



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

CRITERI DI PROGETTO E SOSTENIBILITÀ DEGLI IMPIANTI IDRICI

Tesi di laurea triennale in Impianti Meccanici

Relatore

Prof. Mauro Gamberi

Presentata da

Valentin Frosin

Sessione 10/2025

Anno Accademico 2024/2025

Sommario

Introduzione.....	1
-------------------	---

Capitolo 1

Inquadramento generale degli impianti idrici	3
1.1 Impianti ausiliari negli stabilimenti.....	3
1.2 Funzioni degli impianti idrici	4
1.3 Fonti di approvvigionamento	5
1.4 Configurazioni tipiche di rete.....	6
1.4.1 Impianto idrico senza serbatoio di compenso.....	7
1.4.2 Impianto idrico con serbatoio di compenso.....	8
1.4.3 Impianto idrico pressurizzato con autoclave	10

Capitolo 2

Componenti degli impianti idrici.....	12
2.1 Tubazioni e materiali.....	12
2.1.1 Tubi in acciaio	12
2.1.2 Tubi in ghisa sferoidale	13
2.1.3 Tubi in rame.....	13
2.1.4 Tubi in materiale plastico	14
2.1.5 Tubi in materiale composito	14
2.1.6 Rivestimenti protettivi	14
2.2 Giunti, raccordi, flange e guarnizioni.....	15
2.2.1 Giunti.....	15
2.2.2 Raccordi.....	16
2.2.3 Flange	17
2.2.4 Guarnizioni	18
2.3 Organi di intercettazione e regolazione.....	19

2.3.1 Saracinesche	19
2.3.2 Valvole.....	20
2.3.3 Rubinetti	21
2.3.5 Valvole ad innesto rapido	21
2.4 Pompe.....	22
2.4.1 Principio di funzionamento	22
2.4.2 Componenti principali	23
2.4.3 Curve caratteristiche e rendimenti	24
2.4.4 Cavitazione e NPSH (Net Positive Section Head)	24
2.4.5 Collegamenti in serie e in parallelo	25
2.5 Sistemi di accumulo	25
2.5.1 Serbatoi sopraelevati.....	26
2.5.2 Autoclavi	27

Capitolo 3

Dimensionamento tecnico.....	28
3.1 Richiami teorici: equazione di Bernoulli e perdite di carico.....	28
3.1.1 Perdite di carico distribuite.....	28
3.1.2 Perdite di carico concentrate.....	30
3.2 Criteri di calcolo dei diametri delle tubazioni.....	32
3.2.1 Reti di distribuzione aperte.....	32
3.2.2 Reti di distribuzione chiuse	33
3.2.3 Considerazioni di progetto.....	34
3.3 Dimensionamento serbatoi ed autoclavi	35
3.3.1 Dimensionamento del serbatoio di accumulo.....	35
3.3.2 Dimensionamento delle autoclavi	37
3.4 Scelta e verifica della pompa	38

Capitolo 4

Innovazioni e sostenibilità	39
4.1 Efficienza energetica nei sistemi di pompaggio.....	39
4.1.1 Indicatori e quadro normativo	39
4.1.2 Aspetti sull'efficienza energetica	40
4.1.3 Motori ad alta efficienza e componenti ausiliari	41
4.1.4 Gestione e ottimizzazione energetica	41
4.2 Monitoraggio e digitalizzazione.....	42
4.2.1 Sistemi di monitoraggio e sensoristica	42
4.2.2 Automazione e controllo intelligente	42
4.2.3 Digital twin e manutenzione predittiva	43
4.2.4 Vantaggi della digitalizzazione	43
4.3 Materiali innovativi e soluzioni anticorrosione.....	44
4.3.1 Materiali metallici e trattamenti protettivi.....	44
4.3.2 Materiali compositi e polimeri avanzati	45
4.3.3 Soluzioni anticorrosione e sostenibilità.....	45
4.4 Recupero e riutilizzo delle acque	46
4.4.1 Recupero delle acque meteoriche	46
4.4.2 Riutilizzo delle acque di processo	46
4.4.3 Integrazione con la gestione digitale	47
4.4.4 Benefici ambientali ed economici	47
4.5 Contributo alla decarbonizzazione	48
4.5.1 Efficienza energetica per la sostenibilità	48
4.5.2 Gestione digitale degli impianti idrici	48
4.5.3 Integrazione con le energie rinnovabili	49
4.5.4 Verso la neutralità carbonica negli impianti idrici	49

Capitolo 5

Caso applicativo semplificato	50
5.1 Dati ipotetici di progetto	50
5.1.1 Descrizione dell'impianto.....	50
5.1.2 Parametri di progetto	50
5.1.3 Configurazione impiantistica.....	51
5.1.4 Schema dell'impianto	52
5.2 Dimensionamento di tubazioni e pompe.....	53
5.2.1 Calcolo dei diametri interni	53
5.2.2 Calcolo delle perdite di carico	54
5.2.3 Prevalenza e scelta della pompa	55
5.3 Verifica serbatoio ed autoclave	56
5.3.1 Architettura impianto.....	56
5.3.2 Verifica del serbatoio di accumulo.....	57
5.3.3 Verifica dell'autoclave	58
Conclusioni	59
Indice figure	61
Indice Tabelle	64
Bibliografia	65
Sitografia	66

Introduzione

Nella struttura di un impianto industriale si riscontrano due tipi principali: gli impianti tecnologici, che operano le trasformazioni produttive, e gli impianti di servizio o ausiliari, che forniscono i fluidi e le energie stesse necessarie per il loro funzionamento.

I sistemi tecnologici, seppur essendo il centro della produzione, non possono funzionare senza l'assistenza dei sistemi ausiliari, i quali assicurano condizioni di funzionamento, sicurezza ed efficienza. In questi, i sistemi idrici giocano un ruolo determinante, in quanto assicurano l'approvvigionamento, la distribuzione e la gestione dell'acqua per scopi di processo, raffreddamento, lavaggio o sicurezza.

Il corretto dimensionamento e il buon utilizzo di questi impianti hanno diretta influenza sulle prestazioni complessive dello stabilimento e sulla quantità di risorse naturali utilizzate. Con gli ultimi anni, l'incremento dell'attenzione verso la sostenibilità ambientale e l'efficienza energetica ha determinato un avanzamento nei criteri progettuali, con l'introduzione di nuovi materiali, di sistemi di recupero delle acque e di soluzioni di monitoraggio intelligente.

La presente tesi analizza i principali criteri di progetto e le migliori pratiche applicabili negli impianti idrici industriali, evidenziando le soluzioni tecnico-costruttive che permettono il connubio di affidabilità, sicurezza e sostenibilità.

Dopo un inquadramento generale sugli impianti di servizio e sul ruolo dell'acqua in ambito industriale, verranno approfonditi i componenti principali ed i metodi di dimensionamento. Seguirà una riflessione sulle innovazioni tecnologiche più recenti in materia di efficienza e riduzione dei consumi idrici, con l'obiettivo di delineare un quadro sintetico ma completo delle moderne strategie progettuali.

Capitolo 1

Inquadramento generale degli impianti idrici

1.1 Impianti ausiliari negli stabilimenti

All'interno di uno stabilimento industriale coesistono differenti tipologie di impianti, ognuna con funzioni specifiche nel processo produttivo.

È possibile distinguere, in generale, tra impianti di produzione (o tecnologici) e impianti di servizio (o ausiliari).

I primi rappresentano il cuore del sistema produttivo, poiché effettuano le trasformazioni delle materie prime o dei semilavorati in prodotti finiti; i secondi, invece, hanno il compito di fornire e gestire i servizi tecnici necessari al corretto funzionamento del processo industriale.

Gli impianti di servizio comprendono tutti quei sistemi destinati a garantire la disponibilità continua delle risorse energetiche e dei fluidi necessari alle attività produttive, come acqua, aria compressa, vapore, energia elettrica e termica, oltre a quelli che assicurano le condizioni ambientali e di sicurezza per il personale e le apparecchiature.

Essi costituiscono una rete invisibile ma essenziale, capace di assicurare la continuità operativa e l'efficienza complessiva dell'impianto industriale.

In molti casi, l'investimento economico e la complessità gestionale degli impianti ausiliari possono superare quelli degli impianti tecnologici, poiché da essi dipendono affidabilità, sicurezza e sostenibilità dell'intera produzione.

Gli impianti di servizio possono essere classificati secondo tre criteri principali:

- Entità servita: impianti per i mezzi produttivi (macchine, apparecchiature, linee di processo) e impianti per le persone addette (climatizzazione, illuminazione, sicurezza);
- Tipo di servizio: impianti di alimentazione, che distribuiscono energia o fluidi alle utenze (ad esempio acqua, vapore, aria compressa), e impianti di scarico, che raccolgono e trattano reflui, gas o acque di scarico;
- Funzione svolta: produzione e distribuzione di energia (termica, elettrica, pneumatica), controllo delle condizioni ambientali, trasporto di materiali solidi o fluidi e gestione dell'interazione impianto-ambiente esterno (trattamento acque, emissioni, ecc.).

Gli impianti idrici rientrano in questa categoria e rappresentano uno dei servizi più diffusi e critici per qualsiasi contesto produttivo.

Essi assicurano l'approvvigionamento, la distribuzione e il recupero dell'acqua per i diversi usi industriali, contribuendo sia alla continuità operativa sia alla sostenibilità ambientale dello stabilimento.

1.2 Funzioni degli impianti idrici

Tra i diversi impianti di servizio presenti negli stabilimenti industriali, gli impianti idrici hanno un ruolo di primaria importanza.

L'acqua, infatti è una risorsa indispensabile non solo per il benessere del personale e la sicurezza degli ambienti di lavoro, ma soprattutto per il corretto svolgimento di numerosi processi produttivi.

In quasi tutte le industrie, la disponibilità di acqua in quantità, pressione e qualità adeguate è condizione essenziale per garantire la continuità e l'efficienza del ciclo produttivo.

Il fabbisogno idrico industriale varia notevolmente a seconda del settore e delle specifiche applicazioni: si va da consumi modesti per usi igienico-sanitari, a quantità molto elevate per processi di lavaggio, raffreddamento o trasformazione.

In alcuni comparti produttivi, come per esempio quello alimentare, chimico, cartario o metallurgico, l'acqua costituisce un vero e proprio elemento di processo.

A titolo esemplificativo, uno zuccherificio che produca 100.000 kg di zucchero al giorno richiede approssimativamente oltre 10.000 m³ di acqua al giorno, valore che evidenzia la rilevanza strategica del servizio idrico e la necessità di disporre di adeguati sistemi di approvvigionamento e recupero.

