

# **CONTROLLO E REGOLAZIONE DI TURBOMACCHINE OPERATRICI**

# Riferimenti bibliografici

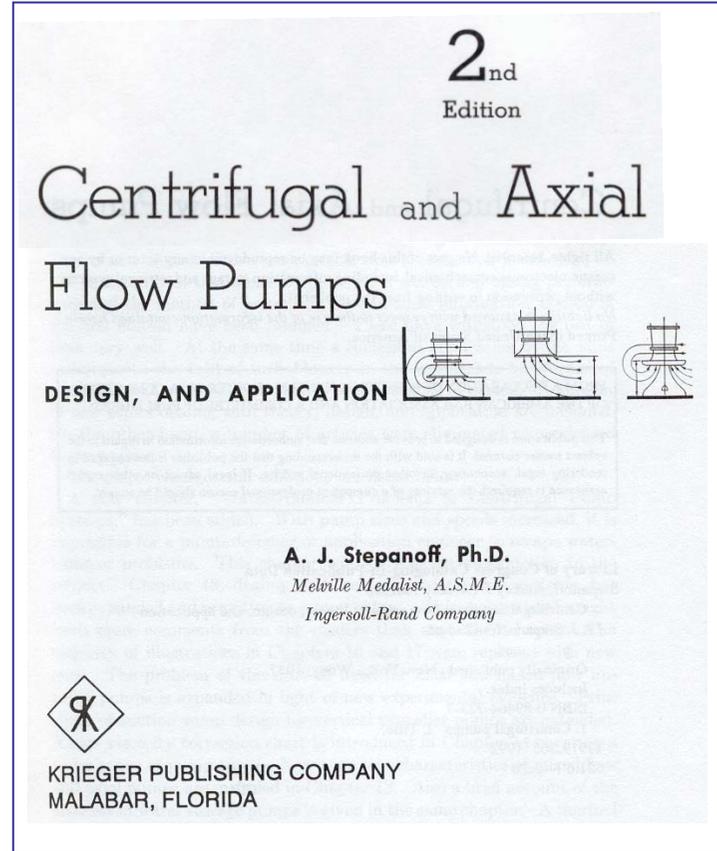
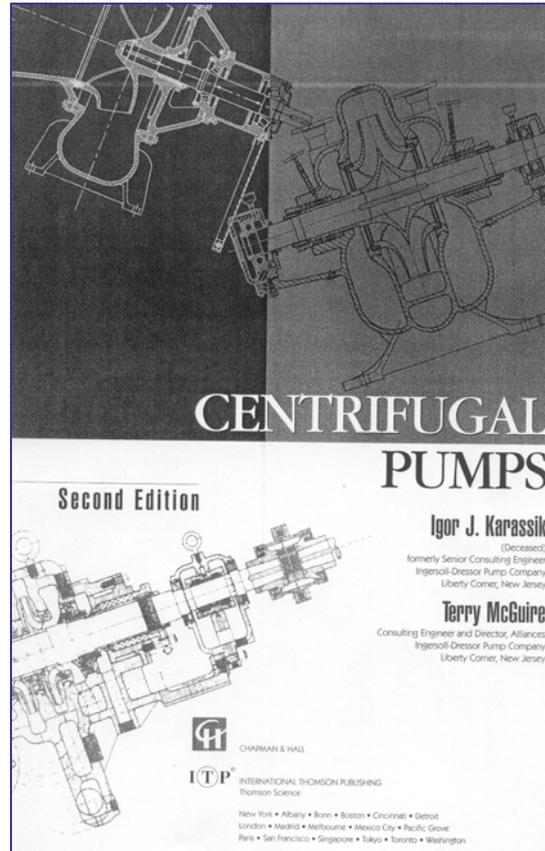
## IMPELLER PUMPS

by  
**STEPHEN ŁAZARKIEWICZ**  
M.I.P.Mech.E.  
*Consulting Engineer of the  
Warsaw Pump Manufacturing Company*

**ADAM T. TROSKOLAŃSKI**  
M.I.W.S.A., M.P.M.A., M.I.P.Mech.E.  
*Professor of Hydraulics at the  
Technical University, Wrocław, Poland*

UNIVERSITA' POLITECNICA  
Inv. n. 217  
ISTITUT CI...  
217

**PERGAMON PRESS**  
OXFORD · LONDON · EDINBURGH · NEW YORK · PARIS · FRANKFURT  
WYDAWNICTWA NAUKOWO-TECHNICZNE  
WARSAW



## Conversione unità di misura

- in = 2.54 cm
- ft = 12 in = 30.48 cm
- gallone inglese (imperial gallon) = 4.54627 dm<sup>3</sup>
- gallone americano (US gallon) = 3.78541 dm<sup>3</sup>
- libbra o pound (lb) = 0.453592643 kg
- libbra forza = 0.453592643 kg x 9.81 m/s<sup>2</sup> = 4.45 N
- pound per square inch (psi) = lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup> = 6897.51 Pa (1 bar = 14.5 psi)
- gallone US al minuto (GPM) = 0.063 dm<sup>3</sup>/s
- British thermal unit (Btu) = 1.05506 kJ

$$\bullet \quad hp = 550 \frac{ft \times lb_f}{s} = 550 \frac{0.3048m \times 4.45N}{s} = 746 W$$

$$\bullet \quad T[^\circ C] = \frac{5}{9}(T[^\circ F] - 32)$$

# *Indice degli argomenti*

1. Il controllo (logica di intervento)
2. La regolazione (effetto sul punto di funzionamento e sulle prestazioni)
3. Interazione motore – turbomacchina
  - a) I motori primi delle turbomacchine (curve caratteristiche coppia-velocità)
  - b) Interazione motore – turbomacchina (avviamento, regolazione)
  - c) Esempi applicativi

## ***Indice degli argomenti***

1. Il controllo (logica di intervento)

# ***Caratteristiche di un sistema di controllo***

- Accuratezza
  - fondo-scala dello strumento
  - punto di misura della grandezza da controllare
  - stato fisico e condizioni del punto di misura
  - deve essere ricercata dove è più necessario un controllo accurato
  
- Sensibilità
  - tipo e dimensione dell'attuatore (ad es. corsa della valvola di regolazione)
  - sensore di misura
  
- Potenza (controllo automatico o manuale?)
  
- Velocità

## ***Il controllo di turbomacchine***

- Le pompe centrifughe sono facili da controllare.  
È necessario avere però sia nota la relazione fra la curva caratteristica della pompa, del circuito e le condizioni operative (prevalenza e portata)
- Le pompe centrifughe possono lavorare in modo continuo per lunghi periodi oppure in modo intermittente.
- La tipologia di controllo si può dividere in:
  - avviamento o interruzione del flusso
  - variazione delle condizioni operative

# ***Controllo dovuto a interruzione del funzionamento***

1. Prosciugamento o raggiungimento del livello desiderato del serbatoio all'aspirazione
2. Riempimento o raggiungimento del livello desiderato del serbatoio alla mandata
3. Raggiungimento della pressione desiderata nel serbatoio alla mandata
4. Il processo servito dalla pompa è terminato (ad es. processo industriale)
5. Una pompa in parallelo può essere fermata per consentire un funzionamento ottimale del sistema o una manutenzione programmata
6. Problema meccanico

## Azione conseguente

- avviamento o fermata del motore primo
- apertura o chiusura di una valvola di regolazione

## *Dispositivi per l'avviamento o la fermata*

- Pulsante avvio/ripristino
- Indicatore di livello
- Regolatore di pressione
- Consumo di potenza (controllo sul sovraccarico o sulla corrente)
- Controllo termostatico
- Controllo su “overspeed” (di solito per turbine a vapore)
- Interruzione completa del flusso senza fermare la macchina
  - controllo manuale della valvola allo scarico
  - valvole di intercettazione nella linea alla mandata
  - valvole di controllo della portata comandate dal regolatore di livello
  - controllo della pressione
  - valvole termostatiche

# Variazione delle condizioni operative

I motivi possono essere molti, ma sono riconducibili a

- mantenere un **livello** costante (all'aspirazione o allo scarico, come nel caso del separatore di vapore)
- mantenere una **portata** costante
- mantenere una **pressione** costante (o superiore ad un certo valore)
- mantenere una **temperatura** costante (la macchina elabora il fluido attraverso uno scambiatore di calore)

Azione conseguente

- **modifica della curva caratteristica della pompa** (variazione della velocità del motore o del rapporto di trasmissione)
- **modifica della curva caratteristica del circuito** (valvola di regolazione)

## ***Intervento sulla velocità di rotazione della pompa***

- Controllo manuale (reostato per motori elettrici o valvola per TV e MCI)
- Controllo della portata (la pompa accelera per aumentare la portata; rallenta per diminuirla)
- Controllo del livello (come per la portata)
- Controllo della pressione (nel caso di TV)
- Controllo della temperatura (la pompa varia la portata in funzione della potenza termica da scambiare)

## ***Controllo manuale o automatico?***

- Il controllo automatico induce negli operatori una minore attenzione
- D'altra parte, la risposta dell'operatore potrebbe non essere pronta
- Costo dell'operatore
- Controllo "misto" ...
  - frequente?
  - prevedibile o improvviso?
  - urgente?
  - difficile o inaccessibile?
  - la grandezza da controllare si può valutare "a vista" o solo con strumenti?
  - economicità della presenza dell'operatore rispetto ad un sistema automatico
  - guasti introdotti dal sistema di controllo

## Controlli “protettivi”

- Fino ad ora si sono considerati controlli “correttivi”
- I controlli protettivi sono ad esempio utilizzati per segnalare:
  - avaria del motore (sovraccarico, voltaggio basso, ecc.) – può seguire l’avviamento di motori in stand-by
  - perdita di fluido nella pompa
  - portata troppo bassa per il processo a valle
  - flusso “inverso”

## *Alcuni consigli pratici sul controllo ...*

1. Utilizzo della pressione del sistema idraulico per il controllo “protettivo” → se la pompa si ferma, anche il controllo “protettivo” è inattivo
2. Sovra-ingegnerizzazione: la strumentazione è di classe troppo “alta” per lo scopo → i costi aumentano (strumentazione, manutenzione, fermata impianto)
3. Il controllo automatico deve integrare, non soppiantare, la strumentazione e gli operatori

# Specifiche progettuali per un sistema di controllo

1. Tipo di fluido (viscosità, corrosività, ...)
2. Portate e pressioni ( $gH = \Delta p / \rho$ )
3. Sempre in servizio o stand-by?
4. Controllo manuale o automatico?
5. Accuratezza
6. Range di regolazione
7. “Direzione” del controllo. Ad esempio, in caso di guasto alla pompa, la valvola deve essere nella posizione “tutta aperta” o “tutta chiusa”?
8. Dettagli impiantistici
  - Valvola verticale o orizzontale?
  - Connessione (ad es. flangia)
9. Range di possibile variazione di tutte le grandezze !!!

2. La regolazione (effetto sul punto di funzionamento e sulle prestazioni)

# Prestazioni di una pompa vs. velocità di rotazione

- $M \text{ [kg/s]} = \rho A v_r \propto n \text{ [rpm]}$  (per fissate dimensioni e stato fisico del fluido)
- $H \text{ [m]} \propto uv \propto n^2$  (vedi anche determinazione della prevalenza a mandata chiusa)
- $P \text{ [W]} = Q \rho g H / \eta \propto n^3$
- $T \text{ [Nm]} = P / \omega \propto n^2$

$$\left. \begin{array}{l} M = 1000 \text{ GPM} = 63 \text{ dm}^3/\text{s} \\ H = 140 \text{ ft} = 42.672 \text{ m} \\ \eta = 80 \% \end{array} \right\} P = 33 \text{ kW} = 44 \text{ hp}$$

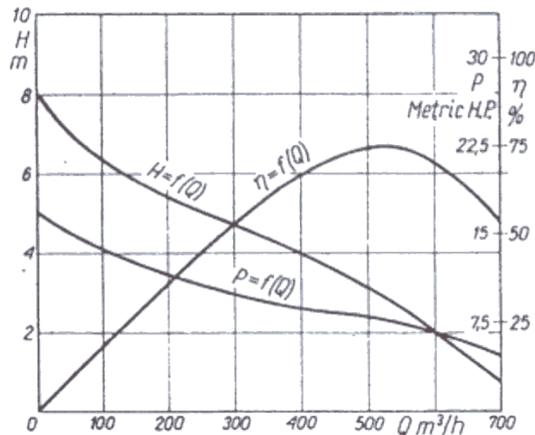
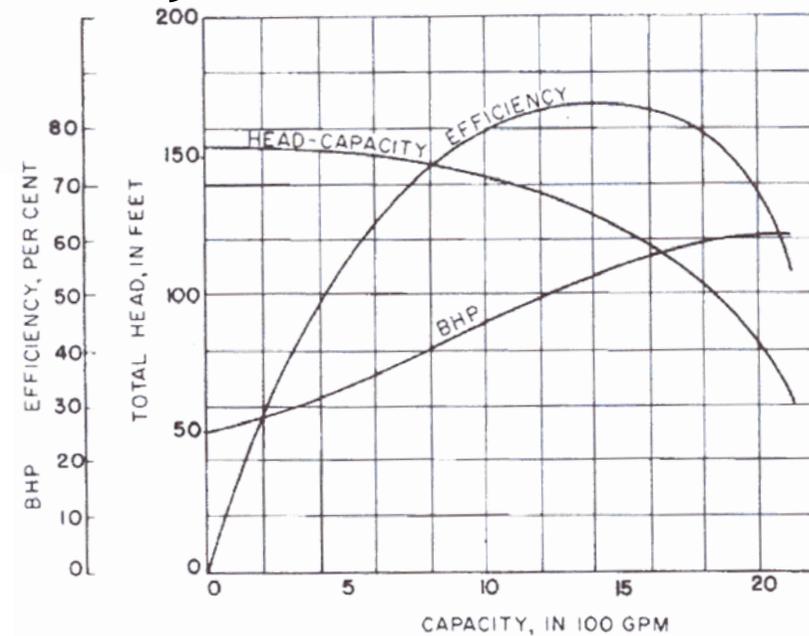


FIG. 3. Characteristic curves  $H = f(Q)$ ,  $P = f(Q)$  and  $\eta_h = f(Q)$  for a propeller pump with a specific speed  $n_{sQ} = 213$  ( $n_{sf} = 640$ ).



4.24 Constant speed (1,770 rpm) characteristics of 6 in discharge, 8 in suction (6 x 8) double-suction pump.

# Velocità specifica di una pompa

- $n_{sQ} \downarrow \rightarrow$  pale lunghe e piccola area di passaggio  $\rightarrow (n_{sQ})_{\min} \cong 10$  legato alle perdite

$$n_{sQ} \left[ \frac{m^{3/4}}{s^{5/2}} \right] = n \frac{Q^{1/2}}{H^{3/4}}$$

$$\omega_{sQ} [-] = \omega \frac{Q^{1/2}}{(gH)^{3/4}}$$

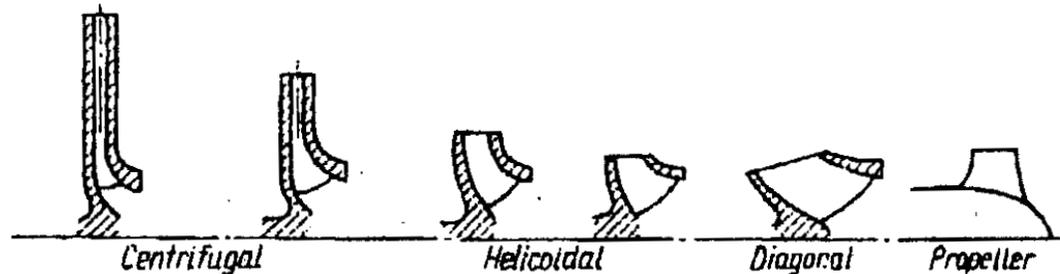
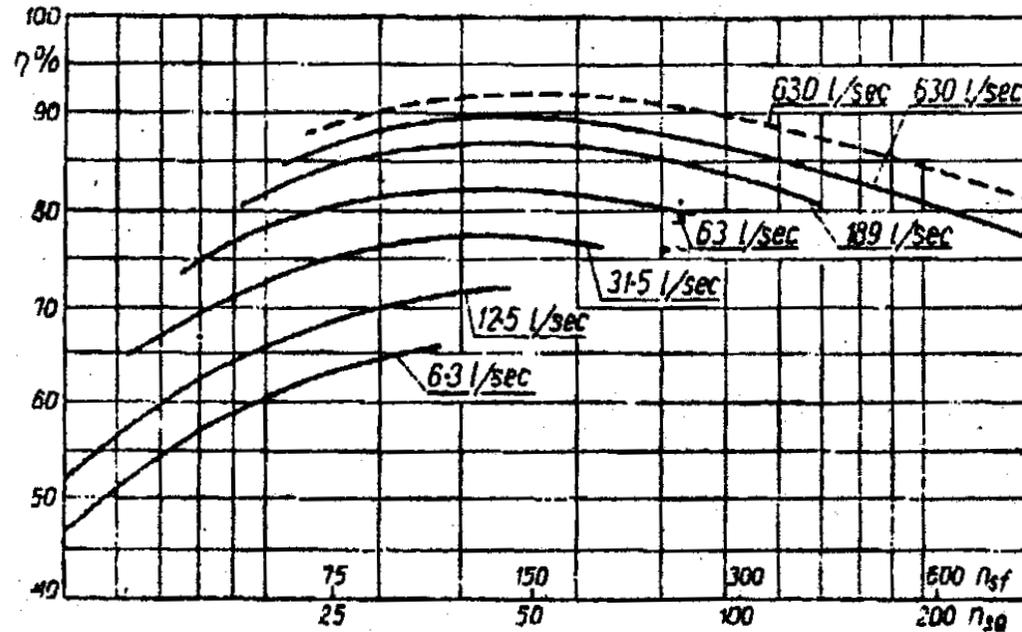


FIG. 6. Pump efficiency as affected by specific speed and pump size (F. KRISAM, KSB).

## Leggi di similitudine

- Se si varia  $n$  in modo tale che i triangoli di velocità all'ingresso e all'uscita della girante rimangano gli stessi  $\rightarrow$  tutte le velocità varieranno proporzionalmente ad  $n$
- Queste relazioni permettono di ricavare la curva caratteristica per ogni  $n$ 
  - si assume che il rendimento resti costante
  - la velocità specifica è proprio costante

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

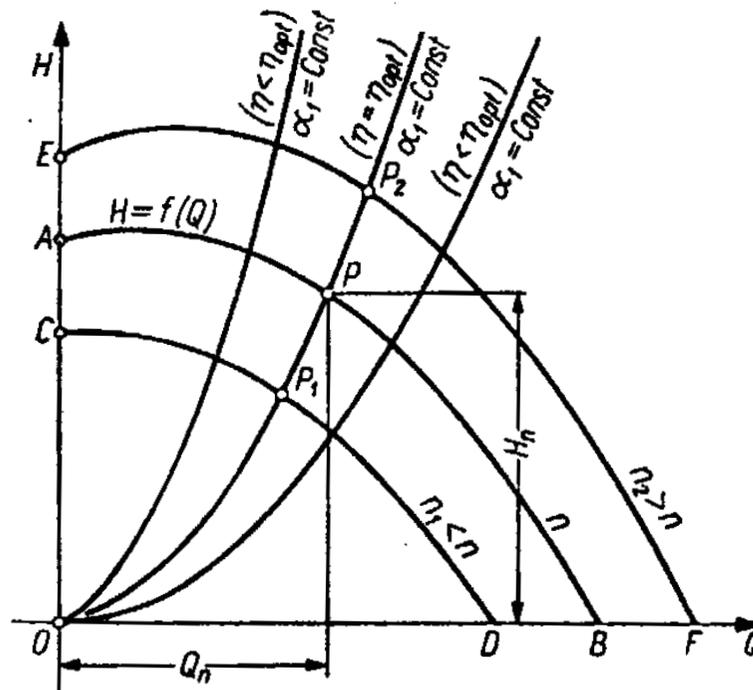


FIG. 15. Similar head–discharge curves  $H = f(Q)$  for one and the same pump at different speeds.

## Valvola attuatore - curva caratteristica

- L'area di passaggio di una valvola deve essere proporzionata con le portate in gioco
- Il dimensionamento dovrebbe tener conto anche di funzionamento in emergenza
- Es. Gate Valve: la portata massima fluisce con il pistone al 50 % (oversize!). Inoltre, per passare da 80 % a 25 % della portata, il pistone si sposta da 30 % a 20 % → poca sensibilità!
- Soluzione ottimale:  
linea a pendenza costante

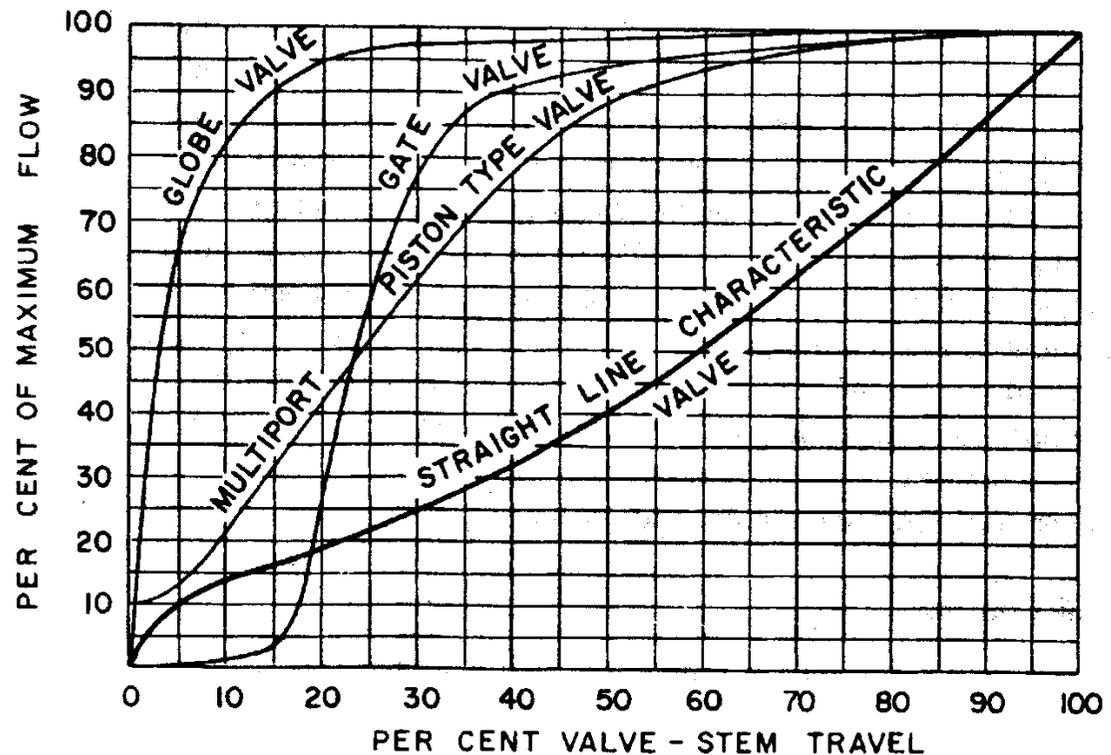


Fig. 23.10 Flow characteristics of different types of valves.  
(Courtesy Bailey Meter Co.)

