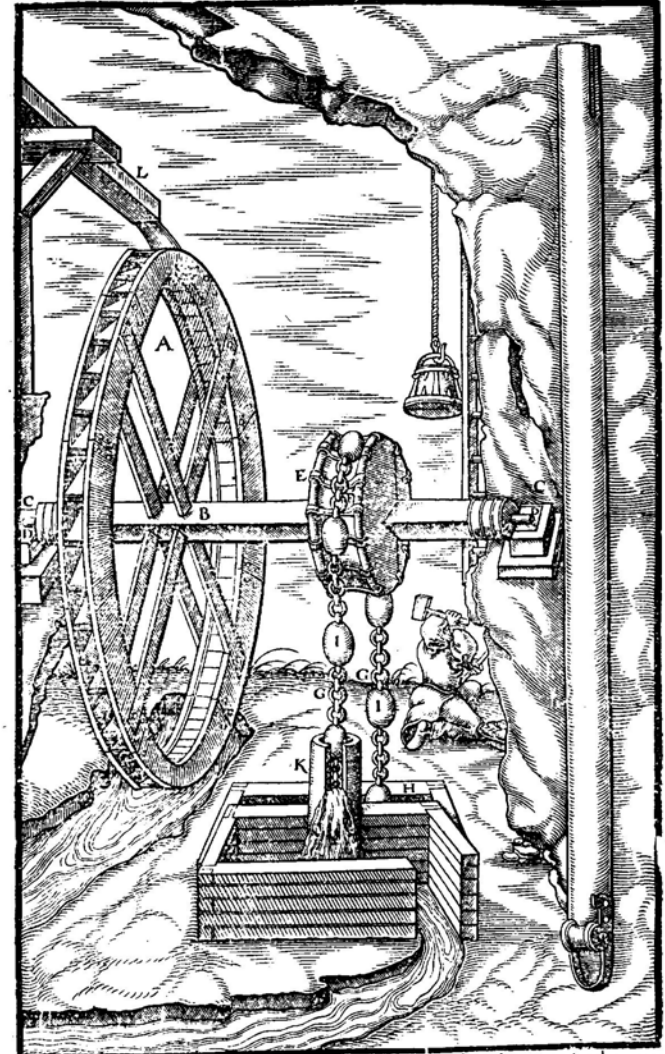
Trave di sopra A. Ruota percossa da l'aque B. Ruota dentata C. Vn'altra trave D.  
Ruota fatta a fusa E. Ferro tondo e piegato F. Ordini di standuffi, o uoi trombe G.



LIBRO SESTO.

165

Ruota A. Trave B. Cede C. Maniglie D. Ruota atamburo E. Spranghe di ferro F.  
Cetra G. Traui H. Palle I. Cannoni K. Canali del fiume L.



L'altra macchina ha due ruote a ramburo, due ordini di cannoni, e due cete  
ne da tirare, le quali con le palle uerfon l'acqua. L'altre cose son' al tutto simi-

1500 – (2)

Agostino Ramelli  
Ponte Tresa 1531 - 1608+

(1588)

*“Le diverse ed artificiose machine del capitano Agostino Ramelli del Ponte della Tresa, ingegniero del christianissimo re di Francia et di Pollonia nelle quali si contengono varii et industriosi movimenti, degni di grandissima speculatione, per cavarne beneficio grandissimo in ogni sorta di operatione”*



# RAMELLI -1

## THE VARIOUS AND INGENIOUS MACHINES OF AGOSTINO RAMELLI

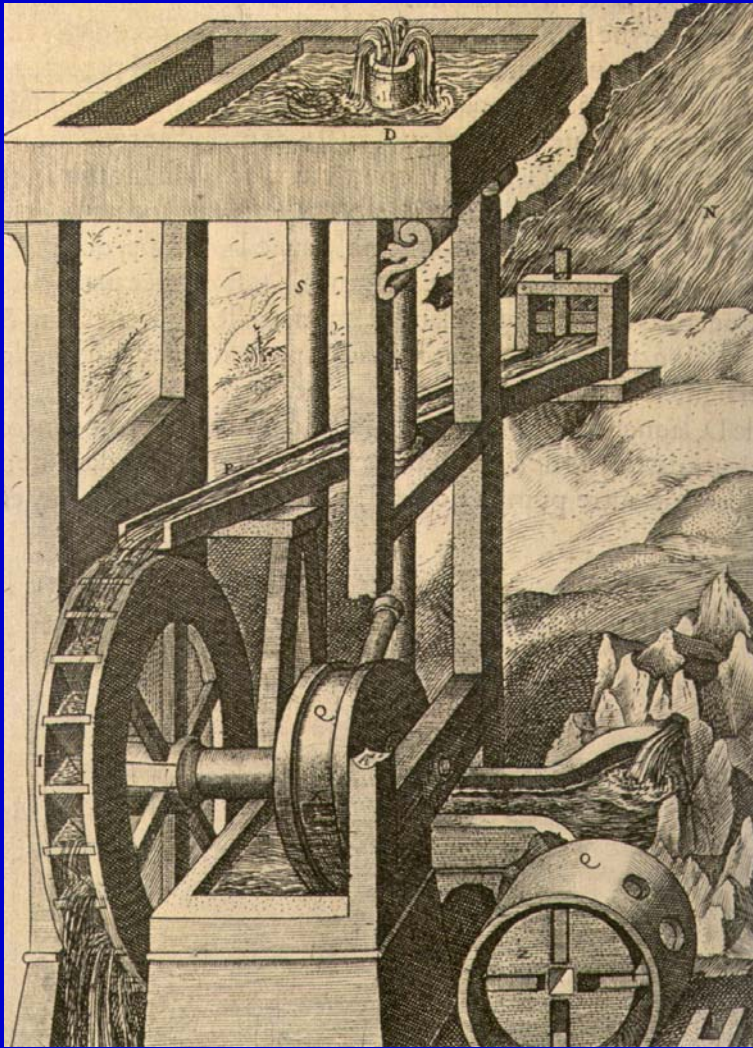
A Classic Sixteenth-Century Illustrated Treatise on Technology



Translation and Biographical Study by Martha Teach Gruhl  
Annotations and Glossary by Eugene S. Ferguson

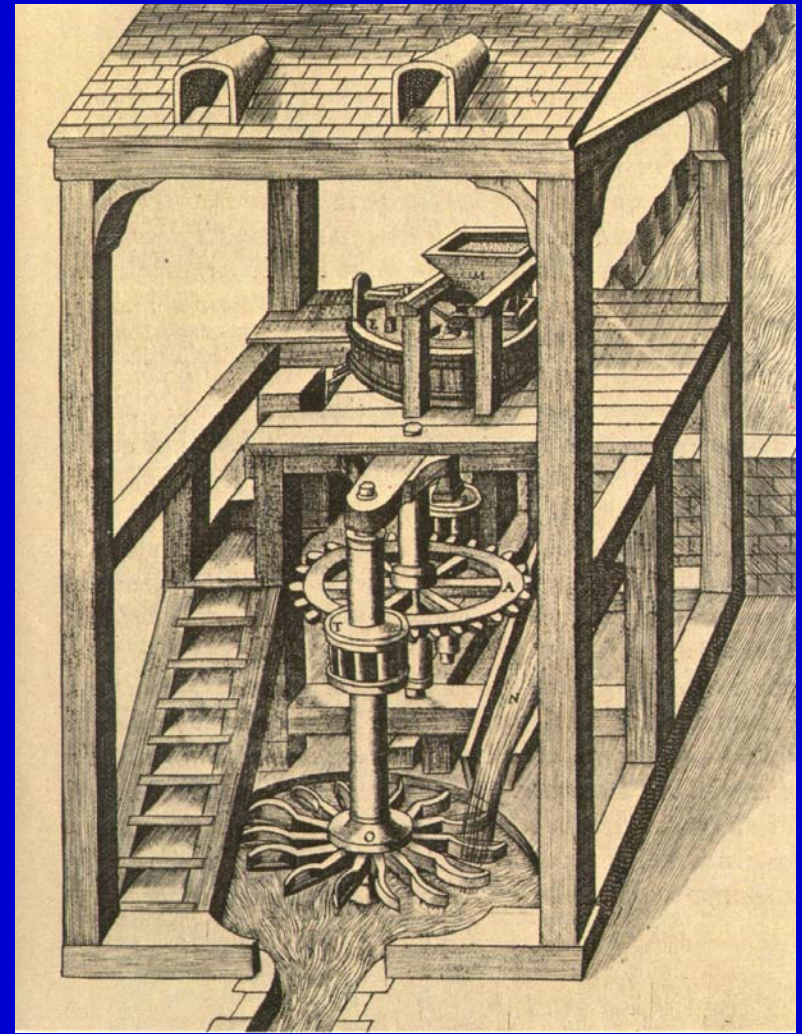


1500 -2



Pompa volumetrica a palette azionata da una ruota idraulica ad asse orizzontale

RAMELLI - 2



Mulino azionato da una ruota idraulica ad asse verticale



# 1600

## BRANCA-1

Giovanni Branca  
(S. Angelo in Lizzola 1571  
† Loreto 24 Gennaio 1645)

1629:

*“Le Machine volume nuovo et di molto artificio da fare effetti marauigliosi tanto spiritali quanto di animale operatione arichito di bellissime figure con le dichiarazioni a ciascuna di esse in lingua volgare et latina”*









# 1700 – (1) Belidor

Bernard Forest de Belidor  
(1693-1761)

*Architecture Hydraulique*  
(4 voll.) 1737-1753

**Les Moulins sont communs à la vérité: c'est justement ce qui en prouve l'utilité et la nécessité de chercher les moyens de les perfectionner.**

**BELIDOR, *Architec. hyd.*  
Lib. II, c. I, § 634.**

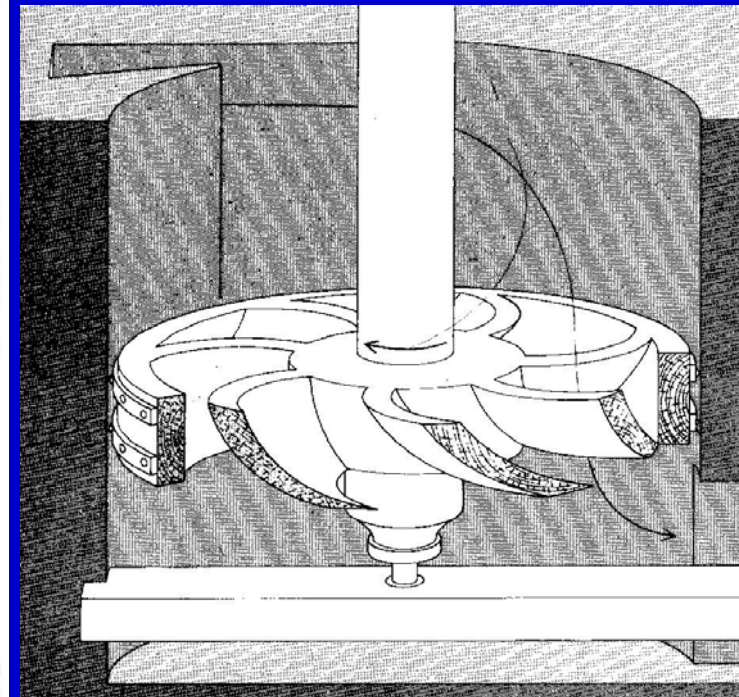
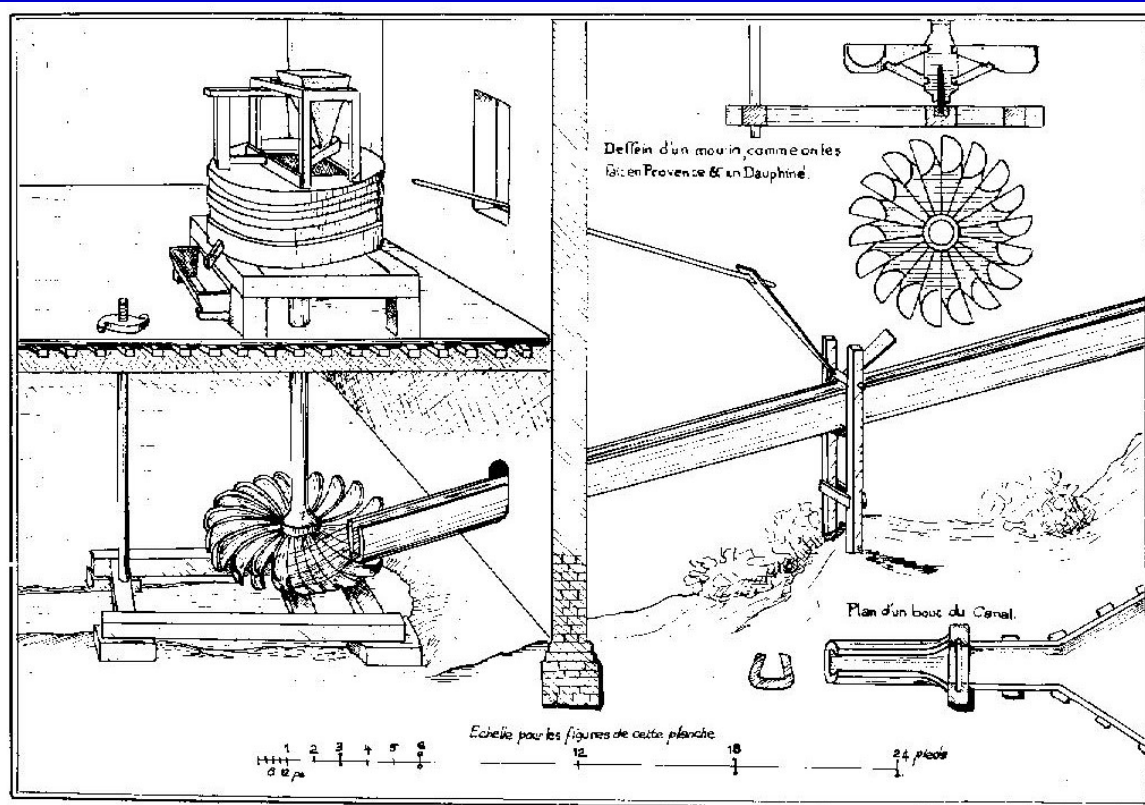
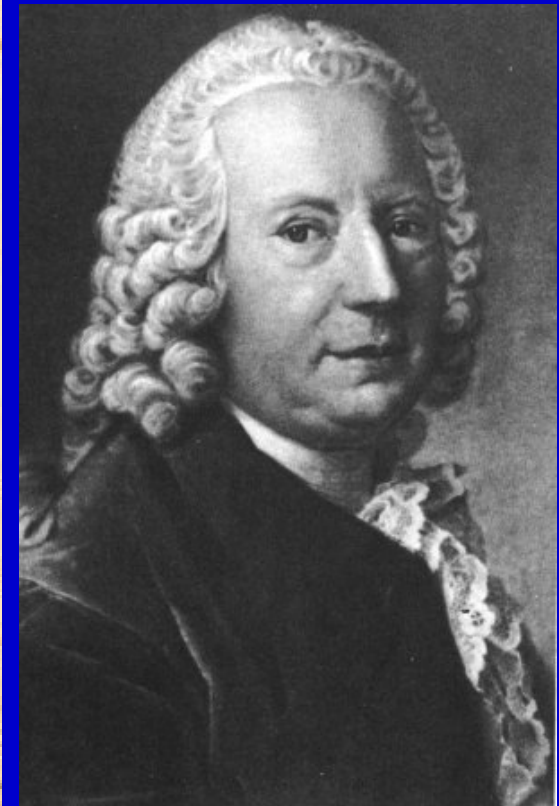
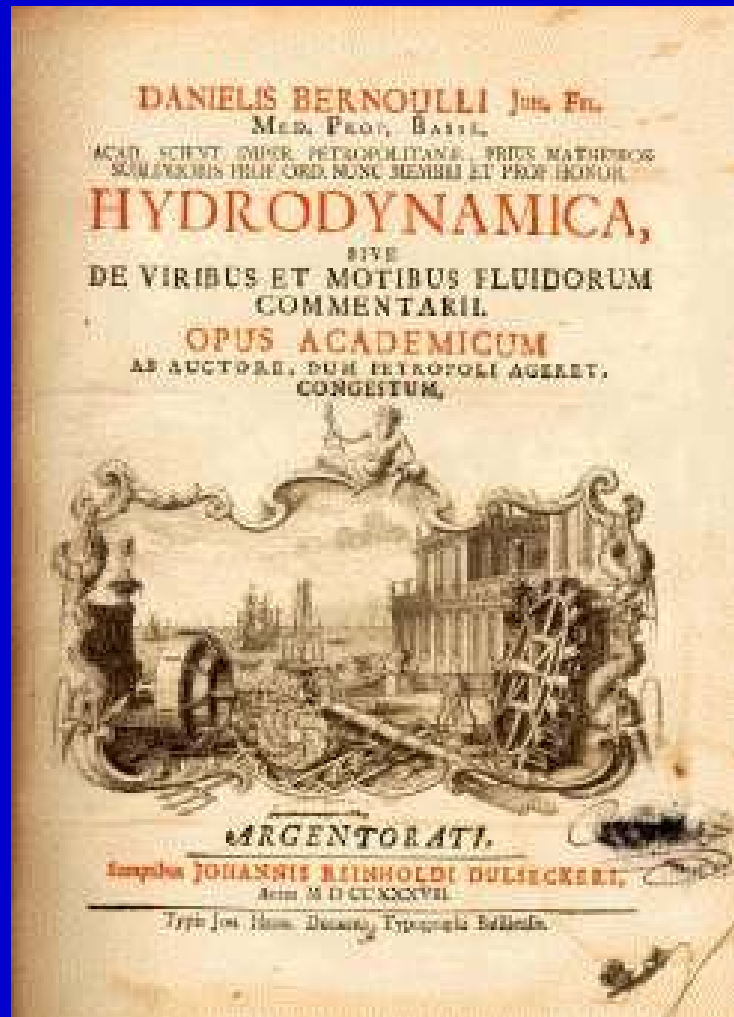


Fig. 1.2. — Roue hydraulique du xviii<sup>e</sup> siècle.



# 1700 – (2) Bernoulli Daniel I (1700-1782)

1738 *Hydrodynamica sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*



# 1700 - (3) Eulero

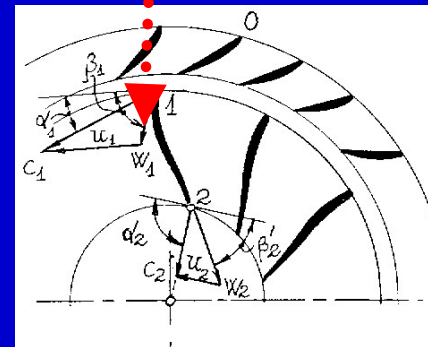
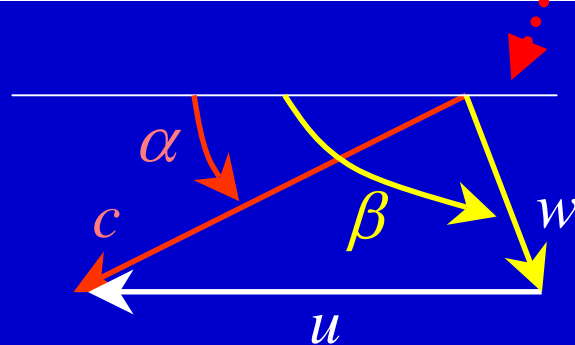
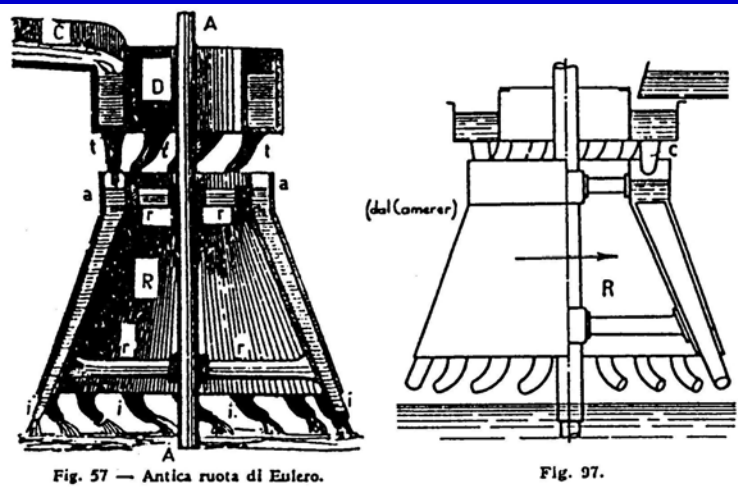
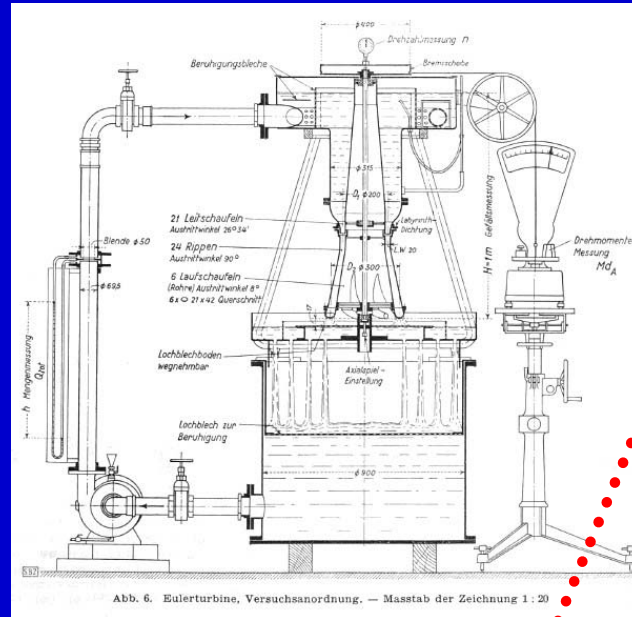
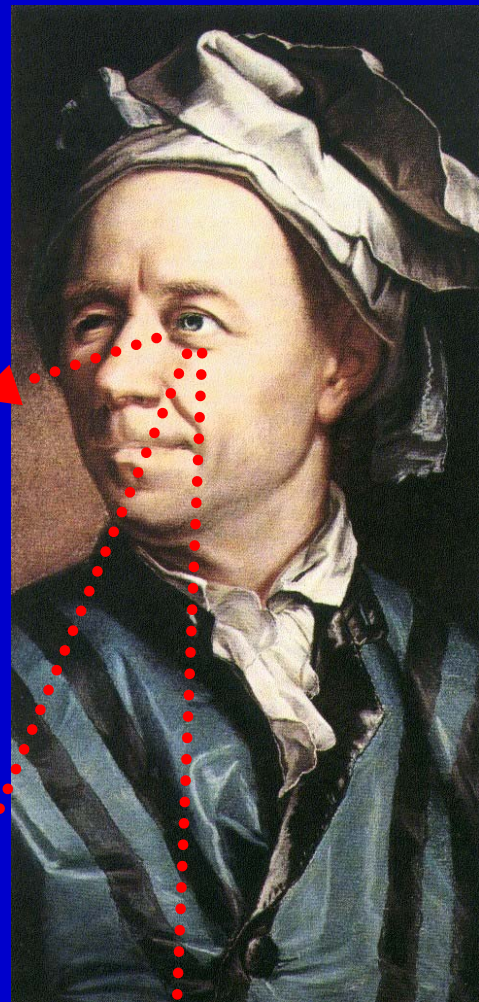
Euler Leonhard  
(Basilea 1707-1783)

1755 "Principi generali del moto dei fluidi"

$$L_{motore} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

$$L = c_1 u_1 \cos \alpha_1 - c_2 u_2 \cos \alpha_2$$

Nel 1750, Segner immagina di costruire una ruota idraulica orizzontale a bracci multipli radiali alla base d'un cilindro verticale. Il maggior contributo dell'epoca fu quello di Eulero che nel 1754 descrive una macchina ispiratagli da Segner.

