

Esercizio n°1 (punti 6)

Si consideri il sistema di pompaggio di Figura 1 costituito da tre pompe uguali P1, P2 e P3, la cui curva caratteristica a 1170 giri/min è rappresentata dalla seguente equazione:

$$H = \alpha - \beta \cdot Q^2 \quad \text{con } \alpha = 40 \text{ m, } \beta = 100 \text{ m}/(\text{m}^3/\text{s})^2 \quad n_f = 1170 \text{ giri/min}$$

essendo H in m, e Q in m³/s.

A n=1170 giri/min il rendimento è:

Q [m ³ /s]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
η %	60	63	65	67	69	70.5	71.5	72	71.5	69	66	63

Il serbatoio A è posizionato alla quota Z_A=12 m, il serbatoio B è posizionato alla quota Z_B=23 m.

La tubazione AA' di lunghezza pari a 100 m ha un diametro di 400 mm, e lungo di essa vi sono 1 valvola ed un gomito a 45°; la tubazione BB' di lunghezza pari a 500 m ha un diametro di 500 mm, e lungo di essa vi sono 1 valvola e 2 gomiti a 45°. Per il calcolo delle perdite di carico si consideri un coefficiente di Bazin γ_B=0.12 m^{1/2}.

$$\beta = 0.000857 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \gamma_B}{\sqrt{D}} \right)^2$$

Si trascurino le perdite di carico fra A' e B'.

Fissato il volume medio giornaliero da sollevare dal serbatoio A al serbatoio B pari a 9000 m³, valutare quale delle due soluzioni è energeticamente più conveniente:

- Pompa P1 e pompa P2 funzionanti a 1170 giri/min; Pompa P3 spenta.
- Pompa P1 e pompa P2 funzionanti a 870 giri/min e pompa P3 funzionante a 1170 giri/min.

Per entrambe le soluzioni determinare inoltre l'NPSH disponibile all'imbocco di ciascuna pompa (si tenga presente che gli assi delle giranti di tutte e tre le pompe sono situati alla quota Z_P=11 m) e confrontarlo con quello richiesto da ciascuna pompa ed eventualmente riposizionarle.

Parametro di Thoma:

$$\sigma^* = \frac{NPSH}{h}; \quad \sigma^* = 0.15 \cdot \omega_s^{1.33}; \quad \omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n \frac{\sqrt{Q}}{(g \cdot h)^{0.75}}$$

Temperatura di riferimento: 20°C; pressione di vapore saturo: 2339 Pa; pressione aria: 101300 Pa.

(N.B: ricavare analiticamente le portate sollevate dalle singole pompe e le corrispondenti prevalenze).

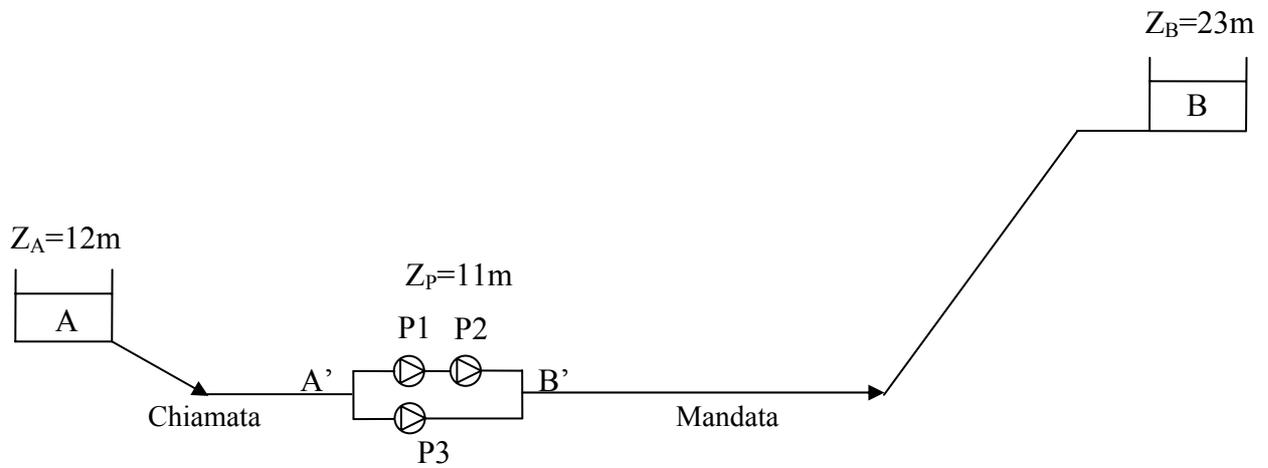


Figura 1. Schema dell'impianto.