# Modalità di regolazione

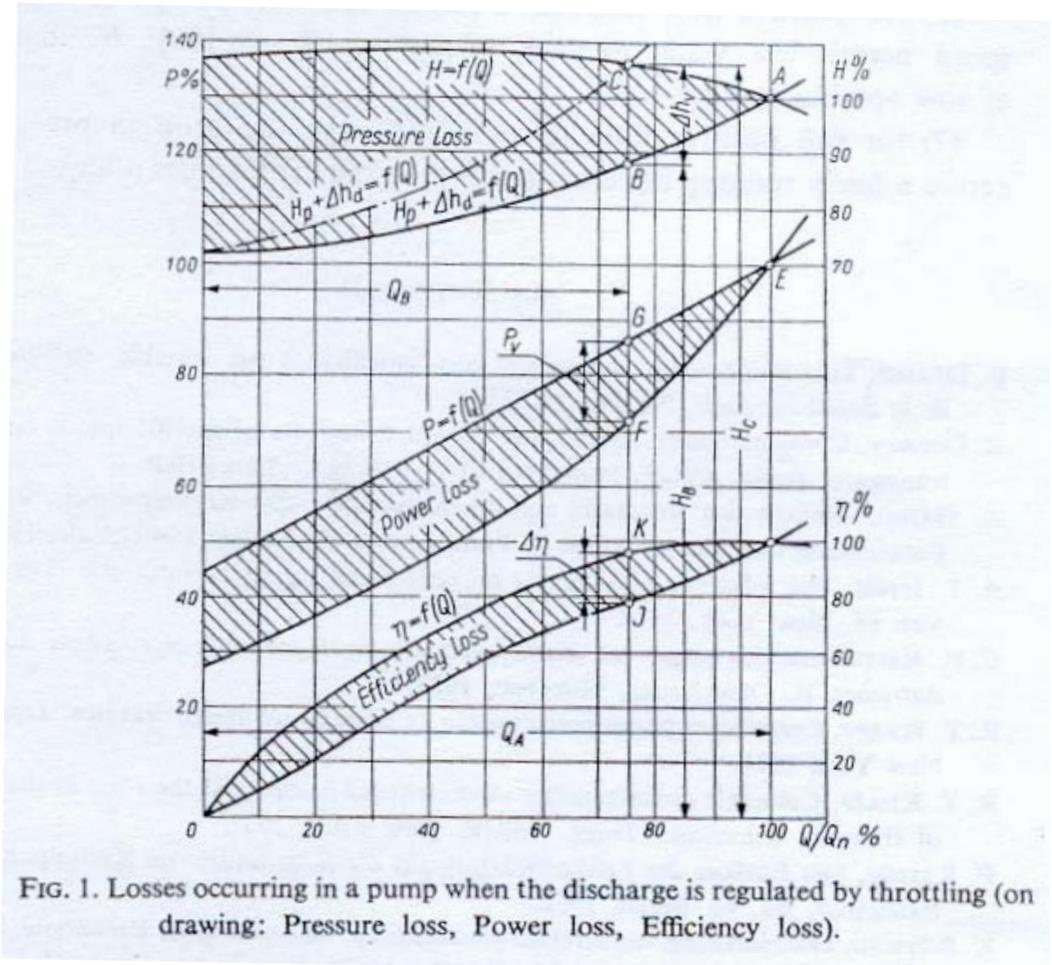
- Velocità di rotazione costante
  - strozzamento valvola regolazione **Fig.1**  
(dissipativa, è fatta solo con macchina in funzione)
  - by-pass (raro)  
(modifica curva caratt. circuito che comprende 2 condotti)
  - iniezione di aria (rarissimo)
- Forma e/o numero di pale
  - IGV → pre-whirl **Fig. 2**  
(poco efficace a bassa vel. spec.)
  - forma e/o numero di pale **Fig. 10**  
(difficile e costoso)
  - riduzione delle dimensioni (sezione di uscita) **Fig. 11**
- Velocità di rotazione variabile **Fig. 14**  
(no perdite e rendimento varia poco)

## Regolazione @ $n = \text{costante}$

- Valvola di strozzamento a valle
- A: punto di funzionamento nominale
- Se la valvola chiude,  $H = H_c$
- $\Delta h_v =$  perdita dovuta allo strozzamento
- Se  $n \uparrow \Rightarrow \eta \ \& \ P \uparrow$   
(ma  $P$  non nullo @  $n = 0$ )
- Quindi, la potenza persa  $\Delta P_{\text{loss}}$  cresce più rapidamente di  $\Delta h_v$ , in quanto cala anche il rendimento

$$\Delta P_{\text{loss}} = \frac{Q \rho g \Delta h_v}{\eta}$$

- Allora si utilizza solo per regolazione con macchina in funzione, non per regolazioni “permanenti”



## *Logica di intervento sulla valvola di regolazione*

- Controllo manuale (valvola a globo) Fig. 23.1
- Controllo della portata Fig. 23.2
- Controllo del livello Fig. 23.1
- Controllo della pressione Fig. 23.3 e 23.4
- Controllo della temperatura (azione combinata su pressione e portata)

# Intervento sulla valvola di regolazione

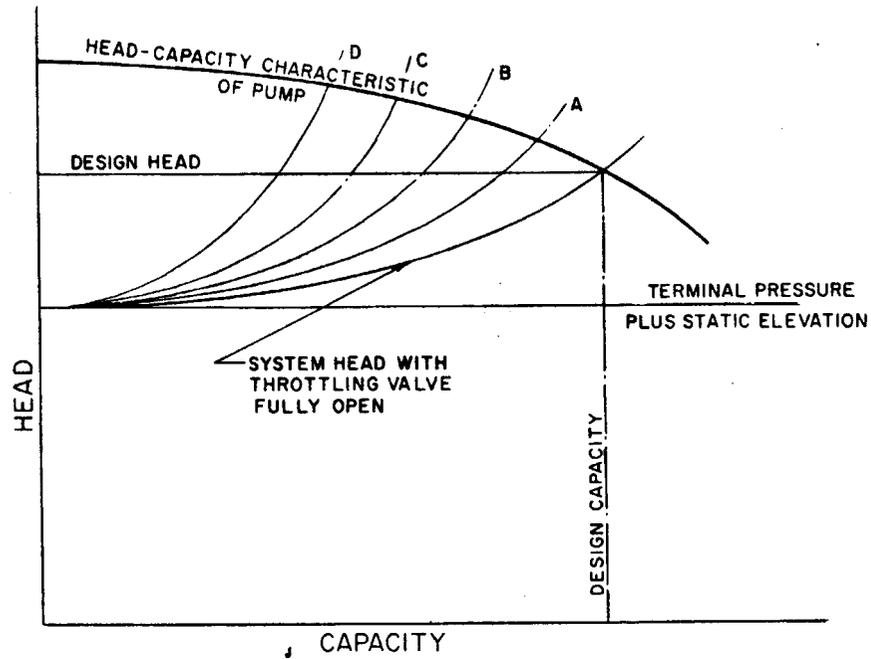


Fig. 23.1 Effect of throttling valve used to vary pump capacity.

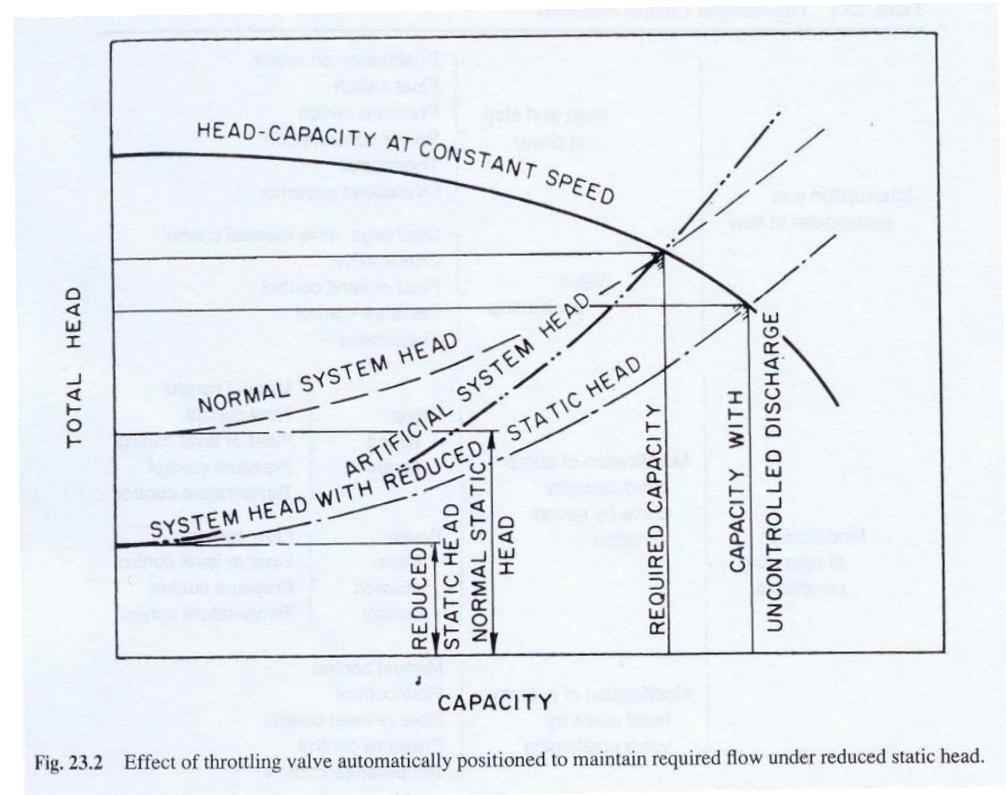


Fig. 23.2 Effect of throttling valve automatically positioned to maintain required flow under reduced static head.

# Esempio di interazione dei dispositivi di controllo

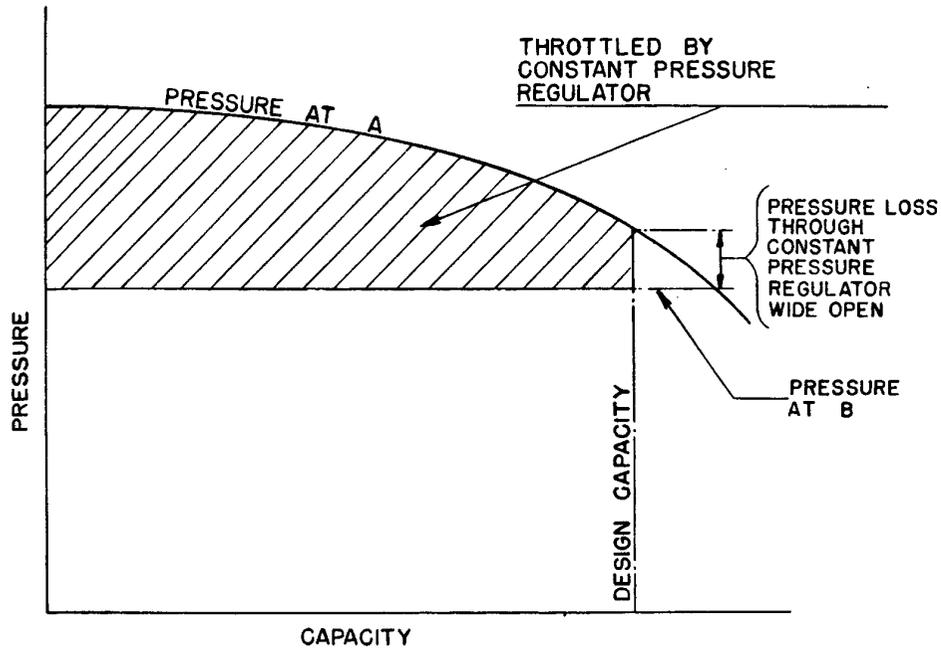


Fig. 23.4 Performance of constant-pressure pump in Fig. 23.3.

- Velocità pompa = costante
- Si desidera pressione in B = costante
- Il regolatore varia  $\Delta p_{AB}$  per mantenere  $p_B = \text{costante}$
- Se  $p_B \uparrow$ , la valvola chiude ( $M_A \downarrow$ ),  $\Delta p_{AB} \uparrow$  fino a che  $p_B = \text{valore desiderato}$
- Se invece  $p_B \downarrow$  la valvola apre ( $M_A \uparrow$ ),  $\Delta p_{AB} \downarrow$  e  $p_B$  torna al valore desiderato

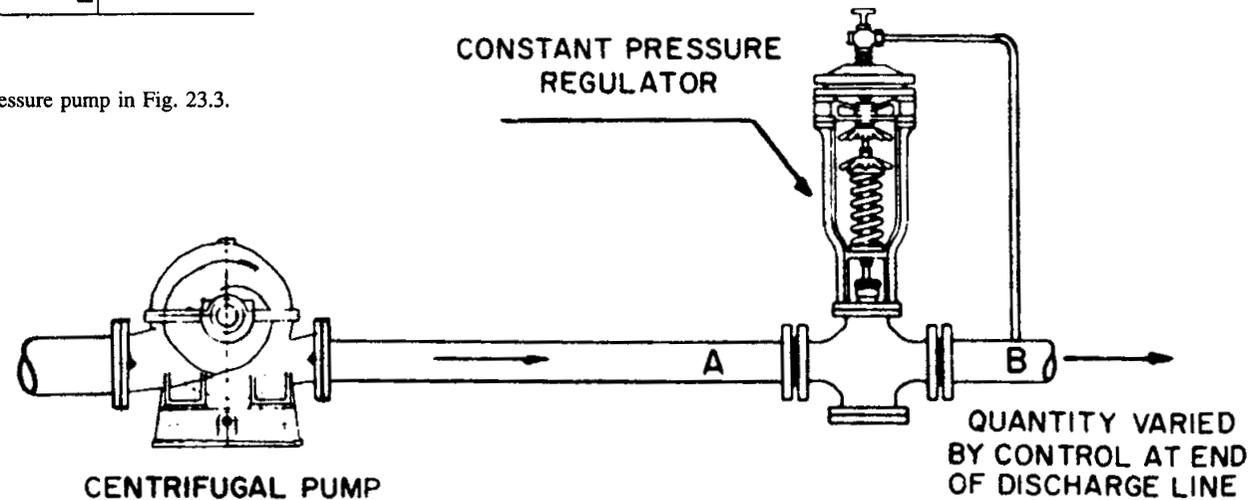


Fig. 23.3 Constant-pressure regulator installed in pump discharge.

# Regolatore di pressione differenziale (1/2)

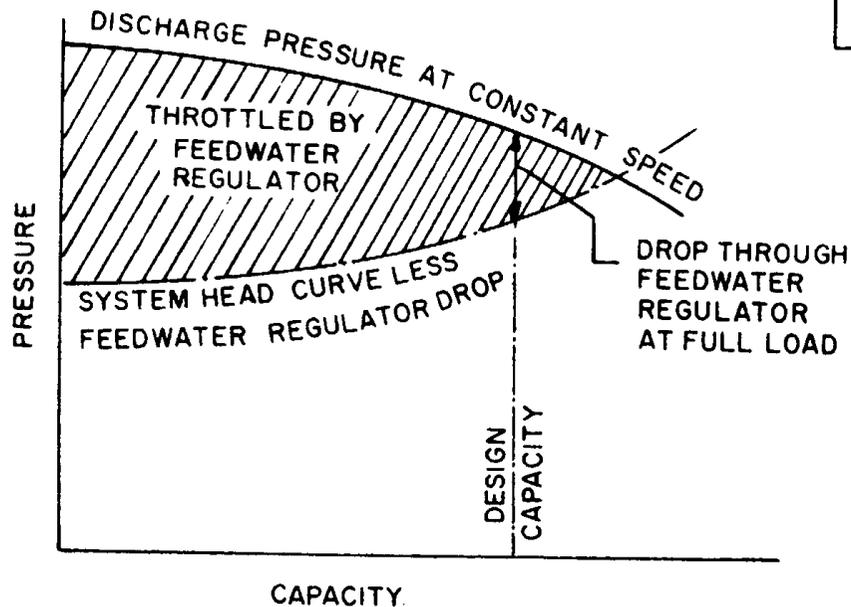
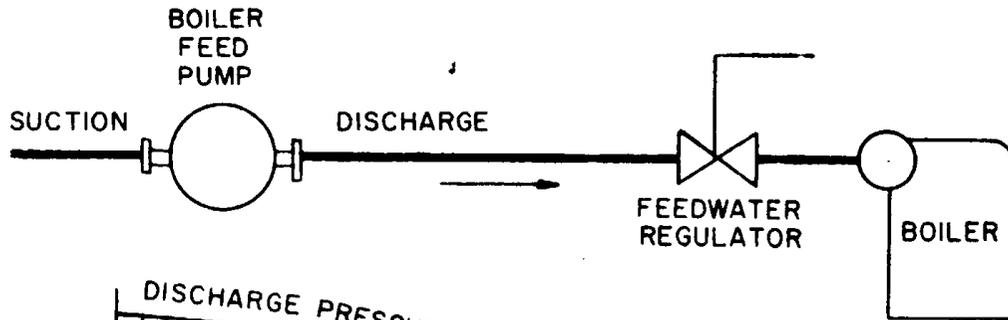


Fig. 23.5 Constant speed boiler feed pump controls.  
*Feedwater regulator only.*

- Regolatore + attuatore
- Velocità rotazione pompa = cost
- $\Delta p_v$  è prop.  $v^2 \rightarrow$  dipende da  $M \rightarrow$  se  $M \downarrow$  allora  $\Delta p_v \uparrow$
- La valvola è progettata per lavorare in condizioni nominali  
Allora, se  $M \downarrow$ , la corsa della valvola è piccola con  $M$  piccole  $\rightarrow$  regolazione non accurata

## Regolatore di pressione differenziale (2/2)

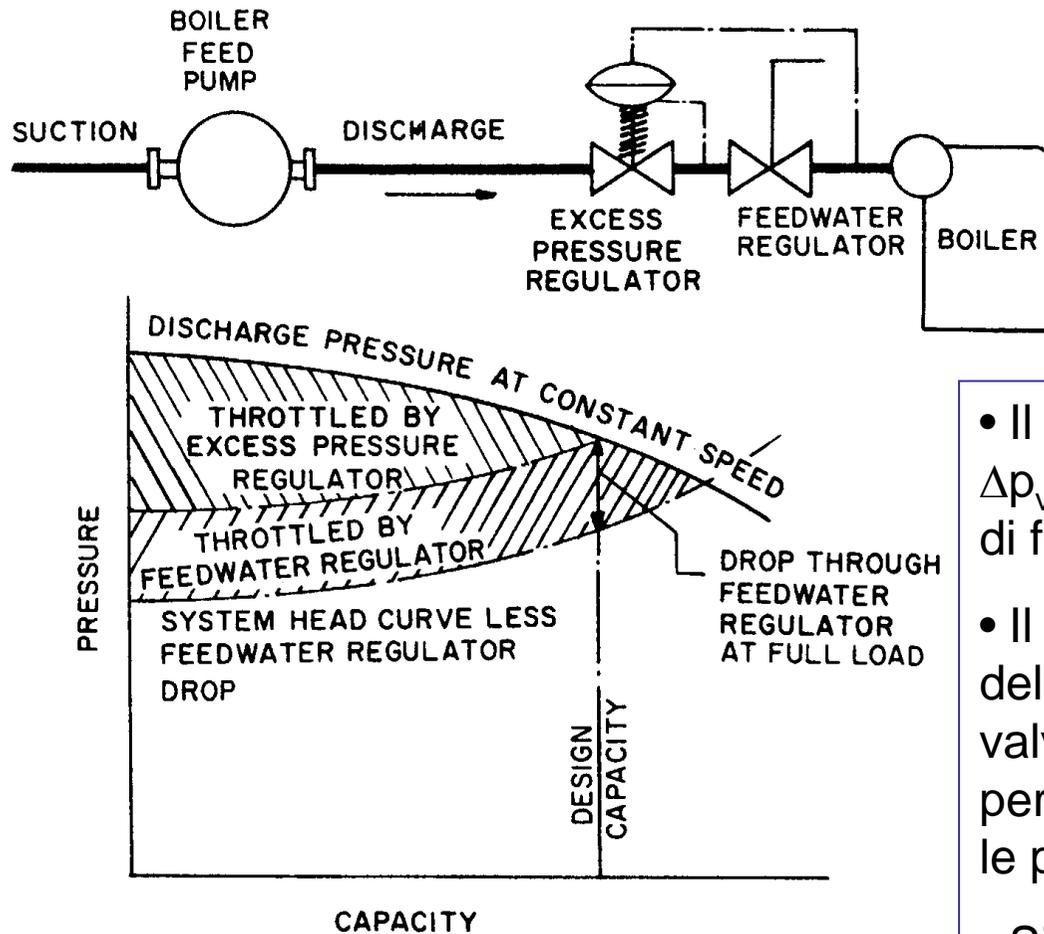


Fig. 23.6 Constant speed boiler feed pump controls.  
Feedwater regulator and excess-pressure regulator.

- Il regolatore differenziale mantiene  $\Delta p_v = \text{cost}$ , indipendentemente dal punto di funzionamento
- Il regolatore deve essere posto a monte della valvola di regolazione, vicino alla valvola stessa e lontano dalla pompa, per evitare che siano considerate anche le perdite di carico nel condotto
- Si sarebbe potuto scegliere di mantenere costante la pressione di alimentazione del boiler anziché  $\Delta p_v$

## Regolazione con pale orientabili

- Recentemente applicata a pompe
- Pre-whirl produce una variazione della prevalenza
- Pre-whirl va dato nel verso positivo (cioè concorde con quello delle pale; nel caso contrario si ha una riduzione del rendimento)

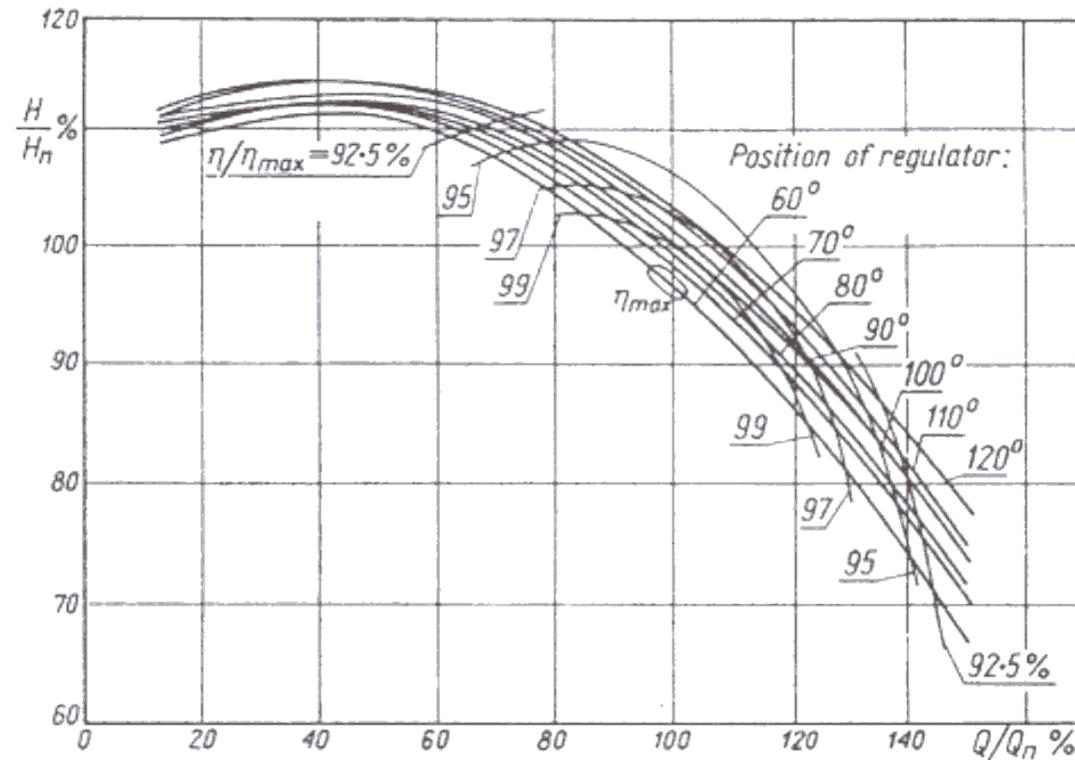


FIG. 2. Influence of pre-whirl on the characteristic of a centrifugal pump of specific speed  $n_{sQ} = 20.5$  ( $n_{sf} = 61.5$ ) (K. SAALFELD).

## Regolazione variando l'inclinazione delle pale

- Difficile e molto costoso

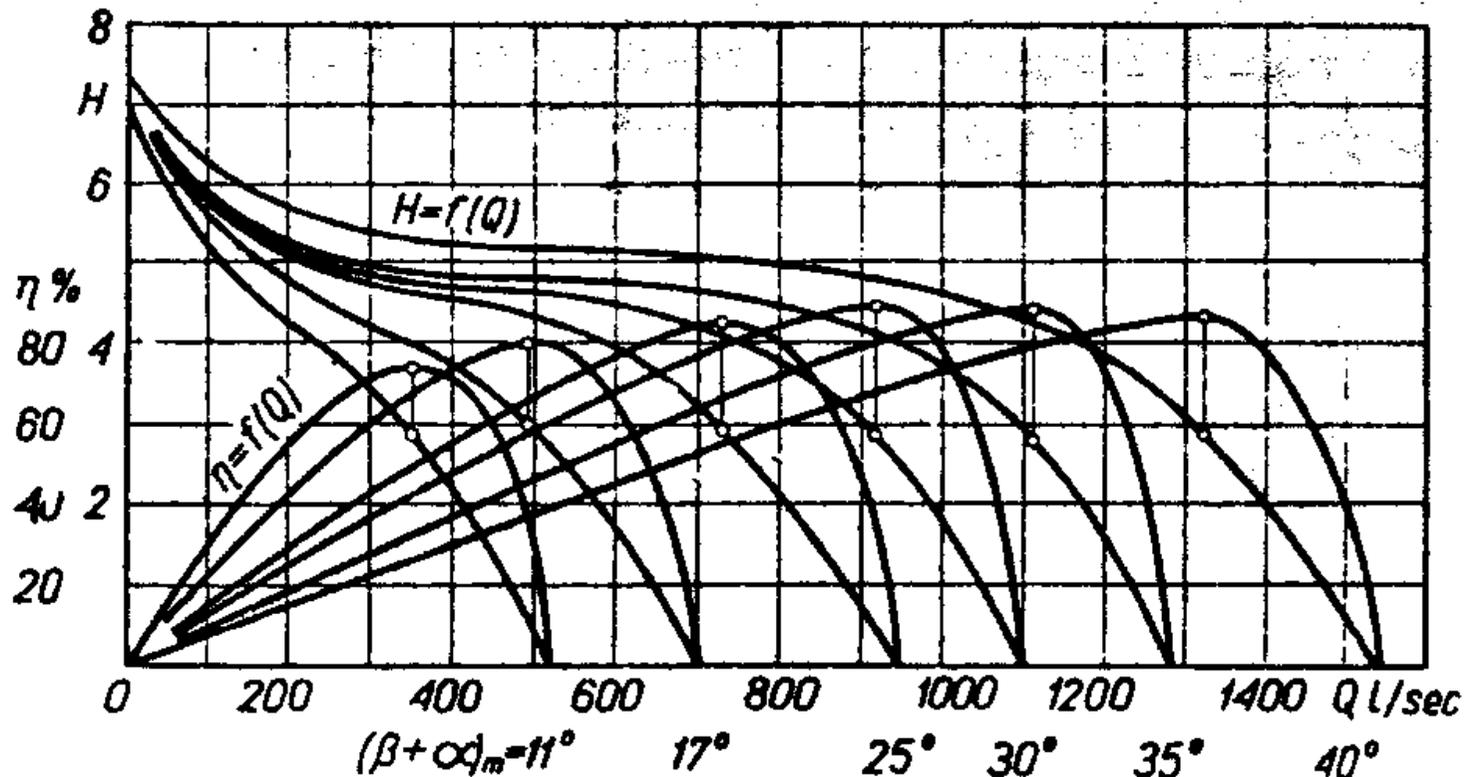
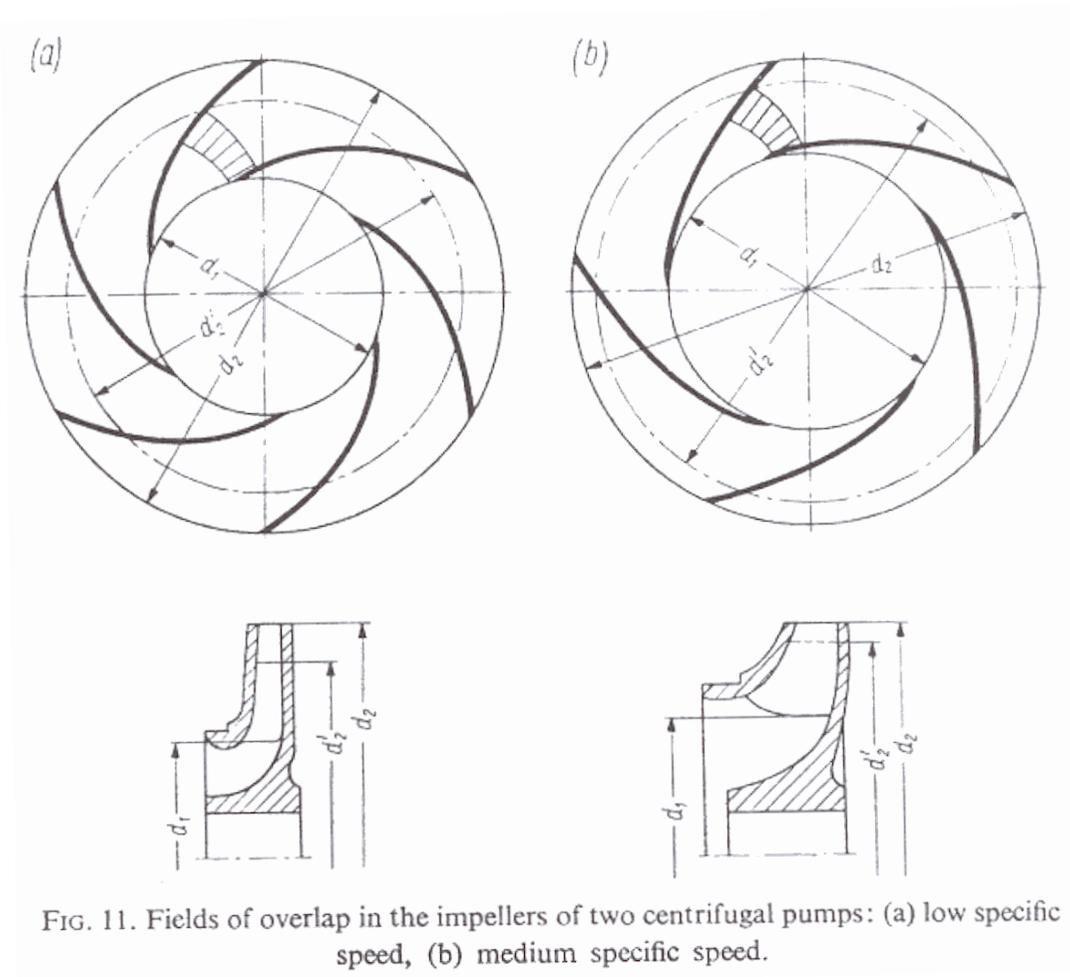


FIG. 10. Characteristics:  $H = f(Q)$  and  $\eta = f(Q)$  for various angles of blade inclination  $(\beta + \alpha)_m = 11^\circ, 17^\circ, 25^\circ, 35^\circ$  and  $40^\circ$  (A. SCHLIMBACH).