Le principali funzioni di un impianto idrico industriale possono essere così riassunte:

- Approvvigionamento, tramite captazione da acquedotti, pozzi o altre fonti;
- Distribuzione, mediante reti e sistemi di pompaggio che assicurano la portata e la pressione richieste;
- Raffreddamento e lavaggio, con utilizzo dell'acqua come fluido di processo per dissipare calore o pulire impianti e superfici;
- Trattamento e ricircolo, per la depurazione e il riuso delle acque reflue, in un'ottica di sostenibilità;
- Sicurezza, attraverso l'alimentazione dei sistemi antincendio e delle reti di emergenza.

Gli impianti idrici antincendio, in particolare, rappresentano una componente fondamentale del sistema di sicurezza industriale.

Essi assicurano la disponibilità immediata di acqua adatta all'alimentazione di idranti, naspi e sistemi di spegnimento automatico.

La loro progettazione deve garantire affidabilità, autonomia e conformità alle norme tecniche e legislative vigenti, al fine di tutelare persone, impianti e strutture da eventuali danni derivanti da incendi.

In conclusione, gli impianti idrici negli stabilimenti industriali svolgono una molteplicità di funzioni che vanno ben oltre il semplice supporto al processo produttivo: essi contribuiscono alla sicurezza, all'efficienza energetica e alla sostenibilità ambientale dell'intero sistema industriale.

1.3 Fonti di approvvigionamento

Gli impianti idrici industriali richiedono un sistema di alimentazione affidabile e continuo, capace di garantire la disponibilità d'acqua nelle quantità e con le caratteristiche necessarie al processo produttivo.

Le principali fonti di approvvigionamento sono:

- acquedotti pubblici;
- acque superficiali (fiumi, laghi, mari, canali);
- falde sotterranee, sia freatiche che artesiane.

La scelta della fonte di alimentazione dipende da numerosi fattori tecnici, economici e ambientali, variabili per ciascuno stabilimento.

Tra i più rilevanti si ricordano:

- il fabbisogno idrico complessivo e la quantità di acqua richiesta dai processi industriali;
- le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua disponibile e la compatibilità con le esigenze del ciclo produttivo;
- la profondità e la ricchezza delle falde sotterranee;
- la vicinanza di acquedotti o corsi d'acqua superficiali;
- il costo unitario dell'acqua proveniente da ciascuna fonte.

Nelle industrie medio-grandi è spesso conveniente ricorrere a soluzioni miste, combinando l'allacciamento all'acquedotto pubblico per l'acqua potabile con la derivazione da pozzi o corsi d'acqua per gli usi di processo.

In questi casi, la derivazione dall'acquedotto pubblico avviene mediante un sistema di allacciamento dotato di valvole di intercettazione, contatori e saracinesche, che consentono di regolare la portata e la pressione dell'acqua in ingresso allo stabilimento.

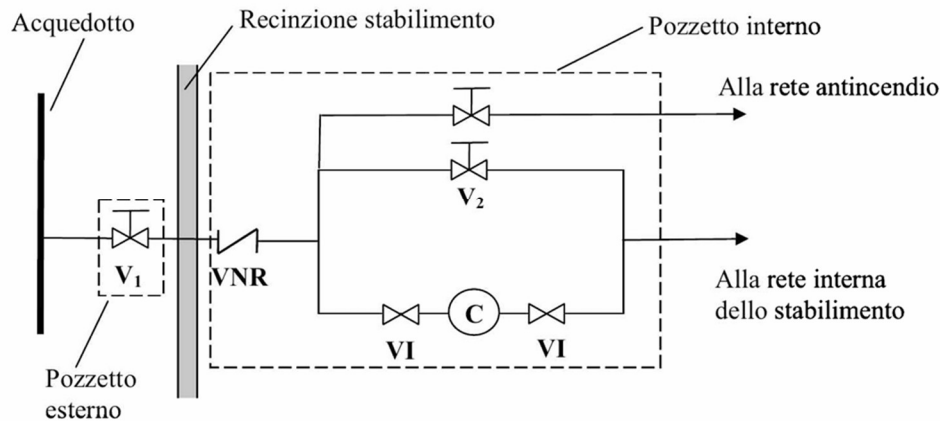


Figura 1 - Allacciamento all'acquedotto pubblico

L'acqua destinata ad usi industriali può contenere impurità di diversa natura (gassose, solide o disciolte) e qualora il processo lo richieda, deve essere sottoposta a trattamenti di purificazione o depurazione, come filtrazione, flocculazione o adsorbimento su carboni attivi.

Questi trattamenti sono fondamentali per evitare fenomeni di incrostazione, corrosione o alterazione delle proprietà dei fluidi di processo.

In sintesi, la scelta della fonte di approvvigionamento rappresenta una fase cruciale nella progettazione di un impianto idrico industriale, poiché deve garantire al tempo stesso sicurezza della fornitura, qualità dell'acqua, economicità e sostenibilità nel lungo periodo.

Una volta assicurata la disponibilità della risorsa, diventa necessario progettare la distribuzione interna, definendo una rete capace di mantenere adeguati livelli di pressione, portata e continuità del servizio.

Tali aspetti costruttivi e funzionali saranno approfonditi nel paragrafo successivo, dedicato alle configurazioni tipiche delle reti idriche industriali.

1.4 Configurazioni tipiche di rete

La rete di distribuzione di un impianto idrico industriale può essere realizzata secondo diverse configurazioni, scelte in funzione delle caratteristiche del processo produttivo, dell'andamento dei consumi e delle condizioni di alimentazione disponibili.

L'obiettivo principale è garantire che in ogni momento l'acqua raggiunga le utenze con portata e pressione adeguate, evitando sprechi energetici e assicurando continuità di servizio.

Le configurazioni più comuni sono tre:

- impianto senza serbatoio di compenso;
- impianto con serbatoio di compenso;
- impianto pressurizzato con autoclave.

1.4.1 Impianto idrico senza serbatoio di compenso

Questa configurazione è adottata quando il diagramma di richiesta giornaliera dell'acqua risulta pressoché costante nel tempo, ossia con variazioni di portata contenute durante l'arco della giornata.

In tali condizioni, è possibile utilizzare una pompa di portata nominale che lavori in un intervallo ristretto di variabilità, garantendo un buon rendimento energetico.

La portata e la pressione vengono regolate tramite una valvola a comando pressostatico (VRP), posta a valle della pompa.

In caso di riduzione del fabbisogno idrico, la valvola si chiude parzialmente, aumentando le perdite di carico e modificando il punto di funzionamento della pompa, che opera a prevalenza maggiore e portata minore rispetto alle condizioni nominali.

La figura seguente illustra il principio di funzionamento del sistema:

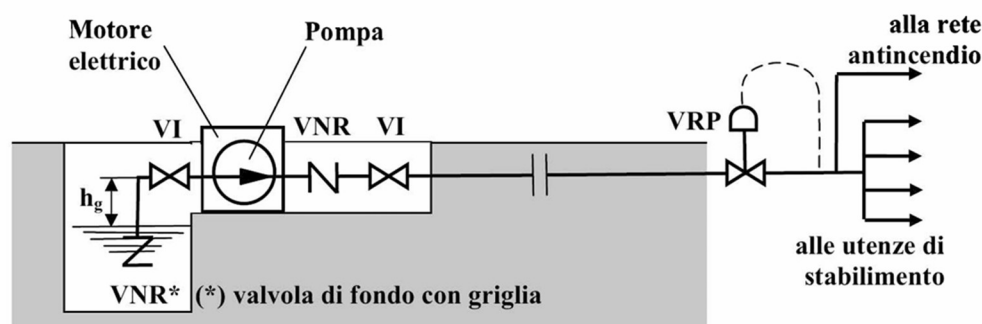


Figura 2 - Impianto idrico senza serbatoio di compenso

Quando le perdite di carico crescono, la caratteristica del circuito (di tipo parabolico) si sposta, determinando un nuovo punto di equilibrio tra curva della pompa e curva del sistema. La pompa lavora quindi con prevalenza H^* e portata Q^* inferiori ai valori nominali, con un rendimento leggermente ridotto.

Questo schema risulta semplice e compatto, ma è consigliabile solo in impianti con fabbisogno regolare, poiché non dispone di un volume d'acqua di riserva capace di compensare le variazioni di consumo o eventuali fermate della pompa.

1.4.2 Impianto idrico con serbatoio di compenso

Quando la richiesta d'acqua all'interno dello stabilimento industriale presenta variazioni significative nel corso della giornata, è opportuno adottare una configurazione con serbatoio di accumulo o di compenso.

Questa soluzione permette di immagazzinare l'acqua durante le ore di minore consumo e di renderla disponibile nei periodi di punta, garantendo continuità di servizio e un migliore sfruttamento delle pompe di alimentazione.

I serbatoi di accumulo possono essere sopraelevati, a terra o interrati, a seconda delle esigenze impiantistiche e dello spazio disponibile.

Quelli sopraelevati, spesso utilizzati anche come riserva antincendio, sono costruiti in acciaio o cemento armato e possono assumere diverse forme (cilindrica, sferica, a fungo). L'altezza del serbatoio deve essere tale da assicurare alle utenze la pressione necessaria, tenendo conto delle perdite di carico lungo la rete di distribuzione.

Il funzionamento dell'impianto è regolato da un sistema di elettrolivelli che comanda l'avvio e l'arresto delle pompe di alimentazione in base al livello d'acqua nel serbatoio.

Quando il livello scende sotto il valore minimo, le pompe si attivano per il riempimento; una volta raggiunto il livello massimo, l'alimentazione viene interrotta.

Il volume utile del serbatoio può essere espresso come:

$$V = V_{min} + \Delta V + \Delta V_0$$

dove:

- V_{min} è il volume minimo corrispondente al livello della bocca di presa dell'acqua industriale;
- ΔV rappresenta la capacità utile necessaria a compensare le variazioni del fabbisogno giornaliero;
- ΔV_0 è il volume libero posto nella parte superiore, necessario per evitare traboccamenti e consentire il corretto funzionamento degli elettrolivelli.