Imbocco	0.5
Sbocco	1
Gomito 45°	0.2
Valvola	2.5

Tabella 1. I coefficienti ξ per il calcolo delle perdite di carico concentrate: $\Delta H = \xi \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$.

Esercizio n°2 (punti 5)

Si dimensionino i tratti 2 e 3, a valle del tratto 1 già dimensionato, della rete di drenaggio urbano mista riportati in figura sulla base dei seguenti dati:

$$\varphi_{IMP}=0.80; \varphi_{PERM}=0.10;$$

Tempo di accesso in rete: 5 min.

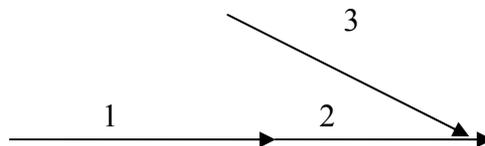
$$\text{Scabrezza tubazioni: } K_S=70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$$

$$\text{Curva di possibilità climatica: } h = a\theta^n \text{ con } a = 38 \text{ mm/ora}^n \text{ e } n = 0.57.$$

Dotazione idrica $q=380$ l/ab.d;

Coefficiente di afflusso in rete $\Phi=0.85$; coefficiente di punta orario $k_h=1.5$;

$$\text{per la portata nera minima si assuma } Q_{n,\min} = 0.67 \cdot \frac{q \cdot N_{ab}}{86400}.$$



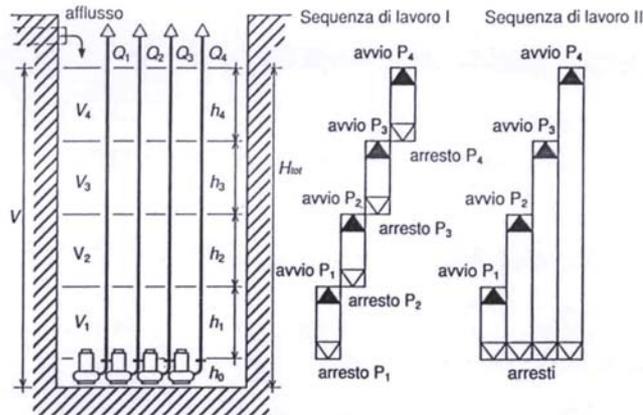
N° ramo	Area sottesa parziale (ha)	Abitanti equivalenti	Impermeabilità (%)	Lunghezza (m)	Pendenza (%)	D (m)
1	1.0	900	55	200	0.8	0.4
2	1.6	1300	80	250	0.7	
3	1.8	1400	68	400	0.9	

h/D	P/D	A/D^2	R/D	V/V_r	Q/Q_r	h/D	P/D	A/D^2	R/D	V/V_r	Q/Q_r
0.05	0.45	0.015	0.033	0.257	0.005	0.55	1.67	0.443	0.265	1.039	0.586
0.10	0.64	0.041	0.064	0.401	0.021	0.60	1.77	0.492	0.278	1.072	0.672
0.15	0.80	0.074	0.093	0.517	0.049	0.65	1.88	0.540	0.288	1.099	0.756
0.20	0.93	0.112	0.121	0.615	0.088	0.70	1.98	0.587	0.296	1.120	0.837
0.25	1.05	0.153	0.147	0.701	0.137	0.75	2.09	0.632	0.302	1.133	0.912
0.30	1.16	0.198	0.171	0.776	0.196	0.80	2.21	0.674	0.304	1.140	0.977
0.35	1.27	0.245	0.193	0.843	0.263	0.85	2.35	0.711	0.303	1.137	1.030
0.40	1.37	0.293	0.214	0.902	0.337	0.90	2.50	0.744	0.298	1.124	1.066
0.45	1.47	0.343	0.233	0.954	0.416	0.95	2.69	0.771	0.286	1.095	1.074
0.50	1.57	0.393	0.250	1.000	0.500	1.00	3.14	0.785	0.250	1.000	1.000