# Regolazione riducendo il diametro delle pale

- Si può ridurre anche del 20% (fino all'80% del valore di progetto)



$$d'_2 \approx d_2 \sqrt{\frac{Q'}{Q}} \approx d_2 \sqrt{\frac{H'}{H}}$$

## Regolazione variando la velocità di rotazione

- Se  $n$  cresce, sia la portata sia la prevalenza aumentano per fissato circuito ( $C \rightarrow C_3$ )
- È la regolazione più economica, perché non ci sono le perdite dovute allo strozzamento e la variazione di rendimento è di solito piccola
- La nuova velocità di rotazione si trova così:

- punto nominale  $C$
- si traccia la parabola  $H = \beta Q^2$  per  $A = \max H$  (cioè  $H_A = \beta Q_A^2$ )
- Similitudine  $\rightarrow$  curve a diverso  $n$  e massimi  $A_1, A_2, \dots$
- nuovi punti  $C_1, C_2, \dots$
- Sapendo  $n_1 : n_2 = Q_1 : Q_2$ , si trova la curva  $n = f(Q)$  che permette di trovare la  $n$  (corrispondente al punto  $D$ ) a cui deve ruotare la pompa per elaborare la portata desiderata (a pari curva del circuito)

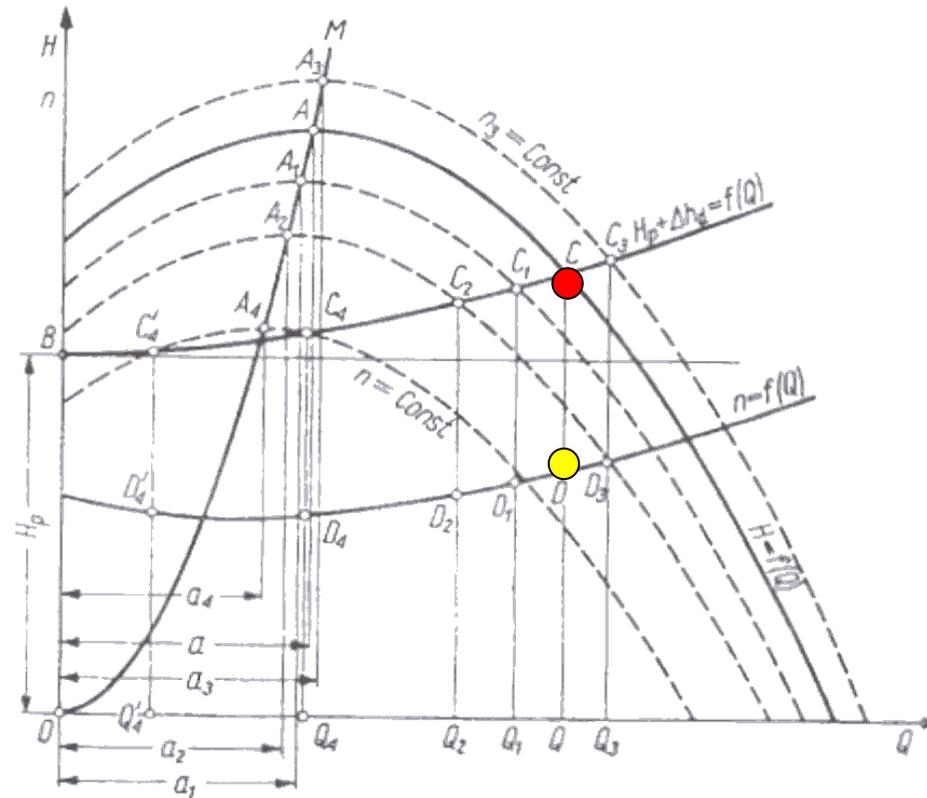


FIG. 14. Determining the speed of an impeller for changed operating conditions.

# Controllo di pompe con velocità variabile (1/3)

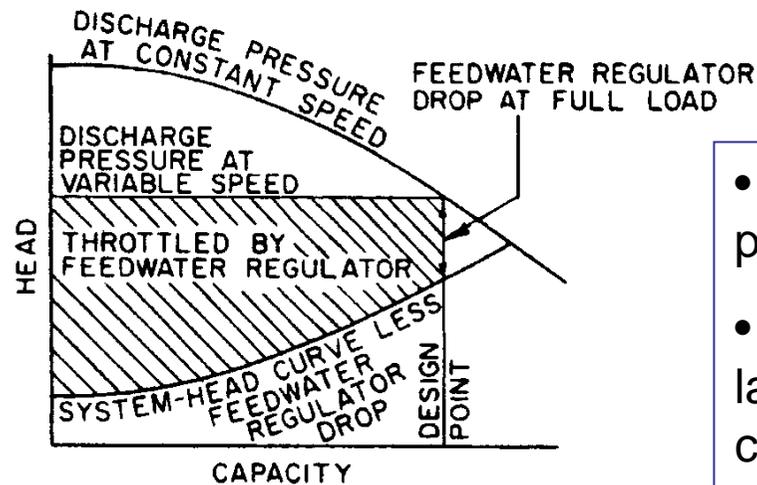
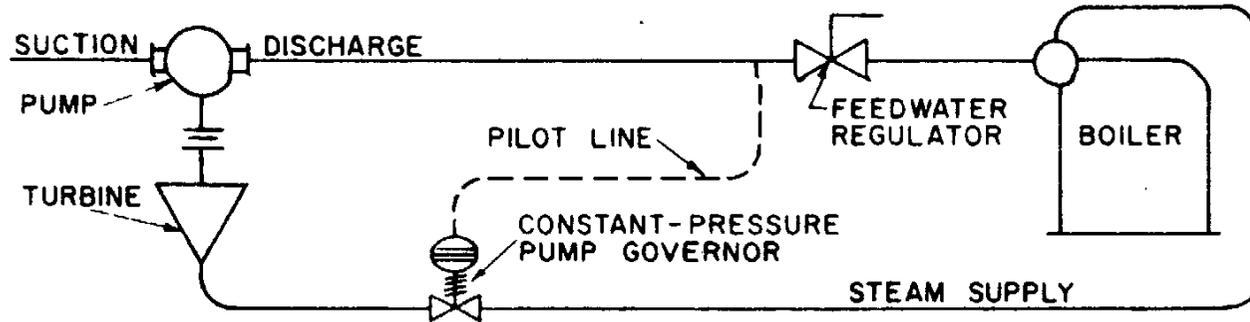
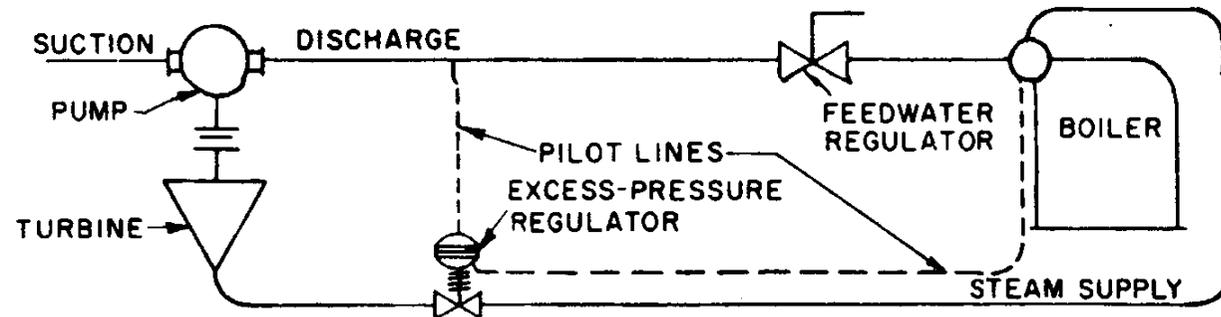


Fig. 23.7 Variable speed boiler feed pump controls.  
*Constant discharge pressure.*

- Velocità pompa = variabile, perché è trascinata dalla TV
- Una sola pilot line, che mantiene la pressione in ingresso alla TV costante, indipendentemente dal carico e dalla velocità della pompa

## Controllo di pompe con velocità variabile (2/3)



- Due pilot lines → regolatore di “eccesso” di pressione
- La velocità della pompa è variata in modo tale che la differenza fra la pressione alla mandata della pompa e quella nel boiler è mantenuta costante, indipendentemente dal carico
- La caduta di pressione nel regolatore non è costante, ma compensa la differenza fra la pressione alla mandata della pompa a diversi  $n$  e quella del circuito

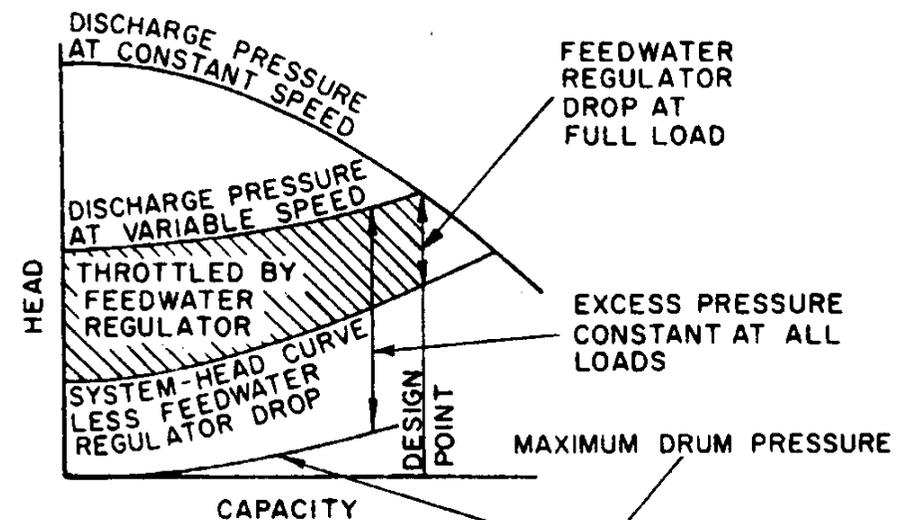


Fig. 23.8 Variable speed boiler feed pump controls.  
Constant excess over boiler pressure.

# Controllo di pompe con velocità variabile (3/3)

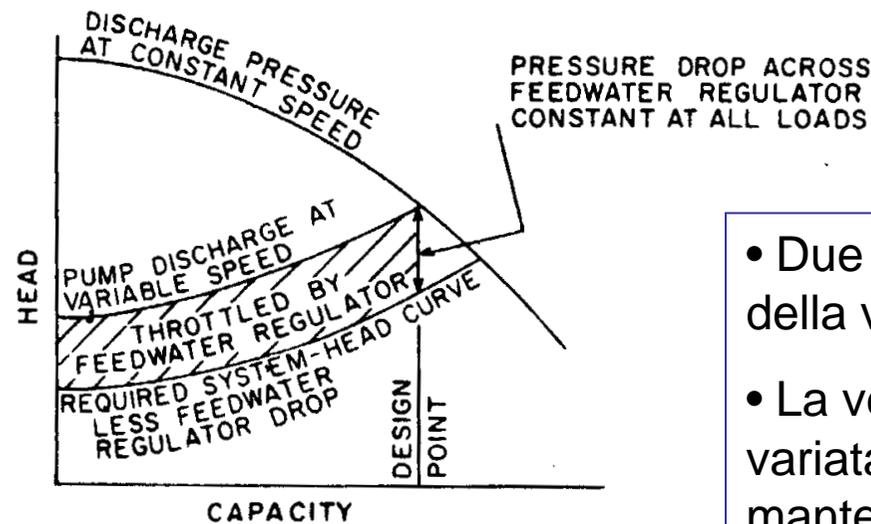
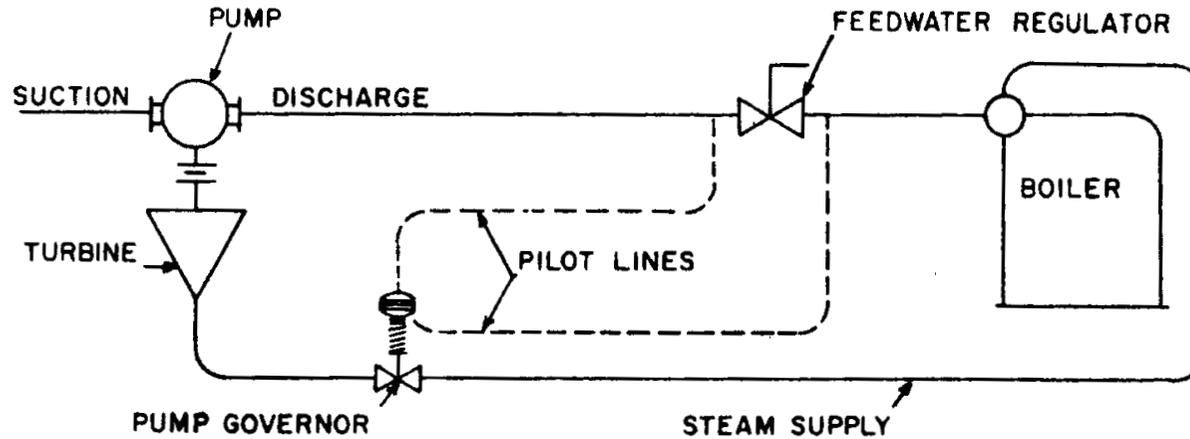


Fig. 23.9 Variable speed boiler feed pump controls.  
Constant pressure drop across feedwater regulator.

- Due pilot lines, a monte e a valle della valvola di regolazione
- La velocità della pompa è variata in modo che  $\Delta p_v$  sia mantenuta costante a tutte le velocità della pompa

## Due pompe in parallelo (stessa caratteristica)

- Caratteristica del parallelo: somma delle portate a pari prevalenza
- Ma,  $Q_{c2} < 2 Q_{c1}$  (la caratteristica del sistema è infatti prop.  $n^2$ )
- Se si regola, conviene agire solo su una pompa, visto che se  $Q \downarrow \Rightarrow \eta \downarrow$  (Infatti,  $Q_1 < Q_{c1}$ )

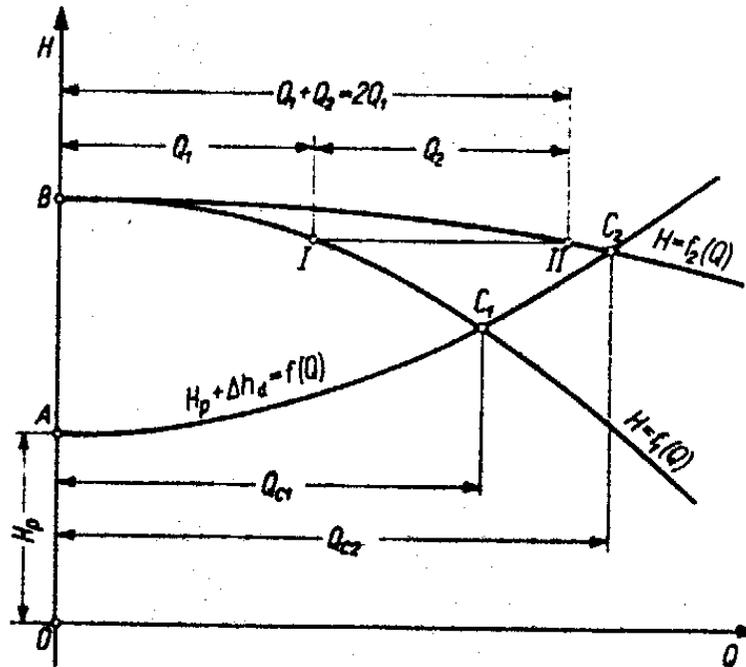


FIG. 24. Curves for the parallel operation of two pumps, with the same head–discharge characteristics, discharging into a common pipeline:  $H = f_1(Q)$  — individual head–discharge characteristic,  $H = f_2(Q)$  — combined head–discharge characteristic.

## Due pompe in parallelo (diversa caratteristica)

- $C_3$ : nuovo punto di funzionamento con prevalenza  $H_{c3}$
- Ma,  $Q_{d1} < Q_{c1}$  e  $Q_{d2} < Q_{c2} \rightarrow Q_{c3} = (Q_{d1} + Q_{d2}) < (Q_{c1} + Q_{c2}) \rightarrow \eta_1$  e  $\eta_2$

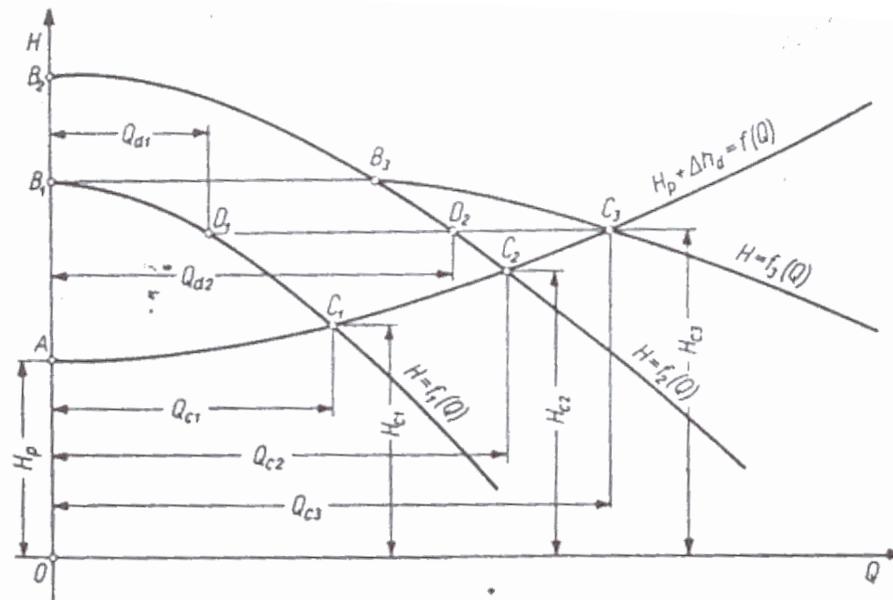


FIG. 25. Curves for the parallel operation of two pumps not having the same head-discharge characteristics;

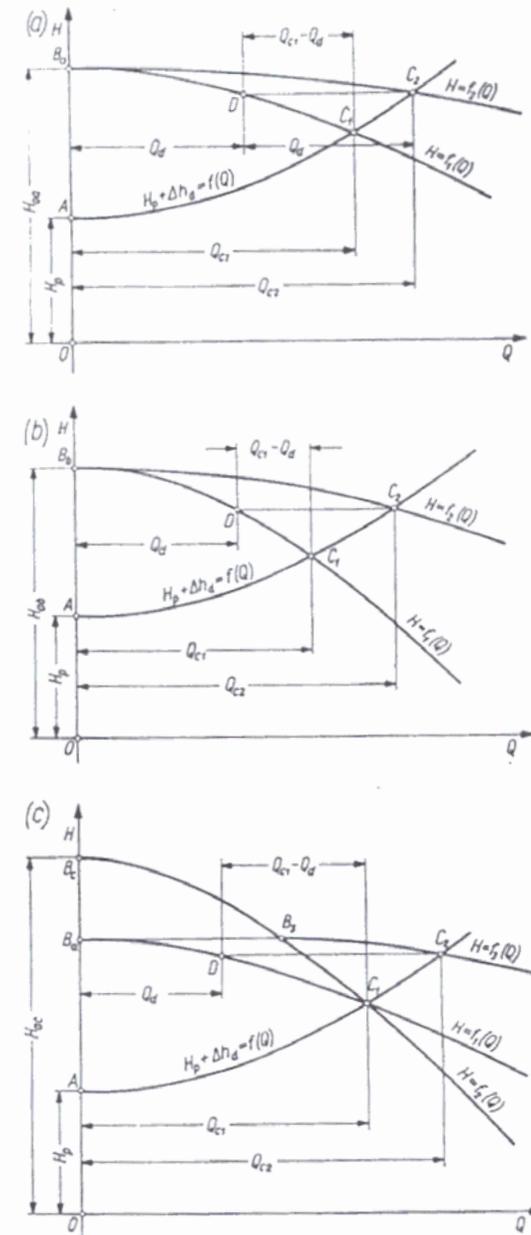
$AC_3$  — pipeline characteristic,  $B_1C_1$  — head-discharge characteristic for pump 1,  $B_2C_2$  — head-discharge characteristic for pump 2,  $B_2B_3C_3$  — combined head-discharge characteristic for both pumps,  $C_1$  — operating point for pump 1 working alone,  $C_2$  — operating point for pump 2 working alone,  $C_3$  — operating point for both pumps working in parallel discharging into a common pipeline with the characteristic  $AC_3$ ,  $D_1$  and  $D_2$  — points defining the operating conditions of each of the two pumps when working in parallel.

## Due pompe in parallelo (2 curve piatte e 2 ripide)

- $H_{0b} = H_{0a}$  (Fig. (a) e (b))
- $H_{0c} > H_{0a}$  (Fig. (c))
- $Q_{c1}$  è sempre lo stesso (Fig. (a), (b) e (c))
- Più sono piatte le curve, più si riduce la portata della singola pompa, cioè  $(Q_{c1} - Q_d)_a > (Q_{c1} - Q_d)_b$
- Il parallelo di due pompe (una piatta e una ripida) passanti per lo stesso punto  $C_1$  dà:  $(Q_{c1} - Q_d)_a < (Q_{c1} - Q_d)_c$
- Quindi, il parallelo di due pompe con diversa caratteristica porta la singola pompa a lavorare in punti operativi diversi, cioè con portata diversa

Infatti, dipende da come la portata totale si ripartisce tra le pompe a disposizione

FIG. 26. Curves for the parallel operation of pumps having flat and steep characteristics: (a) two pumps having identical flat characteristics, starting from the point  $B_a$  with the co-ordinate  $H_{0a}$ , (b) two pumps having identical steep characteristics starting from point  $B_b$  with the co-ordinate  $H_{0b} = H_{0a}$ , (c) two pumps, one of them with a flat characteristic  $H = f_1(Q)$ , starting from the point  $B_a$  and the other with a steep characteristic  $H = f_2(Q)$  starting from point  $B_c$  with the ordinate  $H_{0c} > H_{0a}$ . Both characteristics intersect the pipeline characteristic at the point  $C_1$ , defined by the same abscissa as in case (a).