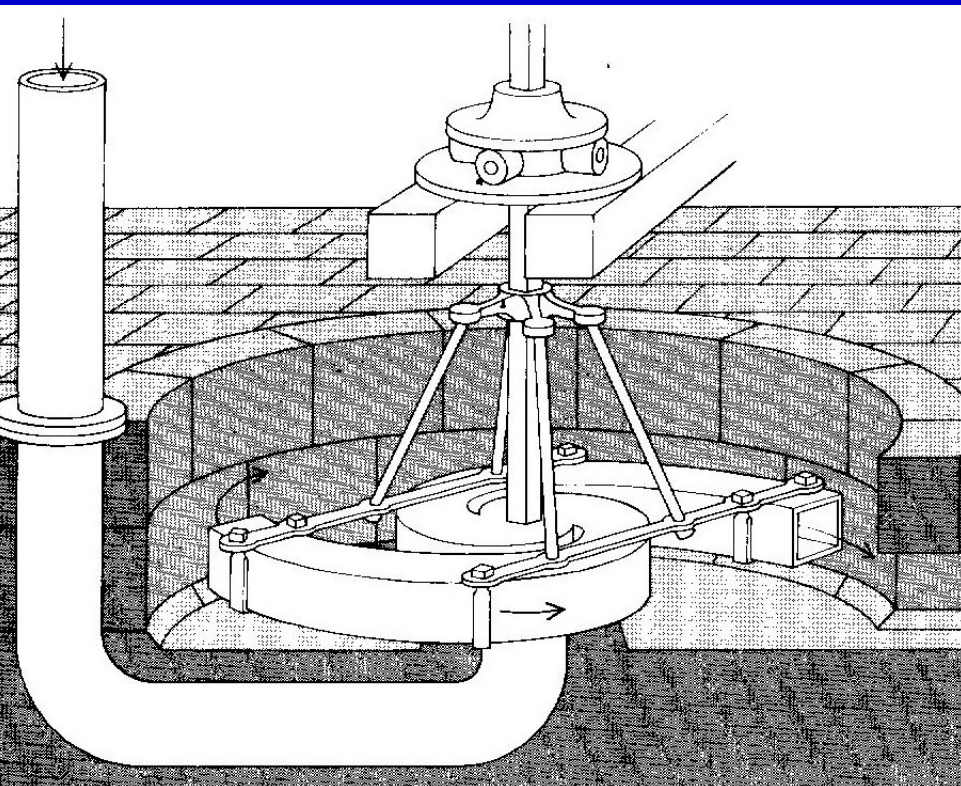




# Mannoury d' Ectot (1807)

Jean Charles Mannoury d'Ectot  
Saint-Lambert- (Orne) 1777  
† Parigi 2 Marzo 1822

*Mémoire adressé à la  
classe des sciences  
physiques et mathématiques  
de l'Institut sur diverses  
machines hydrauliques  
(1813)*



Esempio di macchina a reazione  
di ispirazione euleriana a lungo  
descritta nei trattati di fisica ma  
che trova una realizzazione  
pratica ad opera dell'Autore

# 1800 - (1) Poncelet



Per evitare il problema dell'ammissione su di un arco limitato Poncelet propone anche ruote centripete ad asse orizzontale

Poncelet Jean-Victor

(Metz 1788.07.01

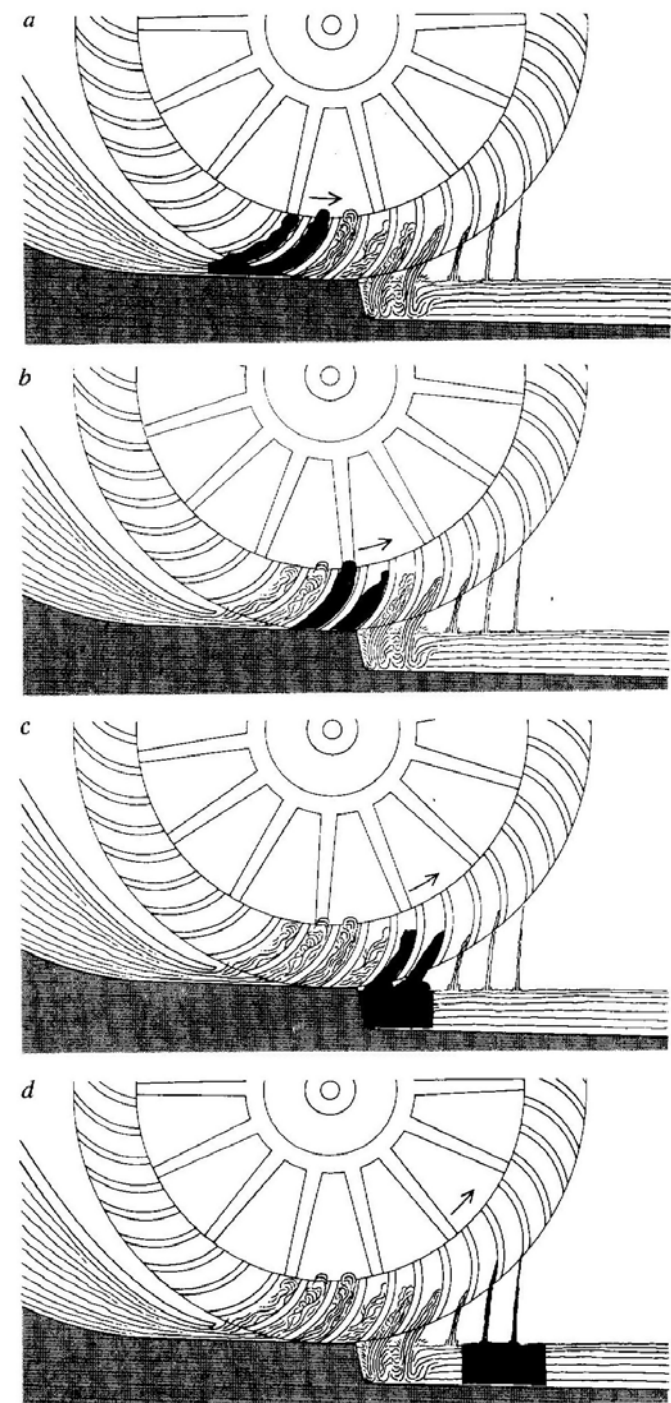
† Parigi 1867.12.22

Generale di brigata

membro dell'*Institut de France*

Matematico, ingegnere,

attivo nella politica francese





# 1835 - Cadolini

## L'ARCHITETTURA PRATICA

DEI

### MULINI

TRATTATA CON METODI SEMPLICI ED ELEMENTARI

DESUNTI DAL NEUMANN E DALL' EYTELWEIN

UNITOVI UN

### RAGGUAGLIO

SULLA TEORIA DELLE RUOTE IDRAULICHE  
SULLA FABBRICAZIONE DELLE RUOTE METALLICHE  
E SUI PERFEZIONAMENTI DELL'ARTE DI MACINARE

PER CURA

DELL' INGEGNERE G. CADOLINI

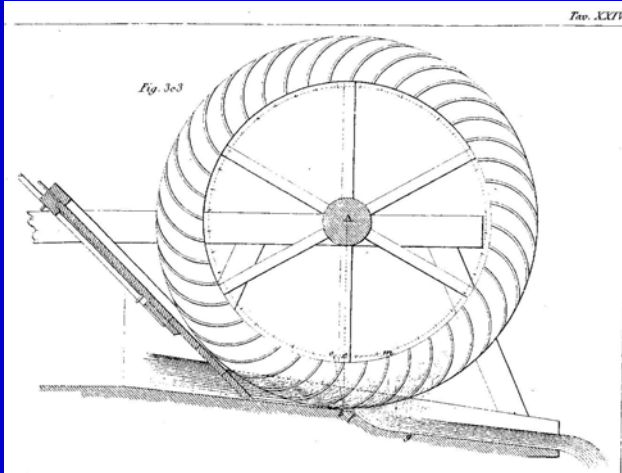
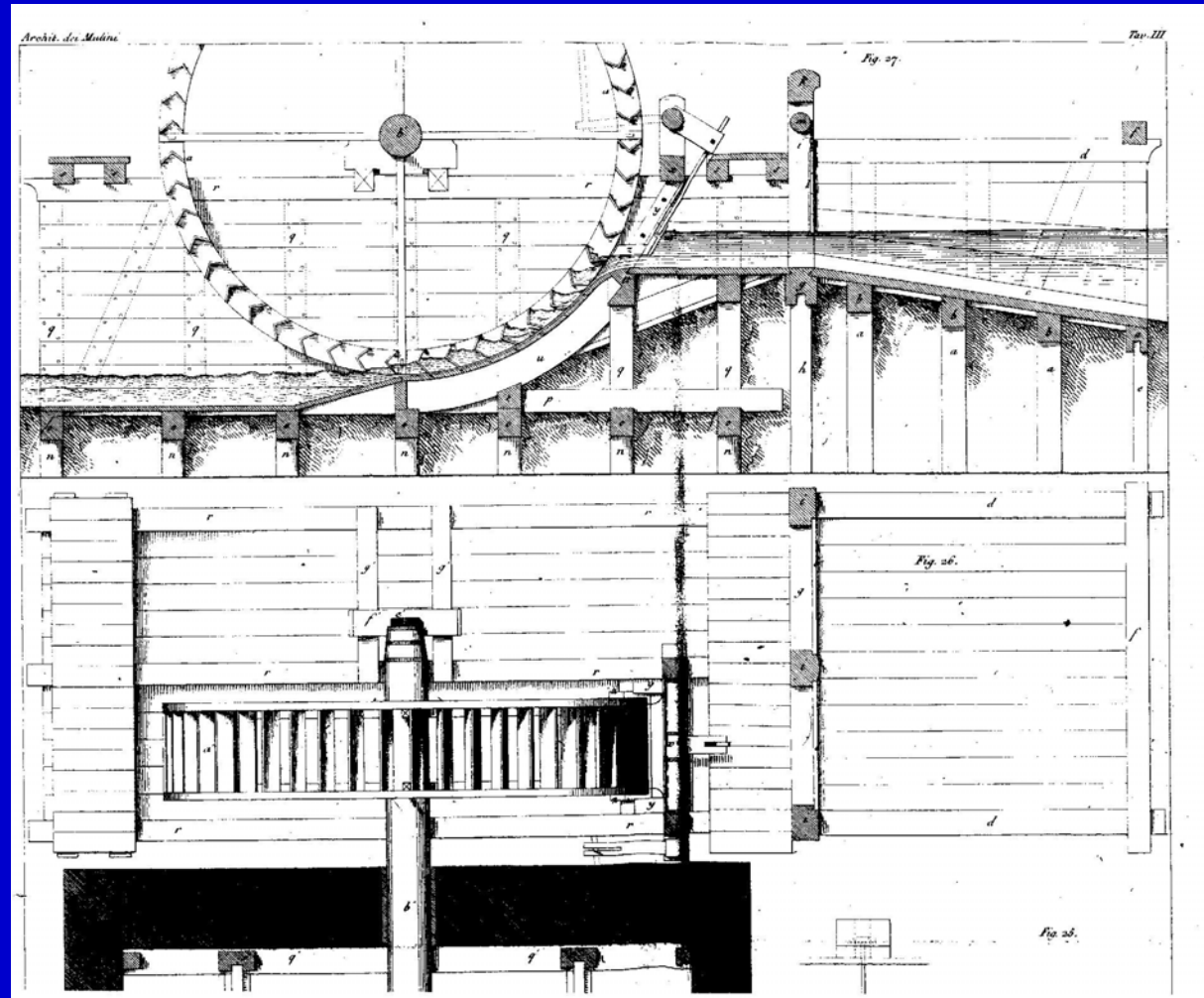
Les Moulins sont connus à la vérité;  
c'est justement ce qui en prouve l'utilité  
et le besoin de chercher les  
moyens de les perfectionner.  
Encyclop. Architec. hyd.  
Lih. II, c. 1, § 634.

LIBRO PRIMO

MILANO

A SPESE DELL'EDITORE

MDCCC.XXXV.



Architettura pratica dei mulini trattata con metodi semplici desunti da Neuman e dall'Eytelwein unitovi un ragguglio sulla teoria delle ruote idrauliche sulla fabbricazione delle ruote metalliche sui perfezionamenti dell'arte di macinare

Milano a spese dell'editore MDCCC.XXXV

Volume 14° della Scelta Biblioteca dell'Ingegnere civile

# 1800 – (2) Claude Bourdin (1790 -1873)

C. B. fra il 1820 e il 1824 realizza diverse installazioni fra il 1820 e il 1824 nel dipartimento del Puy de Dôme con macchine ispirate a quella di Eulero

Moulin d' Ardres, Moulins de Pont-Gibaud (1833) rendimento 67% misurato col freno Prony

1822 Saggio: *Des turbines hydrauliques ou machines rotatoires à grande vitesse*  
“Dal latino *turbo*”

Al Concorso bandito nel 1826 della “*Société d'Encouragement pour l'industrie national*”, Burdin presenta una memoria sulle ruote orizzontali abbandonando il principio della ruota di Eulero e ponendo le basi per l'architettura successivamente adottata da Fourneyron

Si ribadiscono i requisiti fondamentali:

- Ingresso senza urto
- Uscita senza velocità
- Possibilità di funzionamento con la ruota immersa (senza perdita di salto utile)

“Turbina”

La memoria (viste le anteriorità di Borda et Navier 1767 e 1819) non ha il carattere di novità e praticità richiesti e a Bourdin viene riconosciuto un premio parziale di 2000 franchi ma il concorso rimane aperto fino all'assegnazione del premio a Fourneyron nel 1833.



# 1800 – (2) Fourneyron

Bénoit FOURNEYRON

(Saint-Etienne 1802.11.01 † Parigi 1867.07.08)



nel 1817-1819 frequenta il primo corso scuola minatori  
(1821 Ingegnere minerario) (Allievo di Bourdin)

1826 concorso bandito da

“Société d’Encouragement pour l’Industrie Nationale” (6000 franchi)

1828 Turbina Pont-sur-l’Ognon da 6 CV  $\eta > 80\%$

Freno Prony (Gaspard Clair) (1755-1839)

Turbina da 30 CV (Inval) 1.15 m  $\eta 75\%$

1828 Premio (*parziale*) della “Société Industrielle” (a Bourdin 2000 franchi)

1832-33 Brevetto Turbina (*premio 6000 franchi*)

1837-38 Turbina H > 100 m 60 CV ( 2300 giri/min) (Saint-Blaise = Sankt Blaisen)

18xx 2 Turbine coassiali 220 CV Fabbrica Tessile di Augusta *record di potenza*

18xx 8 Turbine da 25 CV Parigi: Mulini di Corbeil e St. Maur

Fabbrica di turbine a Chambon-Faugerolles (vicino a St. Etienne)

1867 200 Installazioni 3500 CV complessivi



# Fourneyron





# Rossetti

La costruzione delle turbines a metà del secolo XIX è ancora una spécialità dell'industria francese

Uno scritto relativo alla

*Esposizione del 1851 a Londra, che menziona la presentazione di una turbina doppia di Fontaine-Baron, segnala che quel tipo di motore idraulico è sconosciuto in Inghilterra*

Nell'esposizione del 1855 a Parigi sono presenti solo costruttori francesi eccetto uno del Tirolo (Fenbach) che espone una turbina centripeta la quale riceve una medaglia di 2° classe e manzione dal parte del Generale Morin per aver sviluppato e realizzato le idee di Poncelet

... e in Italia...

SULLE  
**RUOTE IDRAULICHE**  
DETTE  
**TURBINI DI FOURNEYRON**

MEMORIA  
dell'Ingegnere **Giuseppe Rossetti**

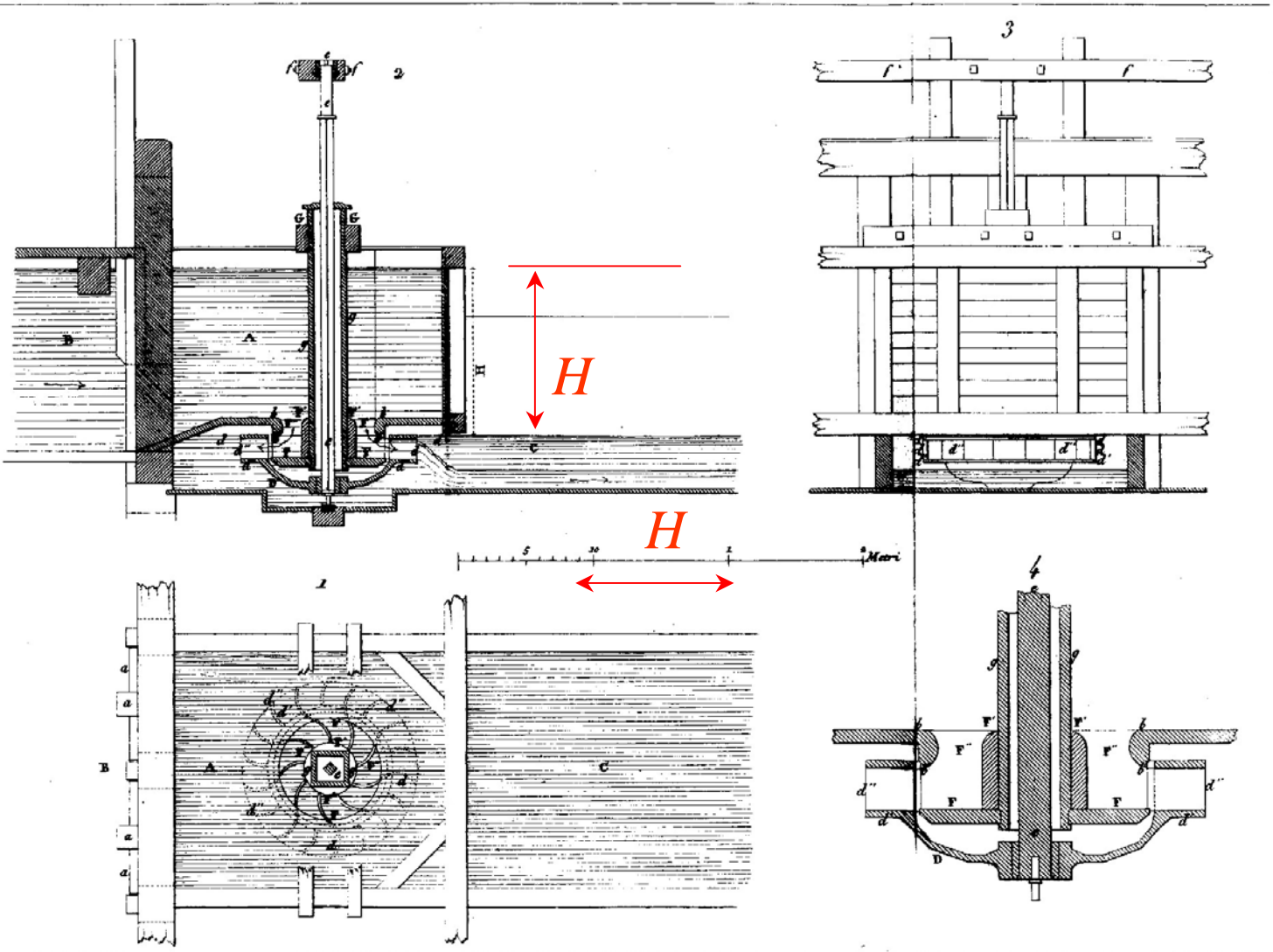
**CON APPENDICE**  
E QUATTRO TAVOLE IN RAME