Esercizio n°3 (punti 4)

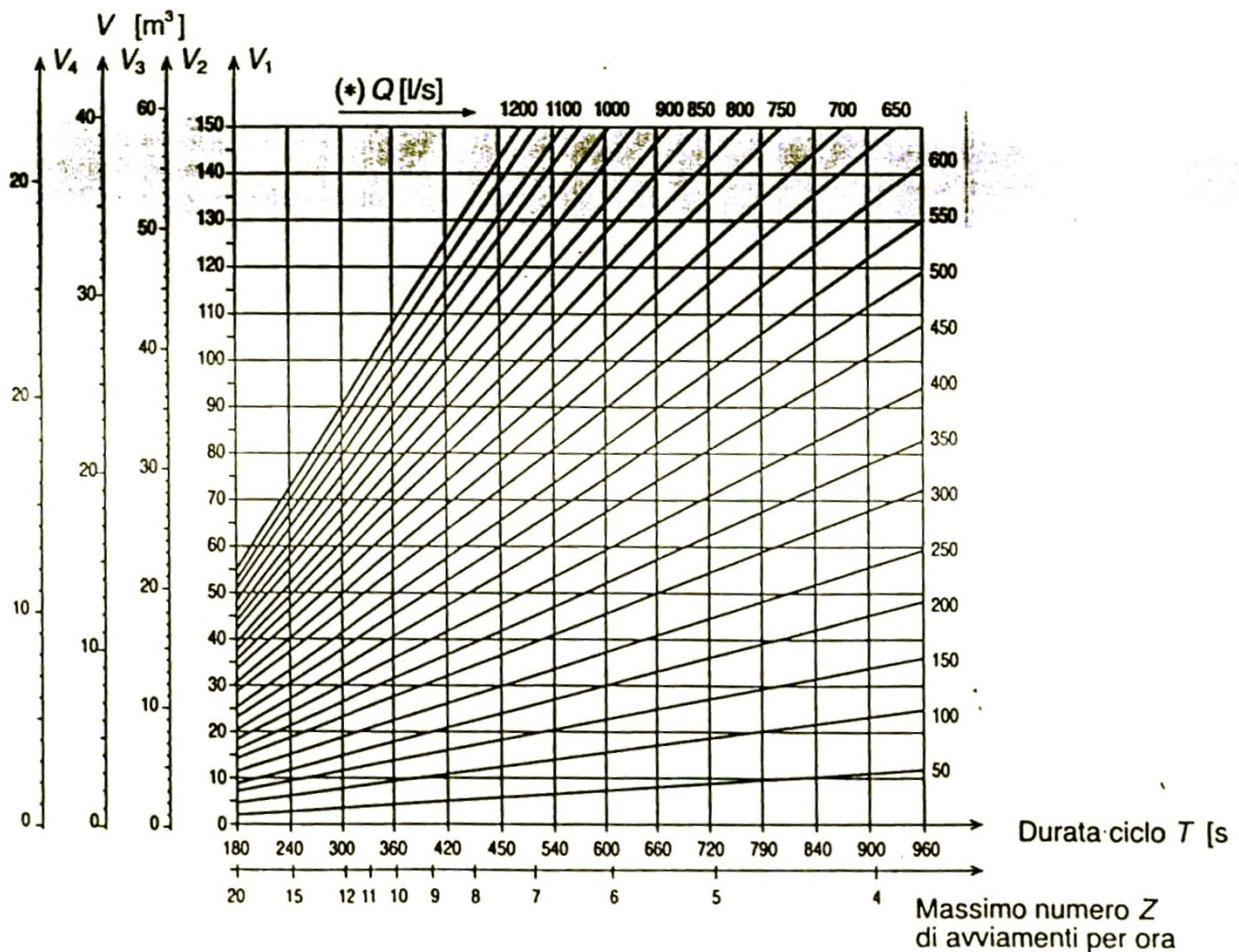
Si dimensioni il volume del bacino di pescaggio di quattro pompe che sollevano ciascuna una portata di 250 l/s. Si considerino le due sequenze riportate in figura e per ciascuna di esse se ne valuti il corrispondente volume.