## Due pompe in parallelo poste lontane

- $C_{II}$  = punto di funz. di  $P_{II}$
- La caratt. di  $P_I$  deve partire più in alto, perché  $P_I$  è posta + alta (è come se la pompa  $P_I$  fornisse una maggiore prevalenza) → sommare  $(h_{II}-h_I)$  →  $f'_I$
- Da qui, si tolgono le perdite da 1 a 2  $(\Delta h_d)_{12}$  →  $f''_I$

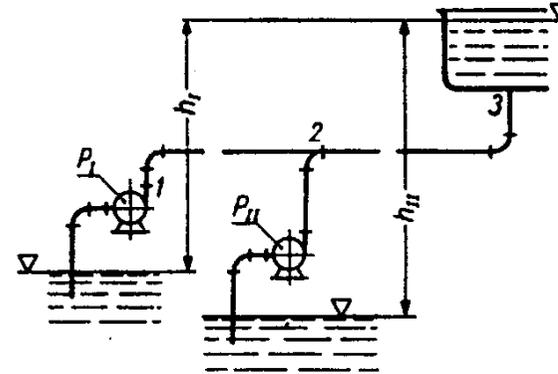


FIG. 27. Parallel operation of two pumps  $P_I$  and  $P_{II}$  situated at a considerable distance apart, discharging into a common pipeline 2-3.

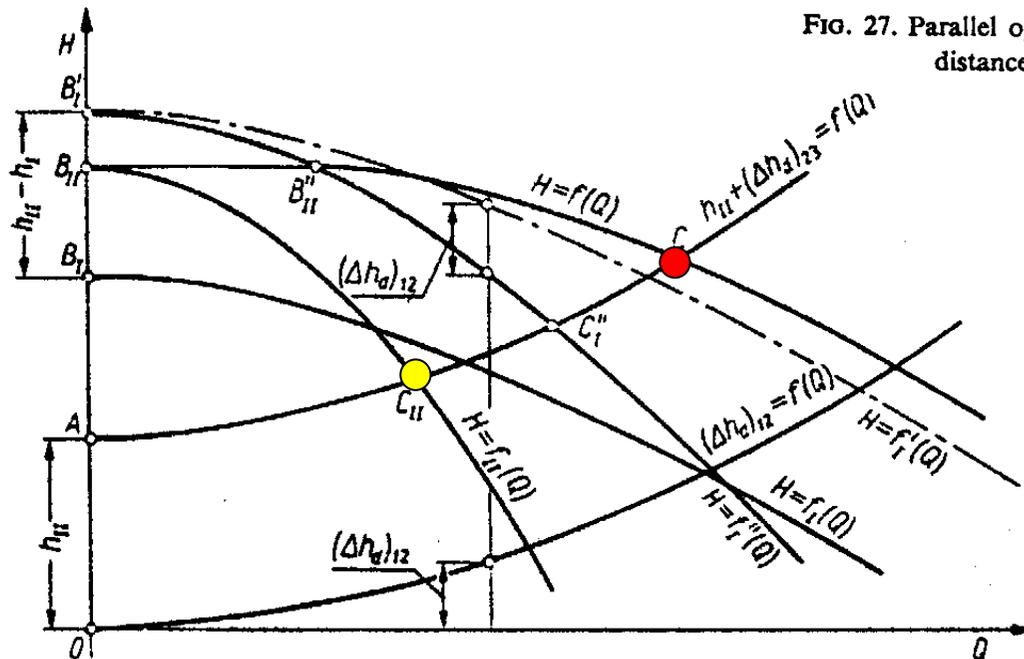


FIG. 28. Curves for the parallel operation of two pumps  $P_I$  and  $P_{II}$  with different characteristics, discharging into a common pipeline 1-2-3 at points 1 and 2 situated at a considerable distance apart.

- Parallelo di  $B_{II}C_{II}$  e  $B'_I C'_I$  →  $B'_I B''_{II} C$  → punto C
- Sono state trascurate le perdite da  $P_{II}$  a 2



## Parallelo di due condotte con diversa caratteristica

- Caratteristica del parallelo di condotte: somma delle portate a pari prevalenza
- $Q_I$  e  $Q_{II}$  sono le portate attraverso ogni condotto

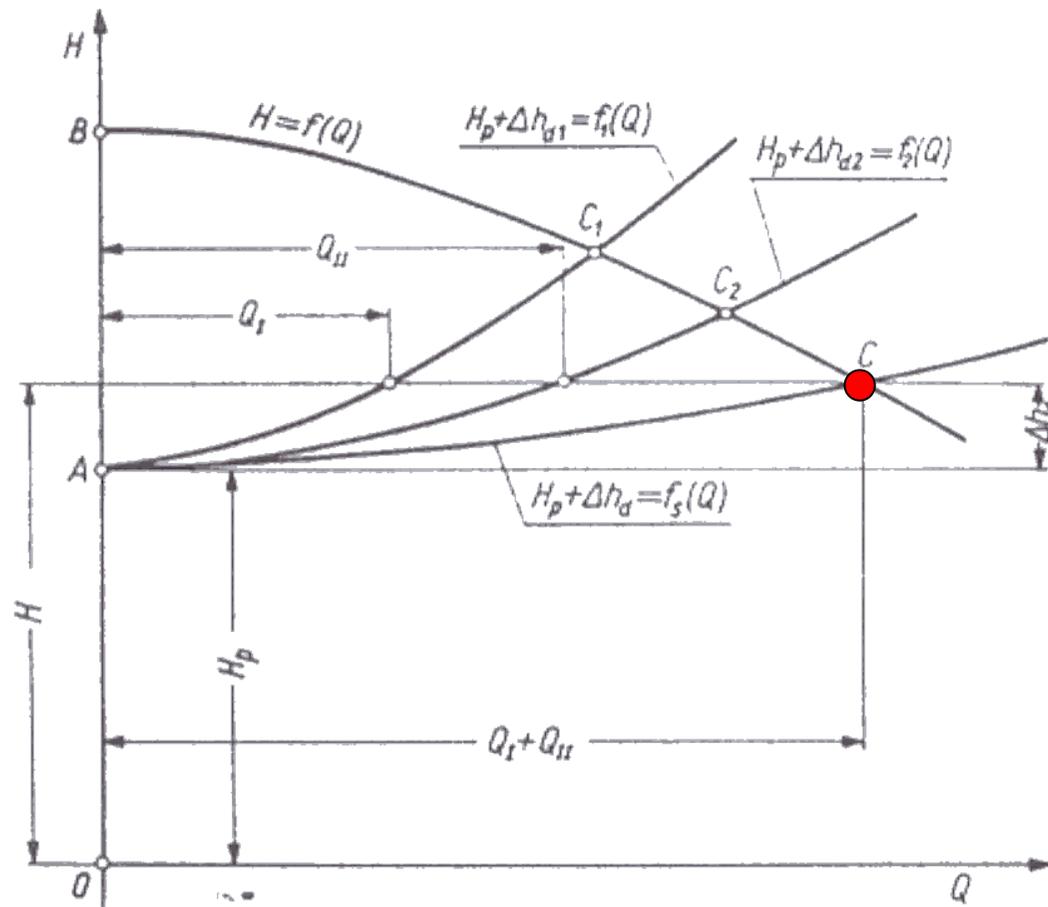


FIG. 31. Curves for the operation of a pump discharging through two parallel pipes with different characteristics.

## Esempio di due pompe in parallelo – una si ferma

- Se una pompa si ferma → il flusso si rovescia e funziona alla velocità di fuga
- Curva “total resistance”: è il parallelo di due circuiti (uno è il circuito “condenser” e l’altro è dovuto alla resistenza della pompa inattiva) → punto di lavoro del sistema C
- La pompa attiva è costretta ad elaborare il 129% di  $M_n$ , ma solo il 96.5% va al sistema (cioè il “condenser”). Il resto (32.5%) è dissipato dalla pompa inattiva
- La pompa inattiva lavora al 23% della prevalenza (punto D)

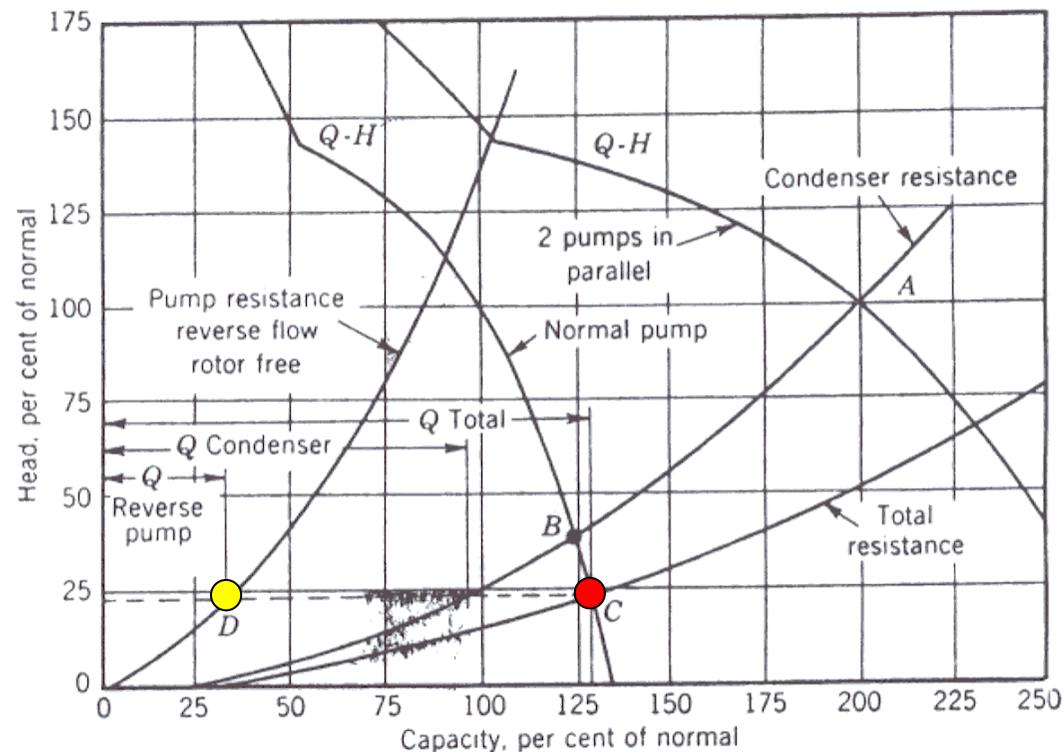


FIG. 13.9. Two pumps in parallel, power failure on one pump.

## Due pompe in serie (stessa caratteristica)

- Caratteristica di pompe in serie: si somma la prevalenza a pari portata
- Pompe in serie sono rare, perché si usano pompe multi-stadio:
  - miniere (piccola portata e alta prevalenza)
  - boiler
  - dislivello acqua
  - lunghe condotte (pompaggio)

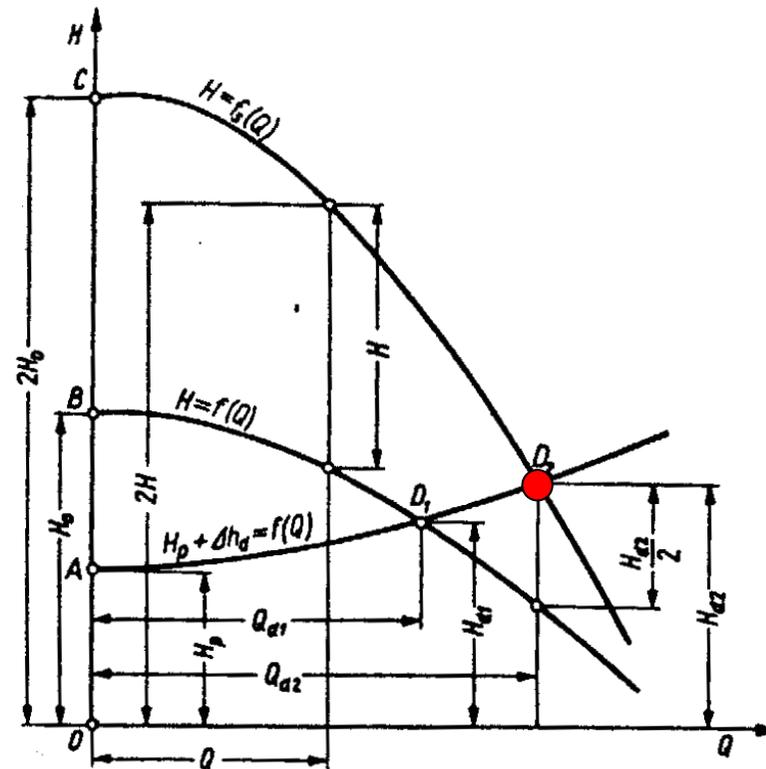


FIG. 30. Curves for the series operation of two pumps with the same head-discharge characteristics.

## Confronto fra diverse regolazioni

- Le diverse strategie di regolazione portano ad una diversa potenza richiesta a parità di portata elaborata, perché si hanno diverse prevalenze
- Quindi, è necessario valutare la strategia migliore, in funzione del punto di funzionamento della pompa

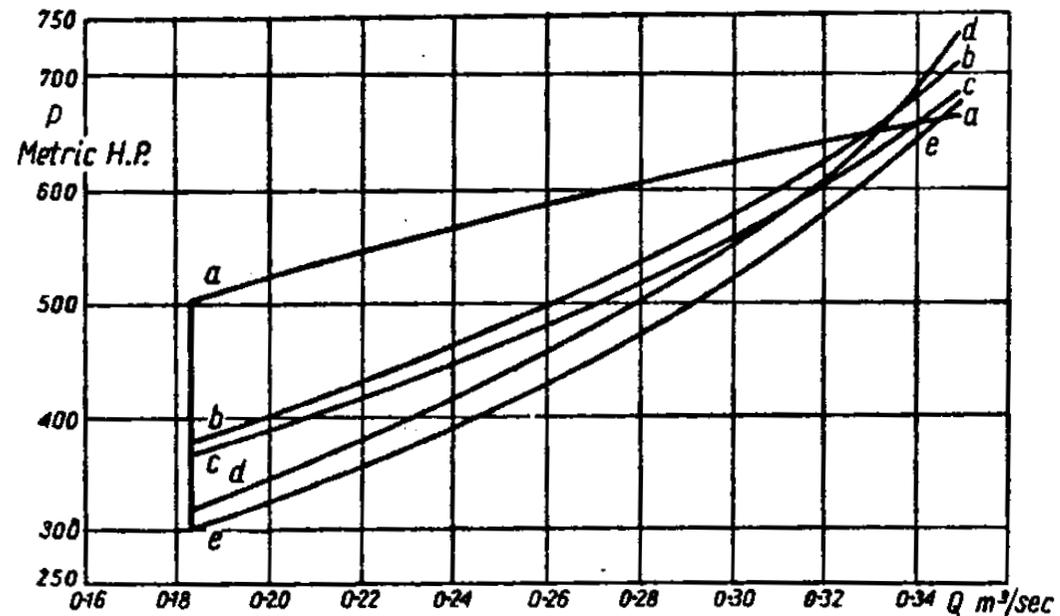


FIG. 15. Curves showing the relationship between the input power and the discharge of two double-entry pumps in series;

$H = 117$  m,  $n = 1800$  r.p.m.,  $a$  — regulation by throttling at  $n = \text{Const}$ ,  $b$  — regulation of the speed of the pump by means of a hydraulic coupling mounted between the pump and a synchronous motor,  $c$  — regulation by varying the speed of a commutator motor,  $d$  — regulation by varying the speed of a d.c. motor by means of a rectifier and an a.c. supply,  $e$  — regulation using a gearbox of constant efficiency, driven by a synchronous motor (C. A. RICHARDSON).

## 3. Interazione motore – turbomacchina

- a) I motori primi delle turbomacchine (curve caratteristiche coppia-velocità)

- **Motore elettrico (il più usato è il motore ad induzione a corrente alternata)**
  - semplice, facile da installare, affidabile
  - velocità costante! (ma si può connettere con un dispositivo per la variazione della frequenza di alimentazione oppure una trasmissione a rapporto di trasmissione variabile)
  
- **Motore a combustione interna**
  - motori di emergenza o stand-by (zone non elettrificate, metano da biogas)
  - velocità variabile, ma in un range limitato
  - Pompe di mezzi antincendio
  - Alimentazione ausiliaria (in caso di mancanza di alimentazione elettrica)
  - Installazioni fisse (drenaggio, irrigazione)

## Immagini di MCI (1/2)

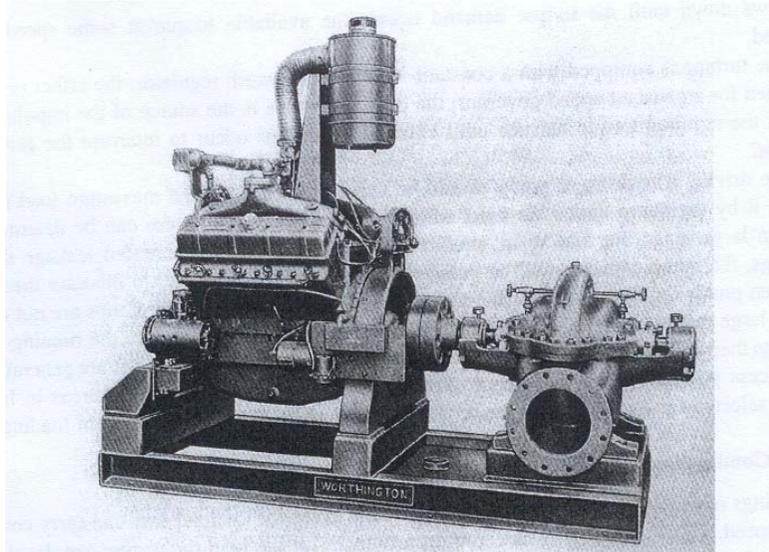


Fig. 24.1 Gasoline engine.

*This type is often employed as a fire pump driver and for other standby applications.*

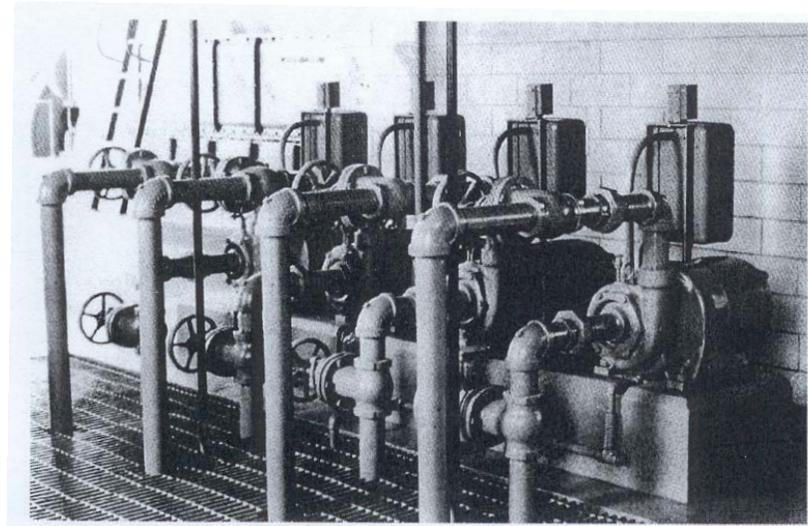


Fig. 24.7 Small-size motor-mounted pump.

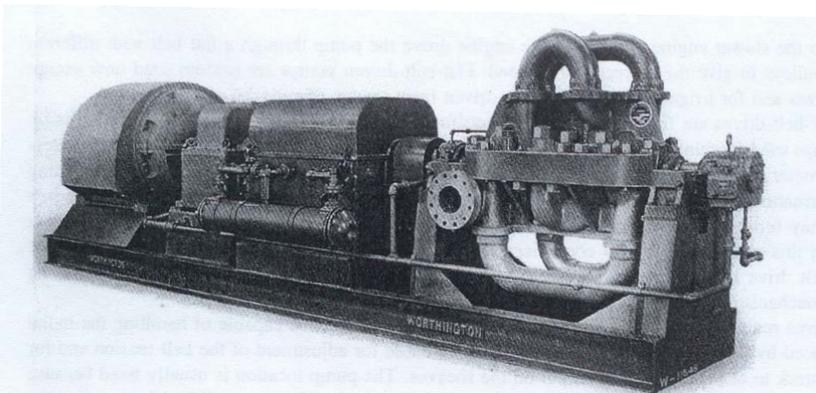


Fig. 24.5 High-pressure high-speed boiler feed pump.

*Step-up gear permits a 1,450-rpm motor to drive pump at 3,800 rpm, through a fluid drive that gives variable-speed control.*

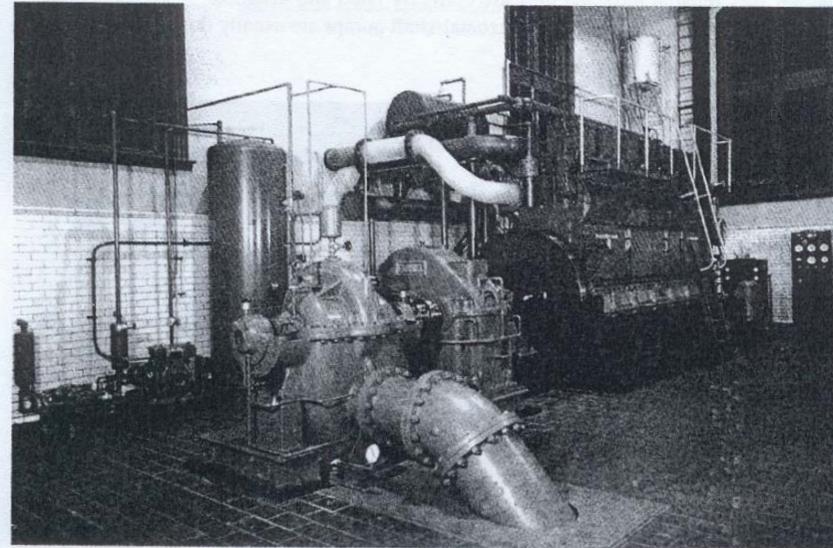


Fig. 24.6 Pump installation driven by slower speed diesel engine through a step-up gear.