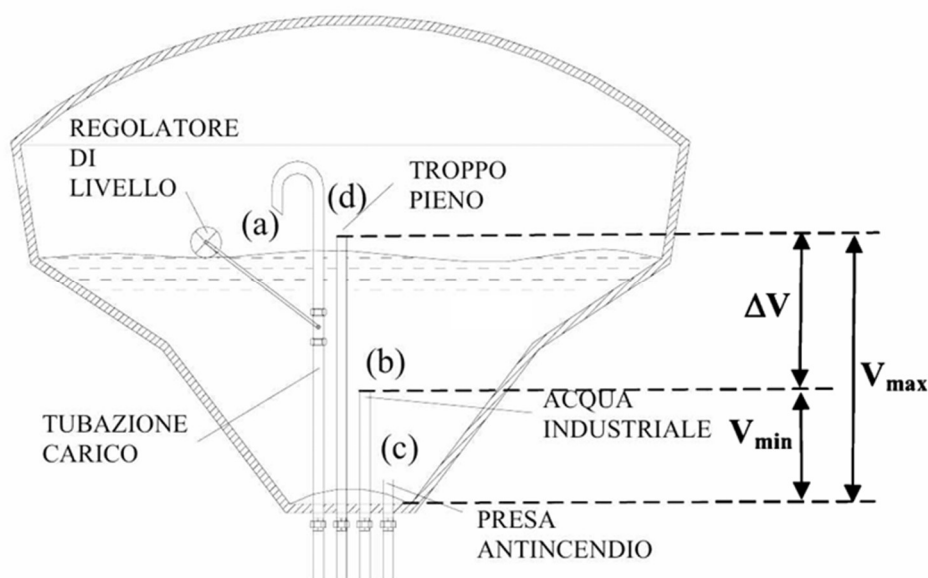


Figura 3 - Sezione tipica di un serbatoio sopraelevato per l'accumulo di acqua industriale ed antincendio

La determinazione della capacità minima del serbatoio di compenso si basa sul diagramma di richiesta giornaliera dell'acqua (Q_t), da cui si ricava il consumo totale nelle 24 ore e la portata media oraria:

$$Q_m = \frac{V_{tot}}{24}$$

Confrontando la curva integrale reale dei consumi con quella ideale a portata costante, si ottiene il segmento verticale corrispondente alla capacità minima ΔV , necessaria a bilanciare le fasi di carico e scarico del serbatoio.

Per sicurezza, tale capacità viene maggiorata per tener conto di richieste improvvise o di interruzioni temporanee dell'alimentazione.

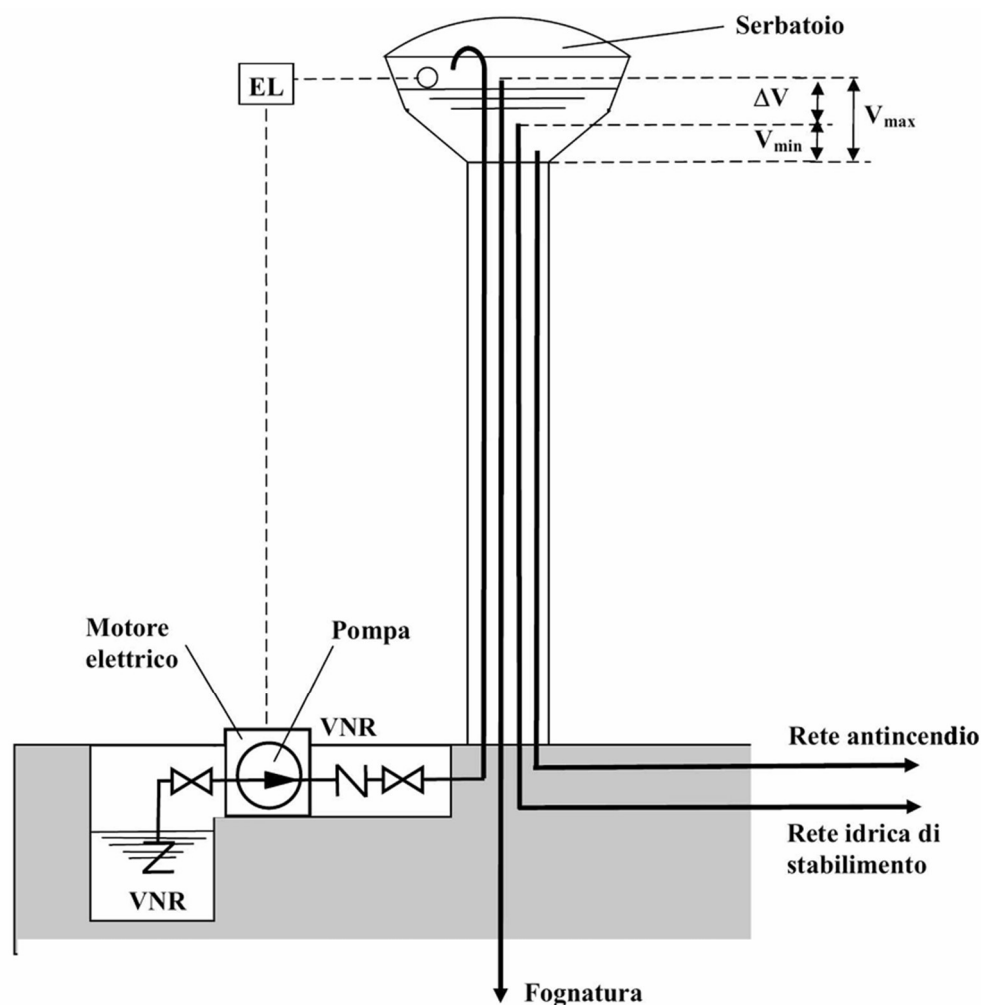


Figura 4 - Impianto con serbatoio di accumulo sopraelevato per il servizio idrico ad uno stabilimento industriale

In alternativa ai serbatoi sopraelevati possono essere adottate vasche interrato o seminterrate, realizzate in cemento armato, collegate a gruppi di pompaggio che inviano l'acqua alle reti industriali e antincendio.

Per garantire la sicurezza dell'alimentazione, le elettropompe sono spesso affiancate da motopompe o gruppi elettrogeni in grado di entrare in funzione in caso di emergenza o mancanza di energia elettrica.

1.4.3 Impianto idrico pressurizzato con autoclave

Quando non si intende installare un serbatoio sopraelevato, ma si desidera mantenere una pressione costante nella rete di distribuzione, si ricorre all'impianto idrico pressurizzato con autoclave.

Questo sistema si basa su un serbatoio chiuso, parzialmente riempito d'acqua e sovrastato da un cuscino d'aria in pressione, collegato alla rete di alimentazione mediante una elettropompa.

Durante il funzionamento, quando il prelievo d'acqua dalle utenze fa diminuire la pressione interna fino ad un limite inferiore, un pressostato di minima (P_m) attiva la pompa, che immette nuova acqua nel serbatoio fino al raggiungimento della pressione massima prefissata. A questo punto, un pressostato di massima (P_M) arresta la pompa, mantenendo la pressione entro un intervallo di valori stabilito in fase di progetto. La pressione interna dell'autoclave è quindi soggetta a oscillazioni controllate, comprese fra due estremi (p_0 e p_1), determinati dalle caratteristiche del sistema e dal volume del cuscino d'aria.

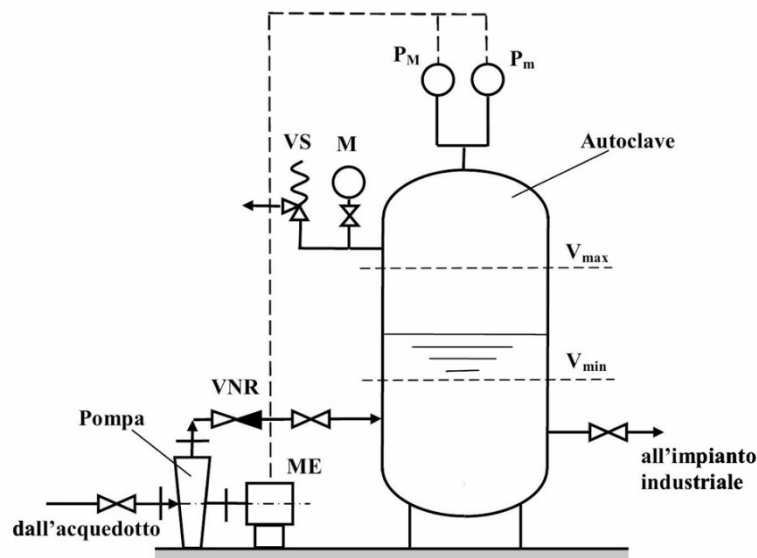


Figura 5 - Impianto idrico con autoclave, pompa e pressostati per piccole e medie applicazioni

Il volume d'acqua all'interno dell'autoclave varia tra un livello minimo V_{min} e un livello massimo V_{max} , corrispondenti ai due limiti di pressione.

Il funzionamento del sistema si basa sul principio di compressione isoterma dell'aria, descritto dalla relazione:

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 \Rightarrow V = V_0 - V_1 = V_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_1} \right)$$

dove V rappresenta il volume utile di acqua accumulato nel ciclo di funzionamento. In questo modo, l'autoclave è in grado di garantire un'erogazione continua anche in assenza momentanea di alimentazione della pompa.

Per impianti di elevata potenzialità, l'autoclave è dotata di un compressore d'aria comandato da pressostati, che provvede automaticamente al reintegro del cuscino d'aria man mano che questo tende a dissolversi nell'acqua.

In tali impianti, un elettrolivello regola il livello dell'acqua nel serbatoio, coordinandosi con i pressostati per mantenere costante la pressione interna.

Il sistema ad autoclave offre il vantaggio di occupare spazi ridotti, garantendo pressione costante in rete e una buona stabilità operativa anche in impianti complessi.

Tuttavia, comporta un costo energetico maggiore rispetto agli impianti con serbatoio di compenso, poiché richiede l'avvio frequente delle pompe e un controllo accurato delle pressioni interne.

Per questo motivo è generalmente adottato in impianti di piccola e media dimensione, oppure come sistema ausiliario per il mantenimento della pressione in reti di distribuzione industriali.

Capitolo 2

Componenti degli impianti idrici

2.1 Tubazioni e materiali

Il tipo di tubo utilizzato per il trasporto di un determinato fluido viene scelto in funzione delle condizioni di esercizio, delle caratteristiche del fluido e dell'ambiente in cui l'impianto è installato. Le principali variabili che influenzano la scelta sono la pressione e la temperatura di esercizio, la portata, la natura chimica del fluido (aggressività e corrosività), nonché la modalità di posa (interrata, aerea o interna al fabbricato). In generale, le tubazioni possono essere realizzate in acciaio, ghisa sferoidale, rame o materiali plastici e compositi, ciascuno dei quali presenta specifiche proprietà meccaniche e chimiche che ne determinano l'impiego.

2.1.1 Tubi in acciaio

I tubi in acciaio rappresentano la soluzione più diffusa negli impianti industriali, grazie all'elevata resistenza meccanica, alla tenuta alle alte pressioni e alla versatilità nelle diverse applicazioni.

In base al tipo di lavorazione e al trattamento superficiale, le principali tipologie di tubi in acciaio sono le seguenti:

- Lisci: con o senza saldatura, sono in acciaio non legato e vengono impiegati per la maggior parte delle reti in pressione;
- Con estremità filettate: possono essere forniti sia lisci che già filettati; vengono utilizzati soprattutto per condotte di piccolo diametro e per collegamenti smontabili;

- Zincati: zincatura effettuata per immersione a caldo, che serve ad evitare fenomeni di ossidazione e corrosione, soprattutto nei tratti esposti o in ambienti umidi;
- In acciaio inossidabile: impiegati in condizioni ostili di esercizio o in presenza di fluidi aggressivi, sono privi di saldatura e resistono molto bene alla corrosione.