Si fissi un solo tempo di ciclo per tutte e quattro le pompe e lo si giustifichi.



Per la sequenza I si dimostri inoltre l'equazione utilizzata per il calcolo del volume da attribuire a ciascuna pompa.

Per la sequenza II ci si avvalga del grafico sotto riportato.



Domande (punti 3 ciascuna)

1. Si definiscano e si descrivano il rendimento idraulico, volumetrico, organico e totale di una turbopompa.
2. Illustrare il concetto di similitudine fluidodinamica e i coefficienti adimensionali Φ , Ψ , Λ , ω_s e D_s .
3. Partendo da una serie di altezze di precipitazione massime annue (ad esempio sulle durate di 1, 3, 6 e 12 ore) descrivere la trattazione statistica per ricavare i parametri a ed n della curva di possibilità climatica $h = a \cdot t^n$.
4. Disegnare e descrivere gli schemi di ventilazione degli impianti di scarico delle acque nere negli edifici.
5. Illustrare i passi e le ipotesi per il corretto dimensionamento di una grondaia a sezione rettangolare.

Esercizio n°1

La curva della pompa a $n_1=1170$ giri/min, è definita dalla seguente equazione:

$$P_{1170}: H = \alpha_1 - \beta_1 \cdot Q^2 \quad \text{oppure} \quad Q = \sqrt{\frac{\alpha_1 - H}{\beta_1}}$$

Applicando il Principio di similitudine fluidodinamica, si ricava l'equazione della curva della pompa a $n_2=870$ giri/min:

$$\begin{cases} \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \\ \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \end{cases} \rightarrow H_2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \alpha_1 - \beta_1 \cdot Q_2^2 \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \rightarrow P_{870}: H = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot \alpha_1 - \beta_1 \cdot Q^2$$

Sistema A

- P1 e P2 in serie a 1170 giri/min

Sommo le prevalenze H delle pompe P1 e P2 a parità di portata Q:

$$H = 2 \cdot (\alpha_1 - \beta_1 \cdot Q^2) \rightarrow Q = \sqrt{\frac{\alpha_1 - \frac{H}{2}}{\beta_1}}$$

Per determinare il punto di funzionamento, si pongono a sistema l'equazione della curva delle pompe P1 e P2 in serie, con l'equazione della curva dell'impianto, così definita:

$$H = H_g + k \cdot Q^2$$

Dove:

$$H_g = H_B - H_A = (23 - 12) = 11 \text{ m};$$

$$k = k_{chiam} + k_{mand} = 56 \text{ s}^2 \text{ m}^{-5};$$

Nello specifico:

$$k_{chiam} = k_{c,d} + k_{c,c} = \frac{\beta_c \cdot L_c}{D_c^5} + \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i}{2 \cdot g \cdot \left(\frac{\pi D_c^2}{4}\right)^2} = 15.92 + 10.33 = 26.25 \text{ s}^2 \text{ m}^{-5}$$

$$k_{mand} = k_{m,d} + k_{m,c} = \frac{\beta_m \cdot L_m}{D_m^5} + \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i}{2 \cdot g \cdot \left(\frac{\pi D_m^2}{4}\right)^2} = 24.64 + 5.16 = 29.8 \text{ s}^2 \text{ m}^{-5}$$

$$\begin{cases} \beta_c = 0.000857 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \gamma_B}{\sqrt{D_c}}\right)^2 = 0.00163 \\ \beta_m = 0.000857 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \gamma_B}{\sqrt{D_m}}\right)^2 = 0.00154 \end{cases} \quad \text{con } \gamma_B = 0.12 m^{1/2}$$

In definitiva il punto di funzionamento è dato da:

$$\begin{cases} H = 2 \cdot (\alpha_1 - \beta_1 \cdot Q^2) \\ H = H_g + k \cdot Q^2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} Q_{IA} = \sqrt{\frac{(2 \cdot \alpha_1 - H_g)}{(k + 2 \cdot \beta_1)}} = 0.519 m^3 s^{-1} \\ H_{IA} = 11 + 56 \cdot (0.519)^2 = 26.1 m \end{cases}$$