MILANO  
COI TIPI DI LUIGI DI GIACOMO PIROLA  
1841

# Pont-sur-l'Ognon 1827

Tav. I

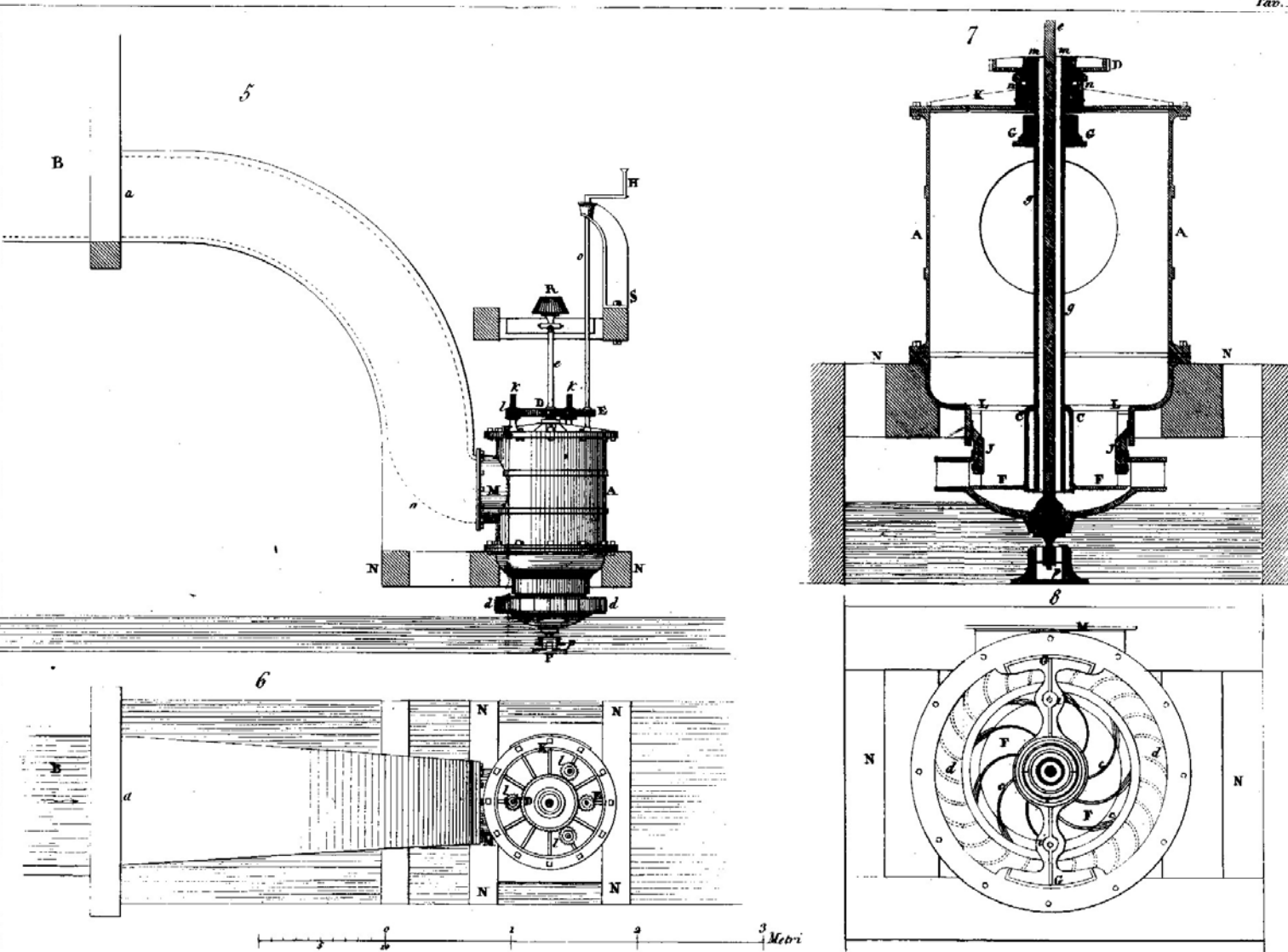


$H \approx 1.40 \text{ m}$   
 $P \approx 6 \text{ CV}$



# Gran mantice di Dampierre (1830)

Tav. II



$H = 3 \div 6 \text{ m}$   
 $Z_d = 9$   
 $Z_g = 27$

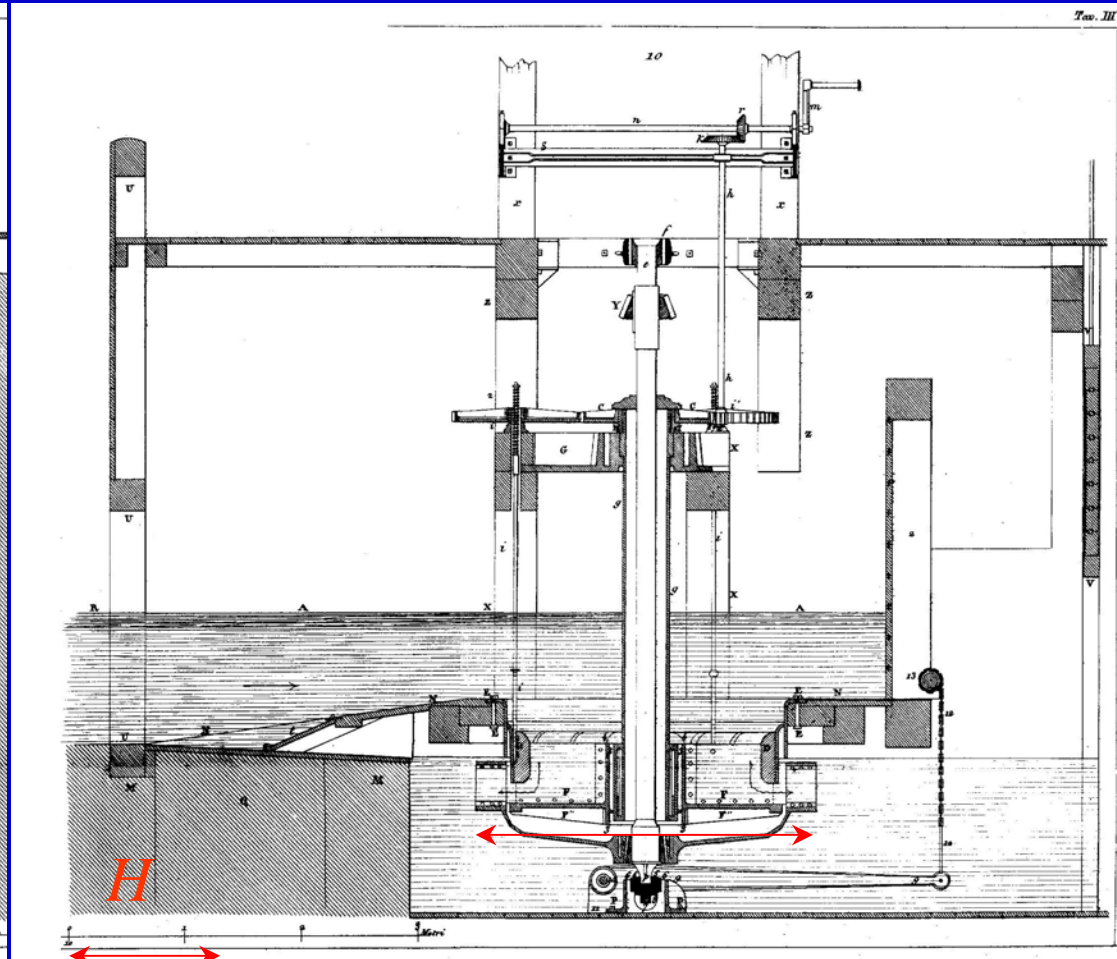
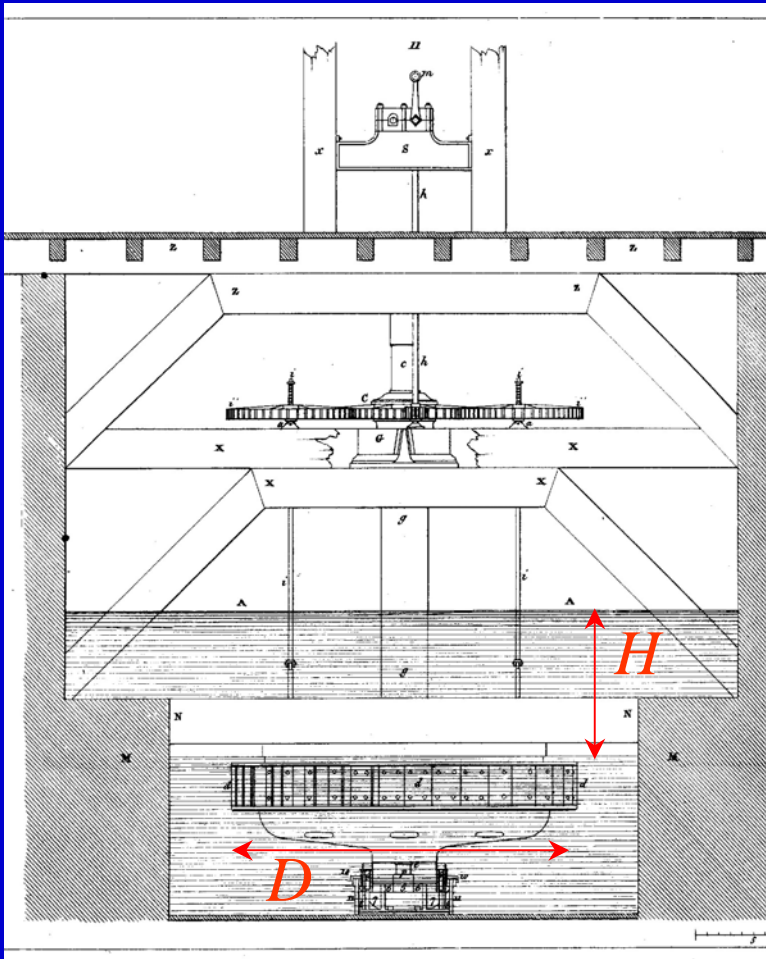
# Ferriere Fraisans

$H = 1.3 \text{ m}; Q = 4 \div 5 \text{ m}^3/\text{s}$

$P 50 \text{ CV}$

$Z_d = 12; Z_g = 36$

$D = 2.4 \text{ m (record)}$







# Fourneyron - Mühlbach

$$n_1 = \frac{n}{\sqrt{H}}; Q_1 = \frac{Q}{\sqrt{H}}$$

DETTE TURBINI DI FOURNEYRON

17

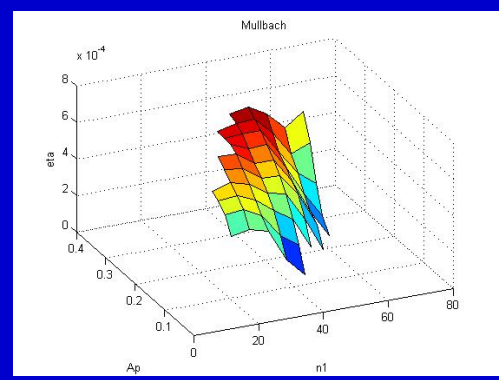
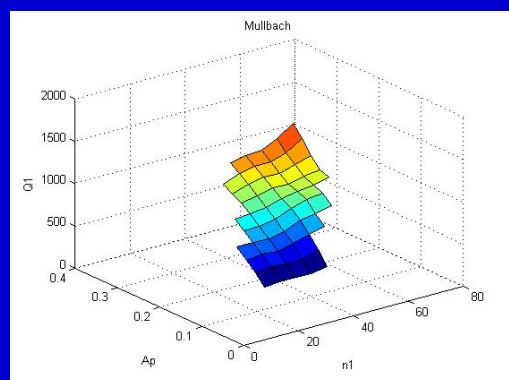
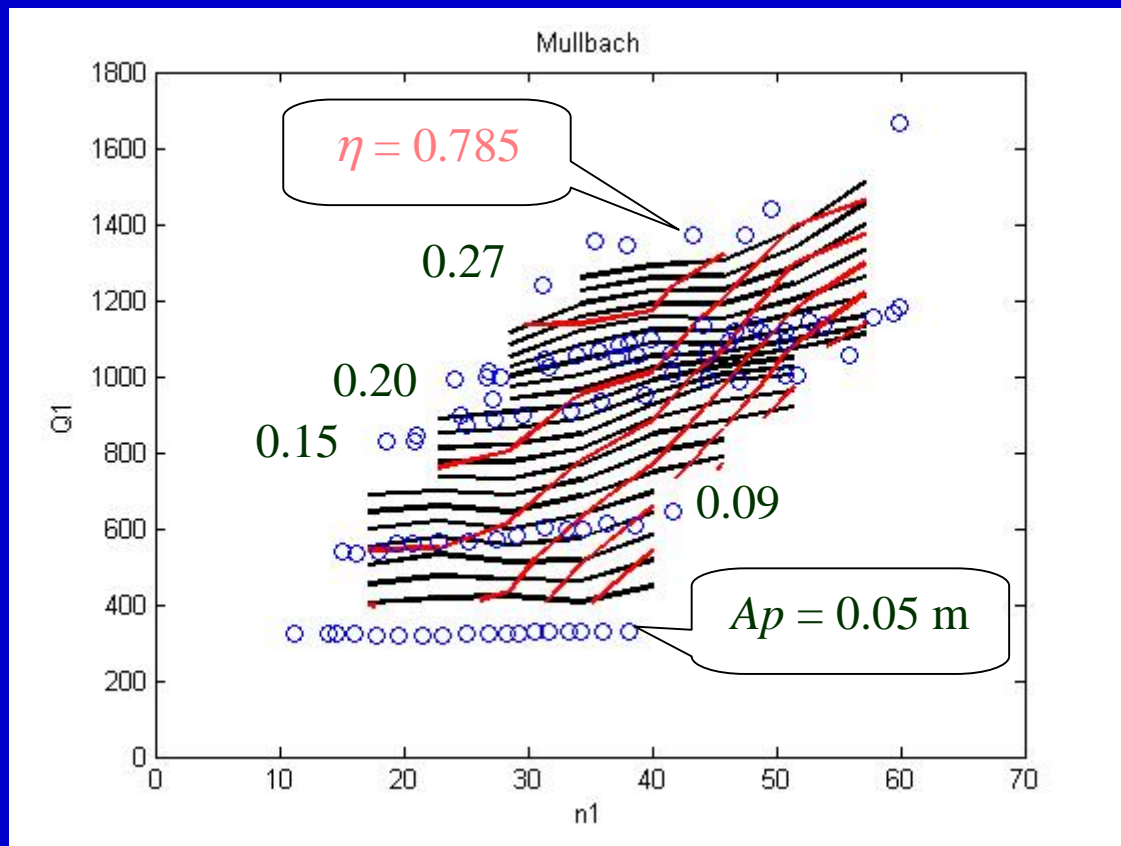
Prospetto delle esperienze fatte al turbine di Mühlbach.

18

SULLE RUOTE IDRAULICHE

Segue il prospetto delle sprienze fatte al turbine di Mühlbach.

Numero progressivo delle esperienze	Elevazione della paratoja del turbine	Peso in chilo-gram. dell'acqua erogata in 1"	Ca- data totale	Lavoro assoluto del motore in		Numero dei giri della ruota in 1'	Effetto utile misurato col freno o quantità del lavoro disponibile in		Rap- porto dell' effetto utile misurat. dal freno al lavoro assoluto del motore	Altezza in metri a cui il turbine è immerso al di sopra della corona inferiore
				Chilo-grammi elevati in 1m-in 1"	Cavalli di 75 chilo-grammi		Chilo-grammi elevati ad 1m-in 1"	Cavalli di 75 chilo-grammi		
43	0.150	1576	3,085	4863	64.84	52.0	3258	43.44	0.671	0.955
44	0.150	1561	3,085	4816	64.21	48.0	3302	44.03	0.685	0.955
45	0.150	1526	3,085	4703	62.70	44.0	3172	42.28	0.675	0.855
46	0.150	1652	3,380	5583	74.44	45.3	3692	49.22	0.662	0.865
47	0.150	1528	3,272	5000	66.66	38.0	3329	44.38	0.666	0.850
48	0.150	1528	3,400	5197	69.16	38.5	3374	44.98	0.651	0.950
49	0.150	1528	3,405	5192	69.22	34.4	3237	43.16	0.626	0.820
50	0.200	2053	3,020	5857	78.09	104.0	326	4.34	0.055	0.890
51	0.200	2033	3,045	6186	82.48	103.6	645	8.60	0.104	0.890
52	0.200	2025	3,080	6237	83.16	101.5	1270	16.93	0.203	0.890
53	0.200	2003	3,120	6256	83.41	95.0	1782	23.76	0.280	0.890
54	0.200	1993	3,170	6332	84.42	90.4	2260	30.13	0.357	0.890
55	0.200	1993	3,190	6357	84.76	87.1	2715	36.20	0.426	0.885
56	0.200	1951	3,203	6249	83.32	82.8	3108	41.44	0.496	0.885
57	0.200	1913	3,240	6198	82.64	80.0	3500	46.66	0.565	0.885
58	0.200	1913	3,255	6227	83.02	75.0	3757	50.09	0.604	0.885
59	0.200	1913	3,270	6255	83.40	70.0	3942	52.56	0.632	0.880
60	0.200	1913	3,305	6313	84.17	67.6	4232	56.42	0.671	0.880
61	0.200	1913	3,310	6331	84.41	67.1	4200	56.00	0.664	0.870
62	0.200	1872	3,310	6182	82.42	63.0	4334	57.78	0.702	0.870
63	0.200	1872	3,335	6228	83.04	58.0	4356	58.08	0.700	0.870
64	0.200	1812	3,306	5991	79.88	50.6	4118	54.91	0.686	0.884
65	0.200	1812	3,286	5960	79.46	48.5	4245	56.59	0.712	0.884
66	0.200	1812	3,321	6017	80.23	44.0	4137	55.16	0.690	0.884
67	0.200	2173	3,610	7860	104.80	100.0	2813	37.50	0.357	0.640
68	0.200	2082	3,650	7615	101.53	97.0	3339	44.51	0.440	0.640
69	0.200	2143	3,560	7643	101.90	91.0	3703	49.40	0.485	0.640
70	0.200	2083	3,475	7253	96.70	87.0	4080	54.40	0.562	0.680
71	0.200	2061	3,300	6815	90.87	80.0	4255	56.70	0.626	0.680
72	0.200	1983	3,250	6448	86.11	72.0	4312	57.79	0.670	0.680
73	0.200	1943	3,230	6289	83.85	67.0	4389	58.52	0.700	0.680
74	0.200	1933	3,358	6505	86.73	62.1	4379	58.38	0.676	0.557
75	0.200	1908	3,343	6392	85.23	57.5	4500	60.00	0.703	0.557
76	0.200	1863	3,393	6317	84.23	54.0	4563	60.81	0.721	0.557
77	0.200	1863	3,398	6337	84.49	49.4	4483	59.77	0.785	0.557
78	0.270	2523	2,290	7562	100.82	90.6	4592	61.22	0.609	0.750
79	0.270	2523	3,070	7758	103.44	87.0	5168	68.90	0.670	0.750
80	0.270	2448	3,170	7760	103.47	81.6	5565	74.27	0.721	0.750
81	0.270	2442	3,180	7750	103.33	77.25	6050	80.46	0.785	0.750
82	0.270	2412	3,310	8097	107.96	69.0	6261	83.52	0.860	0.720
83	0.270	2523	3,475	8776	117.01	66.1	6841	91.08	0.707	0.720
84	0.270	2445	3,390	8302	110.69	61.5	6545	87.26	0.793	0.720



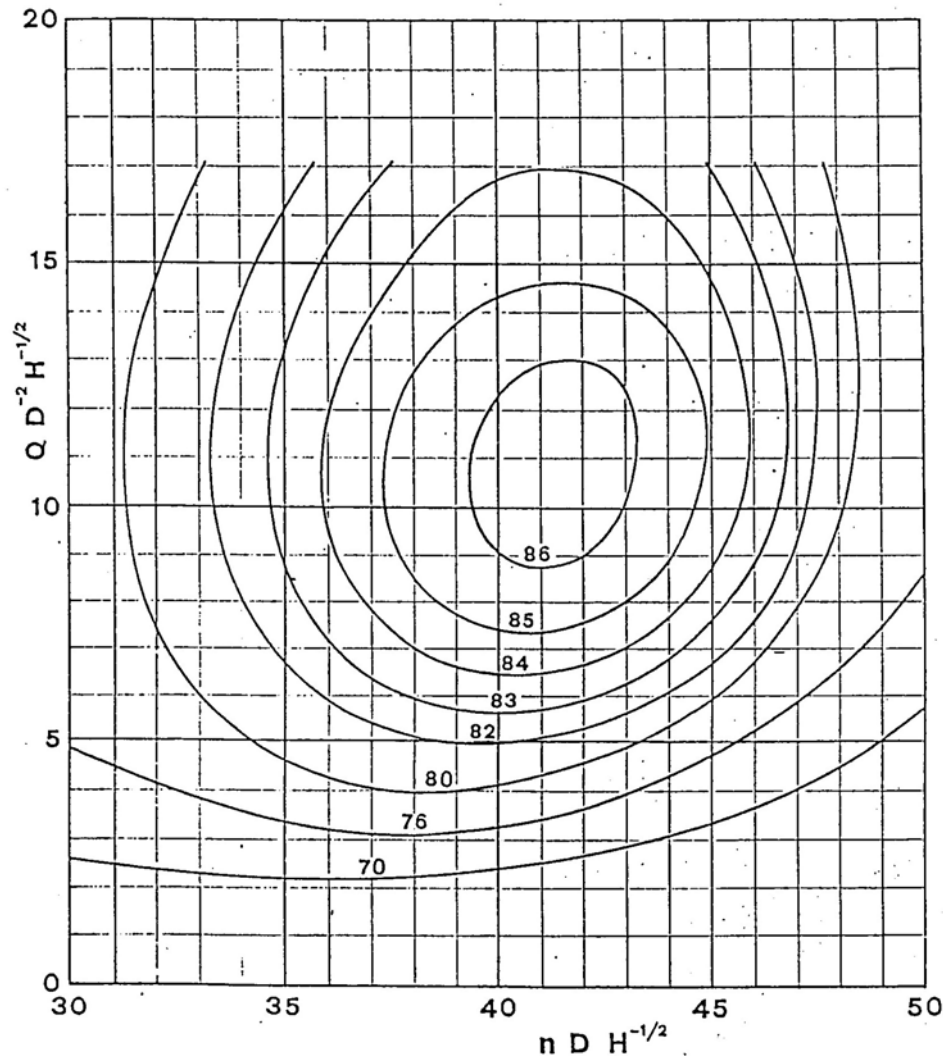


# Diagrammi collinari (1)

## Turbina Pelton

Coordinate ridotte:

$$n_{11} = \frac{nD}{\sqrt{H}}; \quad q_{11} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}}$$