Gli acciai più comuni sono quelli al carbonio (S235, S275, S355) oggi classificati secondo la normativa UNI EN 10025, mentre gli acciai inossidabili, come le leghe AISI 304 e 316, sono scelti per impieghi dove è richiesta maggiore resistenza alla corrosione o alle alte temperature. All'esterno, le tubazioni in acciaio possono essere protette mediante rivestimenti bituminosi o plastici applicati per estrusione, mentre nei tratti aerei si utilizzano vernici protettive o isolanti termici.

2.1.2 Tubi in ghisa sferoidale

I tubi in ghisa sferoidale sono ottenuti per centrifugazione e successivo trattamento termico (ricottura). Offrono una buona resistenza meccanica, durabilità e una discreta flessibilità, caratteristiche che li rendono ideali per reti di distribuzione idrica interrate.

La giunzione tra i vari elementi avviene generalmente mediante giunti a bicchiere con guarnizione elastomerica, che assicurano la tenuta idraulica e fungono da giunto dielettrico, riducendo il rischio di corrosione galvanica.

Le condotte in ghisa sferoidale, realizzate secondo la norma UNI EN 545, sono normalmente rivestite internamente in malta cementizia e protette esternamente con uno strato di zinco o vernice bituminosa; nei terreni più aggressivi si può aggiungere un rivestimento in polietilene. I principali tipi di ghisa tradizionalmente indicate come Fe 320, Fe 410 ed Fe 510, sono oggi classificate dalla norma EN 1563 come EN-GJS-350-22, EN-GJS-400-15 e EN-GJS-500-7, con resistenze a trazione comprese tra 350 e 500 Mpa.

2.1.3 Tubi in rame

Il rame è impiegato principalmente per tubazioni di piccolo diametro, come negli impianti sanitari, di riscaldamento o di raffreddamento. È apprezzato per l'elevata conducibilità termica ed elettrica e per la buona resistenza alla corrosione.

Le giunzioni possono essere realizzate mediante brasatura o raccordi filettati, garantendo una tenuta efficace e duratura nel tempo.

Per la sua duttilità e facilità di posa, il rame è indicato per applicazioni con pressioni moderate, fino a circa 10 bar e temperature non troppo elevate.

2.1.4 Tubi in materiale plastico

I materiali plastici hanno trovato ampia diffusione grazie alla leggerezza, alla resistenza chimica e alla facilità di installazione. Sono particolarmente adatti al trasporto di acqua e fluidi non aggressivi.

I principali tipi di tubi plastici sono:

- PVC rigido (policloruro di vinile): economico e resistente agli agenti chimici, viene impiegato per impianti a bassa e media pressione e per temperature fino a 60 °C;
- PP (polipropilene): adatto al trasporto di fluidi fino a 80 °C, offre buona resistenza meccanica, ottime proprietà dielettriche e un'elevata durata nel tempo;
- PE (polietilene): disponibile in versioni a bassa e alta densità, è molto utilizzato per reti idriche e scarichi industriali grazie alla sua flessibilità, alla saldabilità per termofusione e alla resistenza ad urti e vibrazioni.

2.1.5 Tubi in materiale composito

Per applicazioni più gravose, in cui si richiedono elevate resistenze chimiche e lunga durata, si impiegano tubi in vetroresina (PRFV: plastica rinforzata con fibre di vetro). Essi sono realizzati mediante avvolgimento su mandrino rotante di fibre impregnate di resina termoindurente e risultano particolarmente leggeri e resistenti alla corrosione, ideali per il convogliamento di fluidi aggressivi o fanghi industriali.

2.1.6 Rivestimenti protettivi

Per aumentare la durata delle condotte, vengono utilizzati rivestimenti interni ed esterni con funzione anticorrosiva e protettiva.

Internamente, le tubazioni possono essere trattate con malta cementizia, resine epossidiche o smalti bituminosi, che isolano il metallo dal contatto diretto con il fluido e ne migliorano la scorrevolezza.

Esternamente, si impiegano zincature, rivestimenti bituminosi o strati plastici estrusi, mentre nei tratti esposti vengono spesso applicate vernici protettive o materiali isolanti termici per ridurre le dispersioni e prevenire la corrosione.

2.2 Giunti, raccordi, flange e guarnizioni

2.2.1 Giunti

Il collegamento tra i vari tronchi di tubazione può essere realizzato mediante diverse tipologie di giunti, scelte in funzione del materiale, delle condizioni di esercizio e del tipo di fluido convogliato.

I principali sistemi di giunzione comprendono: giunti per saldatura, giunti a bicchiere, giunti a flangia, giunti a manicotto o bocchettone e giunti speciali.

I giunti per saldatura rappresentano la soluzione più comune per tubi in acciaio di medio e grande diametro, ma vengono impiegati anche per condotte di diametro ridotto. La saldatura può essere ossiacetilenica o elettrica e viene eseguita di testa, previa smussatura a “V” delle estremità dei tubi, al fine di garantire la penetrazione completa del cordone. Questa tipologia assicura un’ottima tenuta meccanica e idraulica, ed è ampiamente utilizzata in impianti per il trasporto di gas e fluidi in pressione.

I giunti a bicchiere possono essere invece saldati o non saldati. Nei primi, una delle estremità del tubo presenta un allargamento detto “bicchiere” in cui viene inserita l’estremità del tubo adiacente, con successiva saldatura perimetrale. Nei secondi, l’accoppiamento è garantito da guarnizioni in gomma o materiali plastici, che assicurano la tenuta anche in presenza di lievi disallineamenti. Questa seconda soluzione è particolarmente diffusa nei tubi di ghisa sferoidale e di materie plastiche, poiché consente una posa più rapida e una manutenzione semplificata.

I giunti a flangia vengono impiegati per il collegamento di tronchi di tubazioni o per il raccordo con apparecchiature, valvole e pompe. Le flange, generalmente metalliche, sono unite tra loro mediante bulloni e interposizione di una guarnizione che garantisce la tenuta. Esistono diverse tipologie di flange: piane, scorrevoli, cieche, a collare o ad anello. La scelta dipende dalla pressione di esercizio, dal diametro nominale e dal tipo di fluido convogliato. Le flange rappresentano inoltre una soluzione pratica per consentire lo smontaggio e la sostituzione dei componenti della linea.

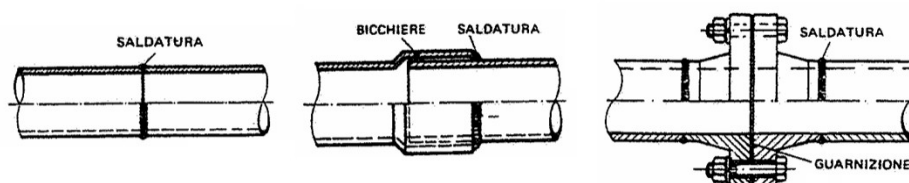


Figura 6 - Giunto saldato, giunto a bicchiere cilindrico saldato, giunto a flange

I giunti a manicotto e a bocchettone sono utilizzati per tubazioni di piccolo diametro, in particolare per condotte di acciaio e materie plastiche. Il manicotto è un elemento cilindrico filettato internamente, nel quale vengono avvitate le estremità dei tubi, che può essere saldato o incollato in funzione del materiale impiegato. I giunti a bocchettone, invece, sono costituiti da tre pezzi: due parti filettate ed un anello intermedio di tenuta, spesso in gomma o materiale plastico, che consente lo smontaggio rapido del collegamento.

Infine, i giunti speciali comprendono le connessioni di tipo Gibault, Express, Victaulic e i giunti adattabili. Questi dispositivi consentono l'assorbimento di piccoli disassamenti e vibrazioni tra le tubazioni e permettono di unire condotte in materiali diversi o con diametri leggermente differenti. Trovano impiego nei sistemi soggetti a frequenti manutenzioni o dove è richiesta una particolare flessibilità del collegamento.

2.2.2 Raccordi

I raccordi sono elementi che consentono di collegare più tratti di tubazione o di modificarne direzione, sezione e configurazione. Si distinguono in base alla funzione e alla geometria in: gomiti, curve, T, croci, riduzioni, nippli, tappi e distribuzioni.

I gomiti e le curve servono per variare la direzione del flusso. Possono avere angoli di 90°, 45° o raggi di curvatura diversi in funzione dello spazio disponibile e delle perdite di carico ammissibili.

Le T consentono la derivazione del flusso in due direzioni, mentre le croci permettono la connessione di quattro condotte convergenti.

Le riduzioni vengono impiegate per raccordare tubi di diametro differente, mentre i nippli costituiscono brevi tronchi filettati utili per unire raccordi o prolungare tratti di tubazione. Infine, le calotte e i tappi servono per chiudere le estremità libere delle condotte, mentre i raccordi di distribuzione uniscono tre o più tubazioni in un unico punto.

I raccordi possono avere imbocchi lisci, da saldare o incollare, oppure filettati, generalmente in ghisa malleabile, ottone o acciaio. Per applicazioni che richiedono elevata resistenza alla corrosione, si impiegano raccordi in acciaio inossidabile. In ambito industriale, le connessioni filettate sono utilizzate soprattutto per diametri inferiori a 100 mm, mentre per dimensioni maggiori si preferiscono collegamenti saldati o con flange.

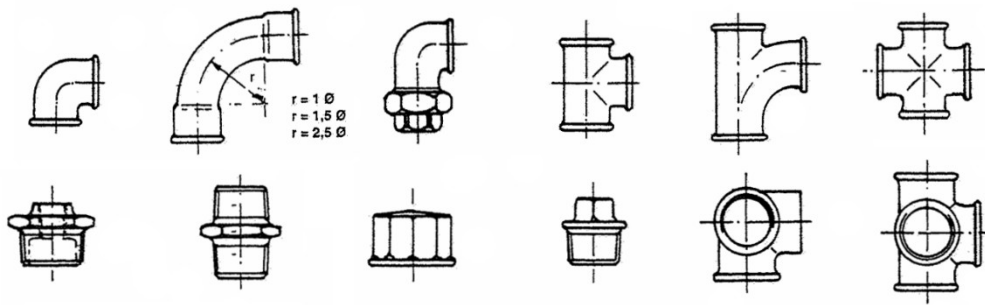


Figura 7 - Raccordo a gomito a 90°, curva a 90°, gomito con bocchettone, T a 90°, T a una curva, croce, riduzione, nipplo, calotta, tappo, distribuzione a gomito, distribuzione a croce

2.2.3 Flange

Le flange costituiscono uno dei sistemi più diffusi per l'unione di tubazioni, poiché consentono un montaggio e uno smontaggio agevole, garantendo al contempo una buona tenuta meccanica. Sono elementi circolari dotati di fori per il serraggio mediante bulloni e vengono accoppiate interponendo una guarnizione.