Il punto di funzionamento delle singole pompe a 1170 giri/min è pari a:

$$\begin{cases} Q_{1170} = Q_{IA} = 0.519 m^3 s^{-1} \\ H_{1170} = \frac{H_{IA}}{2} = 13.05 m \\ \eta_{1170} = 67.5\% (\text{vedi Tabella}) \end{cases}$$

Q [m ³ /s]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
η %	60	63	65	67	69	70.5	71.5	72	71.5	69	66	63

Dato il volume medio giornaliero da sollevare dal serbatoio A al serbatoio B, si ricava il n° di ore di lavoro della pompa:

$$N_{ore} = \frac{V}{Q_{IA}} = \frac{9000}{0.519 \cdot 3600} = 4.82 h$$

Quindi la potenza assorbita P_a specifica per ogni singola pompa può essere stimata come:

$$P_{a_{1170}} = \frac{\gamma \cdot Q_{1170} \cdot H_{1170}}{\eta_{1170}} = \frac{1000 \cdot 9.81 \cdot 0.519 \cdot 13.05}{0.675} = 98.4 kW \rightarrow \text{potenza assorbita in un'ora}$$

$$P_{a_{1170}}^{die} = P_{a_{1170}} \cdot N_{ore} = 474 kW / die \rightarrow \text{potenza assorbita al giorno}$$

$$P_{A}^{die} = 2 \cdot P_{a_{1170}}^{die} = 948 kW / die \rightarrow \text{potenza assorbita complessivamente}$$

Sistema B

- P1 e P2 in serie a 870 giri/min e P3 in parallelo a 1170 giri/min

Per porre in serie le pompe P1 e P2 si sommano le rispettive prevalenze a parità di portata Q, ottenendo quindi:

$$H = 2 \cdot \left(\alpha_1 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} - \beta_1 \cdot Q^2 \right) \rightarrow Q = \sqrt{\frac{\alpha_1 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} - \frac{H}{2}}{\beta_1}}$$

Per porre in parallelo la pompa P3 al sistema dato da P1 e P2 in serie, è necessario sommare le portate Q a parità di prevalenza H:

$$\begin{cases} Q = \sqrt{\frac{\alpha_1 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} - \frac{H}{2}}{\beta_1}} + \sqrt{\frac{\alpha_1 - H}{\beta_1}} \\ H = H_g + k \cdot Q^2 \end{cases} \rightarrow Q - \sqrt{\frac{\alpha_1 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} - \frac{(H_g + k \cdot Q^2)}{2}}{\beta_1}} - \sqrt{\frac{\alpha_1 - (H_g + k \cdot Q^2)}{\beta_1}} = 0$$

Risolvendo quest'ultima equazione per tentativi si ottengono le coordinate del punto di funzionamento del sistema B analizzato:

$$\begin{cases} Q_{IB} = 0.58 m^3 s^{-1} \\ H_{IB} = 11 + 56 \cdot (0.58)^2 = 29.85 m \end{cases}$$

Per quanto riguarda i punti di funzionamento relativi alle singole pompe, si ottiene che:

- **P₁₁₇₀**

$$\begin{cases} Q_{1170} = \sqrt{\frac{\alpha_1 - H_{IB}}{\beta_{1170}}} = 0.319 m^3 s^{-2} \\ H_{1170} = H_{IB} = 29.85 m \\ \eta_{1170} = 71\% (\text{vedi Tab}) \end{cases}$$

Q [m ³ /s]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
η %	60	63	65	67	69	70.5	71.5	72	71.5	69	66	63

- P_{870} in serie

$$\begin{cases} Q_{870} = \sqrt{\frac{\alpha_1 \cdot \frac{n_2^2}{n_1^2} - \frac{H_{IB}}{2}}{\beta_1}} = 0.268 m^3 s^{-1} \\ H_{870} = H_{IB} = 29.85 m \end{cases}$$

- P_{870} singola

$$\begin{cases} Q_{870} = 0.268 m^3 s^{-1} \\ H_{870} = \frac{H_{IB}}{2} = 14.92 m \\ \eta_{870} = 71.5\% (*) \end{cases}$$

(*): la curva del rendimento della pompa a 870 giri/min si ottiene attraverso il principio di similitudine idrodinamica, secondo il quale:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow Q_2 = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \cdot Q_1$$