## Turbina Francis lenta

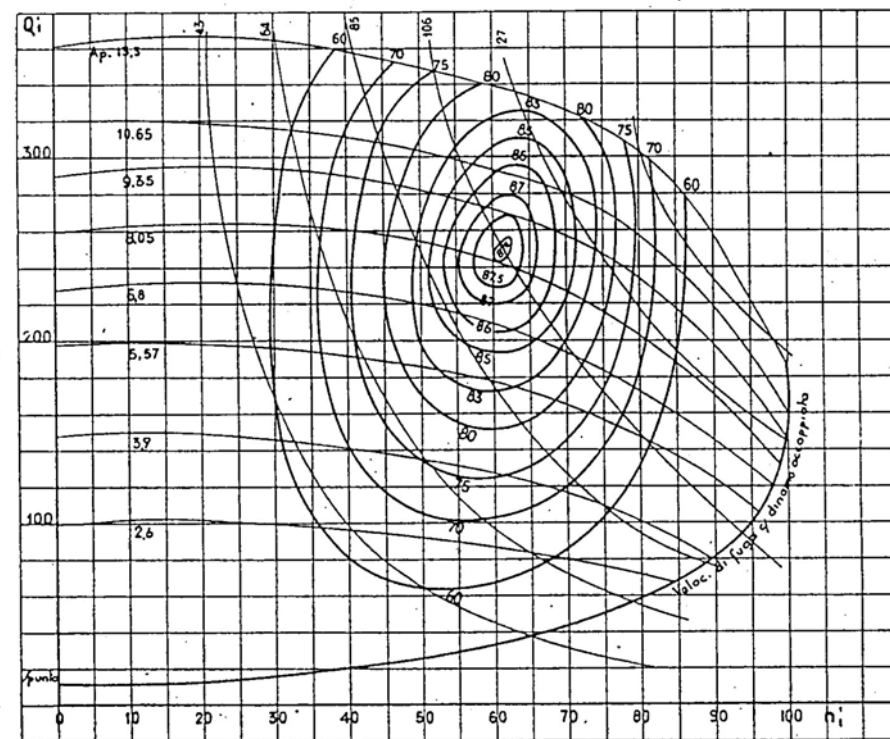


Fig. 123. - Diagramma collinare relativo ad una ruotina di prova per turbina Francis lenta (ad alta caduta) Costruzioni Mecc. RIVA - Milano. (Il modellino è stato costruito in scala 1:10 rispetto alla turbina destinata all'impianto. I valori assoluti dei rendimenti risentono naturalmente delle ridottissime dimensioni del modellino).

# Diagrammi collinari 2

## Turbina Francis media

## Turbina ad Elica

a

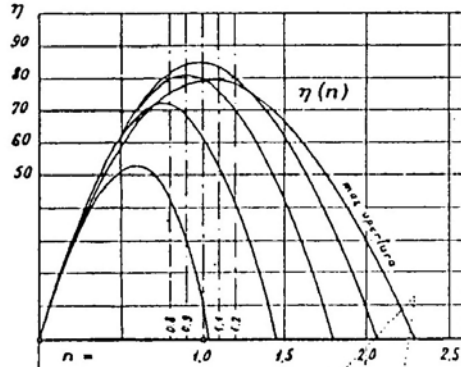
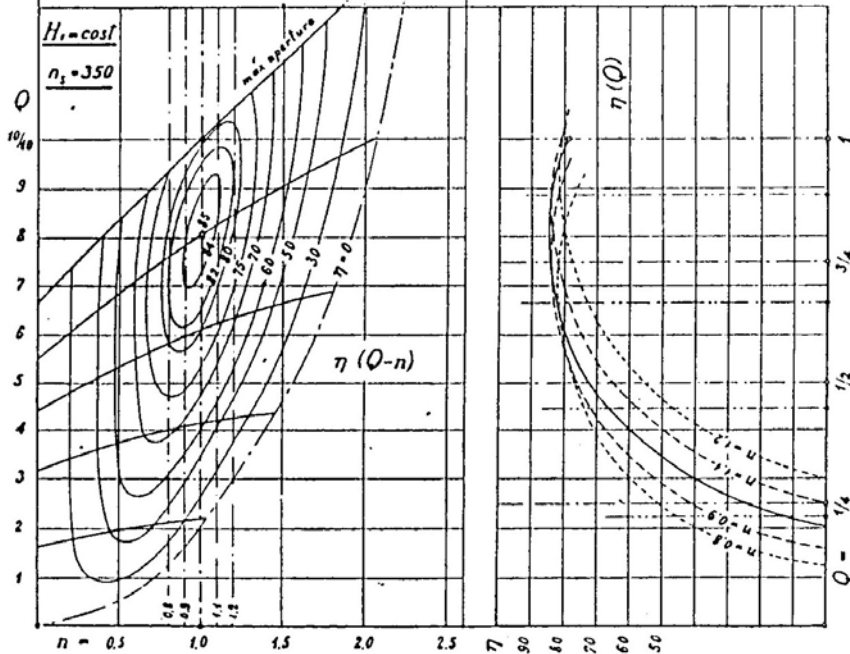


Fig. 320.  
Diagramma generale a caduta costante  $\eta(Q-n)$  di una turbina normale ( $n_s = 350$ ).



b

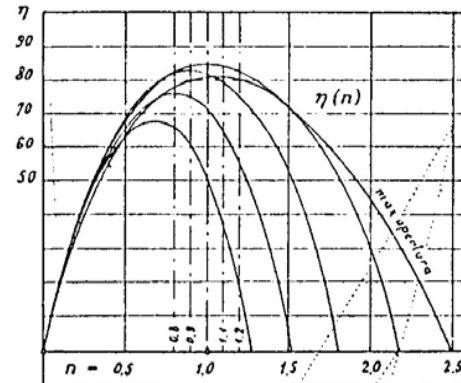
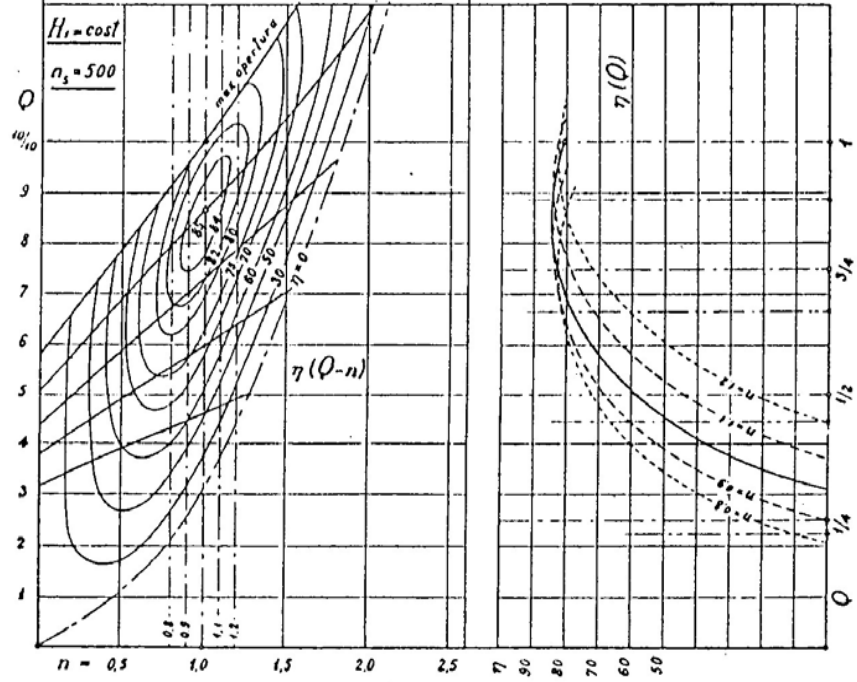


Fig. 321.  
Diagramma generale a caduta costante  $\eta(Q-n)$  di una turbina veloce ( $n_s = 500$ ).



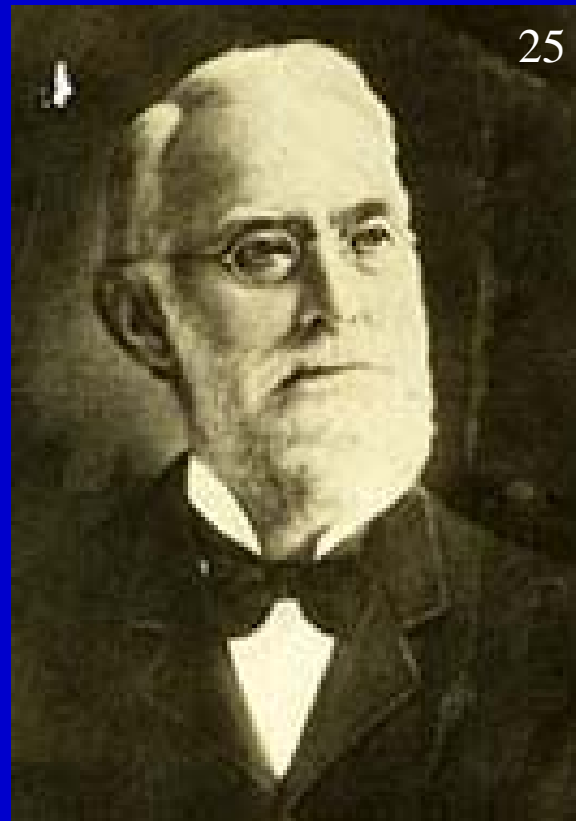


# Pelton

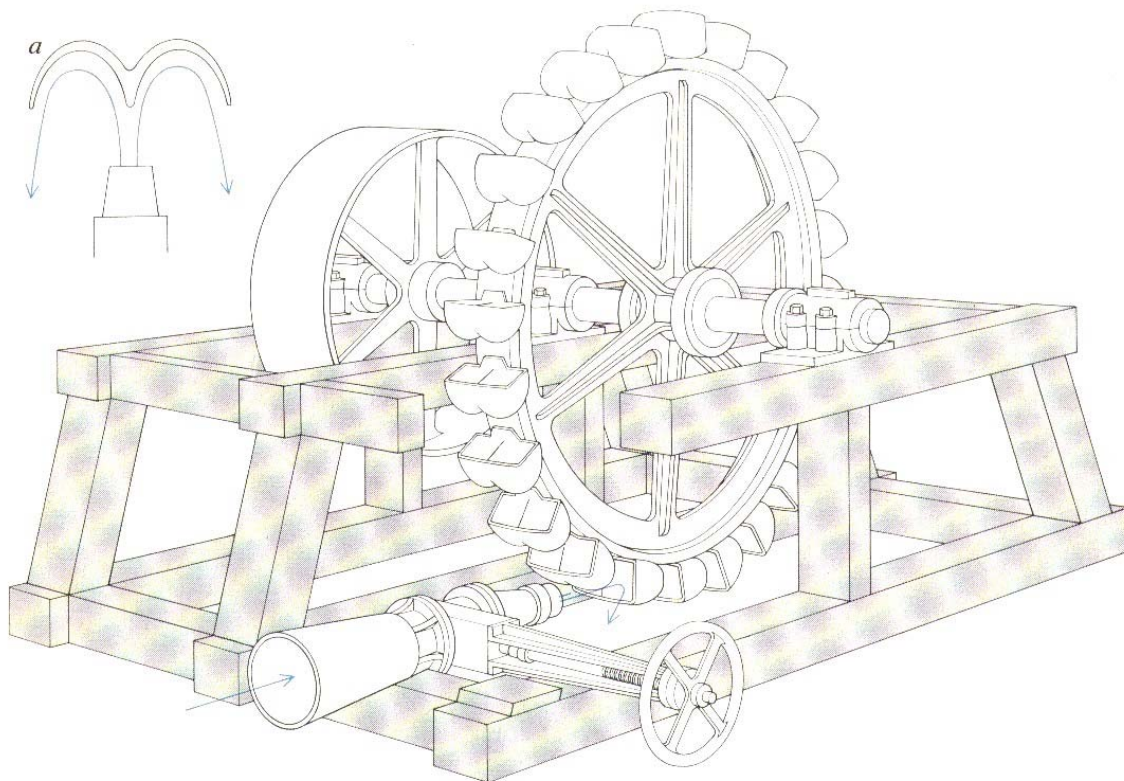
Lester Allen PELTON

Vermillon (Ohio), 5 Settembre 1829

Oakland (Ohio), 14 Marzo 1908



*Ingegnere idraulico americano, ideatore della ruota idraulica che porta il suo nome, ancor oggi considerata la più efficiente turbina ad acqua ad azione.*



Questo motore verticale, la ruota Pelton, fu progettato fra il 1880 e il 1890. Un getto d'acqua proveniente da un ugello (in basso a sinistra) colpisce una sequenza di doppie tazze fissate al rotore. Il profilo curvo delle tazze (a) serviva a estrarre dall'acqua il massimo di ener-

gia. Una ruota Pelton da 100 chilogrammi, in grado quindi di poter essere trasportata da due uomini, veniva usata nelle miniere d'oro; essa poteva fornire una potenza di 125 cavalli vapore. La stessa configurazione si riscontra anche in alcune moderne turbine idrauliche.

A 20 anni Lester A. Pelton si unì ai cercatori d'oro; quando l'avventura fallì, egli si trasferì a Comptonville in California dove, nel 1864, iniziò la produzione di macchinari per mulini, comprese le particolari ruote idrauliche ad azione con cucchiaini a forma di tazza sul tipo di quelle usate per fornire potenza all'equipaggiamento per l'estrazione dell'oro.

Per caso, o forse tramite vari esperimenti, egli arrivò a sviluppare il modo di aumentare le prestazioni delle ruote idrauliche, separando ogni cucchiaino in due pale a forma di cucchiaino. Ulteriori prove sul prototipo portarono a brevettare, nel 1880, la ruota che da Pelton prese il nome; nel 1887 fondò un'industria, la Pelton Water Wheel Co., per la sua produzione, industria di cui Pelton fu per alcuni anni il consulente. Nel 1895 gli venne dato un riconoscimento dal Franklin Institute per il suo lavoro.

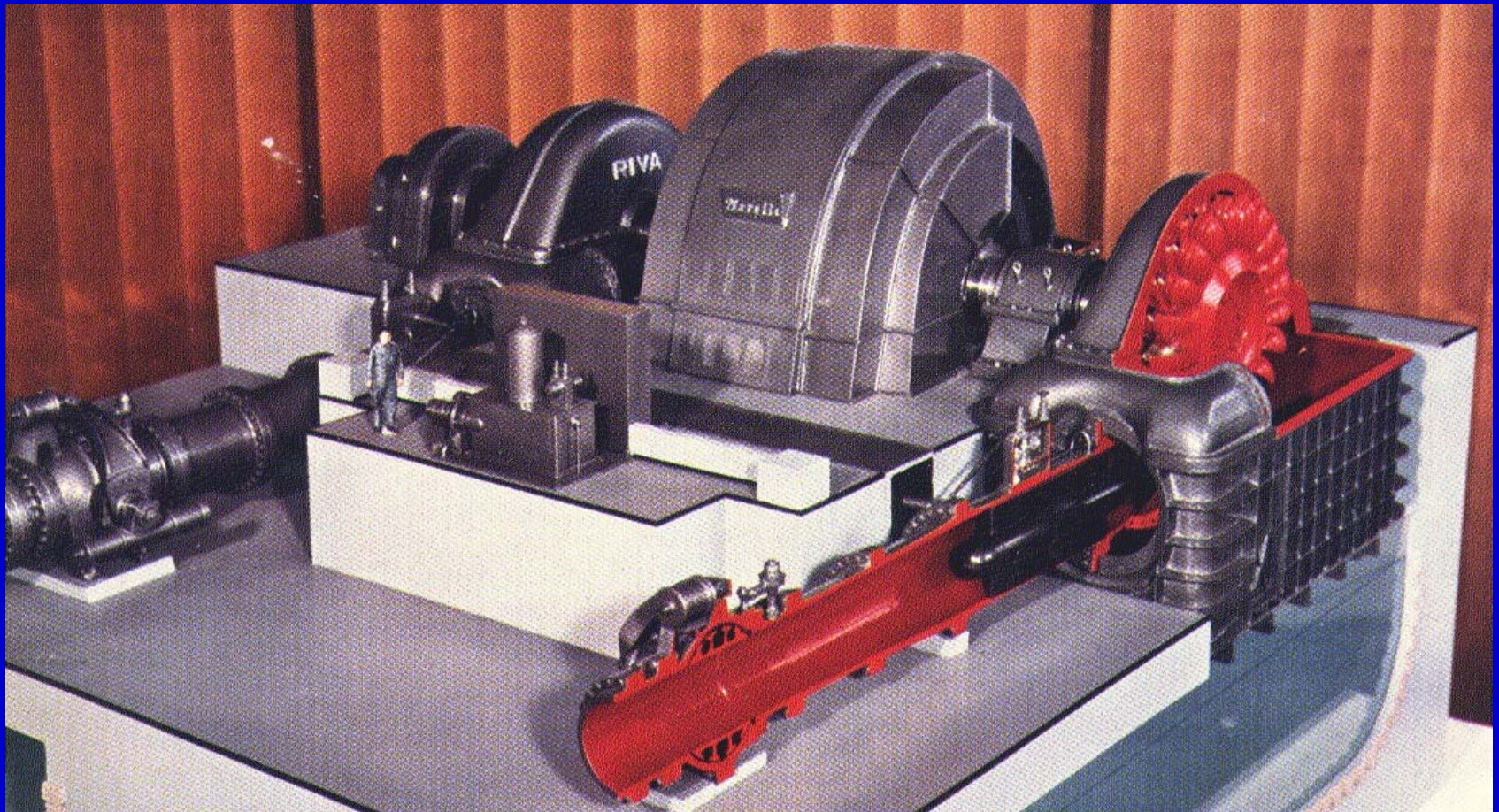
NORMAN A. F. SMITH



# Impianto di Cimego (1)

costruzione RIVA (1953)