In base alla forma e all'impiego si distinguono diversi tipi di flange:

- piane, utilizzate per pressioni medio-basse e fluidi non corrosivi;
- scorrevoli, impiegate in reti di distribuzione di fluidi caldi a bassa pressione;
- cieche, destinate alla chiusura di tronchi di tubazione o all'interruzione temporanea della linea;
- a collare, usate per condotte a media e alta pressione;
- ad anello, con scanalatura per guarnizioni di tipo ring-joint, adatte ad impianti ad alta pressione e temperatura.

Le flange vengono collegate mediante bulloni disposti simmetricamente lungo la circonferenza e la loro disposizione è standardizzata in funzione del diametro nominale e della pressione (DN, PN).

La tenuta del collegamento dipende in larga misura dalla qualità della guarnizione, dal profilo di accoppiamento e dal corretto serraggio dei bulloni. Durante il montaggio, le superfici delle flange devono essere parallele e pulite, al fine di garantire una distribuzione uniforme delle pressioni di contatto.

2.2.4 Guarnizioni

Le guarnizioni sono elementi fondamentali per assicurare la tenuta delle giunzioni flangiate o di altri sistemi di collegamento. La loro funzione è impedire la fuoriuscita del fluido e compensare le irregolarità delle superfici di accoppiamento.

La scelta del materiale dipende dalla pressione e dalla temperatura di esercizio, nonché dalla natura chimica del fluido convogliato.

Si distinguono principalmente in:

- guarnizioni piane, costituite da fibre aramidiche o gomma sintetica, idonee per basse e medie pressioni;
- guarnizioni metalliche, in acciaio, rame o alluminio, impiegate per fluidi corrosivi e alte pressioni;
- guarnizioni metalloplastiche, formate da una lamina metallica con anima in fibra o grafite, adatte per temperature elevate (fino a 600 °C);
- guarnizioni spirali, composte da nastri metallici e strati di materiale plastico alternati, utilizzate per pressioni e temperature medio-alte;
- guarnizioni ad anello (ring-joint), con sezione ovale o ottagonale, impiegate nelle flange ad alta pressione e temperatura.

La tenuta di una guarnizione è influenzata dal profilo e dalla rugosità delle facce contrapposte delle flange, dalla profondità dei solchi e dal corretto serraggio dei bulloni. Durante l'installazione, è essenziale procedere con un serraggio incrociato e graduale, utilizzando una chiave dinamometrica, per evitare deformazioni e garantire una distribuzione uniforme della pressione di contatto.

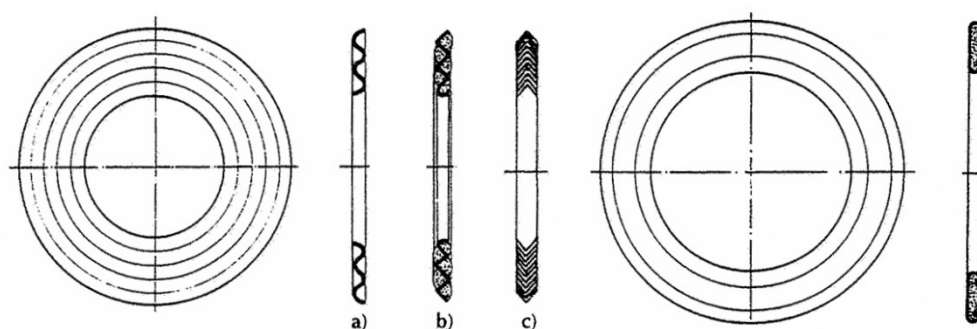


Figura 8 - A sinistra la guarnizione ondulata: a) metallica; b) metalloplastica; c) spirometallica; mentre a destra la guarnizione piana

2.3 Organi di intercettazione e regolazione

Gli organi di intercettazione e regolazione hanno la funzione di controllare, interrompere o modulare il flusso del fluido all'interno delle condotte. Essi vengono installati nei punti in cui è necessario gestire la portata o consentire operazioni di manutenzione sull'impianto, e sono progettati in modo da garantire affidabilità, tenuta e durata nel tempo.

La scelta del tipo di organo dipende da vari fattori, tra cui la pressione e la temperatura di esercizio, la natura chimico-fisica del fluido, il diametro della tubazione e la frequenza delle manovre.

Dal punto di vista costruttivo, un organo di intercettazione è generalmente composto da un corpo o carcassa, un otturatore che regola il passaggio del fluido, una sede di tenuta, una guarnizione e un dispositivo di comando (manuale o automatico).

I materiali impiegati per la costruzione sono principalmente acciaio, ghisa, bronzo e ottone per le parti strutturali, mentre le superfici di tenuta possono essere rivestite con elastomeri o materiali plastici resistenti alla corrosione.

2.3.1 Saracinesche

Le saracinesche sono organi di intercettazione che consentono l'apertura o la chiusura completa del condotto mediante il movimento traslatorio di un otturatore, detto cuneo, che si muove perpendicolarmente all'asse della tubazione.

Sono impiegate prevalentemente in condotte di grande diametro e risultano particolarmente indicate per manovre "tutto aperto – tutto chiuso", in quanto non adatte alla regolazione graduale della portata.

L'otturatore, durante la manovra, scorre tra due sedi di tenuta poste all'interno del corpo della valvola.

Le saracinesche possono essere a cuneo elastico, che consente un miglior adattamento alle sedi, oppure a facce parallele, più adatte per fluidi a basse pressioni o per installazioni interrate. Generalmente sono realizzate in ghisa sferoidale o in acciaio al carbonio, mentre le sedi di tenuta possono essere in bronzo, acciaio inox o elastomero, in funzione del tipo di fluido. Grazie alla loro semplicità costruttiva, le saracinesche garantiscono perdite di carico molto ridotte e una buona affidabilità nel tempo.

2.3.2 Valvole

Le valvole sono componenti destinati sia all'intercettazione sia alla regolazione del flusso. La loro caratteristica principale è la possibilità di variare in modo continuo la portata del fluido agendo sull'otturatore, che può assumere diverse configurazioni: a otturatore sferico, a cono, a disco o a membrana.

Le valvole vengono impiegate in impianti industriali e civili per un ampio intervallo di pressioni e temperature, e possono essere azionate manualmente, pneumaticamente, elettricamente o tramite servocomandi.

Tra le principali tipologie si distinguono:

- valvole a flusso avviato, utilizzate per regolare la portata mediante uno spostamento assiale dell'otturatore;
- valvole di sicurezza, destinate ad aprirsi automaticamente in caso di sovrappressione, proteggendo l'impianto da condizioni anomale;
- valvole a diaframma, particolarmente adatte per fluidi corrosivi o contenenti particelle solide;
- valvole di regolazione della pressione o della portata, che consentono il mantenimento di valori costanti tramite molle di contrasto o dispositivi servocomandati;
- valvole automatiche a galleggiante, impiegate nei serbatoi per interrompere il flusso al raggiungimento di un determinato livello del liquido.

Le valvole moderne possono includere sensori e attuatori per il controllo remoto e l'integrazione con sistemi di automazione industriale.

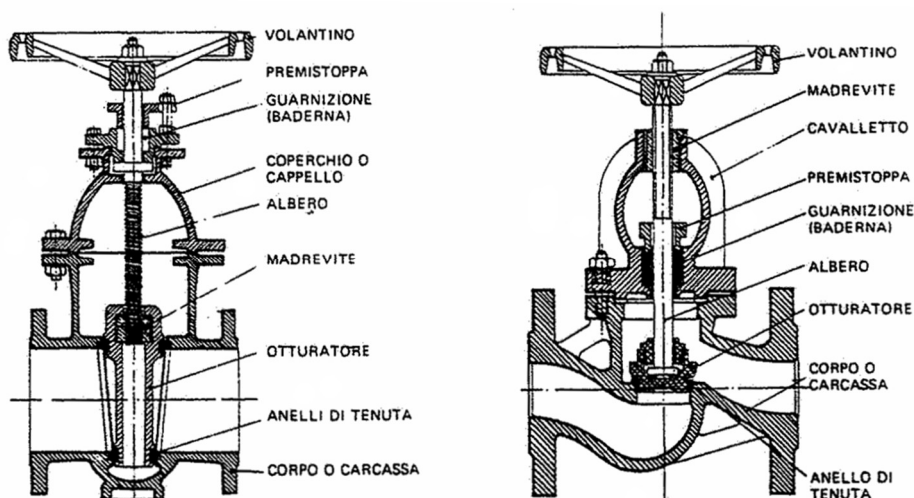


Figura 9 - Saracinesca e valvola (a flusso avviato)

2.3.3 Rubinetti

I rubinetti sono dispositivi di intercettazione di dimensioni più contenute, impiegati per fluidi a bassa o media pressione e per manovre frequenti. Possono essere a maschio, a sfera o a farfalla, a seconda della forma e del movimento dell'otturatore.

Nei rubinetti a maschio, l'otturatore presenta una forma tronco-conica con un foro di passaggio che, ruotando di 90° permette l'apertura o la chiusura completa.

I rubinetti a sfera, molto diffusi negli impianti moderni, utilizzano una sfera forata che ruota intorno al proprio asse, consentendo una chiusura rapida e una tenuta efficace anche con fluidi aggressivi.

I rubinetti a farfalla invece, sono caratterizzati da un disco rotante solidale all'albero di comando: la loro struttura compatta e il ridotto ingombro li rendono adatti per condotte di grande diametro e per applicazioni in cui è richiesta una manovra veloce con basse perdite di carico.

2.3.4 Valvole di ritegno

Le valvole di ritegno, o valvole di non ritorno, hanno la funzione di impedire l'inversione del flusso nel circuito consentendo il passaggio del fluido in una sola direzione. Il loro funzionamento si basa sulla pressione del fluido stesso, che apre la valvola nel verso del moto e la richiude automaticamente quando la direzione del flusso si inverte. Esistono diverse configurazioni costruttive:

- a clapet o a battente, in cui la chiusura è garantita da un disco incernierato che ruota sotto l'azione del flusso;
- a disco, più compatte e adatte a impianti con spazio ridotto;
- a sfera, che utilizzano una sfera come otturatore per garantire la tenuta;
- a molla, nelle quali la chiusura è assistita da una forza elastica che accelera la risposta.

Le valvole di ritegno trovano ampio impiego in impianti di pompaggio e distribuzione idrica, in sistemi di aria compressa e in linee di processo dove è necessario evitare riflussi indesiderati.