Da cui si ottiene che:

$n_1=1170$	Q [m ³ /s]	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
$n_2=870$	Q [m ³ /s]	0.04	0.07	0.11	0.15	0.19	0.22	0.26	0.30	0.33	0.37	0.41	0.45
	η %	60	63	65	67	69	70.5	71.5	72	71.5	69	66	63

Dato il volume medio giornaliero da sollevare dal serbatoio A al serbatoio B, si ricava il n° di ore di lavoro della pompa:

$$N_{ore} = \frac{V}{Q_{IB}} = \frac{9000}{0.58 \cdot 3600} = 4.31 h$$

La potenza assorbita P_a relativa alla combinazione B è data da:

$$Pa_{870} = \frac{\gamma \cdot Q_{870} \cdot H_{870}}{\eta_{870}} = 54.9 kW \quad \rightarrow \quad \text{potenza assorbita in un'ora da una singola pompa a}$$

870giri/min

$$Pa_{870}^{die} = Pa_{870} \cdot N_{ore} = 236 kW / die \quad \rightarrow \quad \text{potenza assorbita in un giorno da una singola pompa a}$$

870giri/min

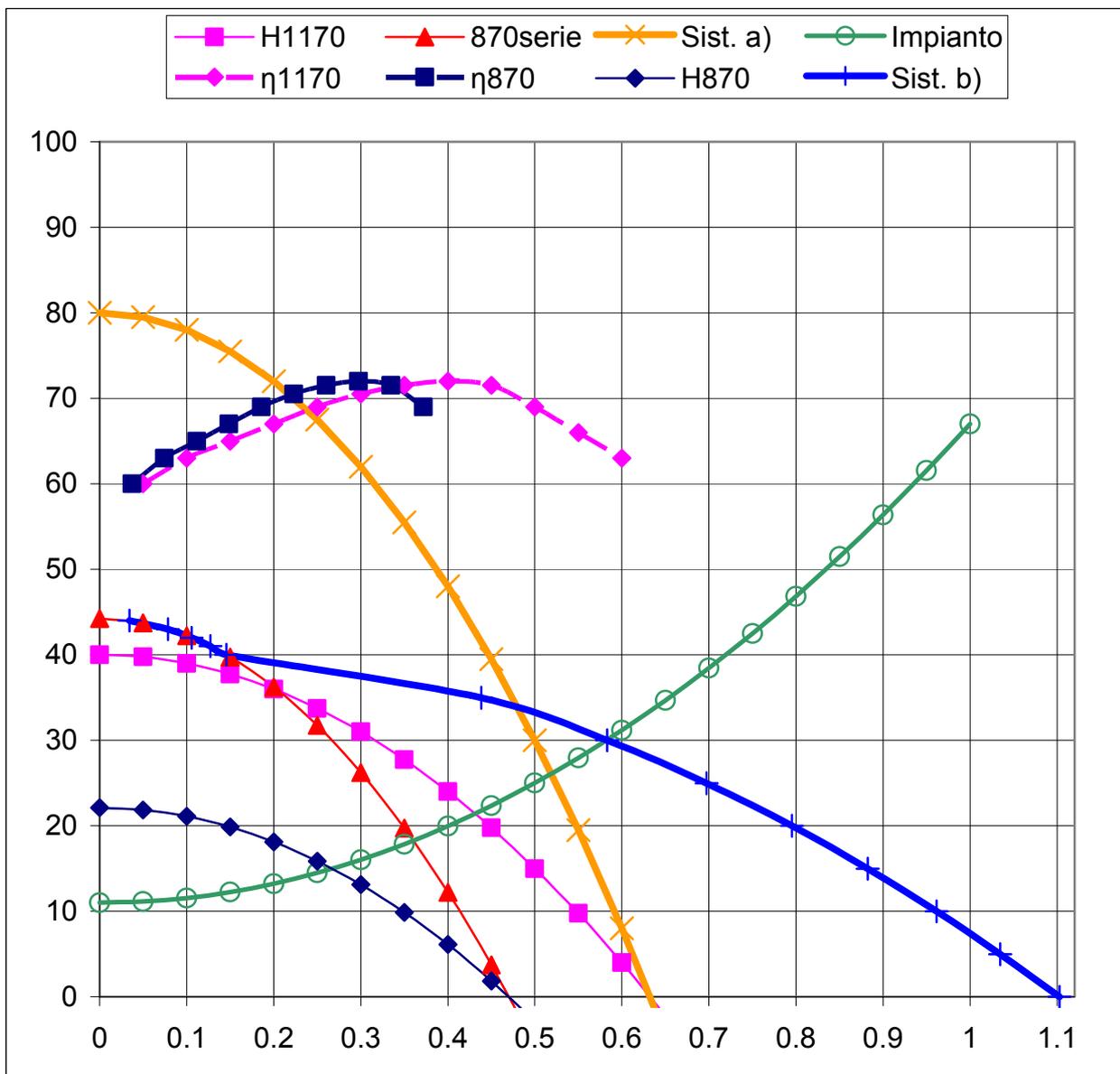
$$Pa_{1170} = \frac{\gamma \cdot Q_{1170} \cdot H_{1170}}{\eta_{1170}} = 131.6kW \rightarrow \text{potenza assorbita in un'ora da una singola pompa a } 1170\text{giri/min}$$