## Immagini di MCI (2/2)

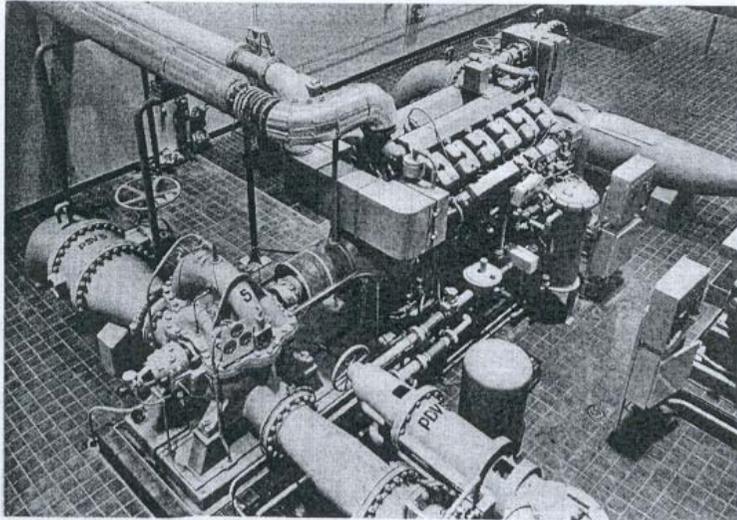


FIG. 1 Natural gas engine driving a horizontal water pump for Winnipex, Canada, water utility. (Waukesha Motor)

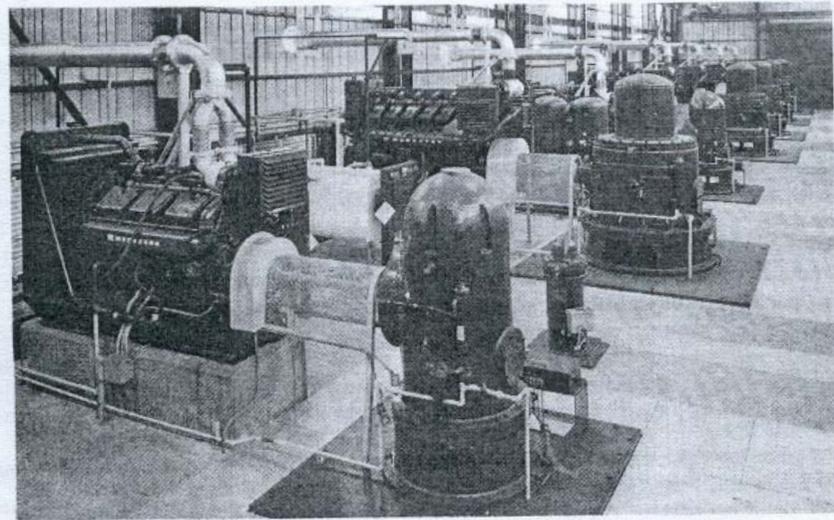


FIG. 2 Diesel engine driving pumps for flood-control station in Seattle. (Waukesha Motor)

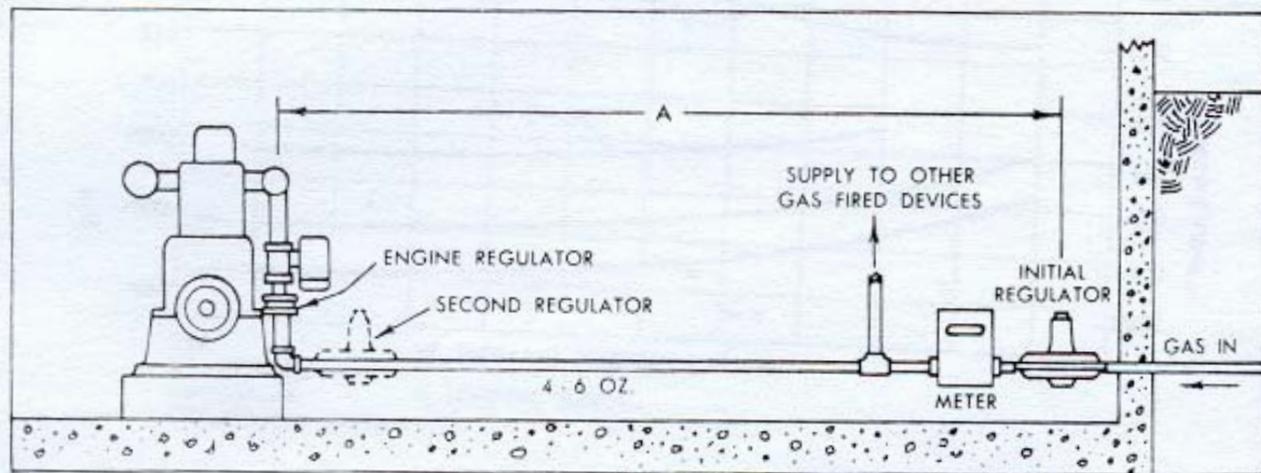
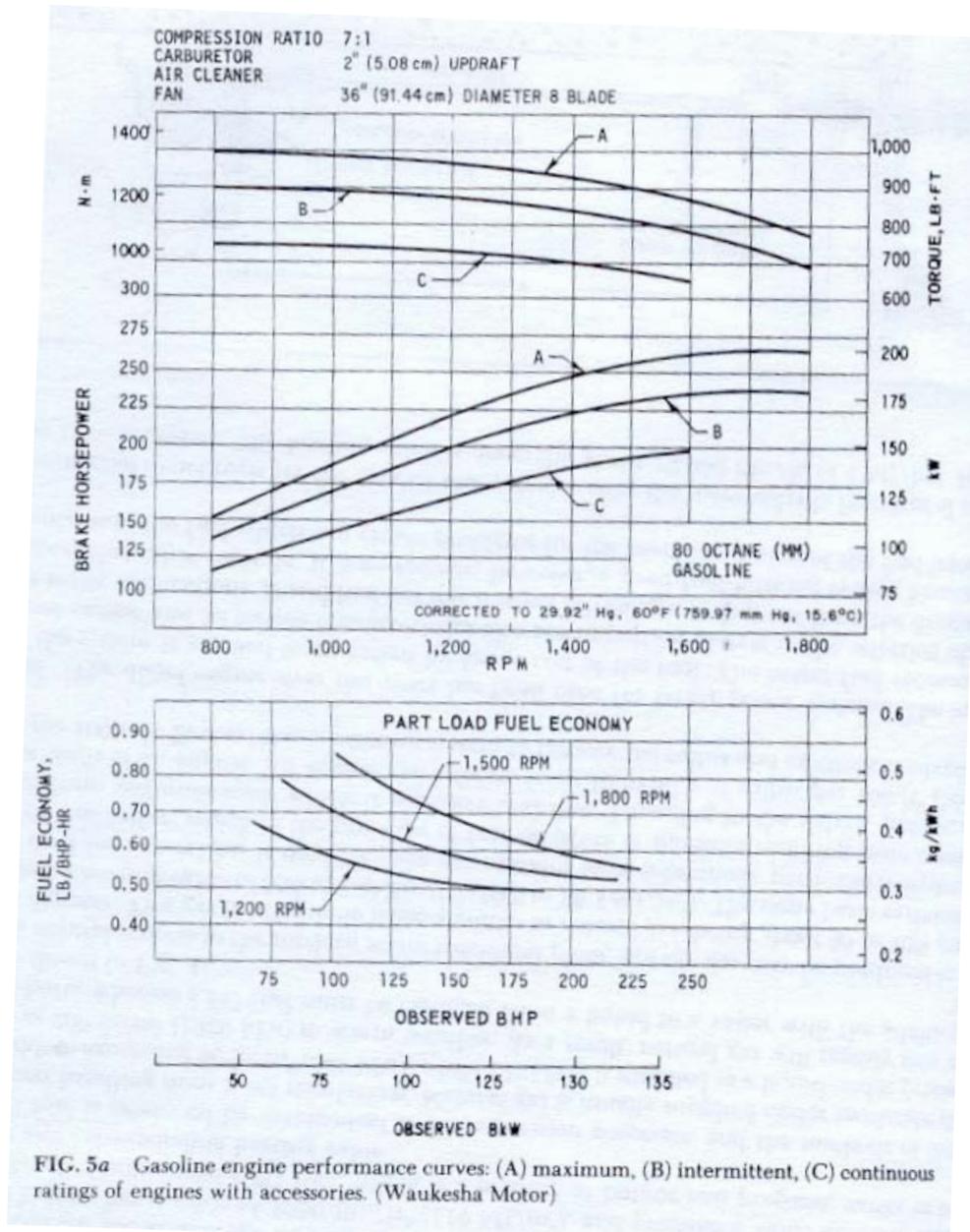


FIG. 3 Typical natural gas fuel system. (Waukesha Motor)

# Curve di prestazione di MCI (1/3)



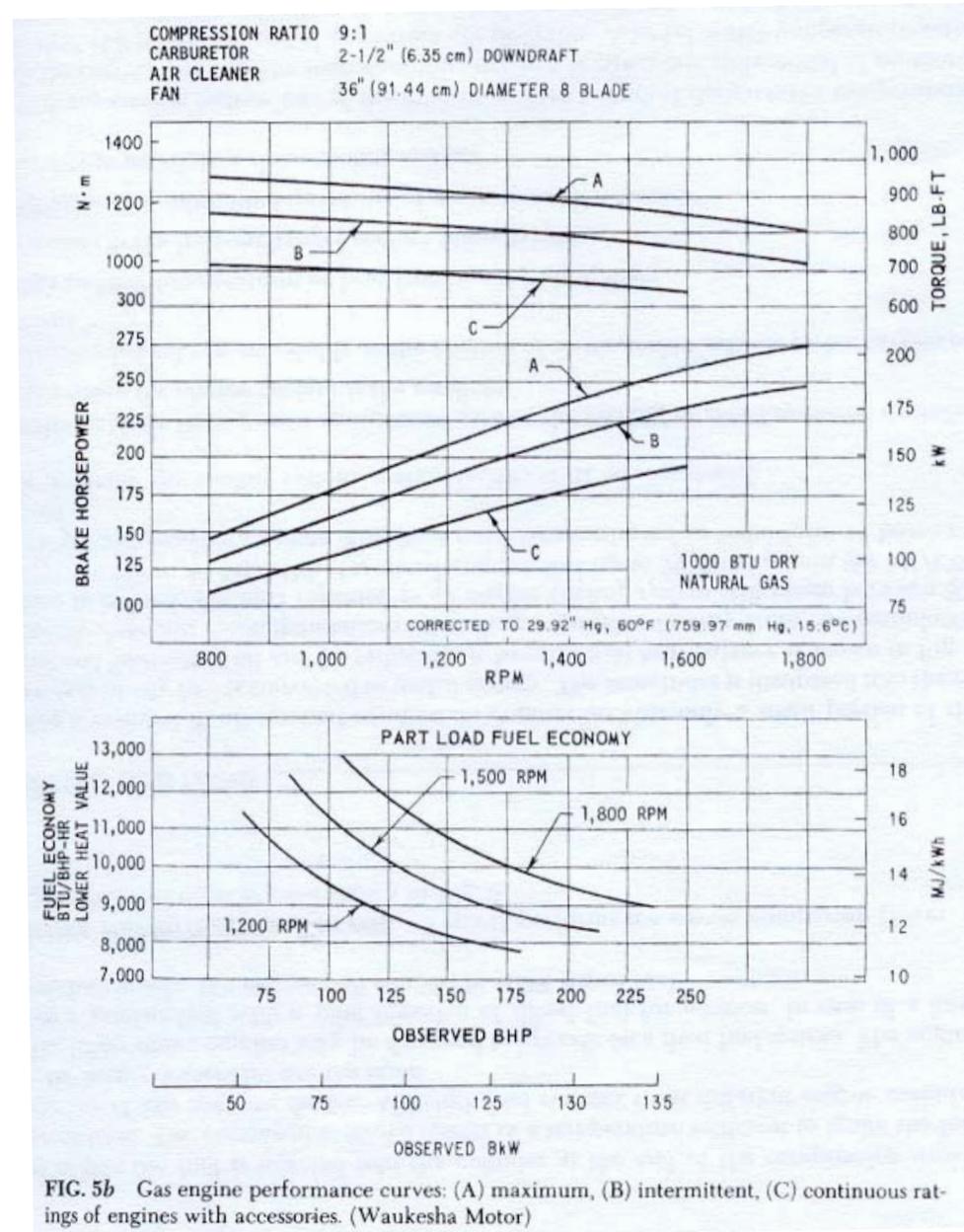
Tipo di funzionamento

- A = massimo
- B = non continuo
- C = continuo

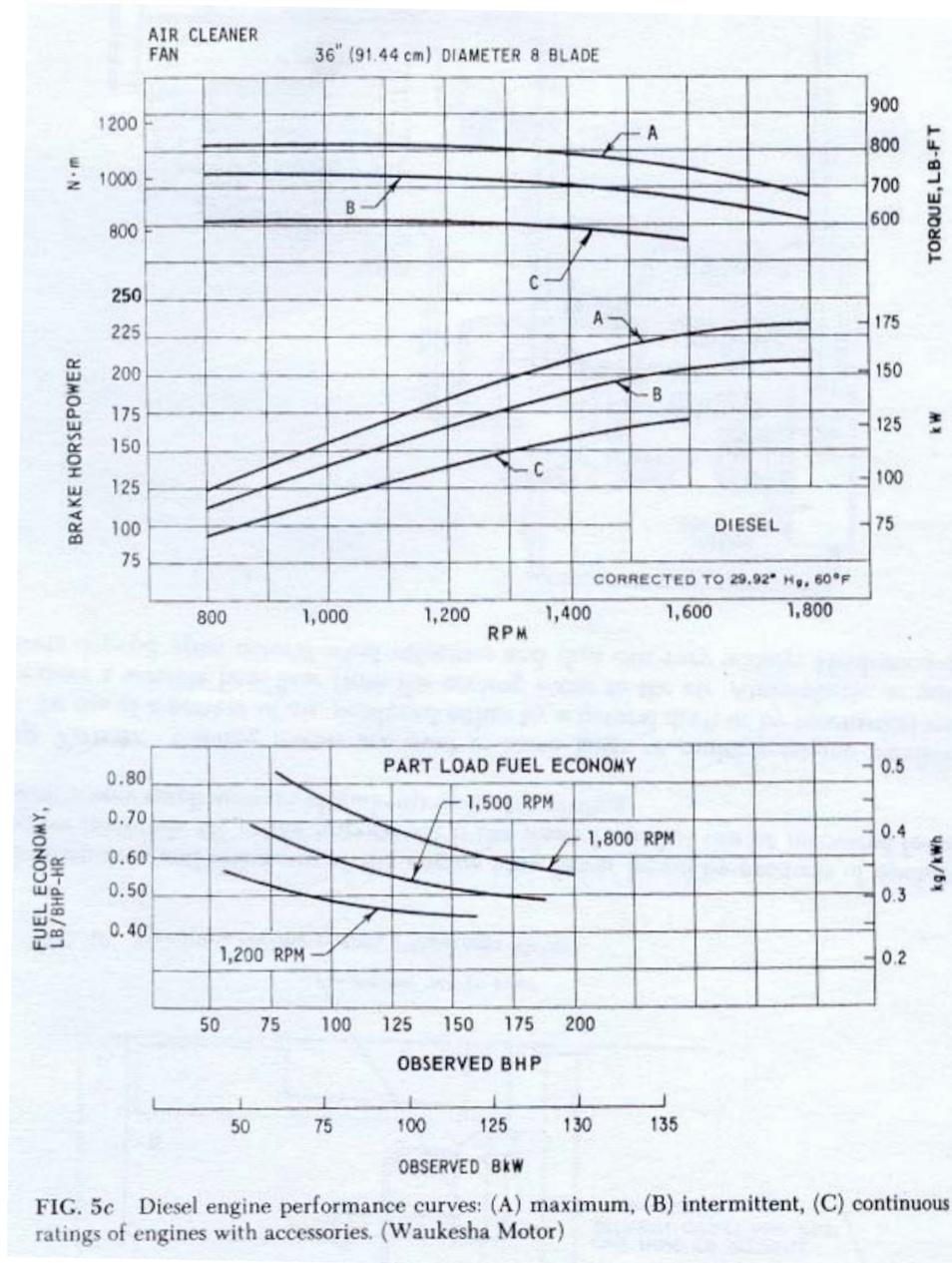
Consumo  
 specifico  $q$

$$q = \frac{M_{fuel}}{P_b} \left[ \frac{\text{kg/s}}{\text{kW}} \right] = \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right]$$

# Curve di prestazione di MCI (2/3)



# Curve di prestazione di MCI (3/3)



- **Turbina a vapore**

- vapore già disponibile
- motori di emergenza o stand-by
- velocità variabile
- grandi potenze ( $> 7.5$  MW) - fornitura per città, industria, ...

- **Turbina a gas**

- motori di emergenza o stand-by (zone non elettrificate, raffinerie)
- potenze grandi ( $>$  di quelle dei MCI)
- velocità variabile, ma in un range limitato

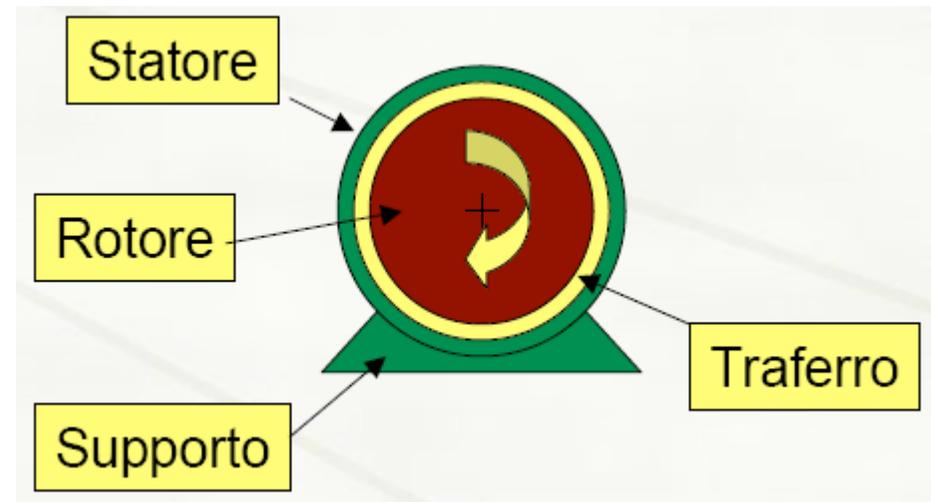


# Motore elettrico

- Motore asincrono
- Motore sincrono
- Motore a corrente continua
- Sistemi composti da diversi motori elettrici (si può variare la velocità, ma costosi)
- Motori lineari (spostamento lineare, non rotazionale)

- Qualunque motore elettrico sfrutta l'interazione tra campi magnetici per la generazione di coppia

- Questi possono essere generati da magneti (o elettromagneti) o indotti (su materiale ferromagnetico immerso in un campo magnetico)



## **Motore elettrico asincrono**

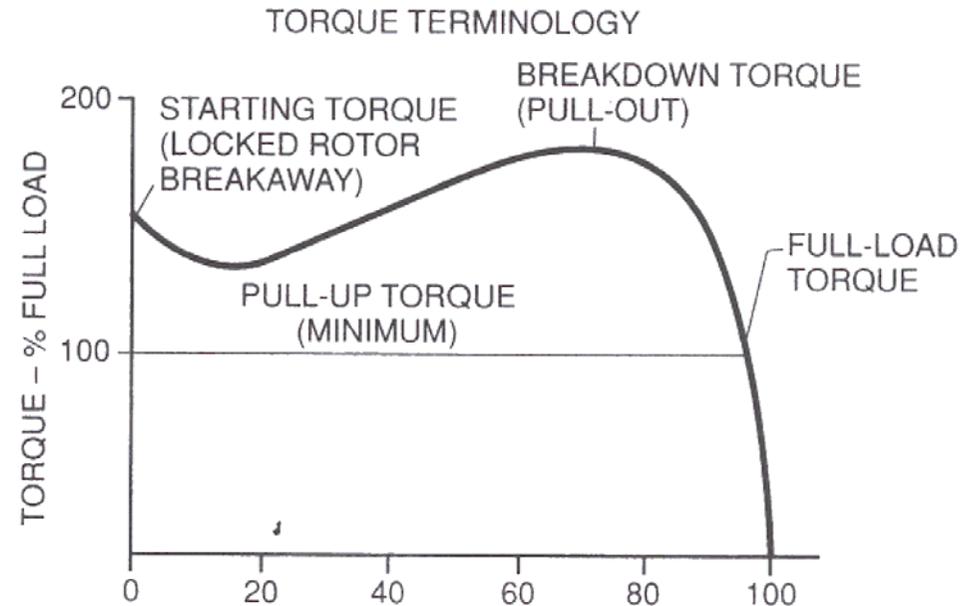
- Semplice e assai diffuso
- Può ruotare in entrambi i versi (non sempre)
- Velocità di rotazione fissata (ma, con opportuni accorgimenti, si può variare)

## **Motore elettrico sincrono**

- Adatto per potenze “grandi” ( $> 500$  kW)
- Permette la correzione del  $\cos\phi$  della linea, agendo sulla corrente di eccitazione
- Velocità di rotazione costante ed indipendente dal carico
- Più difficile da gestire
- Molto più costoso del motore asincrono
- Non può essere sovraccaricato → il dimensionamento deve essere opportuno

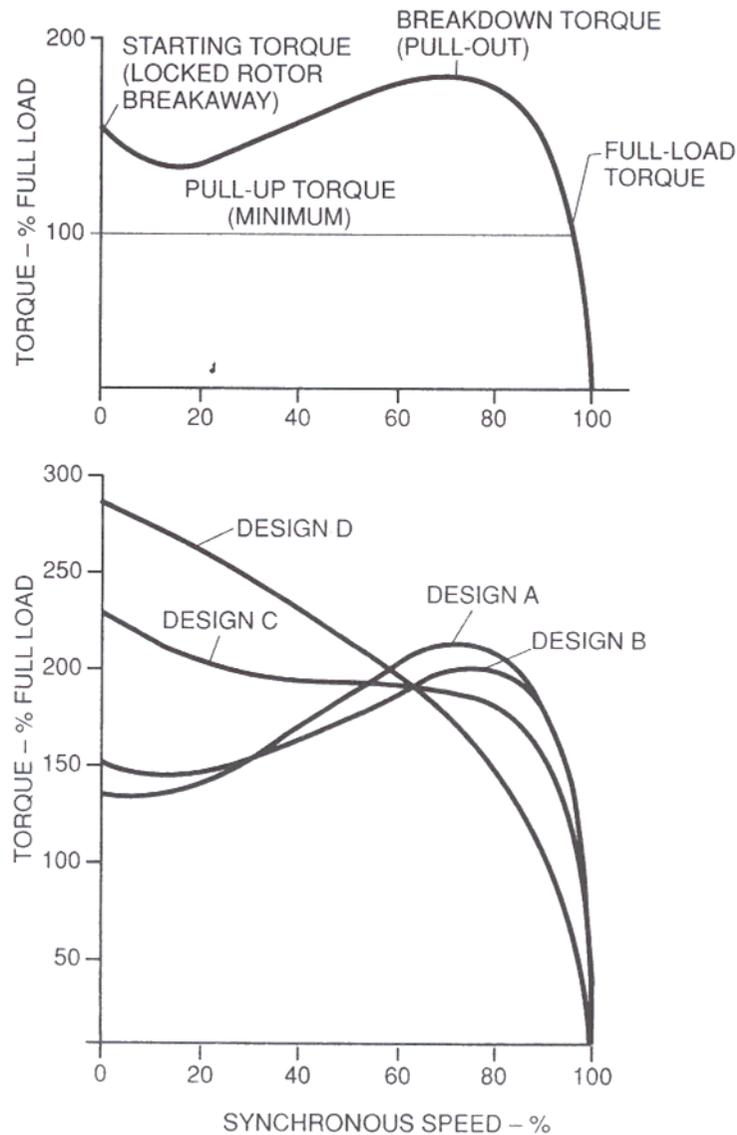
## **Motore a corrente continua**

- La velocità di rotazione può essere regolata facilmente
- Rarissime applicazioni (marine, laboratori), dove la corrente continua è disponibile



- **Starting Torque (Locked-Rotor Breakaway)**: coppia sviluppata dal motore allo spunto, in corrispondenza del voltaggio e della frequenza del motore
- **Pull-Up Torque**: coppia minima sviluppata dal motore nella accelerazione da fermo alla velocità nominale
- **Pull-Out Torque**: coppia massima senza che si verifichi un brusco calo di velocità oppure coppia che un motore sincro può produrre alla velocità di rotazione sincro

# Curve caratteristiche



Di solito, le pompe centrifughe non richiedono grande coppia di spunto

- B: coppia normale, corrente bassa
- A: coppia normale, corrente normale (con dispositivo riduttore di voltaggio)
- C: coppia alta, corrente bassa
- In generale, la coppia è proporzionale al quadrato della tensione applicata

$$(T_m)_{as} \propto V^2$$

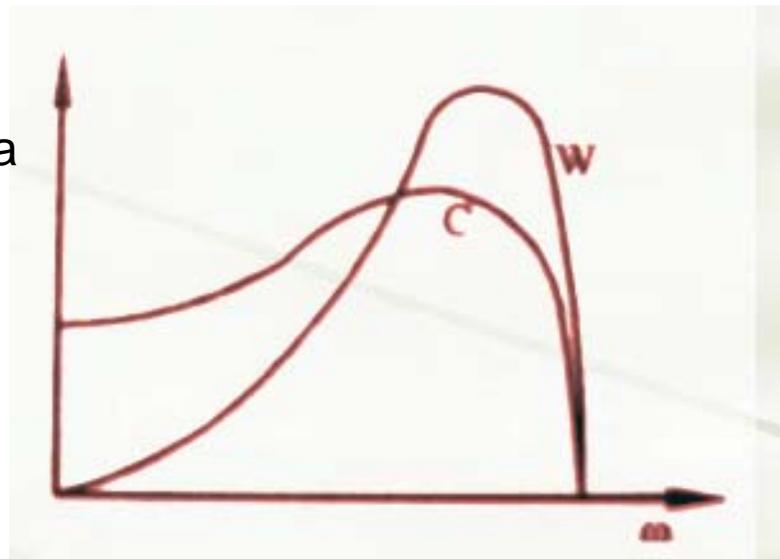
Fig. 24.11 Typical speed-torque characteristics of squirrel-cage induction motors standardized by NEMA.  
(After Westinghouse Electric Corp.)

# Motore asincrono ad induzione

- Il rotore, che monta degli avvolgimenti in cortocircuito, è immerso in un campo magnetico rotante, con distribuzione al traferro sinusoidale. Il campo rotante può essere generato con almeno due avvolgimenti, pilotati con correnti sinusoidali opportunamente sfasate nel tempo
- La corrente di alimentazione ha pulsazione  $\omega_0$
- La coppia è proporzionale al quadrato della tensione applicata  $(T_m)_{as} \propto V^2$
- $T_{\max} \cong (2 \div 3) T_{\text{nominale}}$  (reostato all'avvio)
- L'ottimizzazione della curva di coppia si può ottenere "sommando" più motori

C = Coppia

W = Potenza



# Velocità di rotazione asincrona

- La velocità di rotazione sincrona è  $n_0$
- La velocità di rotazione di un motore asincrono a pieno carico è MINORE di  $n_0$  di 1.5-6.0% (scorrimento detto “slip”)
- Esempio (  $f = 50$  Hz ; slip = 2%;  $p$  = numero coppie polari):
  - $p = 1 \rightarrow n_0 = 3000$  rpm;  $n_{as} = 2940$  rpm
  - $p = 2 \rightarrow n_0 = 1500$  rpm;  $n_{as} = 1470$  rpm
  - $p = 4 \rightarrow n_0 = 750$  rpm;  $n_{as} = 735$  rpm

$$n_0 = \frac{60f}{p}$$

- Motori a bassa velocità hanno coppia di spunto maggiore e minori correnti all'avviamento
- Ma hanno minore efficienza e sono più pesanti (+ costosi)
- Di solito, si usano motori più veloci possibile

Table 24.2 Synchronous Speeds for 60-, 50-, 40-, 30- and 25-Cycle Motors

Motor poles	60 cycles	50 cycles	40 cycles	30 cycles	25 cycles
2	3,600 rpm	3,000 rpm	2,400 rpm	1,800 rpm	1,500 rpm
4	1,800	1,500	1,200	900	750
6	1,200	1,000	800	600	500
8	900	750	600	450	375
10	720	600	480	360	300
12	600	500	400	300	250
14	514	428	343	257	214
16	450	375	300	225	187
18	400	333	267	200	
20	360	300	240		
22	327	272	218		
24	300	250	200		
26	277	231			
28	257	214			
30	240	200			
32	225				
36	200				

# Motore elettrico asincrono a gabbia di scoiattolo

- Range di potenza variabile: da 200 kW (alim. 500 V) a 1 MW (alim. 3000-6000 V)
- $T$  allo spunto = 1.5-2.0  $T_n$  → avviamento anche con valvola di mandata aperta
- $I$  allo spunto = 5x  $I_n$
- Velocità di rotazione non regolabile

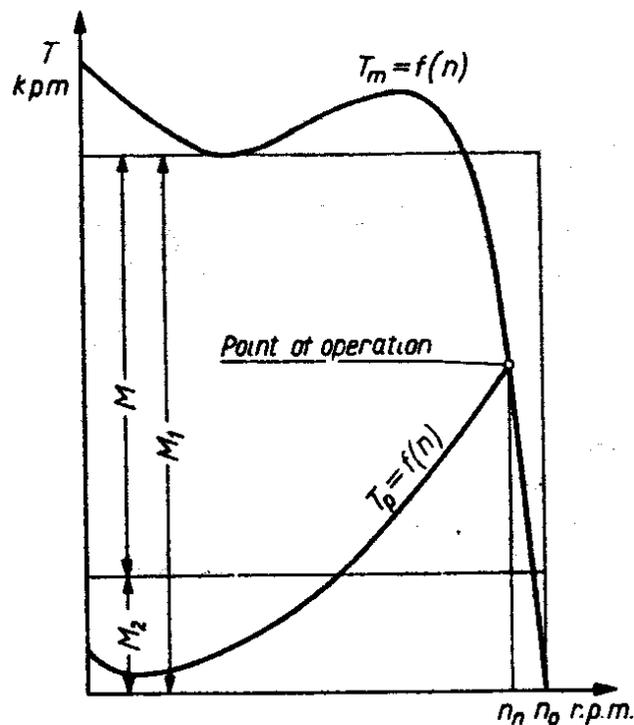


FIG. 2. Speed-torque characteristics of a delta-connected squirrel-cage motor  $T_m = f(n)$  and a centrifugal pump  $T_p = f(n)$ , when started with delivery valve open.