2.3.5 Valvole ad innesto rapido

Le valvole ad innesto rapido sono componenti utilizzati per collegamenti e disconnessioni frequenti tra condotte o apparecchiature, garantendo al contempo la tenuta del fluido.

Sono composte da un corpo valvola e da un codolo di innesto, che si accoppiano mediante un meccanismo di chiusura automatica a molla.

Vengono impiegate principalmente in impianti pneumatici, in sistemi di distribuzione di aria compressa, e più raramente in impianti idraulici a bassa pressione.

Le valvole ad innesto rapido permettono un accoppiamento immediato senza necessità di utensili e sono generalmente realizzate in ottone, acciaio o materiale plastico rinforzato. Questi dispositivi migliorano la sicurezza e la praticità nelle operazioni di manutenzione, riducendo i tempi di intervento e le perdite di fluido durante il collegamento o lo scollegamento delle linee.

2.4 Pompe

Le pompe sono macchine operatrici destinate al trasferimento di energia meccanica ad un fluido, incrementandone la pressione e consentendone il movimento da un livello energetico inferiore ad uno superiore. Sono ampiamente utilizzate negli impianti industriali e civili per il sollevamento, la distribuzione e la circolazione dei fluidi.

Tra le diverse tipologie, le pompe dinamiche trovano largo impiego grazie alla loro regolarità di funzionamento, semplicità costruttiva e capacità di garantire portate elevate in modo continuo.

2.4.1 Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di una pompa centrifuga si basa sulla trasformazione dell'energia meccanica fornita dal motore in energia cinetica e di pressione del fluido.

Il liquido, aspirato al centro della girante, viene proiettato verso la periferia per effetto della forza centrifuga. Nel diffusore e nella voluta, parte dell'energia cinetica si trasforma in energia di pressione, che consente il sollevamento del fluido.

L'energia specifica ceduta al fluido è descritta dall'equazione di Eulero:

$$H_{th} = \frac{1}{g}(u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1})$$

dove H_{th} è la prevalenza teorica, u la velocità periferica e c_u la componente tangenziale della velocità assoluta del fluido (1 in ingresso e 2 in uscita).

In pratica, la prevalenza reale risulta inferiore a quella teorica per le perdite dovute a turbolenze e attriti interni.

2.4.2 Componenti principali

Le principali parti costitutive di una pompa centrifuga sono:

- Girante: organo rotante che trasmette energia al fluido. Può essere aperta, semichiusa o chiusa, a seconda del tipo di fluido trattato;
- Voluta (o chiocciola): raccoglie e convoglia il fluido in uscita, trasformando parte dell'energia cinetica in energia di pressione grazie alla sezione crescente;
- Albero e supporti: trasmettono il moto dal motore alla girante;
- Tenute: impediscono le perdite di fluido lungo l'albero;
- Bocche di aspirazione e mandata: permettono l'ingresso e l'uscita del fluido, mantenendo condizioni di pressione tali da evitare la cavitazione.

Durante il funzionamento, il moto rotatorio della girante genera una depressione nella zona centrale che richiama continuamente nuovo fluido, assicurando il flusso continuo nel sistema.

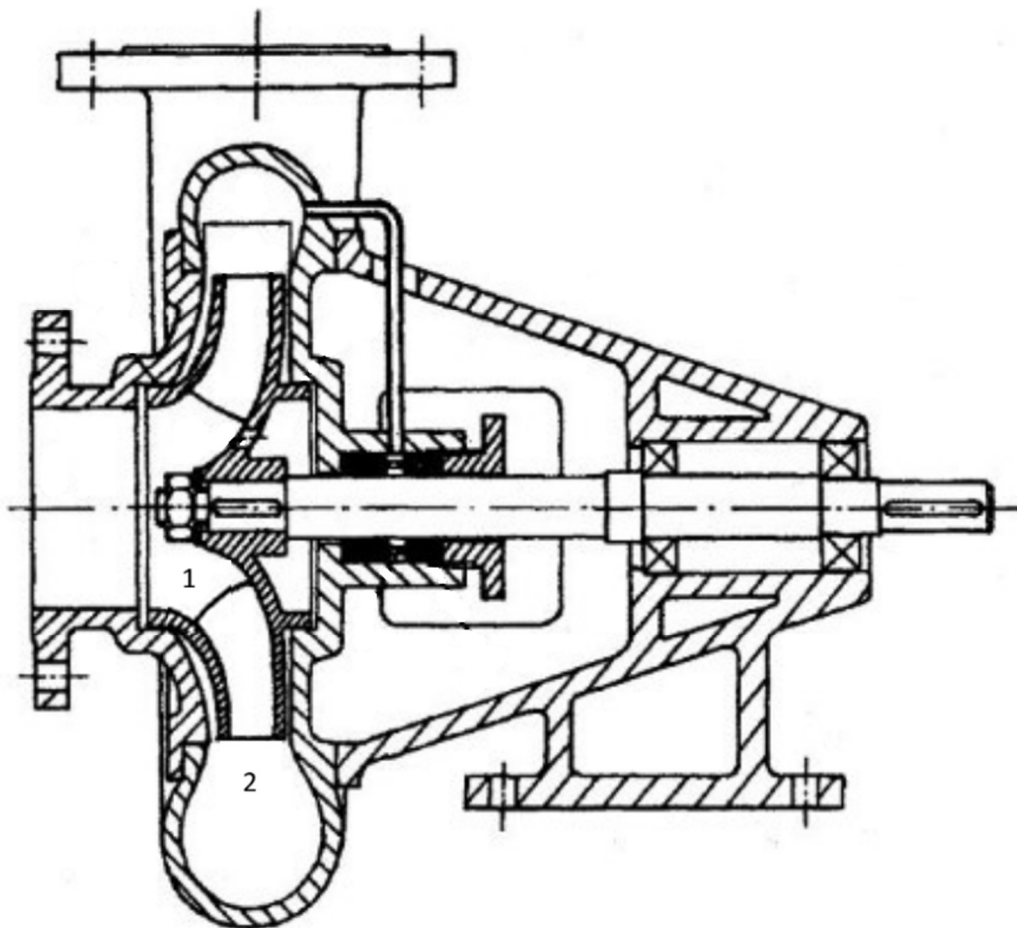


Figura 10 - Sezione longitudinale di una pompa centrifuga

2.4.3 Curve caratteristiche e rendimenti

Il comportamento di una pompa centrifuga è rappresentato dalle curve caratteristiche, che correlano prevalenza, portata, potenza assorbita e rendimento.

La prevalenza totale è data da:

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1)$$

Essa decresce all'aumentare della portata a causa delle perdite interne.

Le curve di potenza hanno invece un andamento crescente, mentre quella del rendimento ha un massimo nel punto di massimo rendimento.

Il rendimento complessivo è dato dal prodotto dei rendimenti idraulico, volumetrico e meccanico:

$$\eta = \eta_i \cdot \eta_v \cdot \eta_m$$

Nelle pompe centrifughe industriali, il rendimento globale varia mediamente tra il 70% e l'85%.

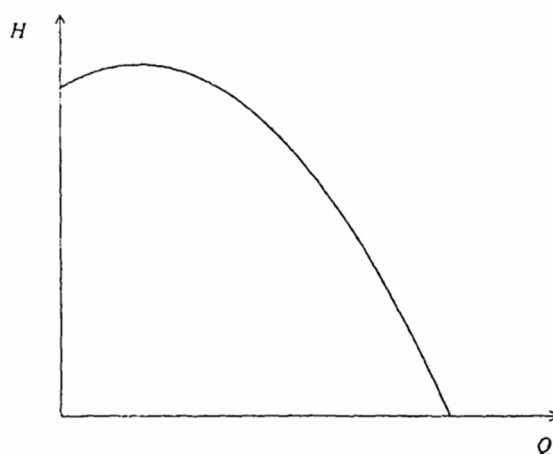


Figura 11 - Curva caratteristica di una pompa centrifuga

2.4.4 Cavitazione e NPSH (Net Positive Section Head)

Un fenomeno di particolare importanza nel funzionamento delle pompe centrifughe è la cavitazione, che si manifesta quando la pressione locale del fluido scende al di sotto della sua pressione di vapore. In queste condizioni, si formano bolle di vapore nelle zone a bassa pressione della pompa (generalmente all'ingresso della girante), che implodono violentemente nelle zone a pressione più elevata. Questo fenomeno provoca rumori caratteristici, vibrazioni

e un progressivo danneggiamento, con conseguente perdita di rendimento e possibile rottura a fatica della girante.

Per evitare la cavitazione, è necessario che la pressione nella sezione di aspirazione sia sempre superiore a quella di vapore del fluido. Tale condizione è garantita se il valore del NPSH disponibile $NPSH_a$ è maggiore del NPSH richiesto $NPSH_r$ dalla pompa:

$$NPSH_a > NPSH_r$$

Il NPSH disponibile rappresenta la differenza, espressa in metri di colonna di fluido, tra la pressione assoluta all'ingresso della pompa e la pressione di vapore alla temperatura di esercizio. Assicurare un adeguato margine tra $NPSH_a$ e $NPSH_r$ è essenziale per garantire un funzionamento regolare e duraturo della macchina, evitando fenomeni di cavitazione e conseguenti danneggiamenti meccanici.

2.4.5 Collegamenti in serie e in parallelo

Quando una singola macchina non è sufficiente, più pompe possono essere collegate tra loro.

- Collegamento in serie: la portata è la stessa per tutte le pompe, mentre la prevalenza totale è la somma delle singole prevalenze. È adottato negli impianti che richiedono elevate pressioni;
- Collegamento in parallelo: la prevalenza è la stessa per ciascuna pompa, mentre la portata complessiva è la somma delle singole. Utilizzato quando sono necessarie grandi portate a basse prevalenze.

Affinché il funzionamento sia stabile, le pompe devono avere curve caratteristiche simili; in caso contrario possono verificarsi instabilità o reflussi indesiderati.

2.5 Sistemi di accumulo

Nei sistemi idrici industriali, la disponibilità di acqua e i consumi non sono sempre costanti nel tempo. Per garantire continuità di servizio, pressione adeguata e una riserva utile in caso di emergenza o interruzione dell'alimentazione, ricorriamo all'impiego di sistemi di accumulo. Come accennato nel Capitolo 1, tali dispositivi svolgono una funzione di bilanciamento tra le fasi di prelievo e quelle di alimentazione e possono avere diverse configurazioni costruttive, in funzione delle esigenze dell'impianto.

I principali sistemi di accumulo sono costituiti da serbatoi sopraelevati e autoclavi, scelti in base al volume richiesto, al livello di automazione desiderato e allo spazio disponibile. In

alternativa, possono essere impiegate vasche di raccolta interrate o seminterrate, generalmente in calcestruzzo armato, che fungono da riserva per gruppi di pompaggio posti a valle. Tuttavia, nelle applicazioni industriali e civili moderne, le soluzioni sopraelevate e in pressione sono preferite per affidabilità e stabilità di esercizio.