$$Pa_{1170}^{die} = Pa_{1170} \cdot N_{ore} = 567kW / die \rightarrow \text{potenza assorbita in un giorno da una singola pompa a } 1170\text{giri/min}$$

$$Pa_B^{die} = Pa_{1170} + 2 \cdot Pa_{870} = 1039kW / die \rightarrow \text{potenza assorbita complessiva relativa al sistema B}$$

Confrontando i valori di potenza assorbita giornalmente dai due diversi sistemi A e B, si conclude che la combinazione A è energeticamente più conveniente in quanto:

$$Pa_A^{die} < Pa_B^{die}$$



Definizione dell'NPSH disponibile all'imbocco di ciascuna pompa (tenendo presente che gli assi delle giranti di tutte e tre le pompe sono situati alla quota $Z_p=11$ m) e confronto con quello richiesto da ciascuna pompa per stabilire se è necessario un eventuale riposizionamento.

Sistema A: P1 e P2 in serie a 1170 giri/min.

- NPSH disponibile a 1170 giri/min

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vap}}{\gamma} - y_a + \Delta Z = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vap}}{\gamma} - (k_c \cdot Q^2) + (Z_A - Z_P) = 4.01 \text{ m}$$

- NPSH richiesto a 1170 giri/min

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q_{1170}}}{(g \cdot H_{1170})^{0.75}} = 2.32$$

$$\sigma^* = 0.15 \cdot \omega_s^{1.33} = 0.459 \quad \rightarrow \quad \text{Parametro di Thoma}$$

$$NPSH = \sigma^* \cdot H_{1170} = 5.992 \text{ m}$$

Sistema B: P1 e P2 in serie a 870 giri/min e P3 in parallelo a 1170 giri/min.

- NPSH disponibile a 870 giri/min

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vap}}{\gamma} - y_a + \Delta Z = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vap}}{\gamma} - (k_c \cdot Q^2) + (Z_A - Z_P) = 2.25 \text{ m}$$

- NPSH richiesto a 870 giri/min

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot \frac{\sqrt{Q_{870}}}{(g \cdot H_{870})^{0.75}} = 1.12$$

$$\sigma^* = 0.15 \cdot \omega_s^{1.33} = 0.175 \quad \rightarrow \quad \text{Parametro di Thoma}$$

$$NPSH = \sigma^* \cdot H_{1170} = 2.605 \text{ m}$$

- NPSH disponibile a 1170 giri/min

$$NPSH = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vap}}{\gamma} - y_a + \Delta Z = \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vap}}{\gamma} - (k_c \cdot Q^2) + (Z_B - Z_A) = 2.25 \text{ m}$$