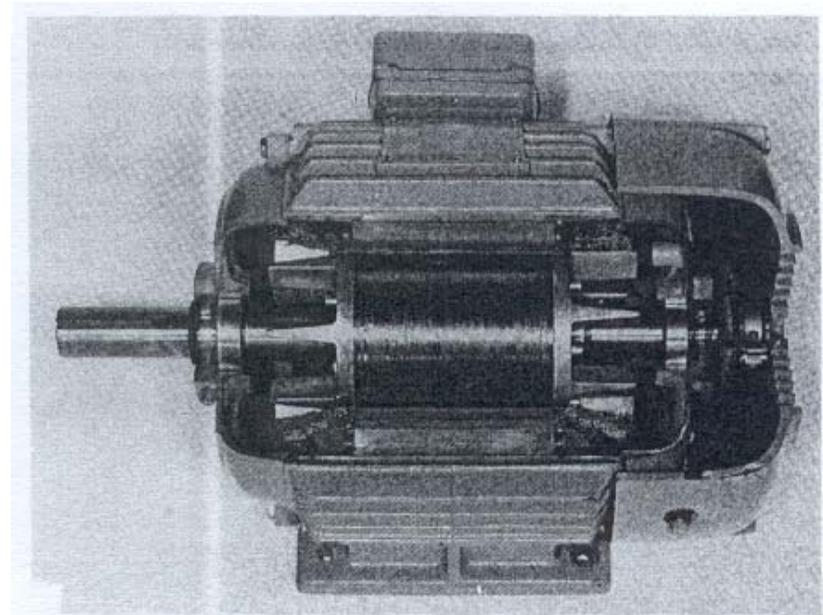


FIG. 1 Cross section of typical squirrel-cage induction motor. (Westinghouse Electric)

## ***Regolazione del motore asincrono***

- **Regolazione della tensione**

( $T_m \text{ prop. } V^2$ ; quindi,  $V \uparrow \rightarrow T_m \uparrow \rightarrow$  aumenta la velocità di regime, a pari  $n_0$ )

- **Regolazione della frequenza**

(aumentando  $f$ , la coppia max si ha in corrispondenza di  $n$  maggiori perché cresce  $n_0$ , ma la coppia max è minore)

- **Regolazione della tensione + frequenza**

(si può ottenere una curva di coppia simile a quella di un motore c.c.)

- **Variazione della resistenza rotorica**

(varia la coppia di spunto)

- **Variazione del numero di poli**

(in luoghi isolati, ma variazione a step; sono poco diffusi)

- **Controllo vettoriale**

(variazione dell'orientazione del vettore del campo rotorico)

## Rendimento e $\cos\varphi$

- Rendimento costante su un campo di funzionamento ampio (ottimo!)
- $\cos\varphi$  varia molto (a basso carico la potenza è bassa  $\rightarrow$  il motore deve avere una riserva grande)
- Sia il rendimento sia il  $\cos\varphi$  sono max a pieno carico

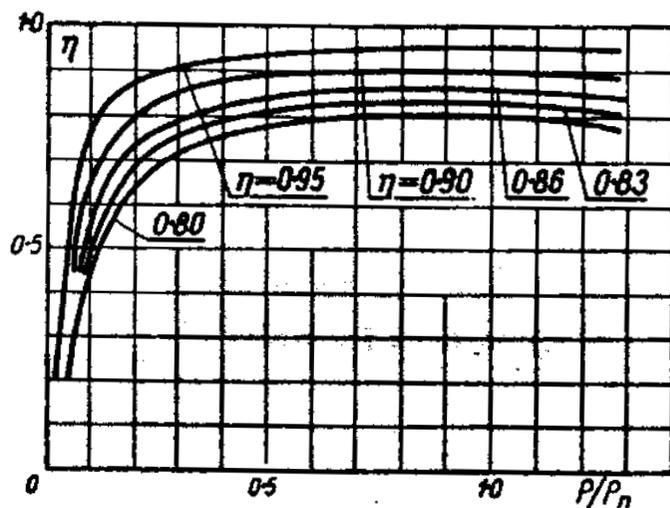


FIG. 4. Relation between the efficiency and load on induction motors with various nominal efficiencies and the degree of loading.

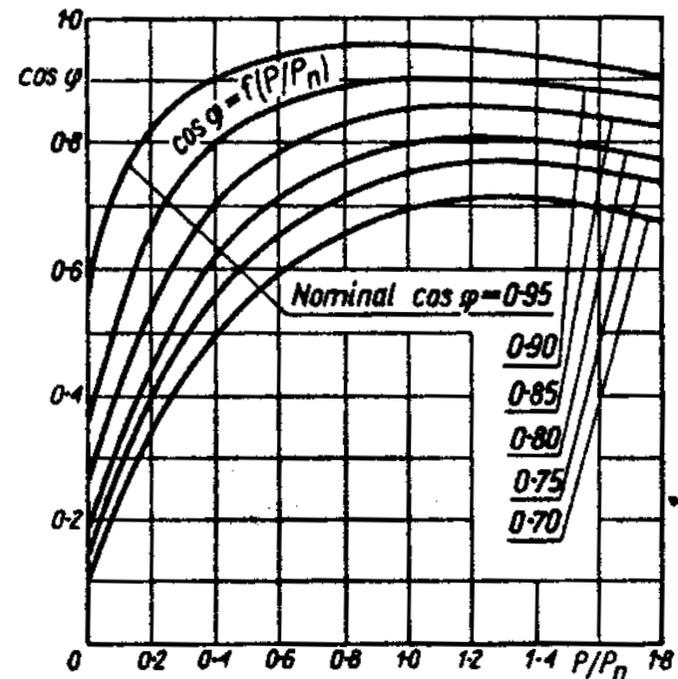


FIG. 5. Effect of load on the  $\cos\varphi$  of induction motors with various nominal power factors.

# Motore elettrico asincrono con rotore avvolto

- Se, a causa delle elevate correnti all'avviamento, non si può utilizzare un motore a gabbia di scoiattolo → motore con rotore avvolto (wound-rotor oppure slip-ring)
- Questo motore ha una coppia di spunto elevata con corrente minore di quella richiesta da un motore a gabbia di scoiattolo
- Resistenza nel secondario per la regolazione della velocità o per l'avviamento (se R aumenta, la max coppia si verifica ad n minori, ma non si deve esagerare, v. 4, 5 e 6)
- Adatti per piccole potenze

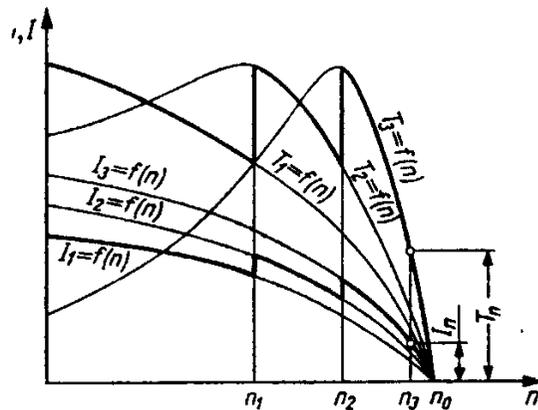


FIG. 6. Speed-torque characteristic of a slip-ring motor and the current characteristic when starting with a two-stage starter;  
 $I = f(n)$ -current characteristics,  $T = f(n)$ -torque characteristics.

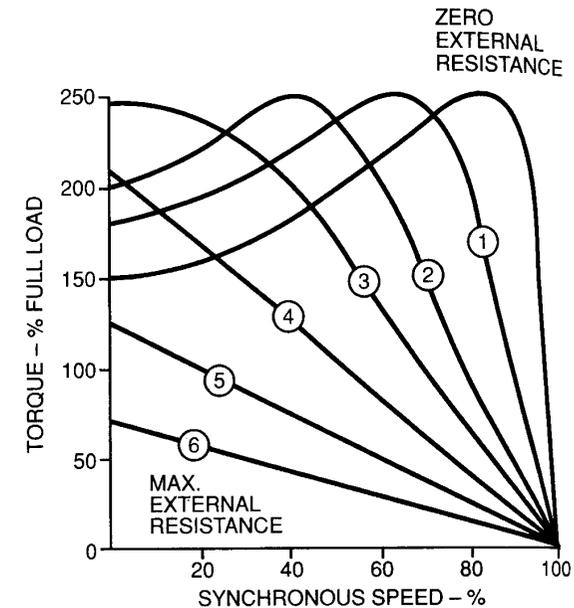
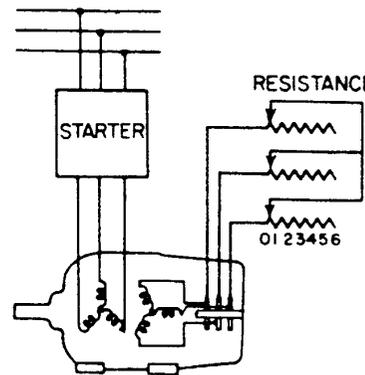
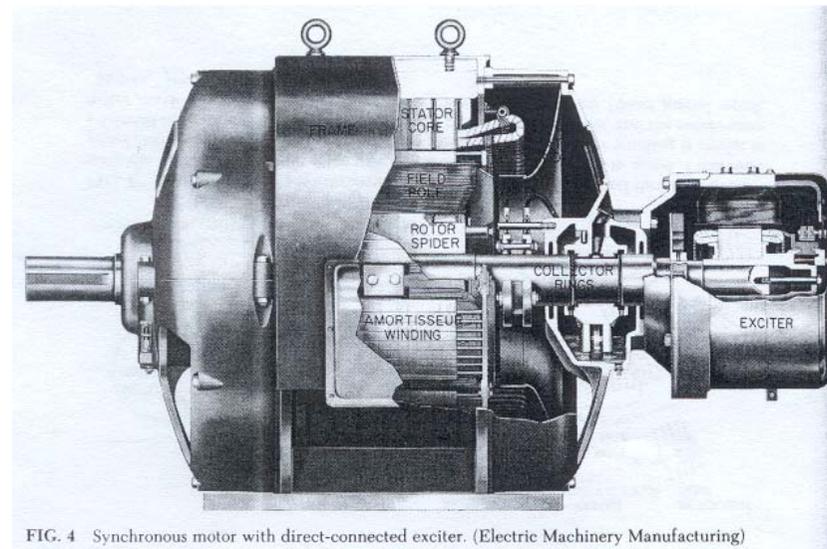
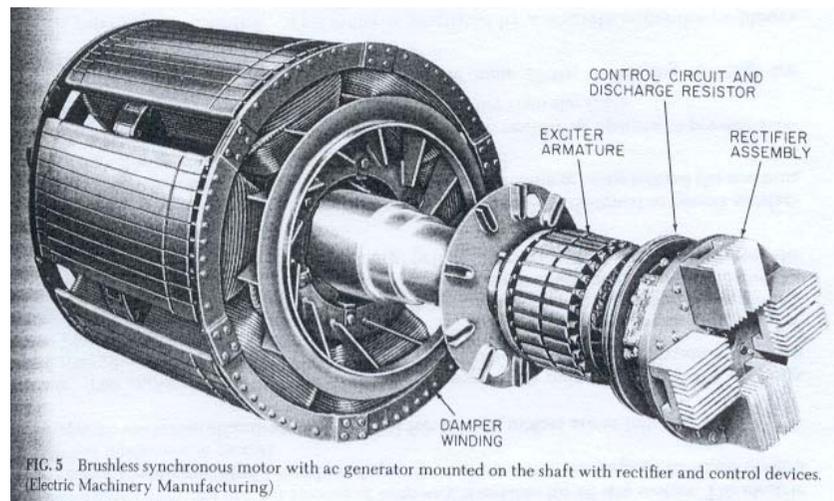


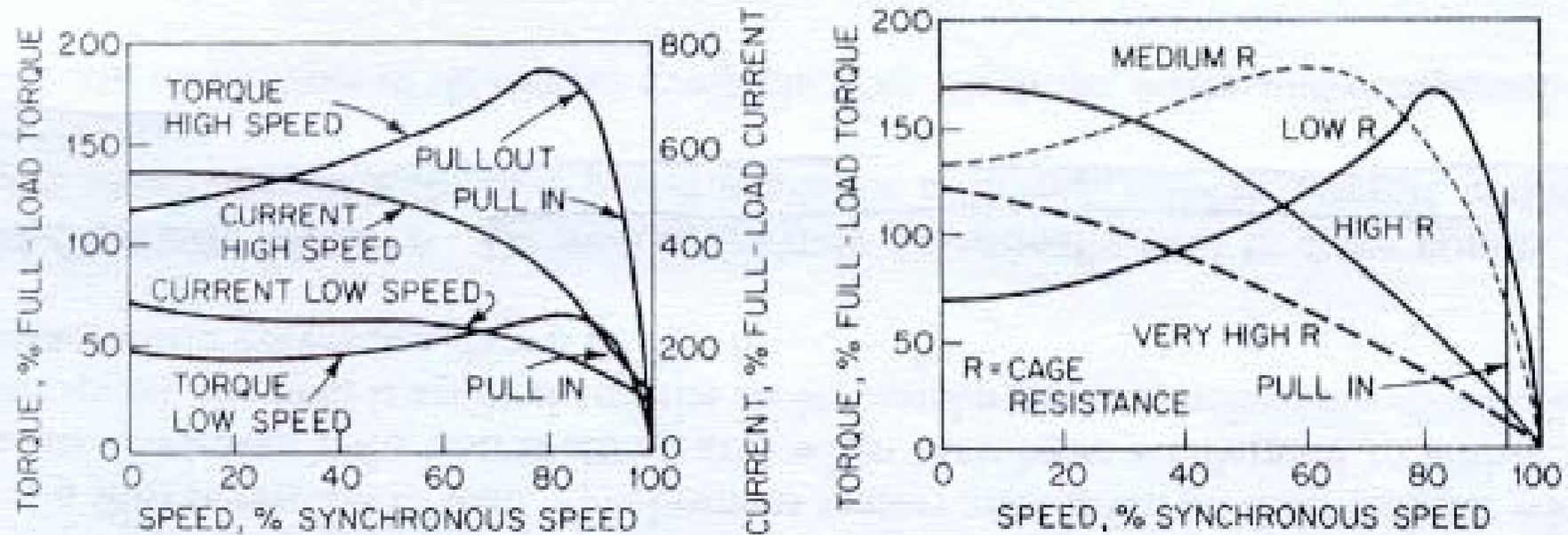
Fig. 24.12 Basic connection diagram and typical speed-torque characteristics of wound-rotor induction motor.  
 (After Westinghouse Electric Corp.)

# Motore sincrono “brushless”

- Ruota alla stessa velocità del campo statorico rotante (velocità di rotazione costante ed indipendente dal carico =  $n_0$ )
- Bassa coppia allo spunto (il motore sincrono non parte da solo) → avviamento con un motore “a gabbia di scoiattolo” ausiliario (un avvolgimento “agds” nel rotore per arrivare fino al 95% della velocità sincrona e poi passa a motore sincrono)
- No spazzole, può operare anche in vuoto
- Costoso, ma alto fattore di potenza e alto rendimento
- Sta sostituendo i motori c.c. (es. macchine a controllo numerico, servoposizionatori)



## Curve caratteristiche



**FIG. 8** Characteristics of synchronous motors depend on rotor design. Torque and current relations are influenced by synchronous speed. High-resistance cage produces high starting torque but low pull-in torque. (From *Power* special report, "Motors," June 1969)

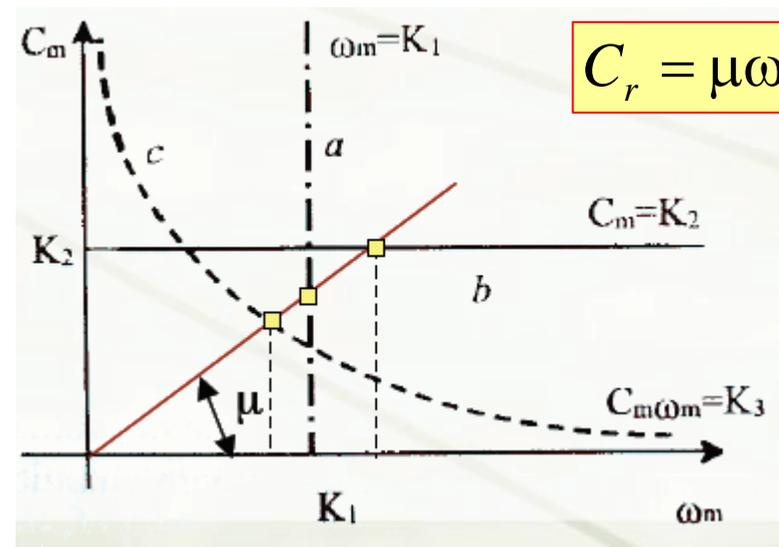
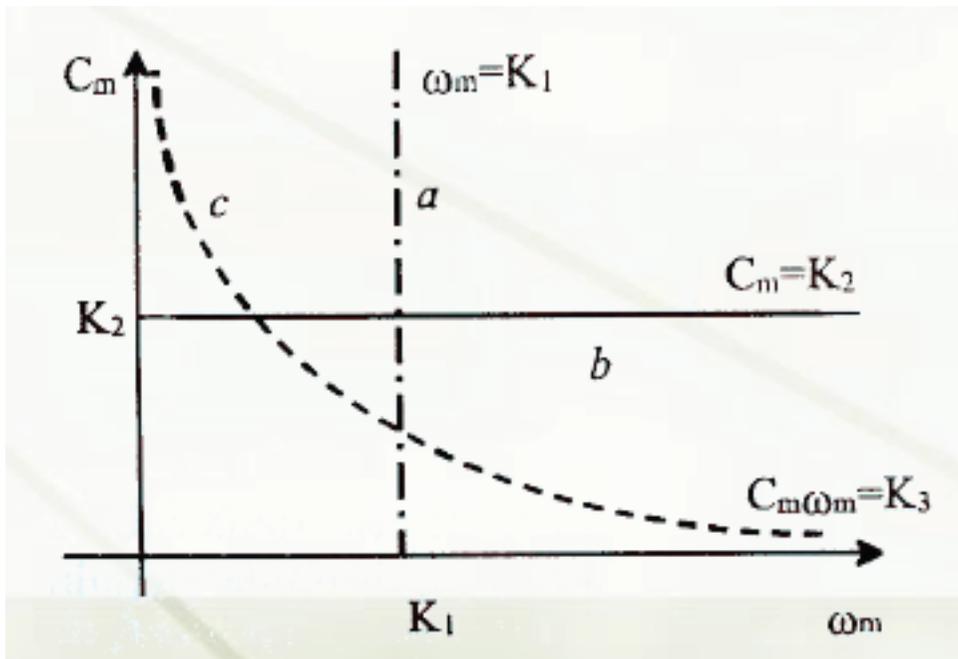
La coppia di un motore sincro è proporzionale alla tensione applicata

$$(T_m)_s \propto V$$

# Motore a corrente continua

- Applicazioni a basso costo (elettrodomestici)
- Rarissimo per pompe (navi, aerei, ...)
- Funzionamento: spira in un campo a induzione costante
- $C_m \omega_m > 0 \rightarrow$  motore;  $C_m \omega_m < 0 \rightarrow$  freno
- Non funziona nel vuoto (serve aria umida per avere un buon contatto delle lamelle)
- Alle alte velocità il contatto peggiora  $\rightarrow$  velocità limitate
- $C_{spunto} \cong (10 \div 50) C_{nominale}$  e  $I_{spunto} \cong (10 \div 50) I_{nominale}$  (reostato all'avvio)

$$C_m = k \Phi_r \Phi_s$$



# Curve caratteristiche

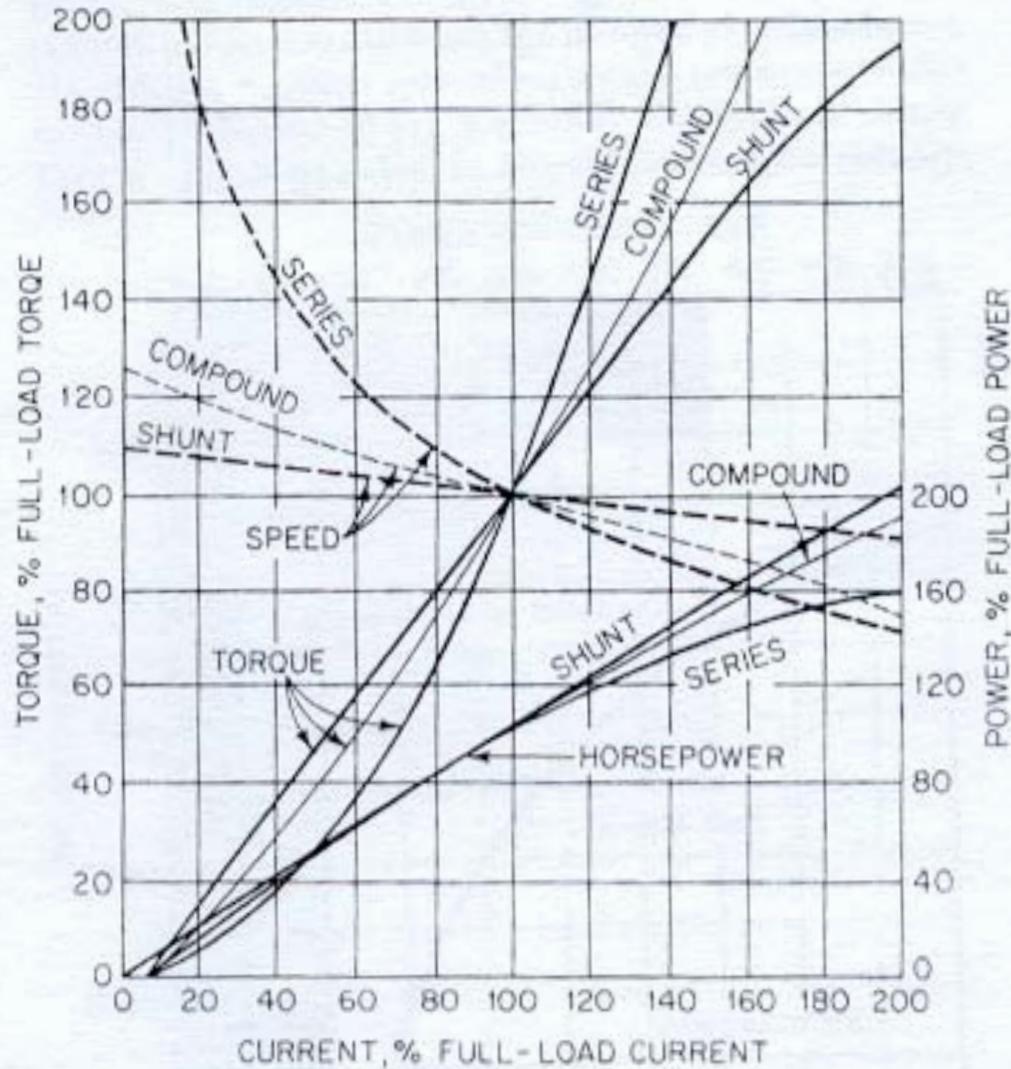


FIG. 10 Speed, torque, and power characteristics of dc motors. (From *Power* special report, "Motors," June 1969)