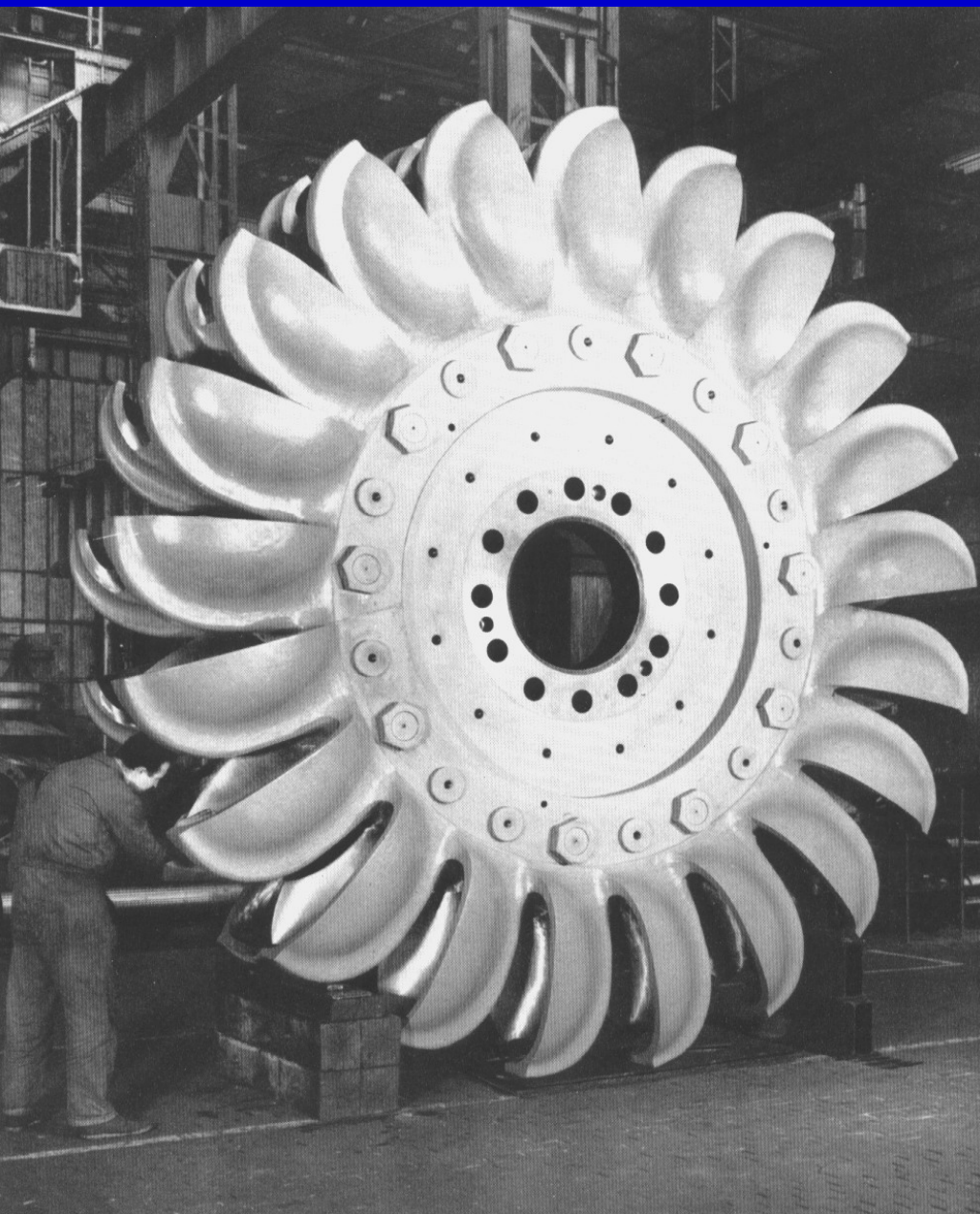
Modello lay out: 2 gruppi P =  $2 \times 110$  MW



record mondiale di potenza del tempo



# Impianto di Cimego (2)

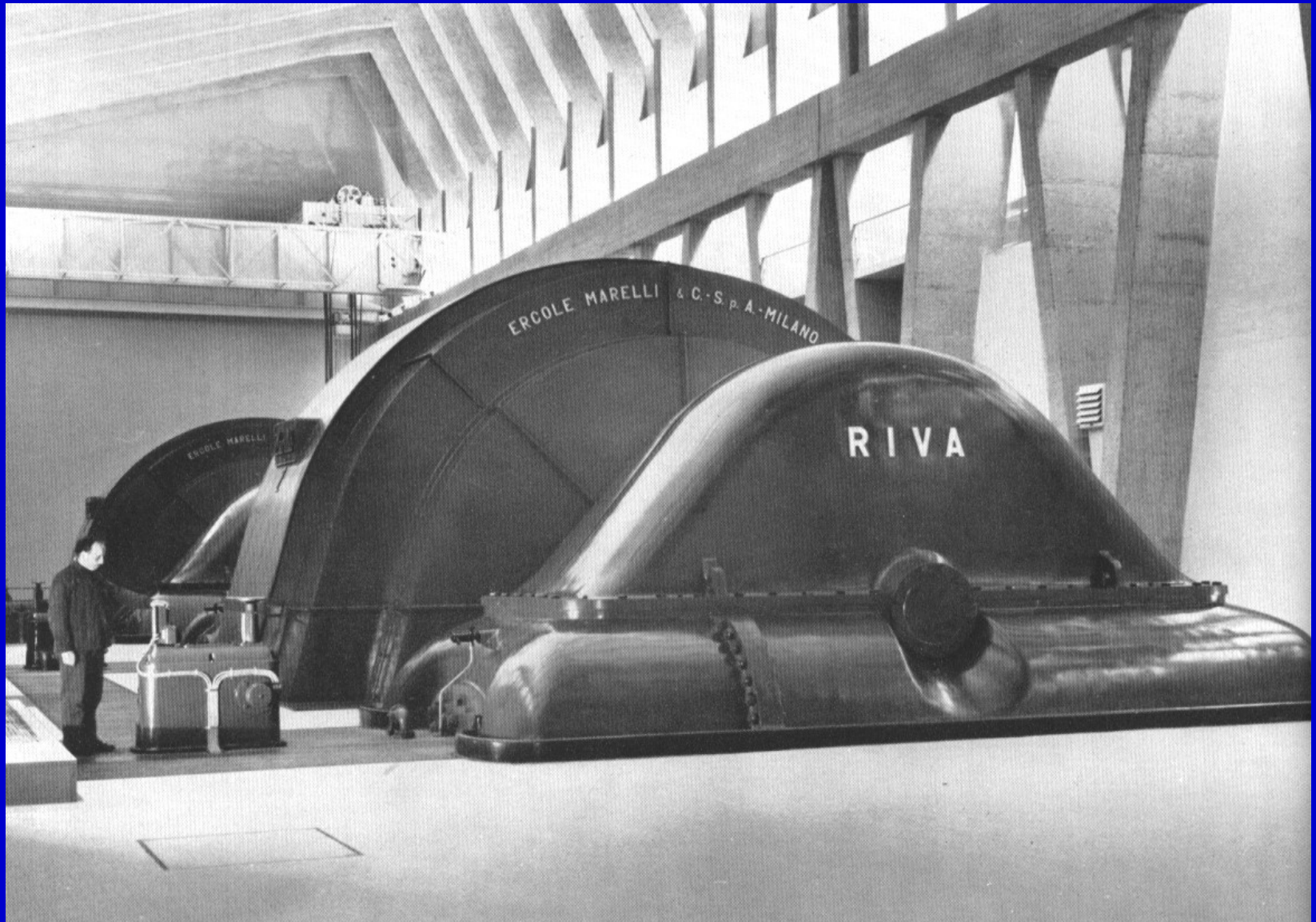


Dati ruota singola:

H	721	m
Q	8.75	m <sup>3</sup> /s
P	55	MW
n	300	giri/min
d	310	mm
D	3650	mm
m	44	t
Z	21	(3 × 7)

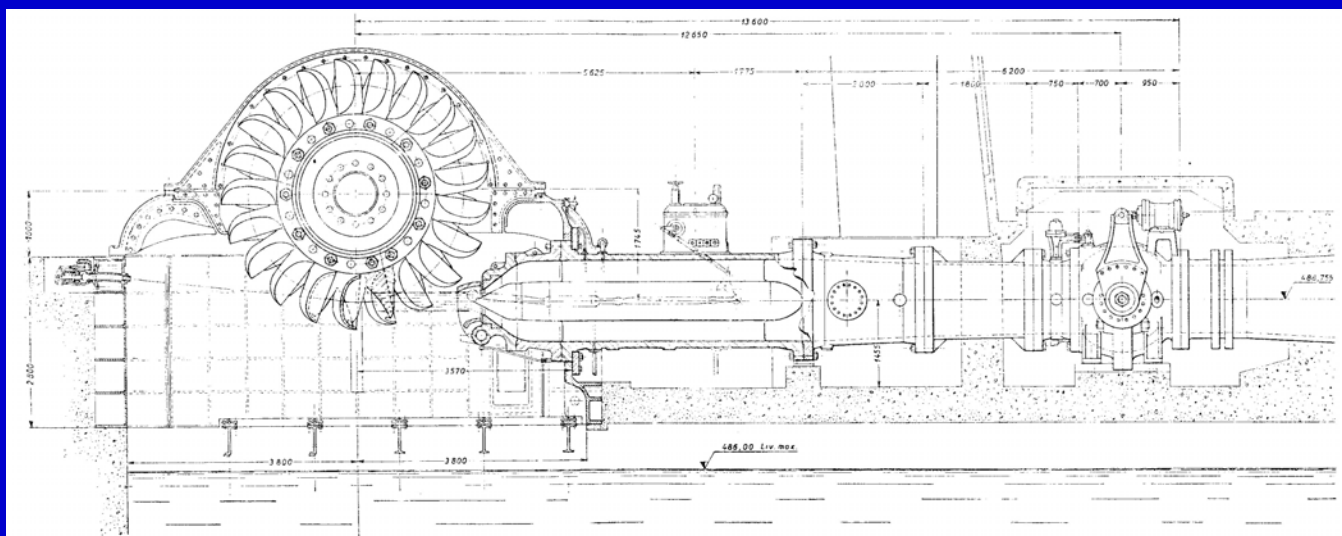
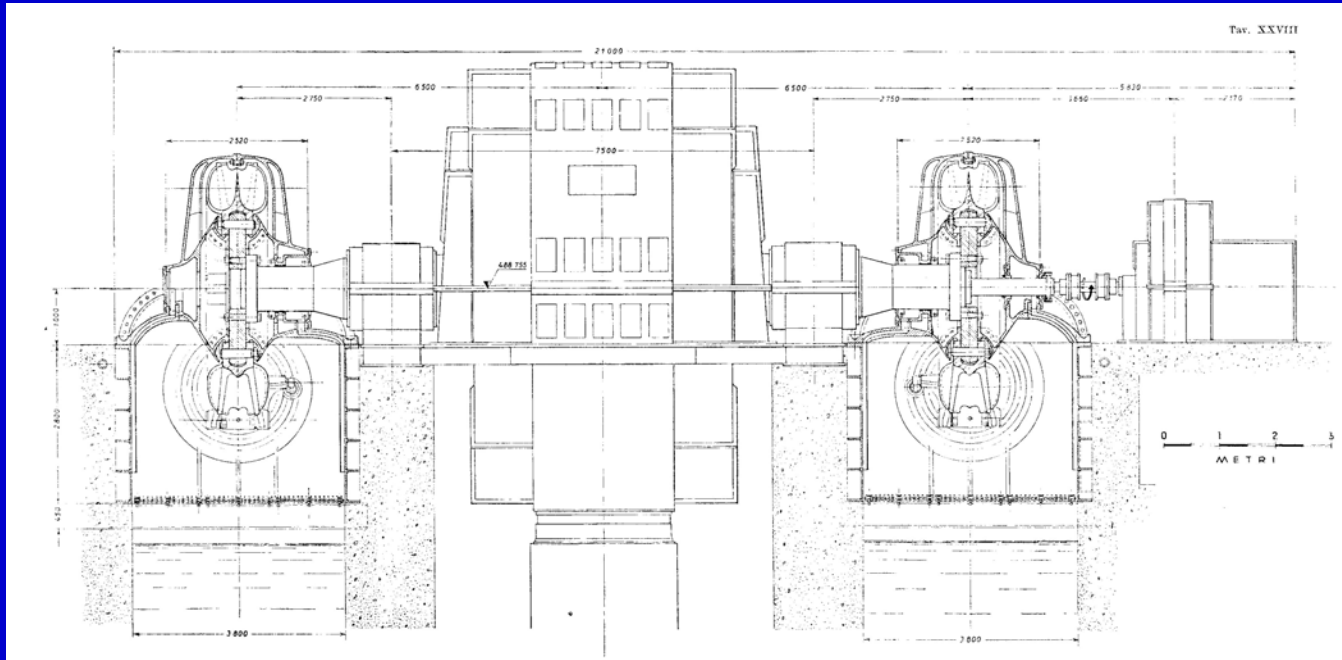
# Impianto di Cimego (3)

## Sala macchine





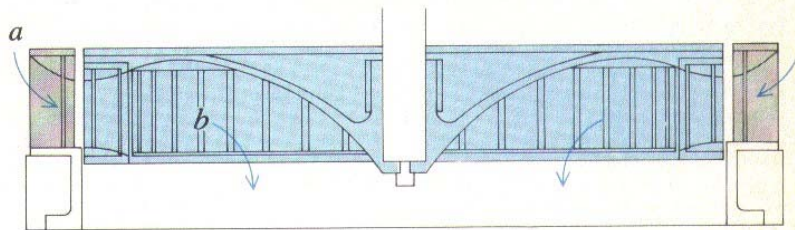
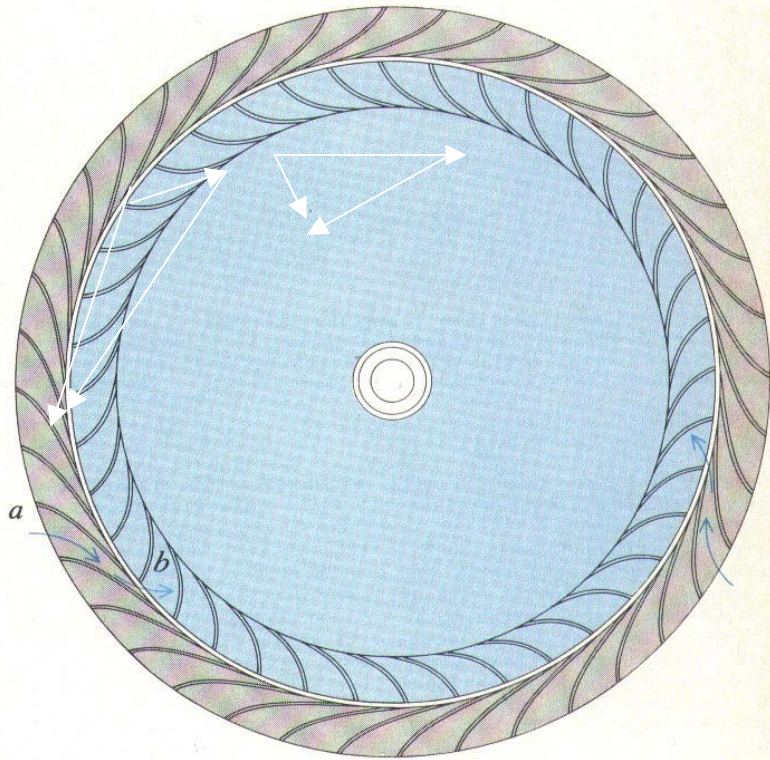
# Impianto di Cimego (4) Prospetto



IMPIANTO DI BOAZZO CIMEGO - Turbina Pelton a due ruote per  $H = 727$  m,  $Q = 17,3$  m<sup>3</sup>/s,  $n = 300$  g/min,  $P = 130.000$  CV (in costruzione [1933], Nival).

Fig. 1 - Sezione trasversale e longitudinale. (r. om. 750).

# James Bichens FRANCIS



La direzione centripeta del flusso d'acqua è illustrata in pianta (*in alto*) e in sezione (*in basso*). Questa turbina appartiene al tipo proposto per la prima volta da Poncelet fra il 1820 e il 1830 e brevettato negli Stati Uniti nel decennio successivo. L'acqua entra nel motore passando attraverso una serie di pale fisse (*a*) e fa ruotare un rotore centrale (*b*). L'acqua esce poi per un condotto di scarico che si apre in prossimità del centro del motore. Questa è una turbina del tipo costruito per la prima volta da James B. Francis nel 1849 e poi installata a Lowell, nel Massachusetts.



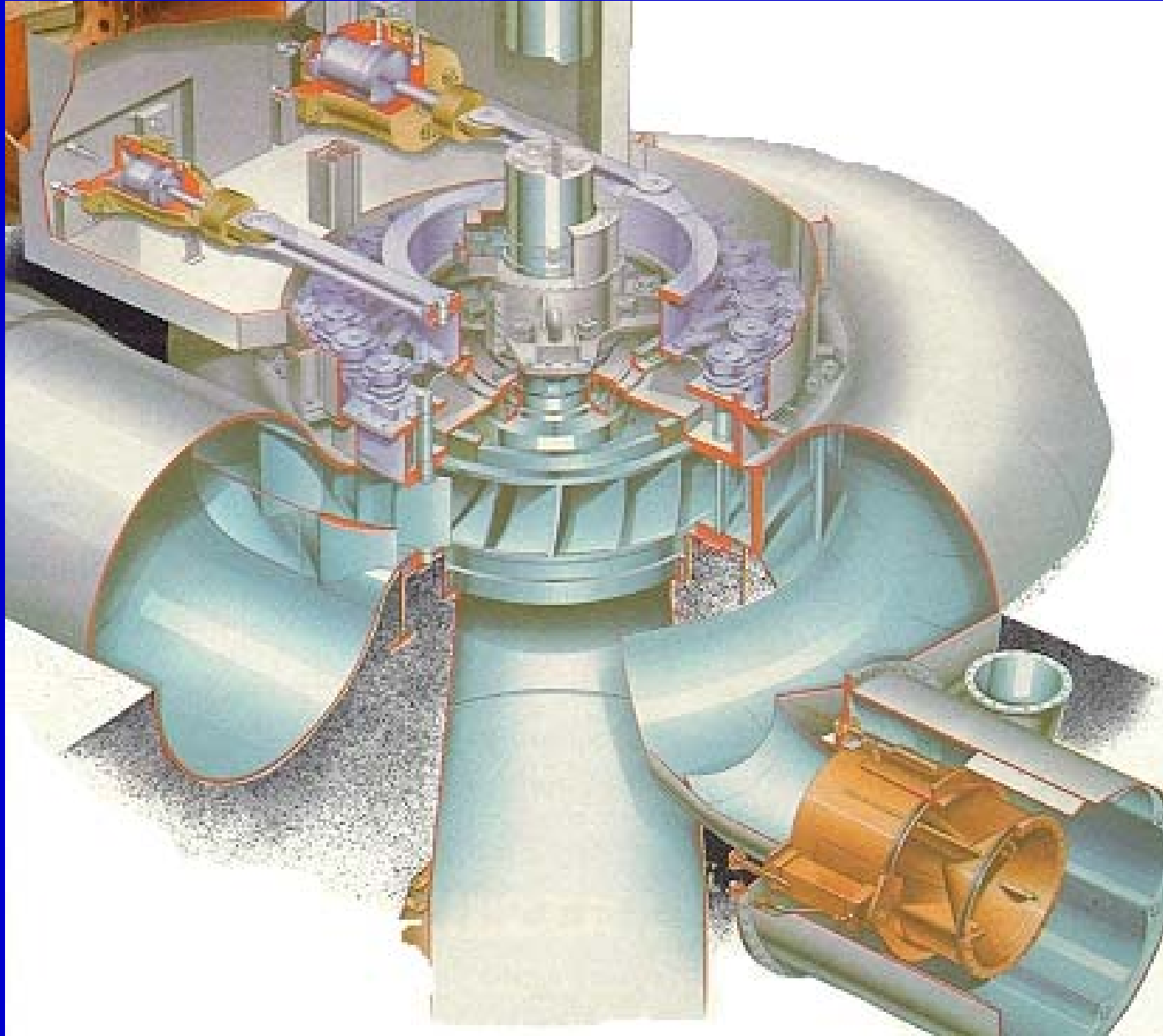
Southleigh (Oxfordshire) 18 Maggio 1815

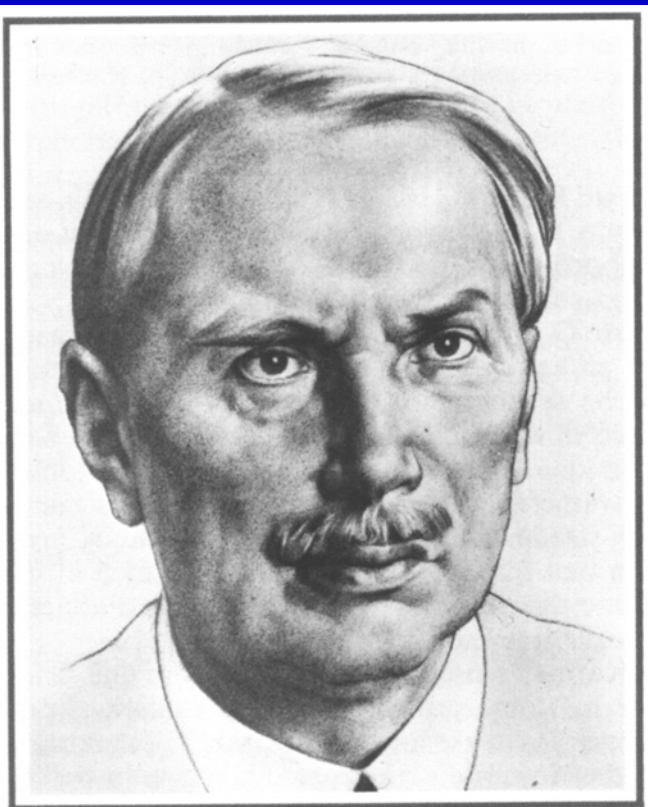
Lowell MS (U.S.A.) 18 Settembre 1892



# Turbina Francis

Complessivo





# Victor Kaplan

## THEORIE UND BAU VON TURBINEN-SCHNELLÄUFERN

VON PROFESSOR DR. ING. DR. TECHN. H. C.

VIKTOR KAPLAN

BRÜNN

UND PROFESSOR DR. TECHN.