- NPSH richiesto a 1170 giri/min

$$\omega_s = 2 \cdot \pi \cdot n \frac{\sqrt{Q_{1170}}}{(g \cdot H_{1170})^{0.75}} = 0.978$$

$$\sigma^* = 0.15 \cdot \omega_s^{1.33} = 0.146 \quad \rightarrow \quad \text{Parametro di Thoma}$$

$$NPSH = \sigma^* \cdot H_{1170} = 4.34m$$

Costanti:		D.I. (q)		Coeff. Affl. Nera		Kh		Kmin		ϕ imp		ϕ perm		a		n											
		380 l/ab*di		0.85		1.5		0.67		0.8		0.1		38		0.57											
Tratto condotta	Abitanti	Q nera massima	Q nera minima	Area scolante parziale	Area scolante totale	Impermeabilità	Lunghezza	Diametro ipotizzato	Pendenza	Scabrezza	Velocità a sezione piena	Portata a sezione piena	Tempo di scolo	Tempo di transito	Tempo di corrivazione	Intensità di pioggia	Coefficiente d'afflusso	Portata critica	Portata massima Qc+Qn, ma	Rapporto tra le portate	Percentuale di riempimento	Rapporto tra le velocità	Velocità per Qmax	Rapporto tra le portate	Percentuale di riempimento	Rapporto tra le velocità	Velocità per Qmin
	N ab	Qnmax l/sec	Qnmin l/sec	Sp ha	Stot ha	IMP %	L m	D m	i %	ks	Vp m/s	Qp l/s	Ta min	Tr min	Tcr min	ic mm/h	ϕ	Qc l/s	Qmax l/s	$\frac{Qmax}{Qp}$	h/d	$\frac{Vmax}{Vp}$	Vmax m/s	$\frac{Qmin}{Qp}$	h/d	$\frac{Vmin}{Vp}$	Vmin m/s
1	900	5.05	2.65	1.0	1	55	200	0.4	0.8	70	1.35	170	5	2.47	6.65	97.9	0.49	131.9	136.9	0.808	0.7	1.12	1.51	0.0156	0.07	0.3	0.405
2	1300	12.34	6.48	1.6	2.6	80	250	0.6	0.7	70	1.65	467	5	4.99	8.33	88.8	0.59	380.2	392.6	0.840	0.7	1.12	1.85	0.0139	0.07	0.3	0.496
																										0.34	0.561
3	1400	7.85	4.13	1.8	1.8	68	400	0.5	0.9	70	1.66	326	5	4.02	7.68	92.0	0.58	264.9	272.8	0.837	0.7	1.12	1.86	0.0127	0.07	0.3	0.498
																										0.37	0.614

Esercizio n°3

Sequenza I

Il numero di attacchi all'ora è generalmente compreso fra 4 e 12, a cui corrispondono "tempi di ciclo" t_c compresi fra 15 (900 sec) e 5 minuti (300 sec).

Si assume pertanto un tempo di ciclo medio pari a:

$$t_c = 10 \text{ min} = 600 \text{ sec};$$

Il volume corrispondente a ciascuna pompa è dato dalla seguente relazione:

$$V_k = t_c \cdot \frac{Q_k}{4}$$

$$\begin{cases} Q_1 = 250 \text{ l s}^{-1} = 0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \Rightarrow V_1 = 600 \cdot \frac{0.25}{4} = 37.5 \text{ m}^3 \\ Q_2 = 250 \text{ l s}^{-1} = 0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \Rightarrow V_2 = 37.5 \text{ m}^3 \\ Q_3 = 250 \text{ l s}^{-1} = 0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \Rightarrow V_3 = 37.5 \text{ m}^3 \\ Q_4 = 250 \text{ l s}^{-1} = 0.25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \Rightarrow V_4 = 37.5 \text{ m}^3 \end{cases}$$

Il volume del bacino di pescaggio contenente le quattro pompe sarà quindi pari a:

$$V_{tot} = \sum_{k=1}^4 V_k + V_{ris} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_{ris} = (150 + V_{ris}) \text{ m}^3$$

Sequenza II

Dal grafico, per un fissato t_c di 10 minuti e per una Q di 250 l/s, si ottiene che il volume corrispondente a ciascuna pompa vale:

$$\begin{cases} V_1 = 37.5 \text{ m}^3 \\ V_2 = 15 \text{ m}^3 \\ V_3 = 10 \text{ m}^3 \\ V_4 = 8 \text{ m}^3 \end{cases} \Rightarrow V_{tot} = \sum_{k=1}^4 V_k + V_{ris} = (70.5 + V_{ris}) \text{ m}^3$$