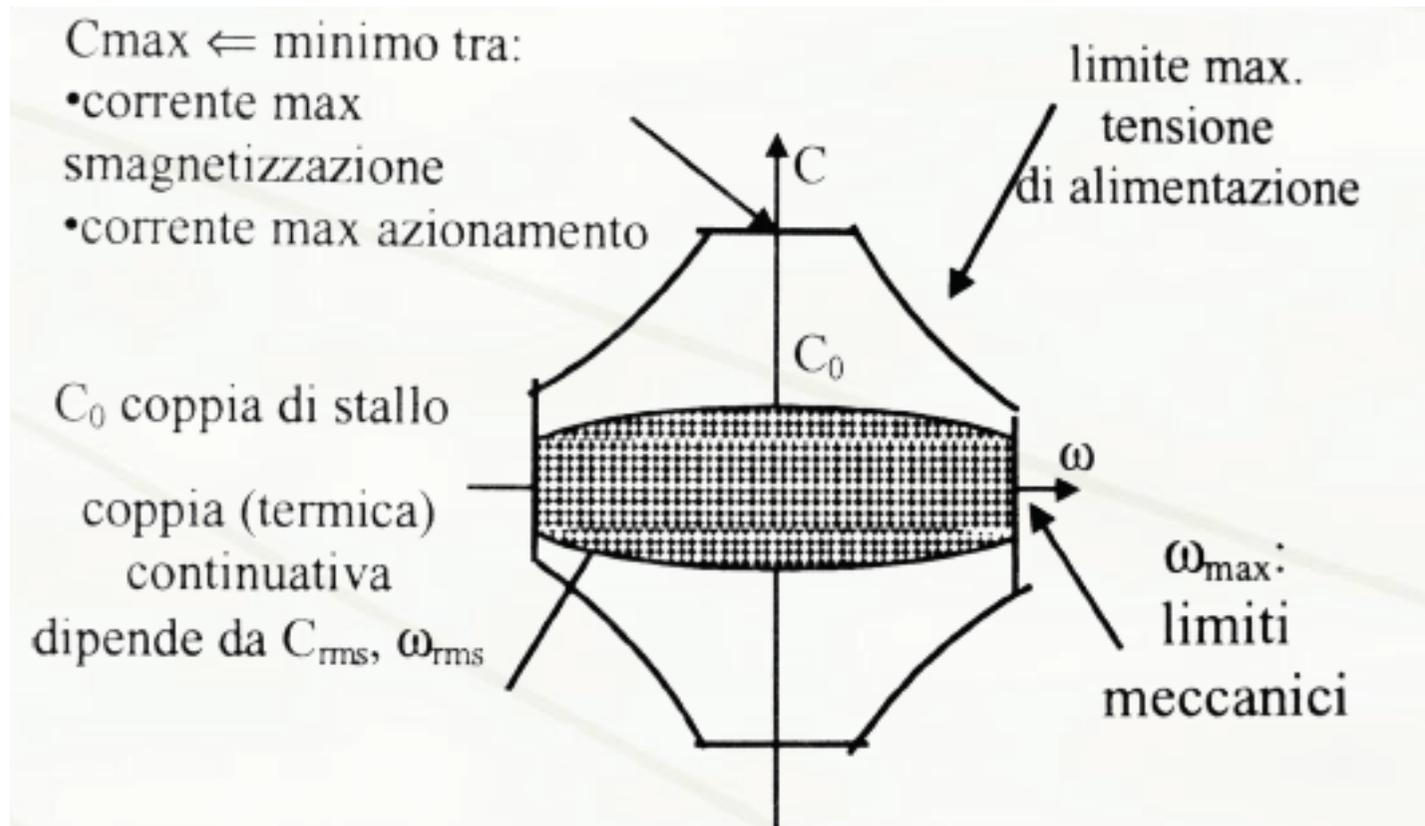
Queste curve riportano coppia, potenza e velocità di rotazione in funzione della corrente di alimentazione per tre tipologie di motore a corrente continua

Se corrente  $\uparrow \Rightarrow$

- coppia  $\uparrow$
- vel. rot.  $\downarrow$
- potenza  $\uparrow$

## Campo operativo

- Ogni macchina ha un certo campo di funzionamento (limite meccanico, termico, corrente, ...)
- Per questo è necessario valutare preventivamente il range di possibile funzionamento



## Potenza e voltaggio di un motore c.a.

$$P = V \cdot I \cdot F_p \cdot K$$

V = tensione di alimentazione del motore

I = corrente nel motore

$F_p$  = power factor (variabile tra 0 e 1)

$F_p = 0$  se tensione e corrente non sono in fase

$F_p = 1$  se tensione e corrente sono in fase

K = 1.0 per sistemi monofase, 2.0 per sistemi bifase, 1.732 per sistemi trifase

**Table 24.1(a)** Standard Voltages and Corresponding Normal Motor Size Ranges—IEC Practice  
*Boldface indicates the voltages most commonly used.*

Supply	Voltage	Reasonable motor sizes, in kilowatts	
		Minimum	Maximum
Single phase alternating current	110		1.0
	<b>220–240</b>		3.7
	440		7.5
Two or three-phase alternating current	380		
	<b>415–440</b>	0.1	300
	600	0.1	300
	<b>3,300</b>		
	<b>6,600</b>	110	5,000
	<b>11,000</b>	150	7,000
		1,000	20,000+

# Caratteristiche elettriche dei motori elettrici

- Il motore elettrico funziona ad un certo voltaggio (standard: 220, 380, 440 e 550 V)
- Di solito può lavorare con voltaggio  $\pm 10\%$  (fissata frequenza)
- Può lavorare con frequenza  $\pm 5\%$  (consente di variare la velocità ai motori c.a.)

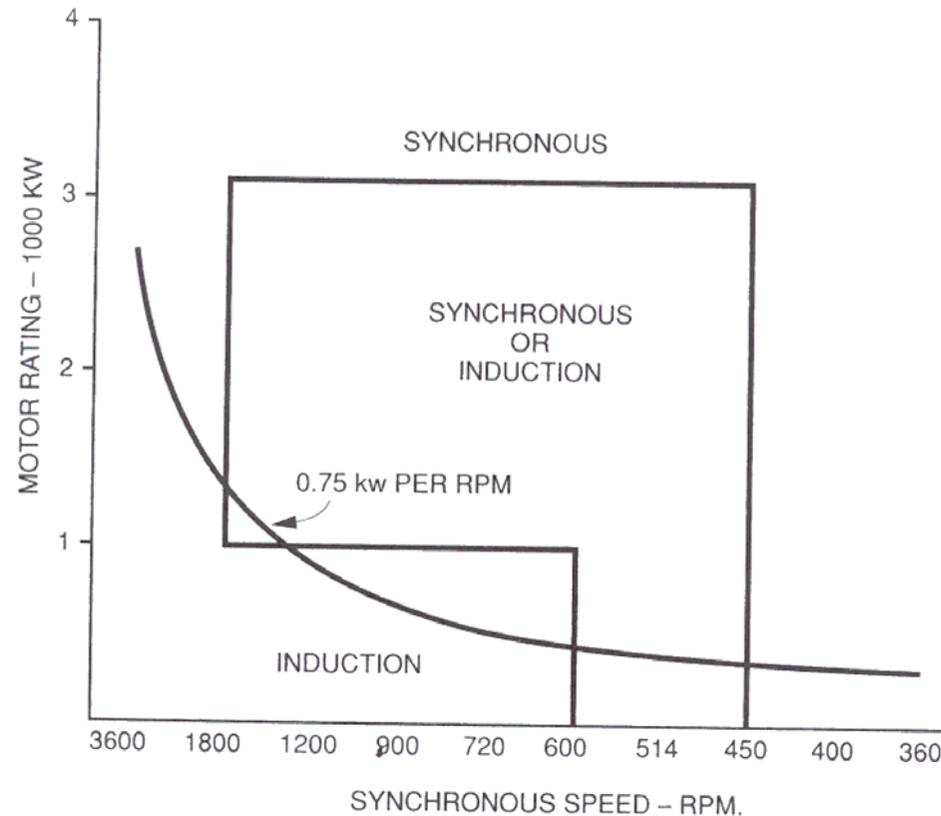
Table 24.5 Approximate Effects of Variations in Voltage and Frequency on A-C Motor Characteristics<sup>1</sup>

Characteristic	Voltage		Frequency	
	110 Percent	90 Percent	105 Percent	95 Percent
Torque				
Starting and maximum running	Increase 21 percent	Decrease 19 percent	Decrease 10 percent	Increase 11 percent
Speed				
Synchronous	No change	No change	Increase 5 percent	Decrease 5 percent
Full load	Increase 1 percent	Decrease 1.5 percent	Increase 5 percent	Decrease 5 percent
Percentage slip	Decrease 17 percent	Increase 23 percent	Little change	Little change
Efficiency				
Full load	Increase 0.5–1 point	Decrease 2 points	Slight increase	Slight decrease
3/4 load	Little change	Little change	Slight increase	Slight decrease
1/2 load	Decrease 1–2 points	Increase 1–2 points	Slight increase	Slight decrease
Power factor				
Full load	Decrease 3 points	Increase 1 point	Slight increase	Slight decrease
3/4 load	Decrease 4 points	Increase 2–3 points	Slight increase	Slight decrease
1/2 load	Decrease 5–6 points	Increase 4–5 points	Slight increase	Slight decrease
Current				
Starting	Increase 10–12 percent	Decrease 10–12 percent	Decrease 5–6 percent	Increase 5–6 percent
Full load	Decrease 7 percent	Increase 11 percent	Slight decrease	Slight increase
Temperature rise	Decrease 3–4°C	Increase 6–7°C	Slight decrease	Slight increase
Maximum overload capacity	Increase 21 percent	Decrease 19 percent	Slight decrease	Slight increase
Magnetic noise	Slight increase	Slight decrease	Slight decrease	Slight increase

<sup>1</sup>Courtesy General Electric Co.

# Costo del motore elettrico

- Motore sincrono per  $n < 600$  rpm o per  $P/n > 0.75$  kW/rpm
- Motore ad induzione a gabbia di scoiattolo per potenze piccole o alta velocità di rotazione



**Fig. 24.14** Guidelines for synchronous motor selection.  
*Below 600 rpm, or power greater than approximately 0.75 kW (1.0 hp) per rpm, synchronous motors are a better selection than squirrel cage induction motors because higher cost can generally be offset by higher power factor and efficiency.*  
*(After Power, Special Motors Report, June 1969, and Mitsubishi.)*

## Problematiche relative al motore elettrico

- Dissipazione del calore: all'ambiente o ad un refrigerante

$$Q_{diss} = \alpha A (T_{avv} - T_{amb})$$

- forma

- materiale

- velocità refrigerante (aria)

$$\Delta T \propto P_e^2$$

- Isolamento: per isolare elettricamente gli avvolgimenti tra loro e con l'esterno
- Cabinato (non permette il controllo a vista del motore):
  - protezione dall'esterno e verso l'esterno (acqua, polvere, fiamme libere, rumore, ...)
  - dissipazione del calore
- Installazione: asse verticale o orizzontale

## 3. Interazione motore – turbomacchina

### b) Interazione motore – turbomacchina (avviamento, regolazione)

## Equazione di bilancio della coppia

$$T_m - T_p - T_{fr} = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$(T_m)_{as} = f(n)$$

$$T_p \propto n^2$$

$$J = Mr^2 = \int \rho r^2 dV$$

Il tempo di accelerazione non deve essere troppo lungo per non danneggiare il motore (infatti il motore elettrico è sottoposto ad alta corrente). Allora:

- utilizzare un motore con una coppia maggiore
- ridurre il carico della pompa
- ridurre l'inerzia delle parti rotanti

$$\Delta t_{acc} = J \frac{(\omega_f - \omega_i)}{T_m - T_p - T_{fr}}$$

# Avviamento (visto dalla pompa)

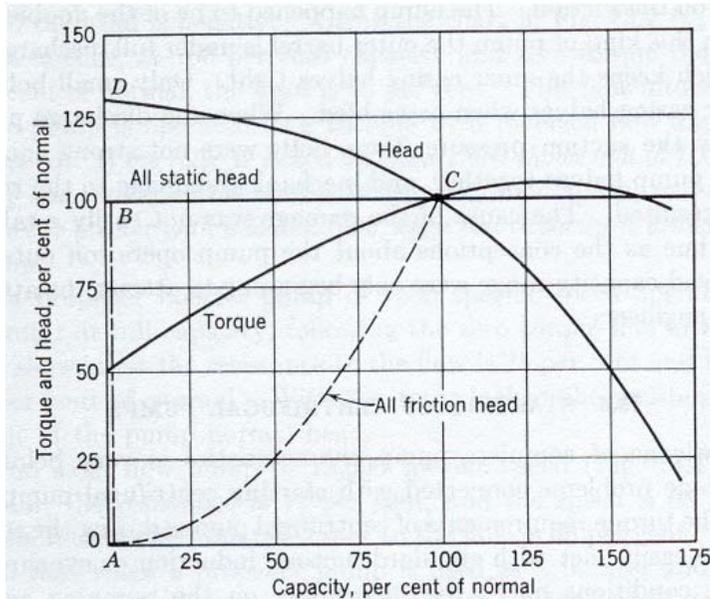


FIG. 13.12. Constant speed pump characteristics.

- C = punto di funzionamento a regime. Infatti,  $H_p = H_{\text{circ}}$  e  $T_C = 100\% T_n$
- Avviamento con valvola aperta, prevalenza solo statica (è come se fosse a valvola chiusa):  $A \rightarrow B$  (senza trasferire fluido) e poi  $B \rightarrow C$
- Avviamento con valvola aperta, prevalenza solo dissipativa:  $A \rightarrow C$  con trasferimento di fluido
- Avviamento condotto lungo ( $t_{\text{avv}} \ll t_{\text{acc\_fluido}}$ ): è come con valvola chiusa ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ )

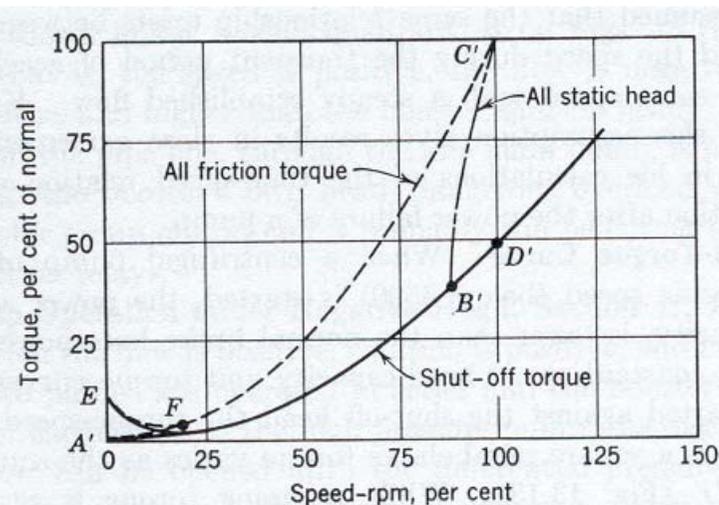


FIG. 13.13. Speed-torque curves.

- Avviamento con valvola aperta, prevalenza solo statica:  $A' \rightarrow B' \rightarrow C'$
- Avviamento con valvola aperta, prevalenza solo dissipativa:  $A' \rightarrow C'$
- D' corrisponde a max prev. a valvola chiusa
- EF: tiene conto di attrito statico e tenute

# Curva coppia-velocità per la pompa

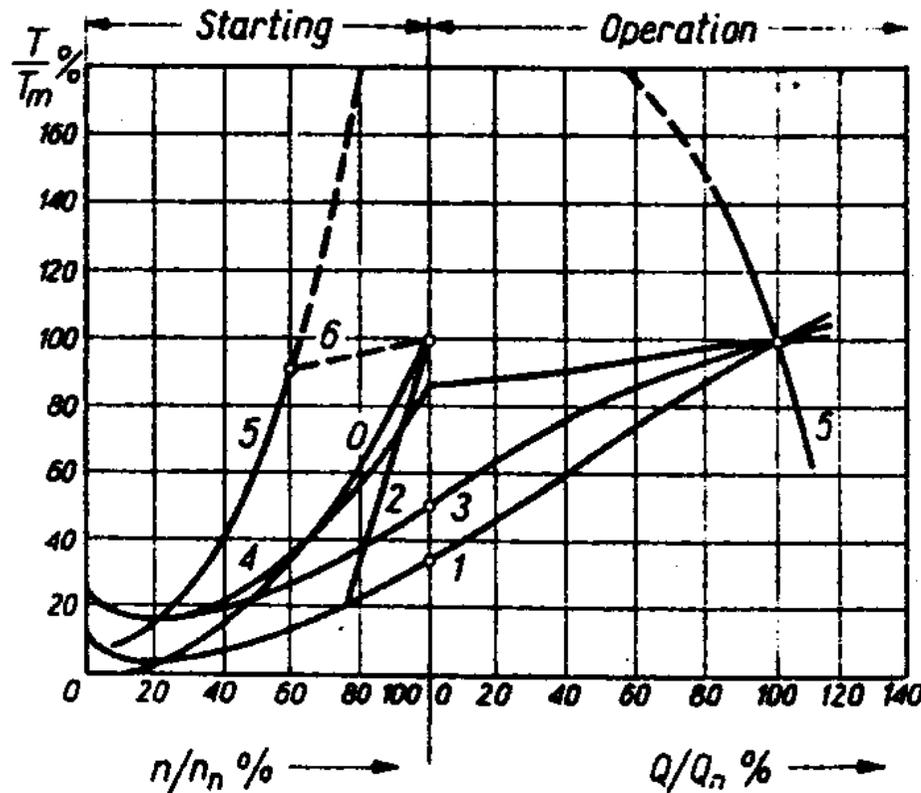


FIG. 1. Speed-torque characteristics of impeller pumps  $T = f(n)$ ; 0 — theoretical characteristic of a centrifugal pump, 1 — actual characteristic of a centrifugal pump with a light impeller, when started with the delivery valve closed, 2 — actual characteristic of centrifugal pump as in 1, when started with delivery valve open, while the non-return valve is opening, 3 — actual characteristic of centrifugal pump as in 1, with a heavy impeller, 4 — actual characteristic of a helicoidal or diagonal pump, when started with delivery valve closed, 5 — actual characteristic of a propeller pump, when started with delivery valve closed, 6 — actual characteristic of a propeller pump as in 5, when started with delivery valve open, while the non-return valve is opening (SULZER).

La forma della curva dipende da:

- tipo di pompa
- valvola aperta o chiusa?

- 0 : curva teorica ( $T_p \text{ prop. } n^2$ )
- 1 e 3: valvola chiusa, ma la pompa 3 è più “pesante”
- 2: pompa come 1, ma valvola aperta e v. non-ritorno che si apre
- 4 e 5: valvola chiusa
- 6 : pompa come 5, ma valvola aperta e v. non-ritorno che si apre
- Nel semipiano a dx si vede come varia T se cresce Q (per i casi con valvola chiusa!)
- La valvola di non-ritorno apre di solito @  $n = 0.6-0.8 n_n$

## Accoppiamento fra pompa e motore agds (1/3)

- $T_{\text{spunto}} = 1.5-2 T_n \rightarrow$  avviamento anche con valvola mandata aperta
- L'area sottesa dalla curva  $T_m$  è prop. alla potenza erogata dal motore, mentre l'area sottesa dalla curva  $T_p$  è prop. alla potenza richiesta dalla pompa
- La differenza è pari alla potenza disponibile per accelerare le masse rotanti fino ad  $n = n_n$

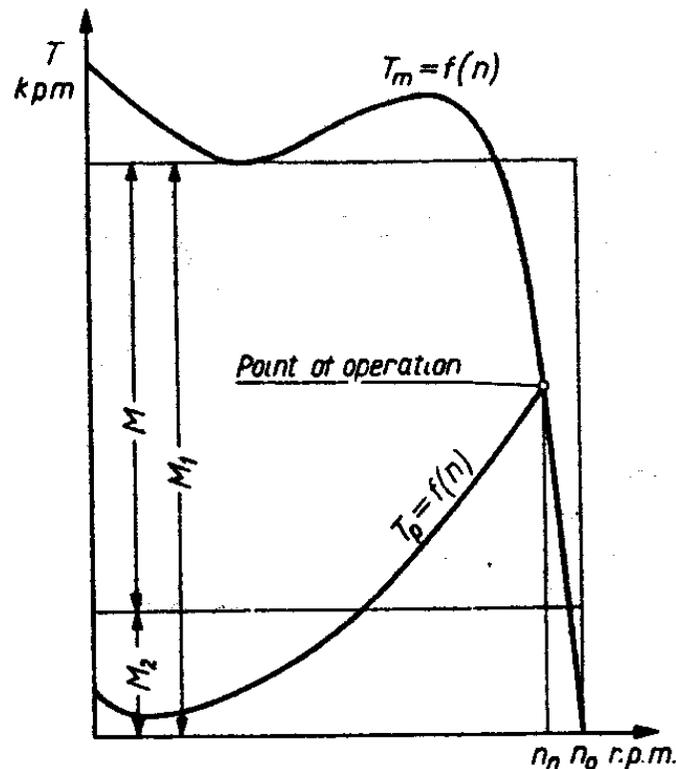
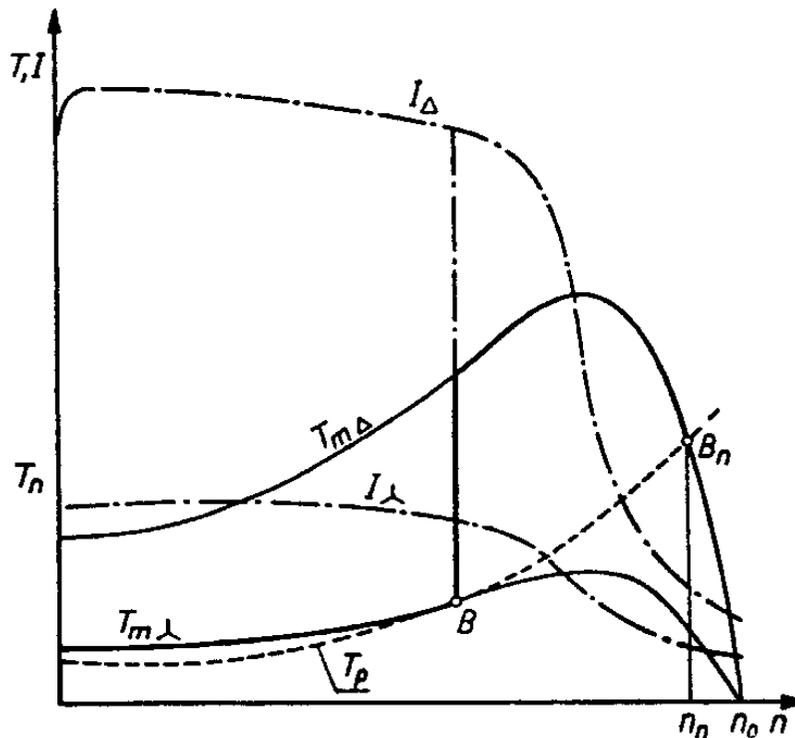


FIG. 2. Speed-torque characteristics of a delta-connected squirrel-cage motor  $T_m = f(n)$  and a centrifugal pump  $T_p = f(n)$ , when started with delivery valve open.

## Accoppiamento fra pompa e motore agds (2/3)



- All'avviamento,  $I = 5x I_n \rightarrow$  potrebbe essere troppo alta per il circuito elettrico
- Allora, si utilizzano sistemi stella-triangolo per ridurla
  - la configurazione a stella abbassa la coppia max, ma riduce molto anche la corrente allo spunto!
  - $B_n$  (avviamento a stella)
  - $B$  (avviamento a triangolo) – funzionamento NON stabile

FIG. 3. Speed-torque characteristic of a squirrel-cage motor when started with a star-delta starter and the corresponding current characteristic and the speed-torque characteristic of a centrifugal pump started with the delivery valve open;  $T_{m\lambda}$  — torque characteristic of star-connected motor,  $T_{m\Delta}$  — torque characteristic of delta-connected motor,  $T_p$  — torque characteristic of a centrifugal pump started with the delivery valve open,  $I_{\lambda}$  — current characteristic for star-connection,  $I_{\Delta}$  — current characteristic for delta-connection,  $B$  — point of balance of torques  $T_{m\lambda}$  and  $T_p$ ,  $B_n$  — point of steady-state operation ( $T_{m\Delta}$  and  $T_p$  in equilibrium).

## Accoppiamento fra pompa e motore agds (3/3)

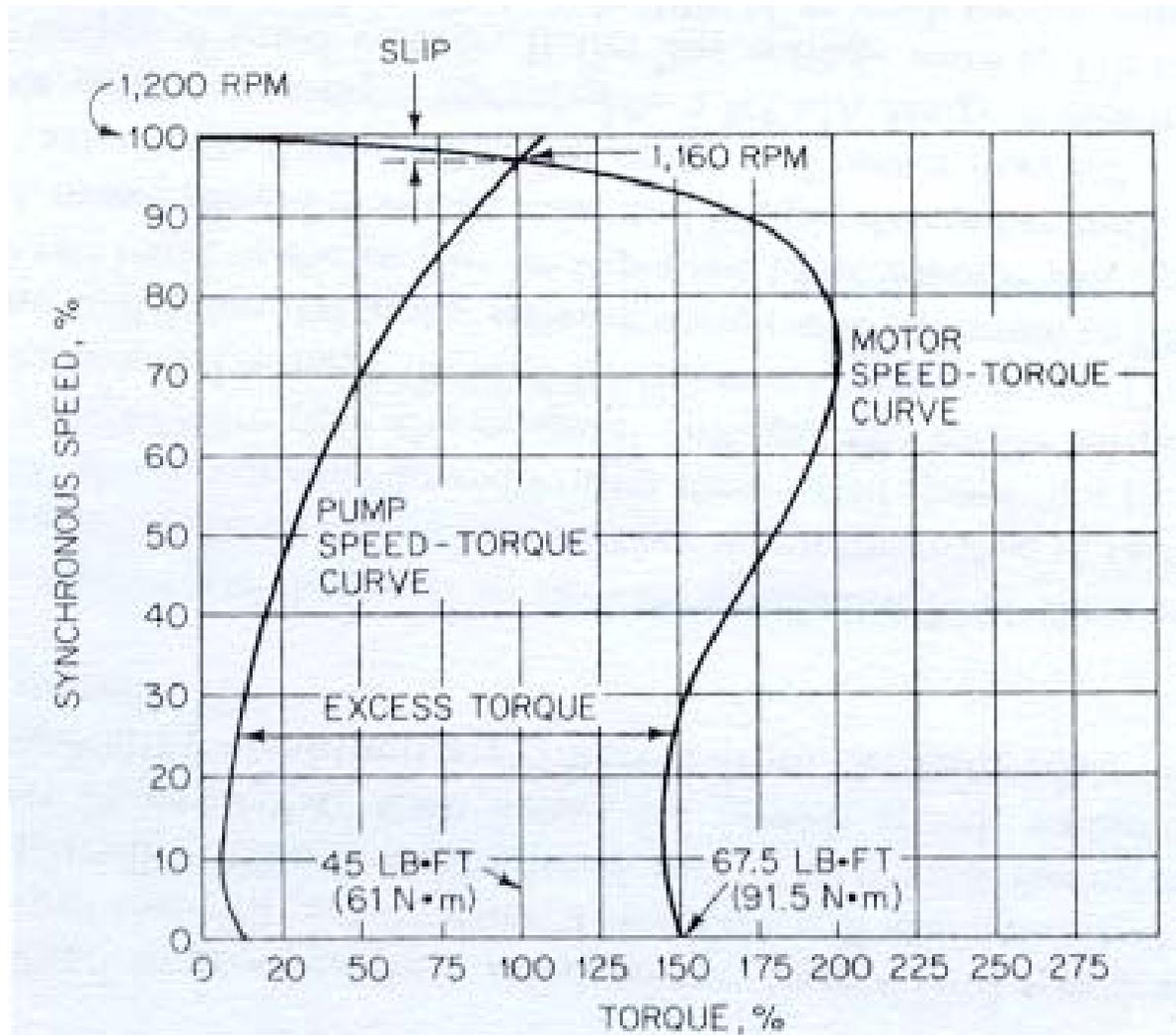


FIG. 13 Typical speed-torque characteristic curves for a centrifugal pump and a squirrel-cage induction, NEMA design B motor. Excess torque accelerates pump.