ALFRED LECHNER

WIEN



MÜNCHEN UND BERLIN 1931

VERLAG VON R. OLDENBOURG

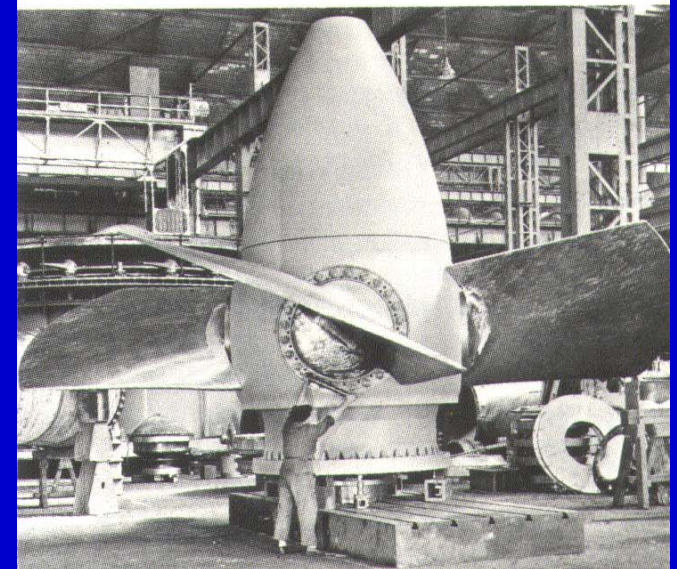


Mürzzuschlag (Stiria)

27 Novembre 1876

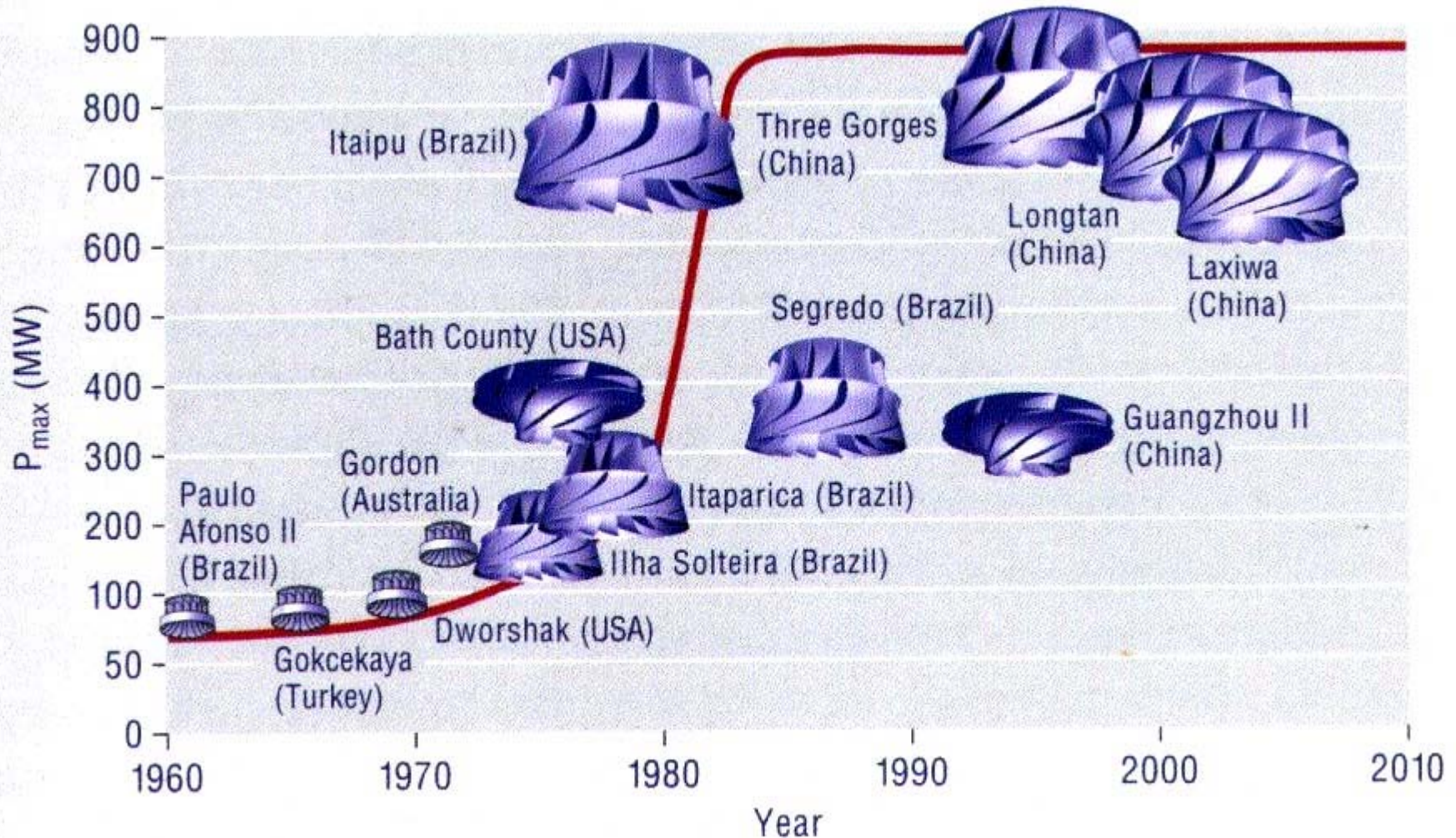
Unterach (Austria)

23 Agosto 1934





# Sviluppo turbine Francis



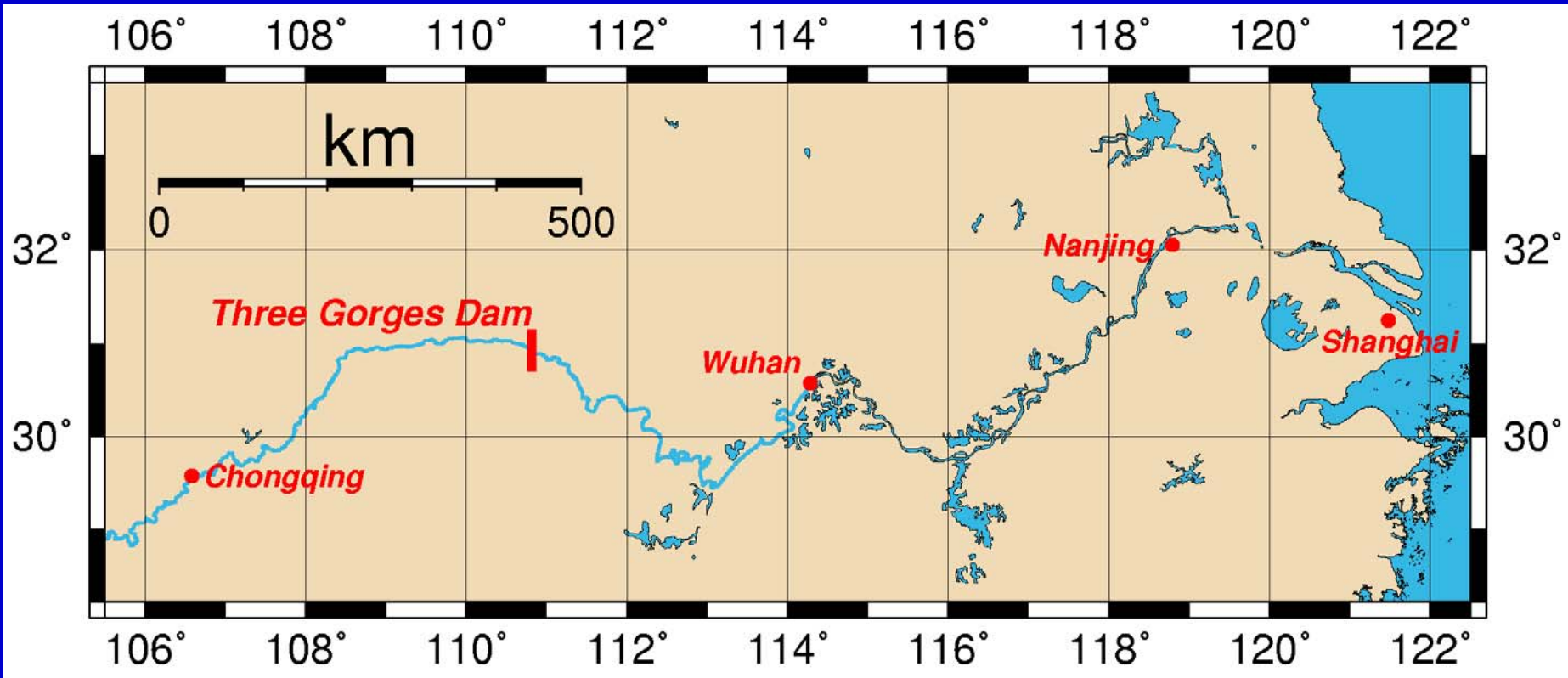
# Costruzioni in corso

## Examples of on-site manufacturing in Voith Siemens Hydro Shanghai

- Xiao Lang Di (Yellow River)
  - Completed: 2002
  - 6 Francis units
  - Runner diameter: 6.35 m
  - Rated output: 306 MW
  - Rated net head: 112 m
- Long Tan (Hong Shui River)
  - 5 of 7 Francis units manufactured by Voith Siemens Hydro
  - To be completed in 2009, 3 runners delivered to date
  - Runner diameter: 7.9 m
  - Rated output: 714 MW
  - Rated net head: 140 m
  - serves as model on-site manufacturing facility for other projects in China.
- La Xi Wa (Yellow River)
  - To be completed in 2011, commissioning first unit summer 2008
  - 5 Francis units
  - Runner diameter: 6.9 m
  - Rated output: 711 MW
  - Rated net head: 205 m
- Xiao Wan (Lan Chang River)
  - 3 Francis units
  - Runner diameter: 6.6 m
  - Rated output: 714 MW
  - Rated net head: 216 m
- Ji Shi Xia (Yellow River)
  - 3 Francis units
  - Runner diameter: 7.65 m
  - Rated output: 340 MW
  - Rated net head: 66 m



# Three Gorges



La diga, in calcestruzzo, è lunga circa 2335 m e alta 185 m, lo spessore alla base è di 115 m e 40 m sulla sommità.

Il progetto ha richiesto lo spostamento di 134 milioni di metri cubi di terra, l'impiego di 28 milioni di metri cubi di calcestruzzo e 463000 t di acciaio.

Il serbatoio è lungo oltre 600 km e raccoglie 39.3 chilometri cubi di acqua. La potenza complessiva prevista è 22 500 MW e diventerà il maggior impianto idroelettrico del mondo. Per contro la produzione elettrica prevista sarà di 84.7 TWh, ponendolo al secondo posto per produttività (dopo Itaipu in Sud America).

# Three Gorges

- 2003: Potenza installata 10 GW (14 turbine da 700 MW)
- 2009: Potenza prevista 22.5 GW (26 turbine da 700 MW+6)

## Produzione Annuale di Energia

Anno	Numero di unità installate	P (GWh)
2003	6	8607
2004	11	39155
2005	14	49090
2006	14	49250
2007	17	43898
Totale	17 (32)	190000

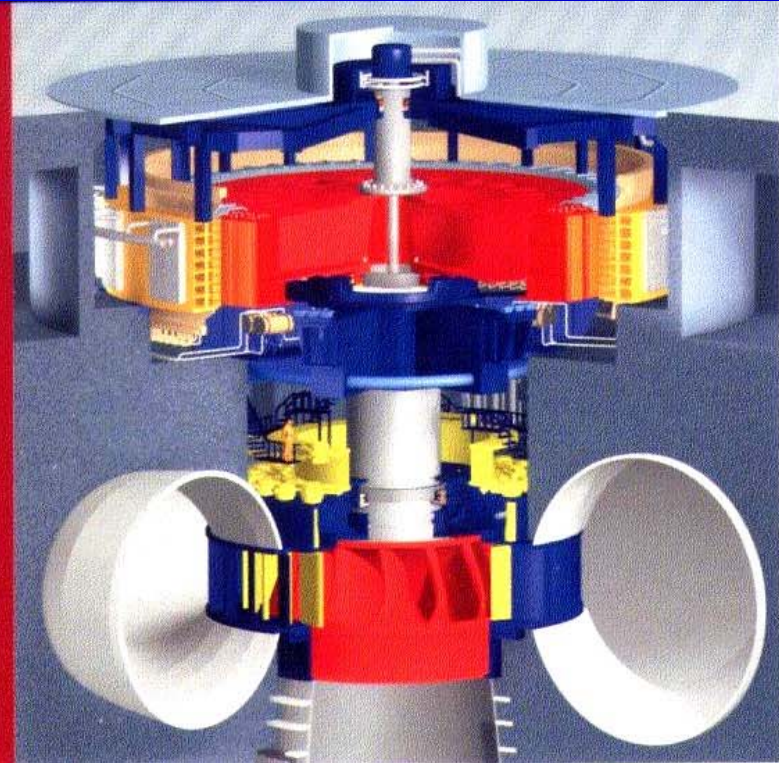


Three Gorges (sinistra)  
Gezhouba (destra)

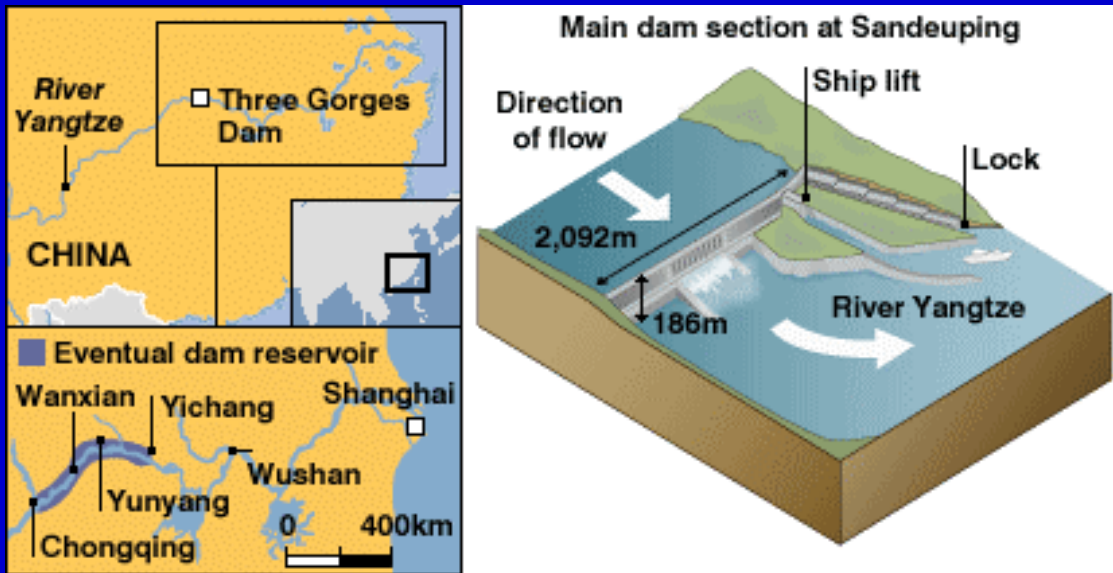


# Three Gorges

Potenza unitaria 700 MW



# Three Gorges



**Tipo:** Diga a gravità in calcestruzzo

**Costo:** costo ufficiale \$25bn - actual cost believed to be much higher

**Inizio lavori:** 1993

**Fine lavori:** 2009

**Parco macchine:** 26 turbine lungo la diga. 6 turbine sotterranee previste per il 2010

**Energia prodotta:**  $49 \cdot 10^9$  kWh

**Serbatoio:** 660 km lunghezza, area sommersa  $632 \text{ km}^2$ .

Livello di monte a pieno invaso 175 m s.l.m.

**Navigazione:** doppio senso previsto per il 2004. Elevatore in una unica fase nel 2009.

## I MAGGIORI IMPIANTI IDROELETTRICI

Three Gorges, China - 18200 MW

Itaipu, Brazil/Paraguay - 12600 MW

Guri, Venezuela - 10000 MW

Grand Coulee, US - 6494 MW

Sayano-Shushensk, Russia - 6400 MW

Krasnoyarsk, Russia - 6000 MW

Churchill Falls, Canada - 5428 MW

La Grande, Canada - 5328 MW

Fonte: International Hydropower Association, UK



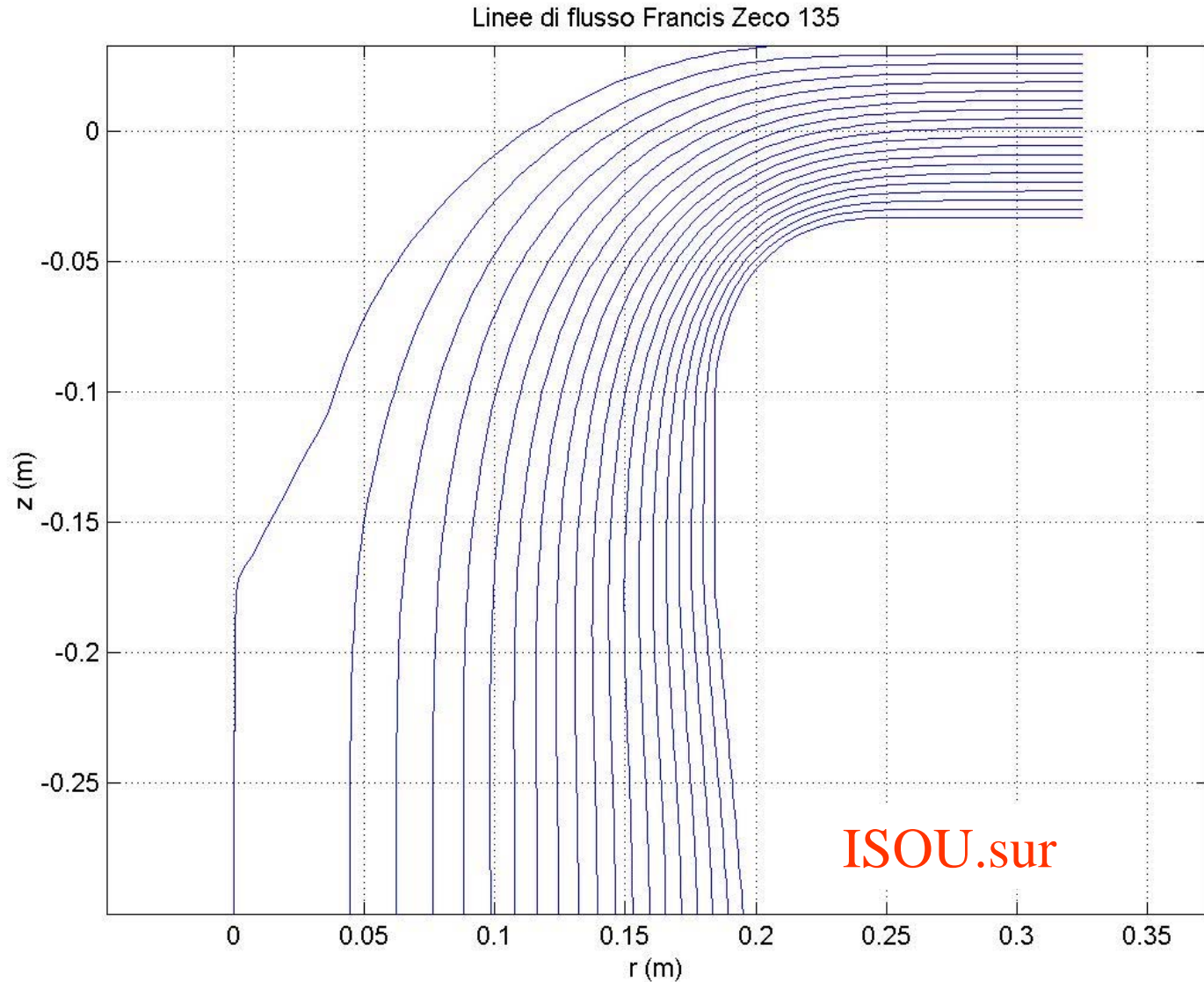
# Modellazione geometrica

# Pala di turbina francis

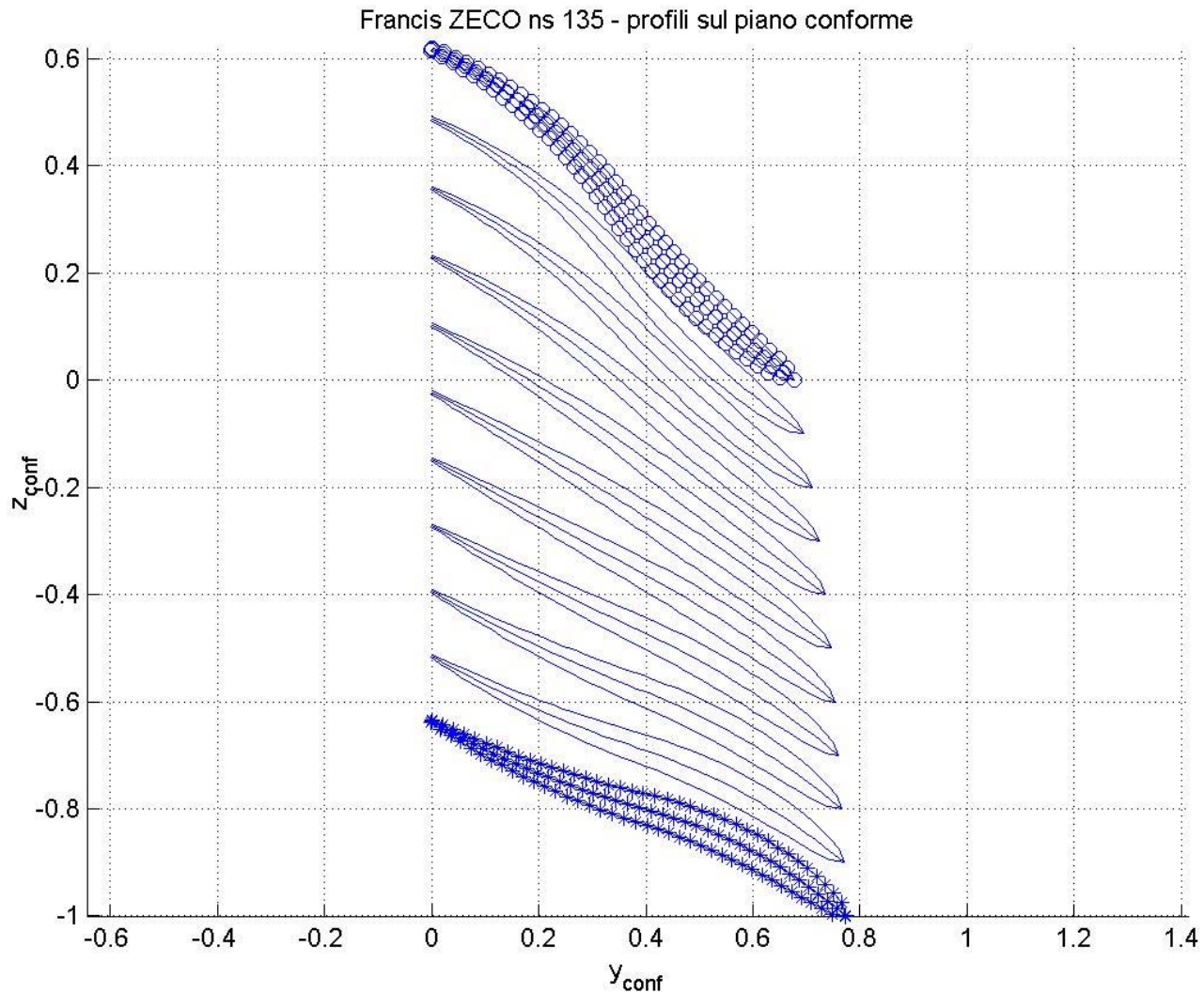
- I. Disegno della pala sul piano conforme
- II. Linea media
- III. Ricoprimento della linea media
- IV. Coefficiente di portanza  $C_L$ : un criterio per la lunghezza della pala
- V. Correzione degli angoli palari