2.5.1 Serbatoi sopraelevati

I serbatoi sopraelevati sono sistemi di accumulo a pressione atmosferica, realizzati in acciaio o cemento armato, con forme variabili (cilindrica, sferica o a fungo) a seconda delle esigenze strutturali e volumetriche.

Essi vengono riempiti tramite una condotta di alimentazione collegata alla pompa di sollevamento, mentre una condotta di distribuzione, posta a un livello inferiore, consente la fornitura dell'acqua all'impianto.

La differenza di quota tra il livello del serbatoio e le utenze garantisce la pressione di rete, secondo la relazione:

$$H = z_s - z_u - h_f$$

dove z_s è la quota del pelo libero nel serbatoio, z_u la quota delle utenze e h_f le perdite di carico totali nelle condotte.

All'interno del serbatoio distinguiamo tre volumi principali:

- Volume minimo V_{min} : riserva obbligatoria per l'alimentazione dell'impianto antincendio, secondo le normative vigenti;
- Volume utile ΔV : quantità d'acqua destinata a compensare le variazioni di consumo o temporanee interruzioni della fornitura;
- Volume libero ΔV_0 : spazio disponibile sopra il livello massimo, necessario per l'ingresso della condotta di carico e il funzionamento del regolatore di livello.

Il volume totale risulta quindi:

$$V_{serb} = V_{min} + \Delta V + \Delta V_0$$

Il riempimento del serbatoio è controllato automaticamente tramite un regolatore di livello che comanda l'accensione o l'arresto della pompa, in modo da mantenere il volume compreso tra i limiti prefissati. Sono inoltre previsti un troppo pieno per lo scarico dell'eccedenza e una valvola di fondo per lo svuotamento e la manutenzione.

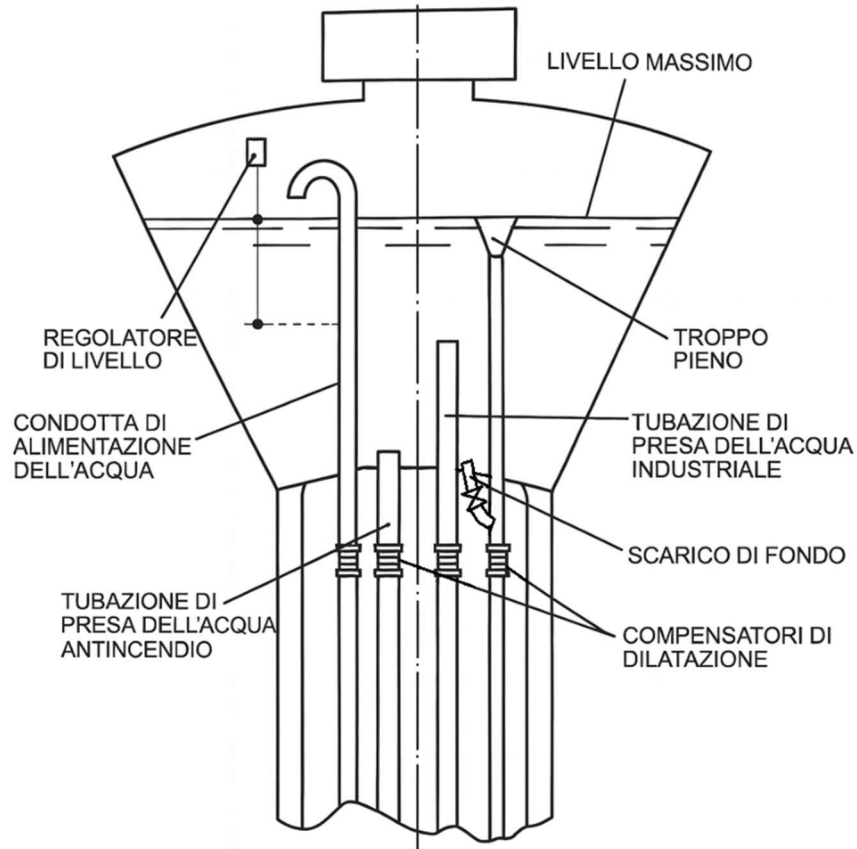


Figura 12 - Sezione di un serbatoio sopraelevato

2.5.2 Autoclavi

Le autoclavi sono serbatoi chiusi in pressione, impiegati per mantenere la pressione costante in rete o per fornire acqua a utenze situate a quote superiori rispetto alla fonte. A differenza dei serbatoi sopraelevati, l'equilibrio idraulico è qui assicurato da un cuscino d'aria compressa, che funge da elemento elastico accumulatore.

Il sistema è costituito da:

- un serbatoio metallico in pressione;
- una o più pompe di caricamento;
- un gruppo di pressostati di minima e massima, che regolano il funzionamento della pompa;
- una valvola di sicurezza e uno scarico di fondo.

Quando la pressione scende al valore limite inferiore, il pressostato attiva la pompa che ripristina la pressione nel serbatoio; al raggiungimento della soglia superiore, la pompa si arresta. Nei sistemi di maggiore potenzialità, il cuscino d'aria viene mantenuto mediante un

compressore ausiliario, comandato automaticamente dai pressostati, mentre la pompa principale è gestita da un elettrolivello.

Poiché parte dell'aria tende progressivamente a dissolversi nell'acqua, è necessario prevedere un sistema di reintegro dell'aria, manuale o automatico, per evitare la perdita di volume utile e garantire il corretto funzionamento del dispositivo.

Capitolo 3

Dimensionamento tecnico

3.1 Richiami teorici: equazione di Bernoulli e perdite di carico

Alla base dello studio e del dimensionamento dei sistemi di distribuzione idrica vi è l'equazione di Bernoulli, che descrive la conservazione dell'energia meccanica in un fluido ideale, incomprimibile e non viscoso in moto permanente.

Per un fluido di densità ρ , alla pressione p , con velocità media v e quota geodetica h , l'equazione assume la forma:

$$\frac{p}{\rho g} + h + \frac{v^2}{2g} = cost$$

La somma dei tre termini, rispettivamente di pressione, quota e velocità (somma del carico piezometrico e del carico cinetico) rappresenta l'energia meccanica totale del fluido, che in condizioni ideali si conserva lungo una traiettoria.

Tuttavia, nei casi reali, la presenza di viscosità ed irregolarità nelle condotte comporta perdite di energia, note come perdite di carico.

3.1.1 Perdite di carico distribuite

Le perdite di carico distribuite derivano dall'attrito tra il fluido in movimento e le pareti interne delle tubazioni. Esse dipendono dalla lunghezza del tratto considerato, dal diametro interno del tubo, dalla velocità del fluido e dalle caratteristiche del materiale.

L'espressione generale che le quantifica è la formula di Darcy–Weisbach:

$$h_d = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

dove:

- h_d : perdita di carico distribuita [m];
- λ : coefficiente di attrito (dipende da Re e dalla scabrezza relativa);
- L : lunghezza del tratto di condotta [m];
- D : diametro interno della condotta [m];
- v : velocità media del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$;
- g : accelerazione di gravità $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

Il coefficiente λ varia in funzione del numero di Reynolds e della scabrezza relativa ε/D .

Il numero di Reynolds è definito come:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

dove μ è la viscosità dinamica del fluido.

Per $Re < 2000$ il moto è laminare ed il coefficiente di attrito si determina mediante:

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

Mentre per moto turbolento, dove la scabrezza assume un ruolo significativo, il coefficiente si calcola con l'equazione implicita di Colebrook–White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

La risoluzione diretta di tale equazione richiede iterazioni numeriche; per questo motivo nella pratica progettuale si fa comunemente riferimento al diagramma di Moody, che ne fornisce una rappresentazione grafica. Il grafico è suddiviso in tre regioni principali:

- Moto laminare: per $Re < 2000$, dove $\lambda = 64/Re$;
- Zona di transizione: compresa tra 2000 e 4000, caratterizzata da instabilità del moto;
- Moto turbolento: per $Re > 4000$, dove l'attrito dipende anche dalla scabrezza della parete.

Nella parte destra del diagramma sono tracciate curve corrispondenti a diversi valori di ε/D : quanto più elevata è la scabrezza relativa, tanto maggiore risulta il coefficiente di attrito.

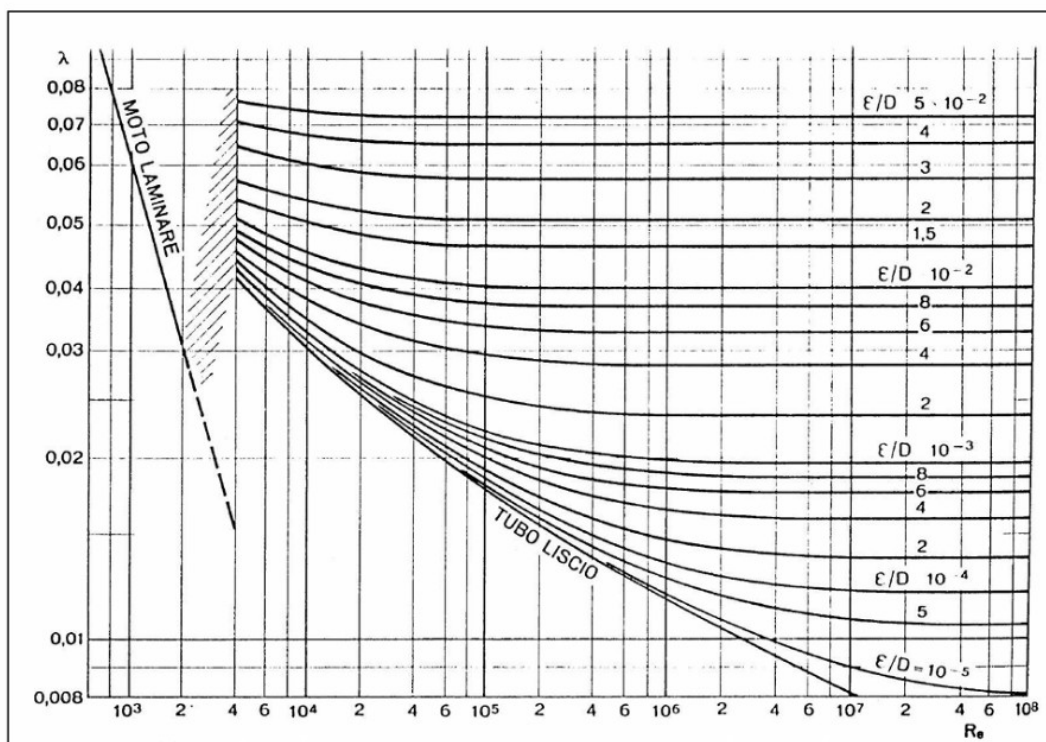


Figura 13 - Diagramma di Moody

I valori tipici della scabrezza interna per diversi materiali sono riportati nella tabella seguente.