- Motore elettrico agds con  $P = 10 \text{ hp} = 7.46 \text{ kW}$
- $n_{as} = 96.6 \% n_0$

## Avviamento di una pompa che ruota all'indietro

- Supponiamo che, con valvola aperta, la prevalenza statica sia tale da fare ruotare la pompa all'indietro (si dovrebbe mettere un sistema per evitarlo, come una valvola di non-ritorno, che lascia immutata la curva per  $n > 0$ )
- Allora la pompa ruota alla velocità di fuga
- Se si collega un motore, la velocità inizia a diminuire perché si genera una coppia in opposizione
- Ma, serve un motore con alta coppia di spunto tale che  $T_m > T_p$  (allo spunto,  $T_p = 120\% T_{p\_nom}$ ) e serve che funzioni al 100% del voltaggio

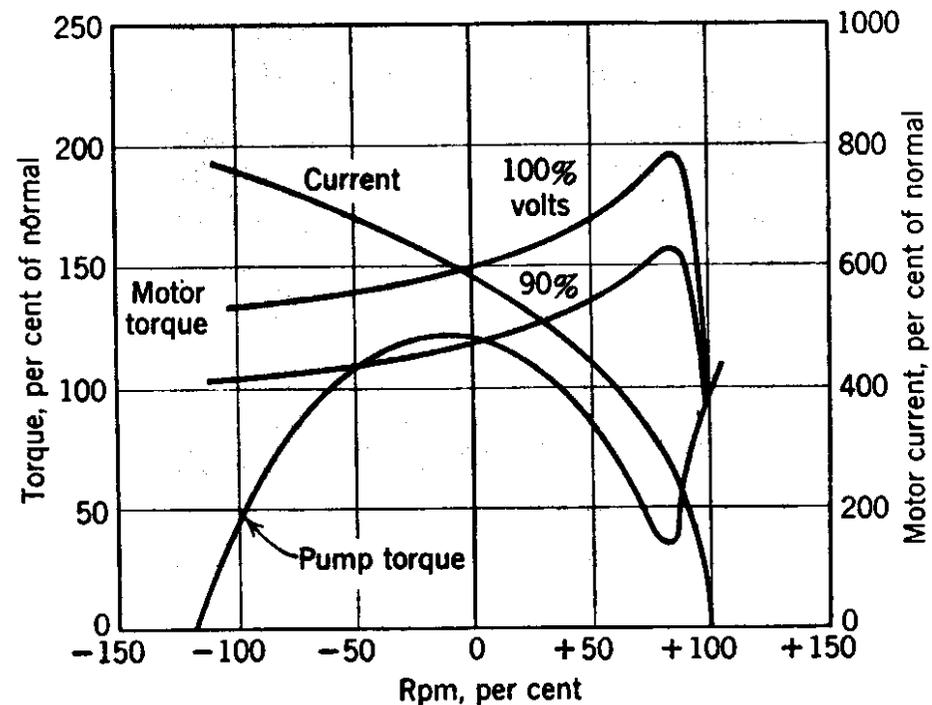


FIG. 13.14. Speed-torque curves; pump  $n_s = 1800$ ; four-pole motor.

## 3. Interazione motore – turbomacchina

### c) Esempi applicativi

## Esempio 1.1 – avviamento a valvola chiusa

- Avviamento a valvola di mandata chiusa!
- $n_{\text{ nominale}} = 1770 \text{ rpm}$
- $T_p \text{ prop. } n^2$ , eccetto che nella parte iniziale in cui a causa dell'attrito:  
(15 % della coppia nominale @  $n = 0 \text{ rpm}$ )  
(0 % della coppia nominale @  $n = 10 \%$  della velocità nominale)

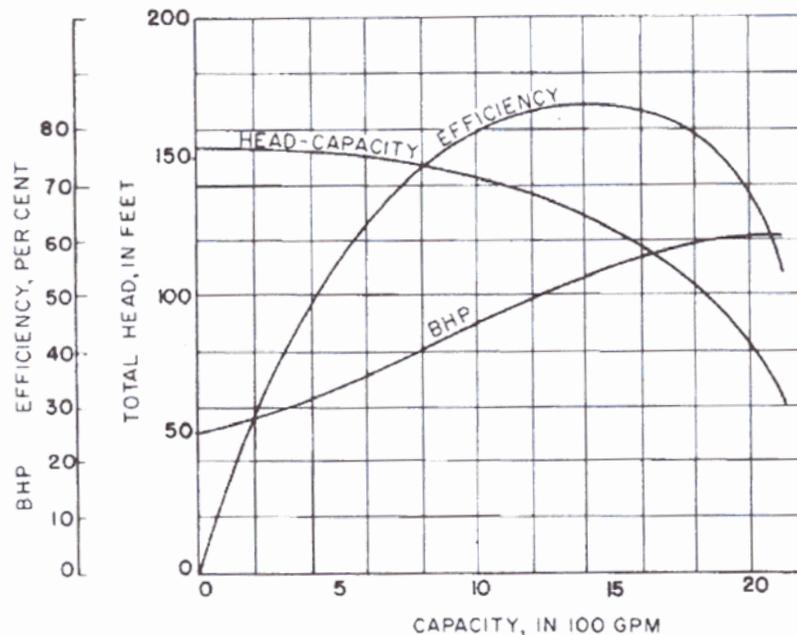


Fig. 24.24 Constant speed (1,770 rpm) characteristics of 6 in discharge, 8 in suction (6 × 8) double-suction pump.

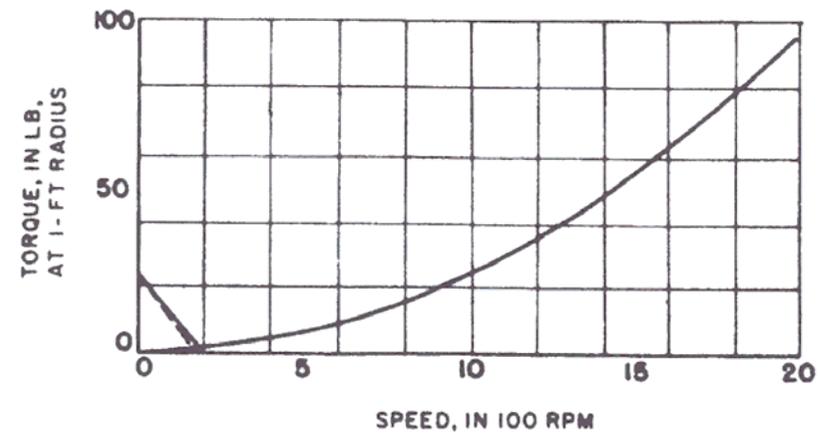


Fig. 24.25 Torque curve of pump of Fig. 24.24 when started against closed gate valve.

## ***Esempio 1.2 – avviamento a valvola aperta***

- Stessa pompa di prima, ma avviamento a valvola di mandata aperta!
- La pompa lavora senza trasferire fluido, fino a che la pompa non fornisce una prevalenza piezometrica pari almeno a  $S = 100$  ft (più perdite di carico lungo il circuito)

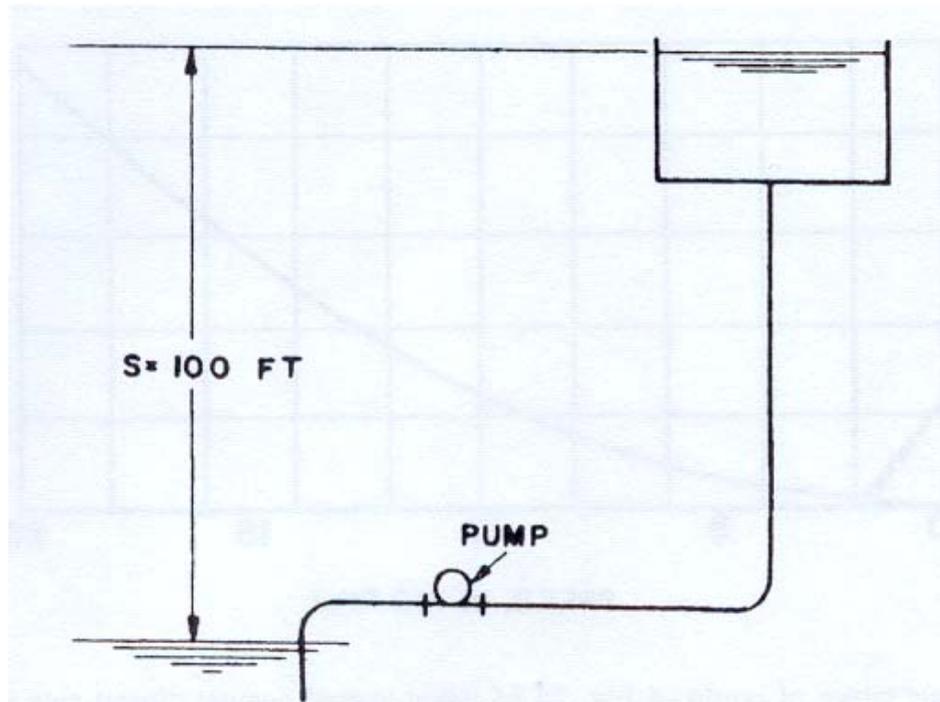
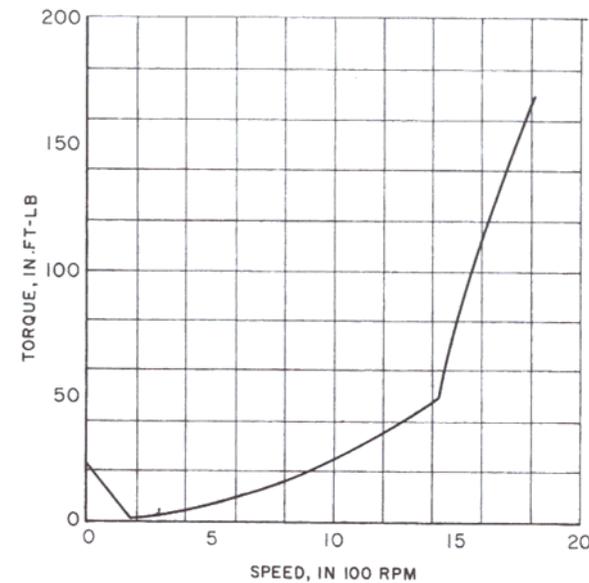
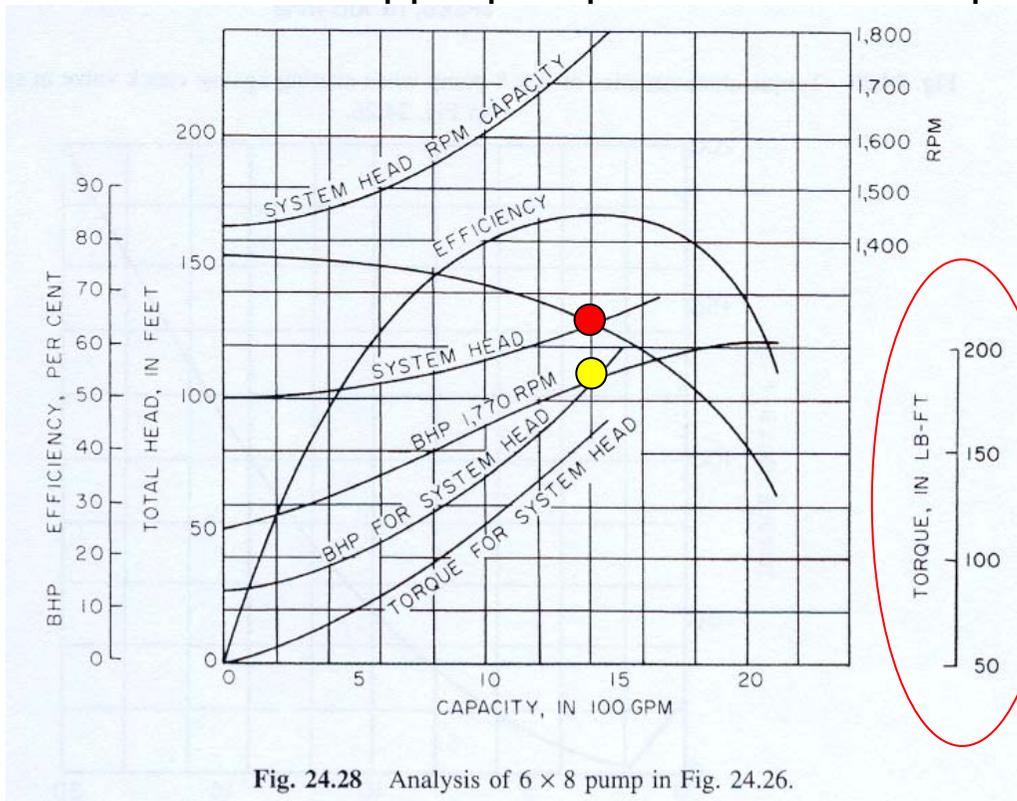


Fig. 24.26 Application for pump characterized by Fig. 24.24.

## Esempio 1.3 – funzionamento a 1440 GPM

- La pompa è la stessa di prima. Si desidera una portata di 1440 GPM = 327 m<sup>3</sup>/h
- La coppia è la stessa di Fig. 24.25 fino a  $n = 1427$  rpm (quando la pompa sviluppa una prevalenza di 100 ft, pari alla prevalenza statica). Inoltre è pari a 50 lb ft a portata nulla
- Se si aumenta ancora la velocità, si arriva alla portata desiderata (1440 GPM )
- La curva di coppia per questo sistema è riportata in Fig. 24.29



## Esempio 1.4 – prevalenza solo dissipativa

- Avviamento con valvola di intercettazione ad apertura rapida → Il flusso parte subito
- Punto di funzionamento desiderato: 318 m<sup>3</sup>/h = 1400 GPM; 39.3 m = 129 ft
- La curva di coppia è in fig. 24.30

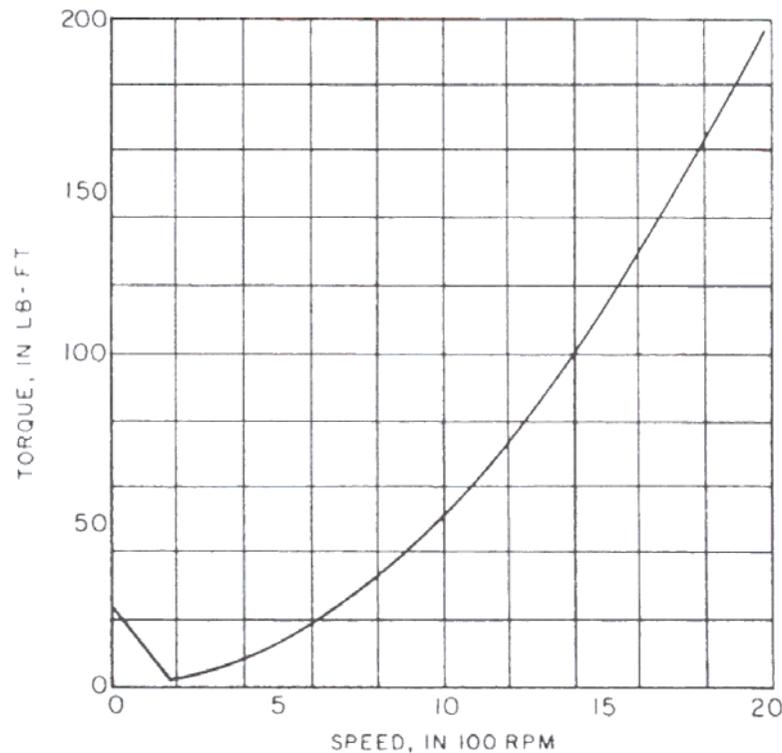


Fig. 24.30 Torque characteristics of 6 × 8 pump when started in wholly frictional system.

Col metodo visto in questi esempi, si può ricavare la caratteristica coppia-velocità per una macchina qualsiasi, nota la curva caratteristica della pompa e il metodo di avviamento

## Esempio 1.5 – pompa con alta velocità specifica

- Stesso circuito di esempio 1.2, ma pompa con alta velocità specifica
- Per questa pompa, sia la prevalenza sia la potenza sono massime allo spunto!
- Questo tipo di pompe sono utilizzate con piccole prevalenze ( $H = 14 \text{ ft} = 4.3 \text{ m}$ ) e condotte corte

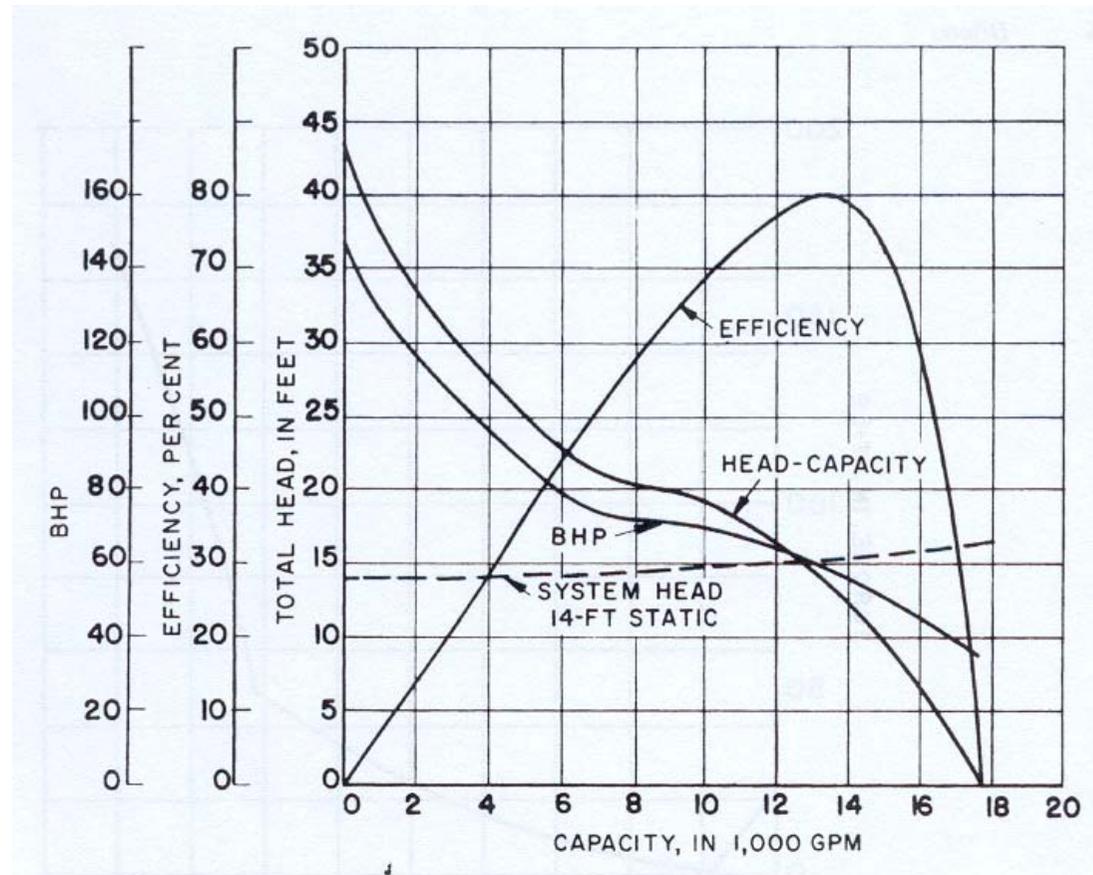
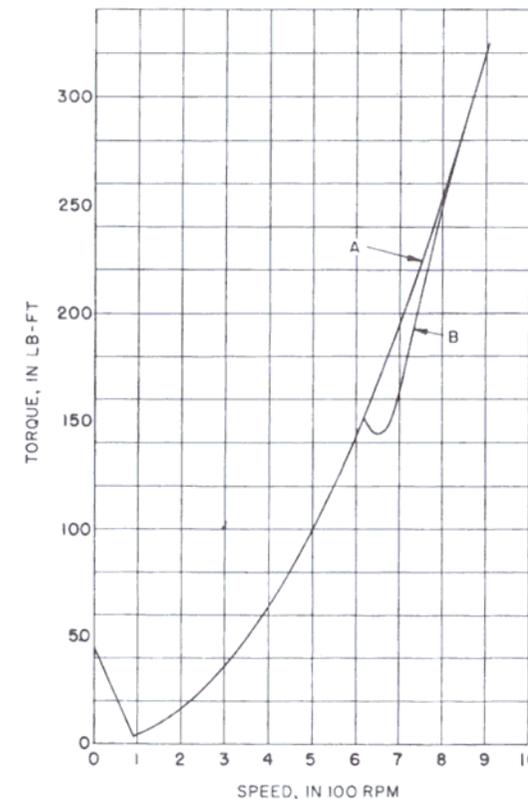
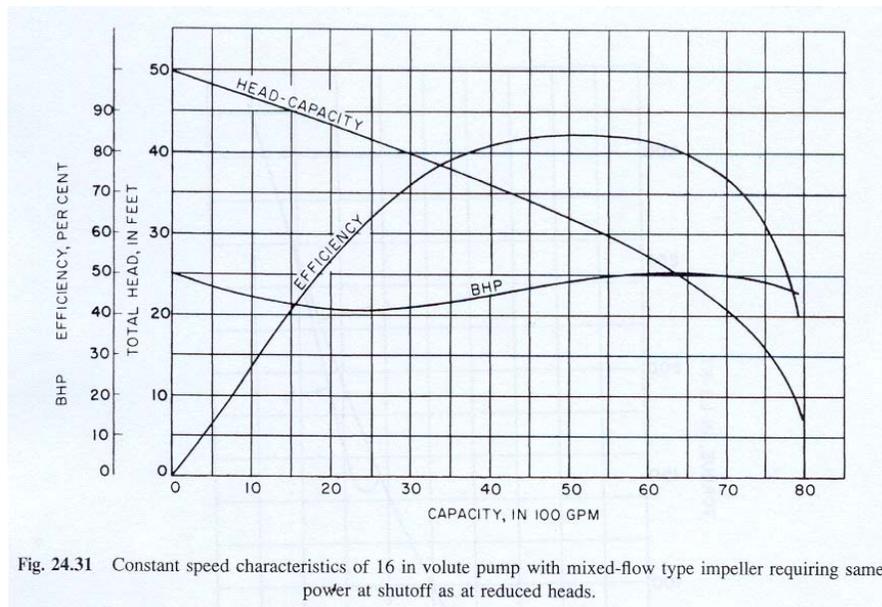


Fig. 24.27 Constant speed characteristics of 30 in discharge propeller pump at 700 rpm.

## Esempio 2

- Pompa con velocità specifica media
- Potenza allo spunto e potenza alla massima efficienza sono uguali → la curva coppia-velocità è la stessa sia se l'avviamento è fatto a mandata chiusa sia se con valvola di intercettazione
- La curva coppia-velocità è indipendente dal tipo di prevalenza
  - A: prev. solo dissipativa o valvola chiusa
  - B: prev. solo statica



## Scelta del motore

- Condizioni ambientali (temperatura, corrente) → vita utile
- Velocità di rotazione
- Coppia e alimentazione elettrica (corrente e voltaggio)
- Tipo
  - Se possibile, scegliere sempre un motore elettrico trifase (es. gabbia di scoiattolo per piccole applicazioni)
- Sistemi di trasmissione
  - a cinghia (potenze piccole)
  - ad ingranaggi (per potenze superiori)
  - con flangia

- Potenza del motore
  - il motore deve lavorare alla massima efficienza
  - anche la pompa dovrebbe lavorare alla massima efficienza
- Riserva di potenza
  - $P_m > P_p$
  - dipende dal tipo di pompa, dalle potenze in gioco e dalla forma della curva di potenza in funzione della portata
  - valori tipici: 40% ( $P \cong 1.5$  kW); 10% ( $P \cong 40$  kW)