# Generazione linee di flusso

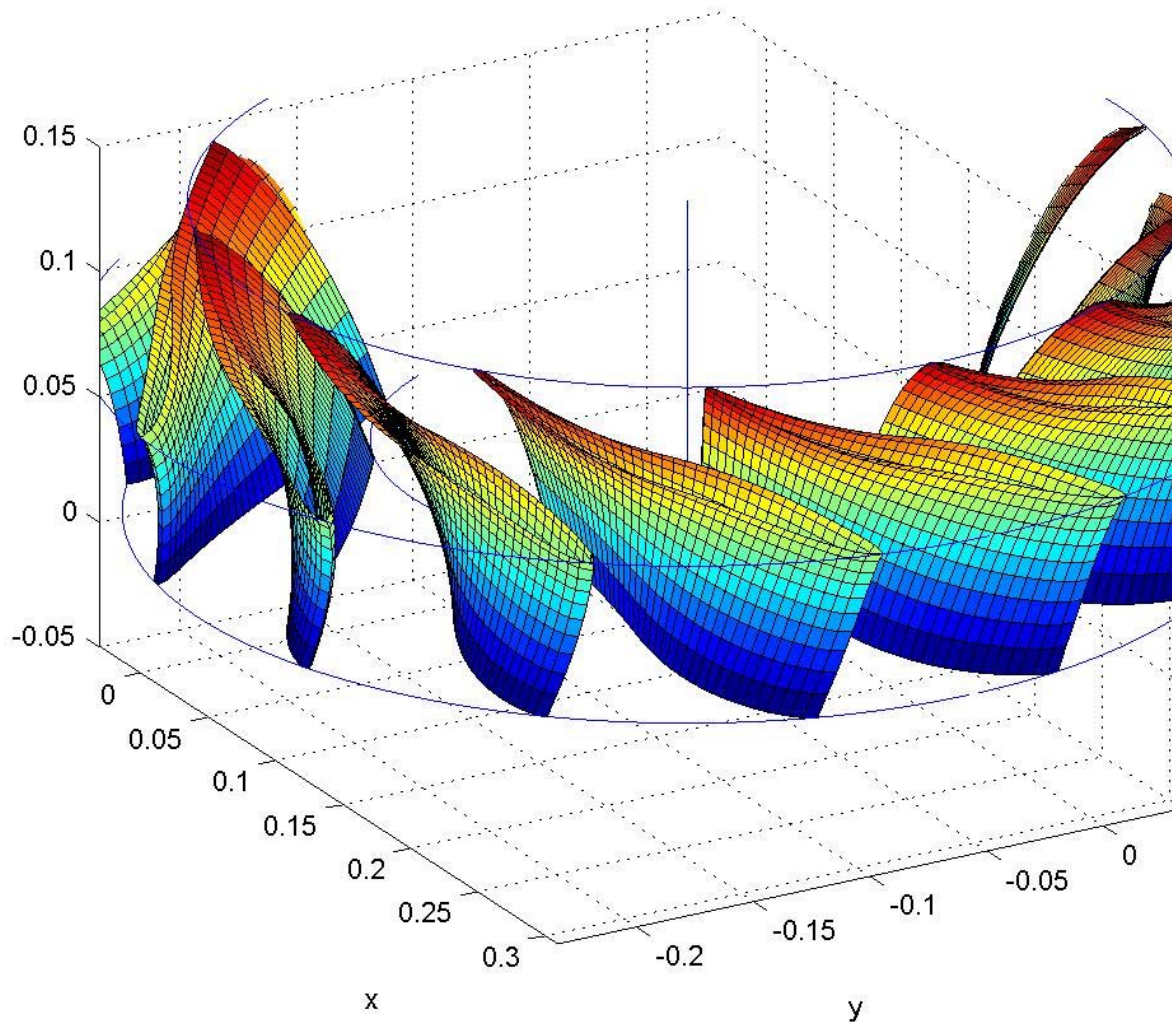


# Disegno della pala





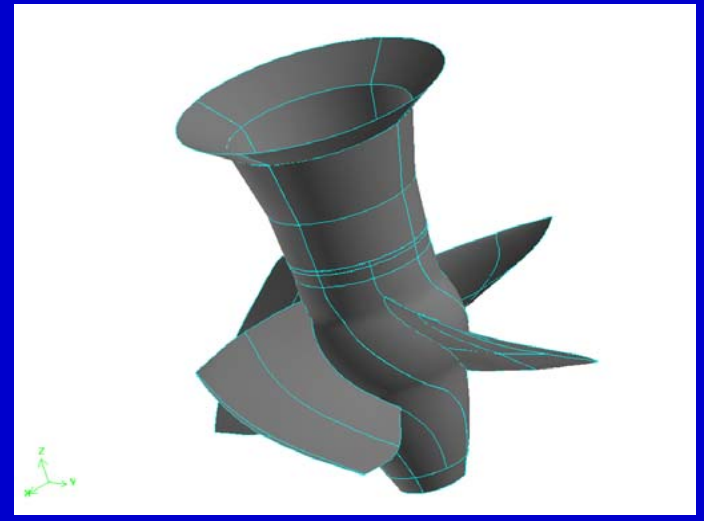
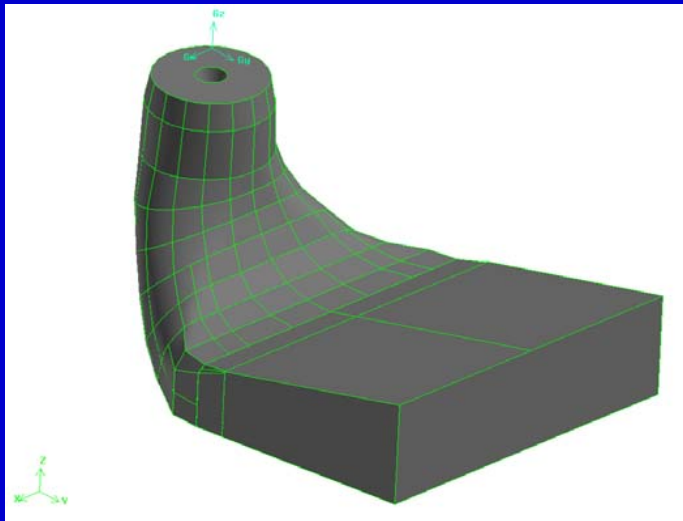
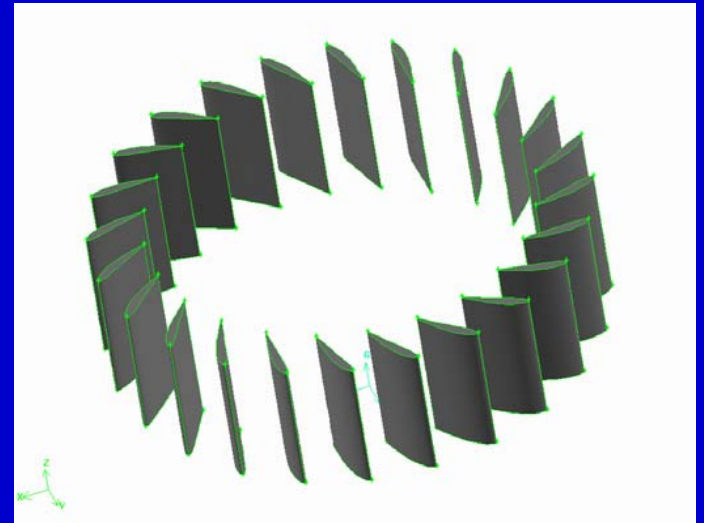
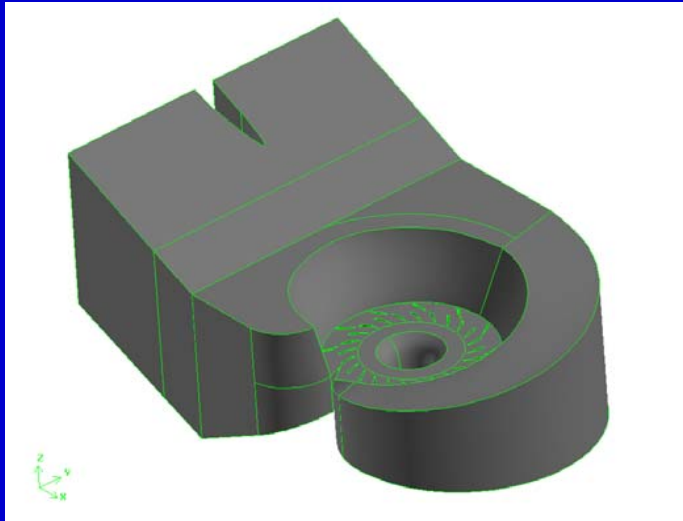
# Disegno della girante



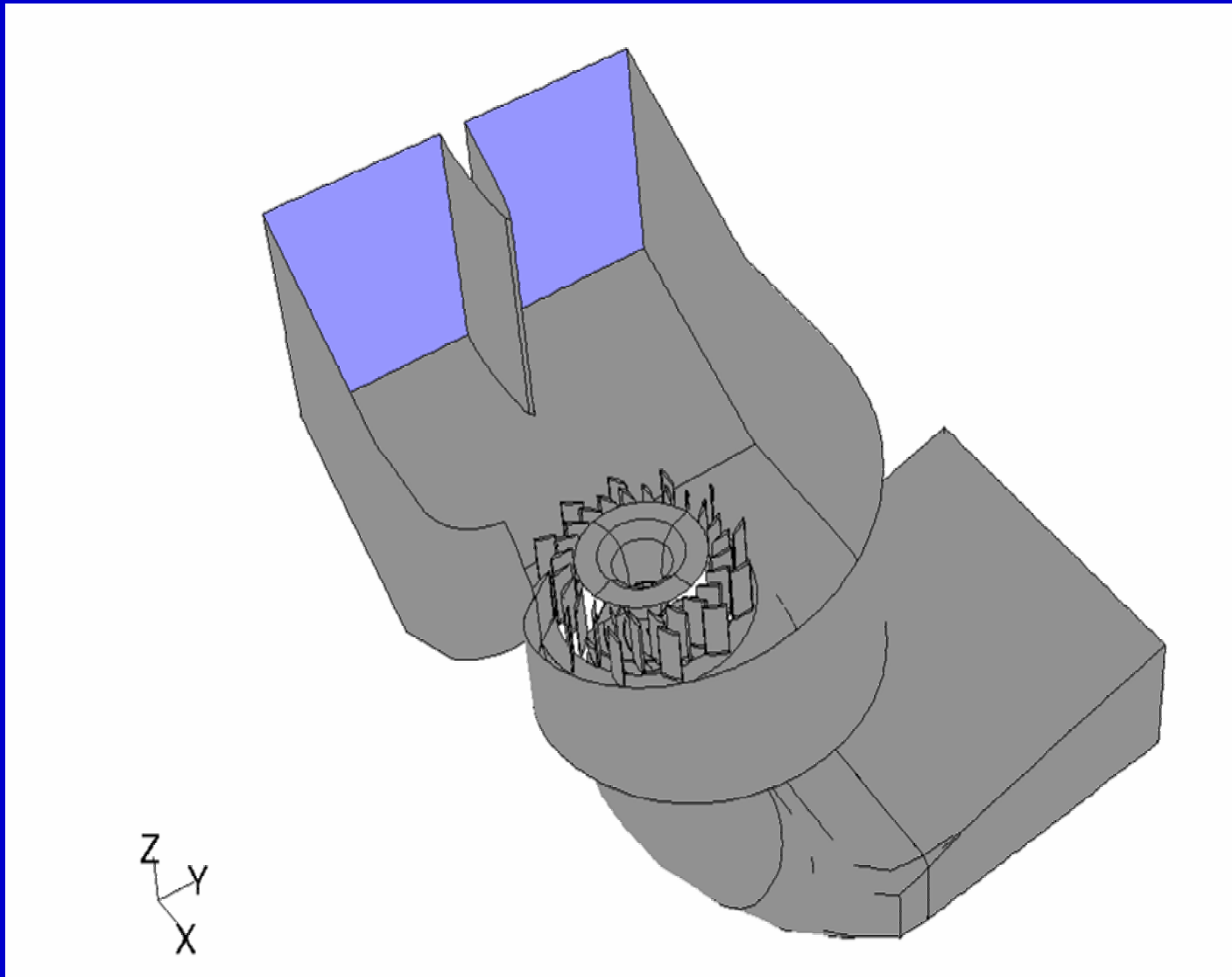
# Simulazioni fluidodinamiche



# *Ricostruzione modello tridimensionale*

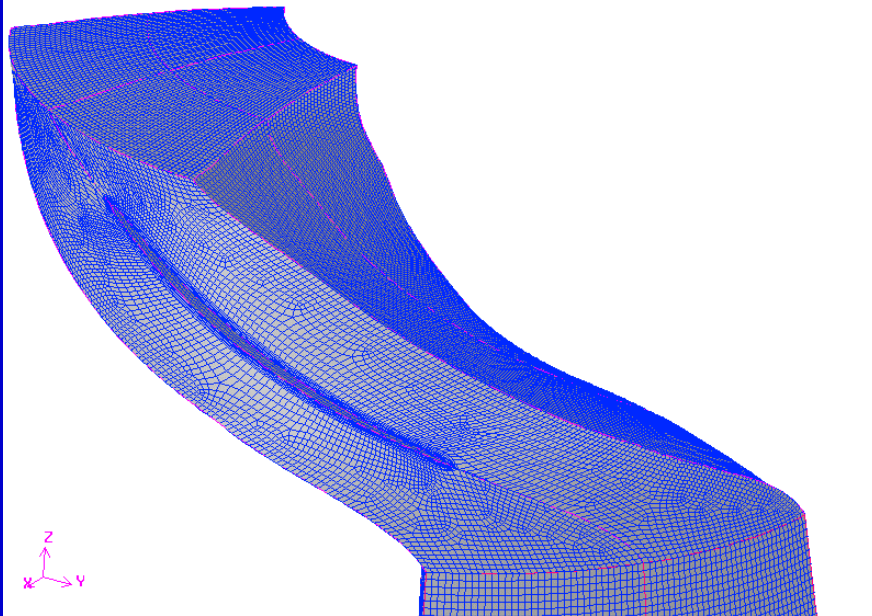


# Modello assemblato

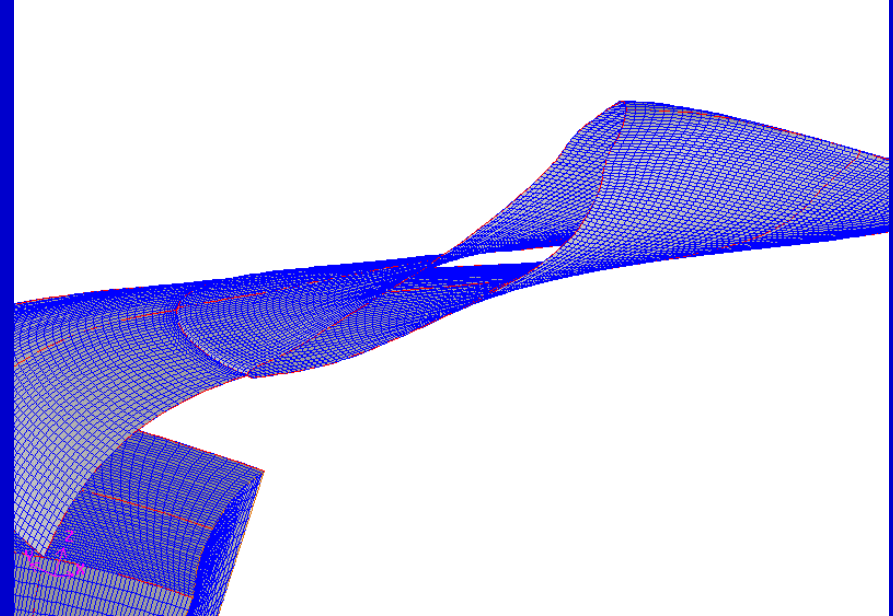




# *Approccio passage to passage*

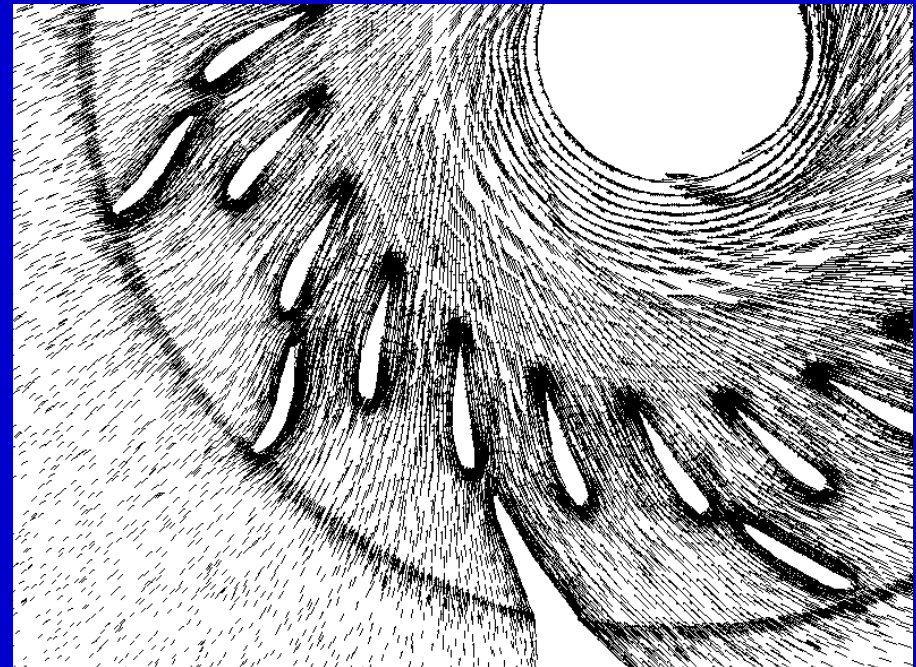
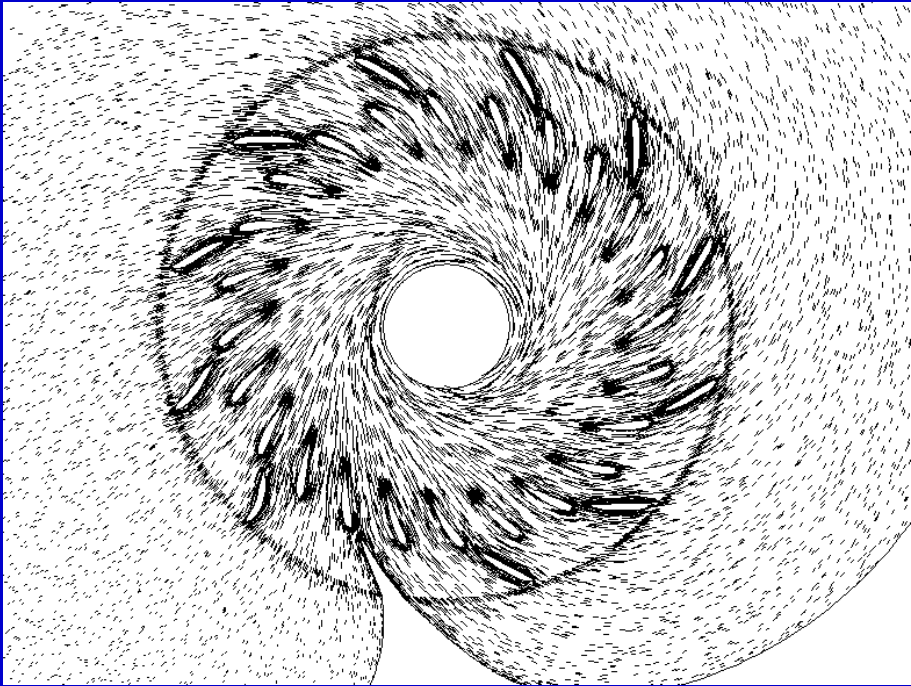


Taglio del volume di calcolo  
lungo la linea media



Particolare del prolungamento del  
trailing edge

# *Analisi del predistributore*





# Simulazione di impianti





# Impianto “Zanè” 1

Turbina Francis e generatore asincrono

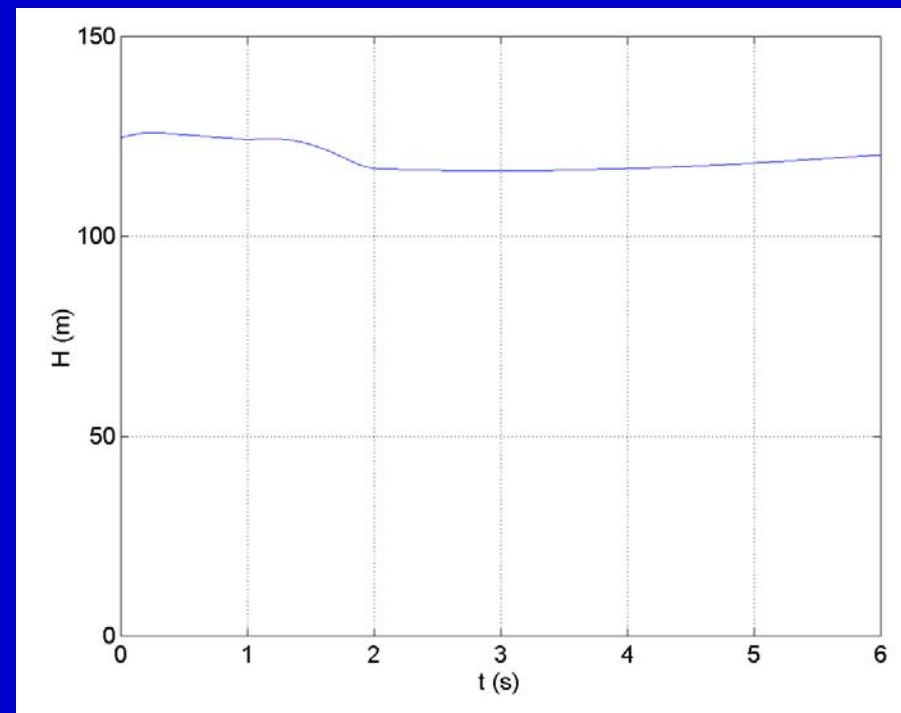
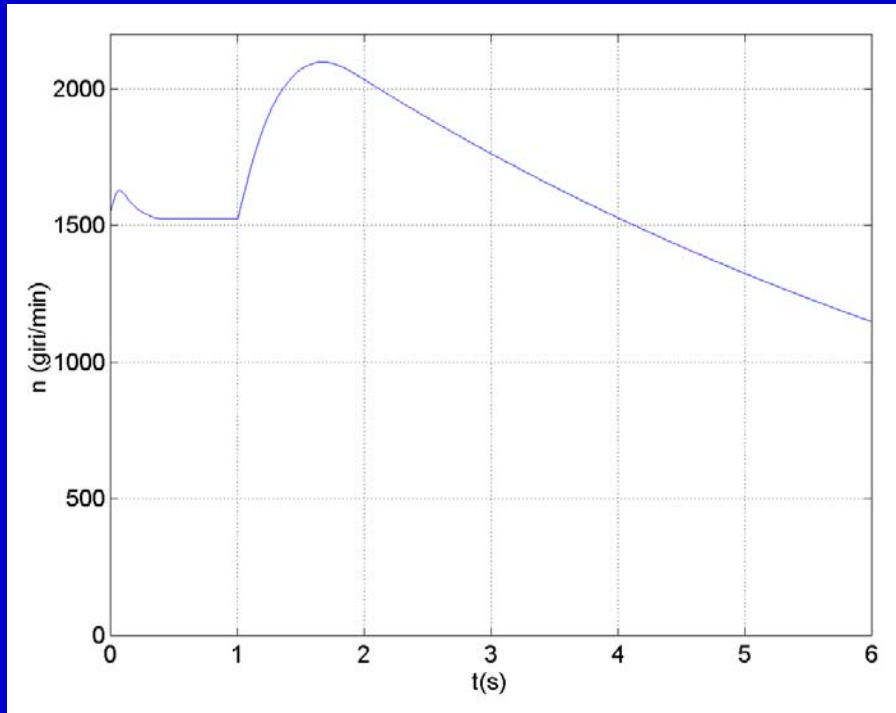
$H = 130 \text{ m}$

$Q = 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$

$n \approx 1550 \text{ giri/min}$



# Distacco del carico con valvola



transitorio di distacco del carico elettrico: velocità turbina e carico idraulico

$$n_{\max} \approx 2200 \text{ giri /min}$$

Prove sperimentali in sito



# Potenza elettrica $P_e$

Potenza dissipata dal generatore  $P_d$

Perdite negli organi di collegamento  $P_v$

Potenza meccanica  $P$

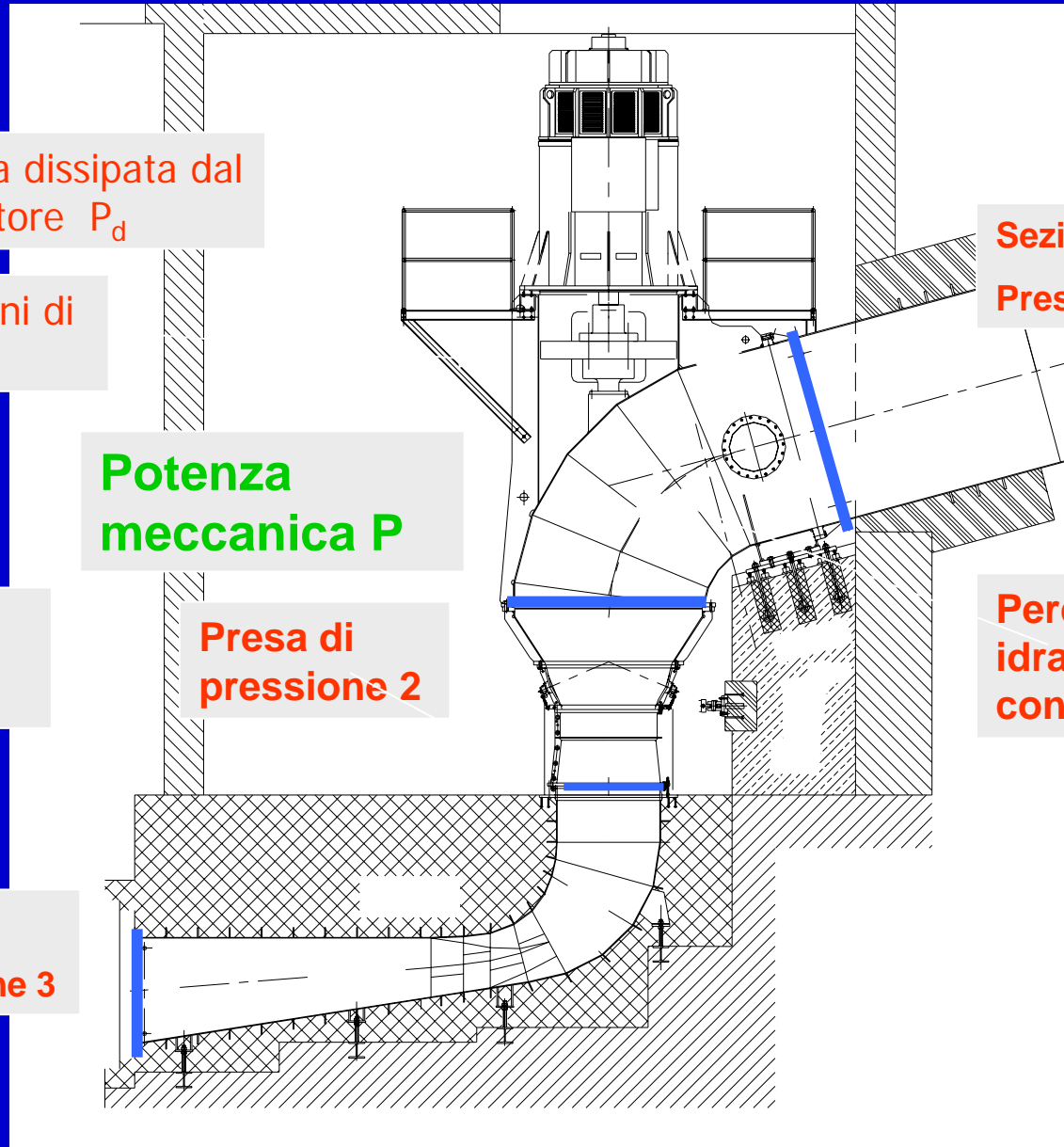
Potenza idraulica  $P_h$

Preso di pressione 2

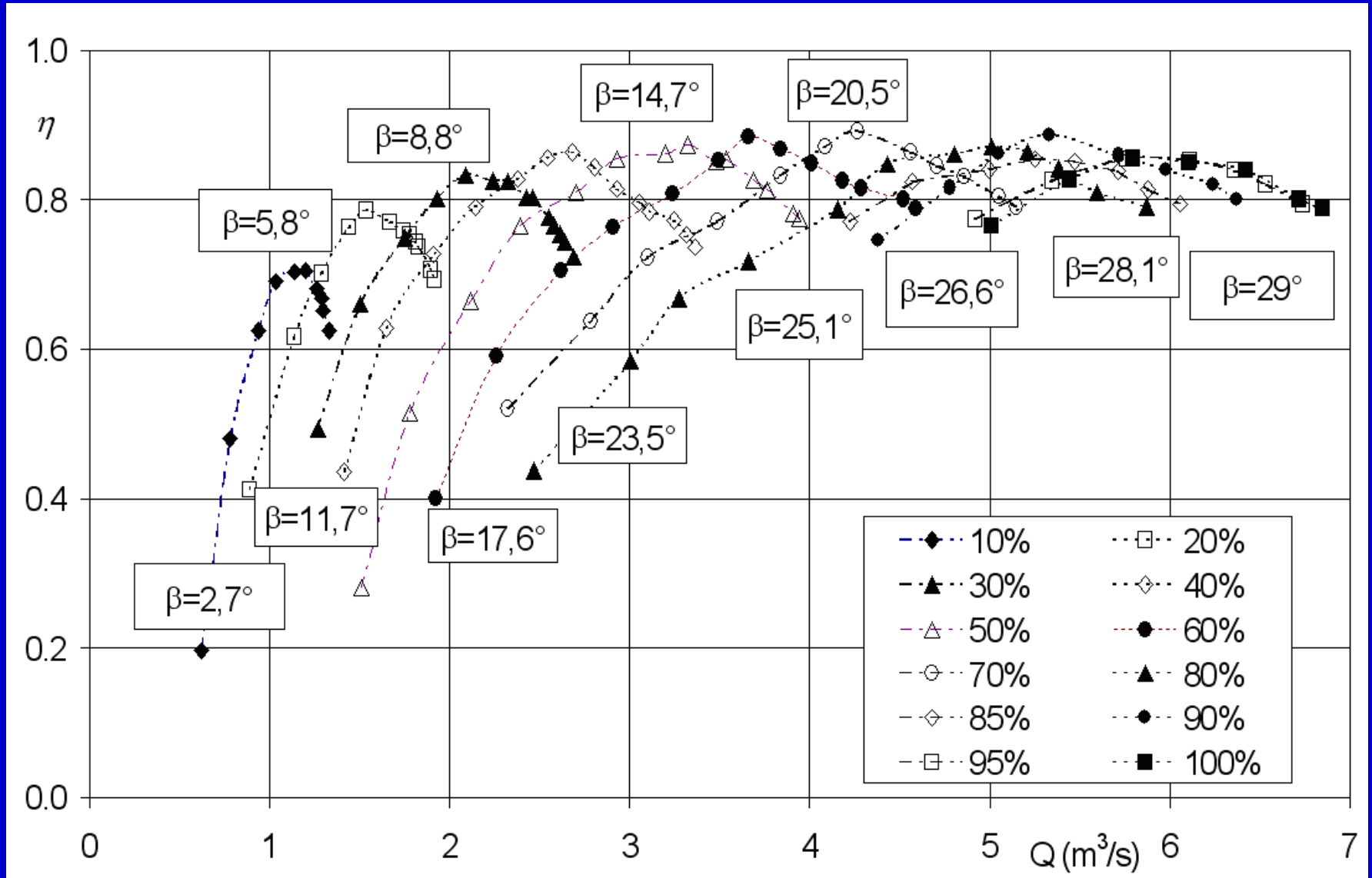
Sezione di alta  
Preso di pressione 1

Perdite idrauliche concentrate  $P_\xi$

Sezione di bassa  
Preso di pressione 3



# Curve parziali di Rendimento



Per ogni angolo di girante  $b$ , si è esplorato il campo di funzionamento variando l'apertura del distributore  $a$

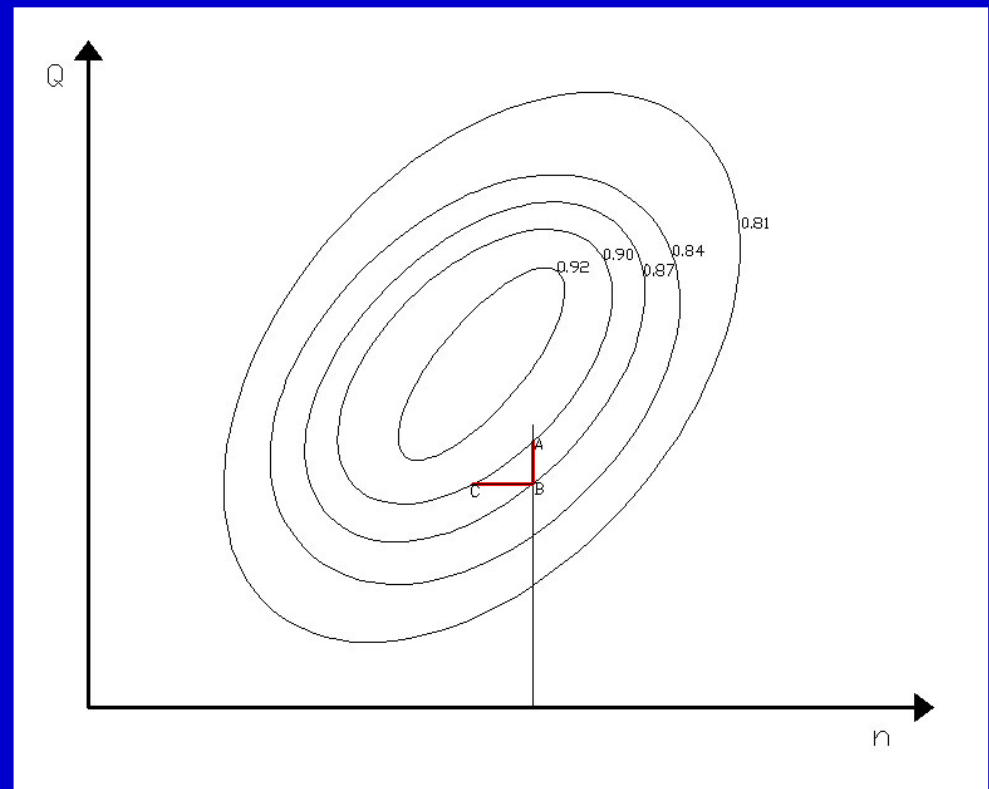
# Gestione di impianti



# I gruppi idroelettrici a velocità variabile

- Il CONTROLLO di un gruppo idroelettrico in VELOCITÀ DI ROTAZIONE e PORTATA permette il raggiungimento di rendimenti maggiori rispetto ad uno con sola regolazione della portata.
- In relazione al punto di funzionamento, l'INCREMENTO DI RENDIMENTO è realizzabile con una variazione positiva o negativa della velocità

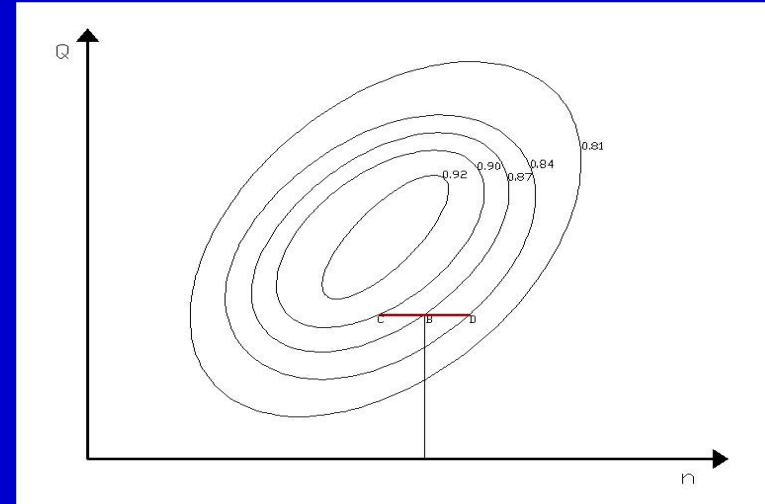
Per esigenze costruttive dei componenti elettronici la VARIAZIONE DI VELOCITÀ deve essere contenuta in un range compreso nel 10-15% nell'intorno della velocità nominale.



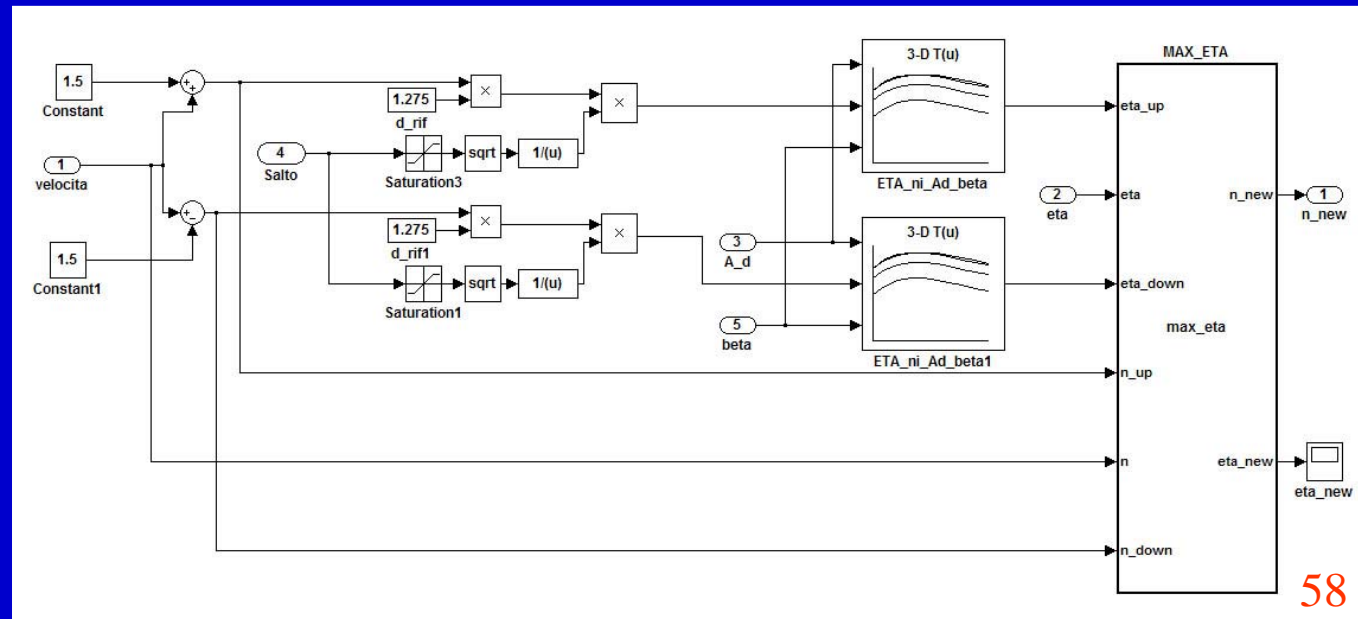
# Modellazione dell'impianto

## Ottimizzatore

Questo sottosistema provvede a testare il diagramma collinare a velocità nell'intorno di quella a cui sta funzionando il gruppo. La scelta del rendimento migliore e della velocità corrispondente è fatta poi nel blocco max\_eta in cui è stata implementata una function appositamente scritta.



La velocità a rendimento più alto viene poi utilizzata per la modifica del set-point dell'alternatore che modificherà in conseguenza la sua caratteristica permettendo al gruppo di ruotare alla velocità desiderata.



# Bibliografia

- AA. VV., *Scienziati e tecnologi dalle origini al 1875 vol. 1 da Abano a Gibbs, vol. 2 da Gilbert a Rankine, vol. 3 da Ransome a Zukowski*, Mondadori, 1975
- Alberti M., Apolloni V., Giovannini M., Naldi G., “*Rilievo in sito delle prestazioni di un mini-impianto idroelettrico ad acqua fluente*”, Atti del MIS-MAC IX, *Metodi di sperimentazione nelle Macchine*, Associazione Termotecnica Italiana, Sezione Friuli Venezia Giulia, Trieste, 24 Marzo 2006
- Agricola Giorgio, *De Re Metallica ristampa anastatica della prima edizione italiana del 1556 a cura di Paolo Macini ed Ezio Mesini*, ANIM, 1994
- Apolloni V., Masi M., Naldi G., “*Simulazione di un mini impianto idroelettrico per il recupero energetico in un acquedotto*”, Atti del 60° Congresso Nazionale ATI Associazione Termotecnica Italiana, Roma, 13-16 Settembre 2005. Branca Giovanni, *Machine (le) a cura di Luigi Firpo*, UTET, Strenna\_1977
- Cadolini G., *Architettura pratica dei mulini trattata con metodi semplici desunti da Neuman e dall'Eytelwein unitovi un ragguaglio sulla teoria delle ruote idrauliche sulla fabbricazione delle ruote metalliche sui perfezionamenti dell'arte di macinare*, Milano a spese dell'editore MDCCC.XXXV Volume 14° della *Scelta Biblioteca dell'Ingegnere civile*
- Ghidelli Paolo, *Modellazione geometrica delle turbine francis*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Facoltà Ingegneria, Università di Bologna, Dicembre 2006, Rel. prof. G. Naldi
- Guidotti Emanuele, *Studio del flusso in una mini-turbina idraulica kaplan mediante simulazione numerica*, Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Facoltà Ingegneria. Università di Bologna, Luglio 2006, Relatore: prof. G. Naldi
- Rossetti Giuseppe, *Sulle ruote idrauliche dette Turbini di Fourneyron*, Pirola, Milano, 1841
- Scarpa Piergiorgio, *Studio e modellazione di un impianto idroelettrico a velocità variabile*, Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica, Facoltà Ingegneria, Università di Bologna, Marzo 2007, Rel. prof. G. Naldi
- Singer C., *Storia della turbina idraulica (1a)*” *Le Scienze* n. 139, Marzo 1980
- Smith Norman (*ac.*), *Storia della tecnologia voll. 1-7*, Boringhieri, 1961-1996
- Vivier Lucien, *TURBINES HYDRAULIQUES et leur régulation*”, Albin Michel, Paris, 1966
- VRH, *HyPower*, n. 16 Aug. 2007