Materiale	ε [mm]
Rame incrudito e ricotto	$0,001 < \varepsilon < 0,003$
Materie plastiche	$0,002 < \varepsilon < 0,007$
Acciaio zincato	$0,020 < \varepsilon < 0,030$
Acciaio nero	$0,040 < \varepsilon < 0,090$
Acciaio incrostato	$0,2 < \varepsilon < 1$

Tabella 1 - Valori tipici di scabrezza

3.1.2 Perdite di carico concentrate

Oltre alle perdite distribuite, nei sistemi di condotte si verificano anche perdite di carico concentrate, causate da discontinuità geometriche del percorso del fluido (curve, gomiti, valvole, raccordi, restringimenti, ecc.).

Tali perdite sono espresse dalla relazione:

$$h_c = k \frac{v^2}{2g}$$

dove k è un coefficiente adimensionale che dipende dal tipo di accidentalità. In alternativa, si può esprimere la perdita concentrata come lunghezza equivalente L_{eq} , ossia la lunghezza di tubo che provocherebbe la stessa perdita per attrito:

$$L_{eq} = k \frac{D}{\lambda}$$

I valori di L_{eq} per le principali accidentalità (curve, valvole, raccordi, riduzioni) sono tabulati in letteratura. Un estratto è riportato nella tabella seguente.

	DN 15	DN 20	DN 25	DN 32	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150
VALVOLE											
Saracinesca	0,1	0,15	0,18	0,2	0,27	0,35	0,43	0,5	0,7	0,85	1
Valvola a sfera	0,05	0,08	0,09	0,09	0,12	0,15	0,20	0,25	0,3	0,4	0,5
Valvola di ritegno (clapet)	2,4	3,1	3,6	4,7	5-9	6-12	8-15	10-20	13-25	16-30	20-35
Valvola a globo	5	7	8	10	13	17	22	28	35	42	50
Valvola ad angolo	2,5	1	4	5	7	8	10	13	16	20	25
CURVE E GOMITI											
90° larga	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1	1,4	1,7	2	2,6	3
90° stretta	0,5	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2	2,5	3,2	4	5
Curva brusca a 90°	1	1,5	1,8	2	3	5	4,4	5,5	7	8,6	10
Gomito	0,4	0,6	0,7	0,8	1	1,5	1,8	2	2,8	3,5	4
Curva 60°	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,7	0,9	1	1,5	1,7	2
Curva 180° larga	0,7	0,8	1	1,3	1,6	2	2,7	3,2	4	5,5	6,5
Curva 180° stretta	1,4	1,7	2	2,6	3,2	4	5,5	6,5	8	11,5	13
RACCORDI - FITTINGS											
Confluenza a T	1,7	2,3	2,7	3,2	4	5	7	8	10	13	15
GIUNTO CONICO											
d/D=3/4	0,4	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	2	2,5	3	3,6	4
d/D=1/2	0,5	0,7	0,8	1	1,4	1,7	2,2	2,8	3,5	4,1	5
BRUSCO CAMBIO DI SEZIONE											
Riduzione											
d/D=3/4	0,11	0,15	0,18	0,24	0,3	0,37	0,5	0,6	0,7	0,85	1
d/D= 1/2	0,17	0,23	0,27	0,35	0,45	0,55	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6
d/D=1/4	0,2	0,3	0,35	0,45	0,55	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2
Aumento											
d/D=1/2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	1,3	1,5	2	2,7	3
d/D=1/4	0,5	0,7	0,8	1	1,4	1,7	2,2	2,8	3,5	4,2	5
Imbocco da serbatoio	0,25	0,35	0,4	0,5	0,7	0,9	1,2	1,5	1,8	2,2	2,5

Figura 14 - Tabella delle lunghezze equivalenti L_{eq} (m) per le accidentalità più comuni

La perdita di carico totale in una condotta sarà dunque data dalla somma delle componenti distribuite e concentrate:

$$h_t = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k_i \frac{v^2}{2g} = h_d + \sum h_c$$

3.2 Criteri di calcolo dei diametri delle tubazioni

Il corretto dimensionamento delle tubazioni rappresenta un aspetto fondamentale nella progettazione degli impianti idrici, poiché influisce sia sulle prestazioni idrauliche del sistema sia sui costi complessivi di realizzazione ed esercizio.

L'obiettivo del dimensionamento è individuare, per ciascun tratto di rete, il diametro interno dei condotti che consenta di garantire la portata richiesta alle utenze, mantenendo le perdite di carico entro valori compatibili con l'efficienza energetica dell'impianto e con il corretto funzionamento delle apparecchiature.

Le reti di distribuzione possono essere classificate in due principali tipologie:

- reti aperte (o a pettine), nelle quali il fluido segue un percorso unidirezionale verso le utenze;
- reti chiuse (o a maglie), in cui i tratti di condotta sono interconnessi e il fluido può fluire in più direzioni.

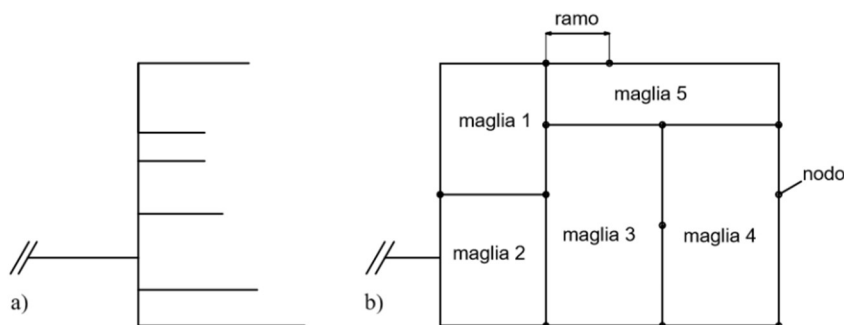


Figura 15 - Tipi di rete di distribuzione: a) rete aperta; b) rete chiusa

3.2.1 Reti di distribuzione aperte

Nel caso di reti aperte, la portata in ciascun tratto di tubazione è determinata dalla somma delle portate richieste dalle utenze a valle.

Il dimensionamento si esegue in base a criteri idraulici che limitano le perdite di carico o la velocità del fluido, garantendo allo stesso tempo la continuità di esercizio ed un corretto funzionamento della pompa.

I due metodi comunemente adottati sono:

- Metodo della perdita di carico costante, in cui si assume un valore standard della perdita di carico per unità di lunghezza r [Pa/m], in modo da mantenere un equilibrio tra

efficienza energetica e costi di installazione. I valori tipici utilizzati nella pratica impiantistica sono:

- 100–200 Pa/m per reti idriche di distribuzione ordinaria;
 - fino a 1000 Pa/m per brevi tratti terminali o impianti antincendio.
-
- Metodo della velocità media costante, in cui si fissa una velocità di riferimento v del fluido all'interno della condotta, variabile in funzione della destinazione d'uso:
 - 1–2 m/s per reti idriche ordinarie;
 - 3–10 m/s per reti antincendio;
 - 3–5 m/s per acqua surriscaldata.

In entrambi i casi, una volta determinata la portata Q per ciascun tratto, il diametro interno di progetto si calcola dall'equazione di continuità:

$$D_{int} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Il diametro ottenuto va poi approssimato al valore nominale immediatamente superiore secondo le serie normalizzate, in modo da contenere la velocità del fluido e le perdite di carico. Il tratto di rete più sfavorito, individuato in genere come il più lungo o quello con il maggior dislivello geodetico, viene utilizzato come riferimento per il calcolo della prevalenza richiesta alla pompa:

$$H = h_d + h_c + h_g$$

dove h_d rappresenta la perdita di carico distribuita, h_c quella concentrata e h_g il dislivello geometrico.

3.2.2 Reti di distribuzione chiuse

Le reti chiuse o a maglie garantiscono una maggiore continuità di servizio e uniformità di pressione, ma risultano più complesse da dimensionare, poiché non è possibile conoscere a priori il verso del moto del fluido nei vari rami.

Il calcolo viene pertanto eseguito tramite metodi iterativi di bilanciamento delle portate, tra i quali il più diffuso è il metodo di Hardy Cross. In tale metodo si impongono due condizioni fondamentali:

1. Equazione di continuità delle portate per ciascun nodo:

$$\sum(\pm q_i) \pm Q_N = 0$$

dove q_i è la portata nei rami e Q_N la portata di alimentazione o prelievo nel nodo.

2. Equilibrio delle perdite di carico per ciascuna maglia:

$$\sum(\pm \Delta h_i) = 0$$

con il segno positivo o negativo in base al verso di percorrenza del fluido rispetto al verso di riferimento della maglia.

Se la condizione non è soddisfatta, si introduce una portata correttiva q_c tale da ristabilire l'equilibrio:

$$q_c = -\frac{\sum(r_j q_j^2)}{2\sum(r_j q_j)}$$

dove $r_j = k \frac{l_j}{D_j^5}$ è il coefficiente caratteristico del ramo, funzione della sua lunghezza l_j , del diametro D_j e del fattore di attrito k .

Il procedimento viene ripetuto iterativamente per tutte le maglie della rete fino al soddisfacimento della condizione di equilibrio idraulico.

Per reti di piccole dimensioni il calcolo può essere condotto manualmente, mentre per reti complesse è necessario ricorrere a software di calcolo fluidodinamico.

3.2.3 Considerazioni di progetto

Nella pratica progettuale, la scelta dei diametri ottimali si basa sul compromesso tra:

- perdite di carico accettabili (per contenere i costi energetici di pompaggio);
- velocità del fluido contenute (per evitare rumorosità, vibrazioni e fenomeni erosivi);
- costi di installazione legati al diametro e al materiale della tubazione.

Generalmente, i diametri vengono selezionati in modo da garantire il miglior equilibrio tecnico-economico, assicurando pressioni di esercizio comprese entro i limiti di progetto e un corretto funzionamento delle pompe e dei sistemi di distribuzione.

3.3 Dimensionamento serbatoi ed autoclavi

I sistemi di accumulo hanno la funzione di disaccoppiare il funzionamento della pompa dalle richieste delle utenze o dalla disponibilità della fonte di approvvigionamento, nei casi in cui quest'ultima non possa garantire la portata richiesta in modo continuo.

La scelta di introdurre un serbatoio o un sistema di accumulo in un impianto idrico dipende principalmente dall'andamento del diagramma di richiesta giornaliera, che rappresenta le variazioni di portata nel tempo in funzione delle utenze servite.

Se la curva di richiesta risulta fortemente irregolare, è conveniente prevedere la presenza di un serbatoio di accumulo alimentato da una pompa a portata media, o in alternativa un accumulo parziale in autoclave con pompa dimensionata sulla portata massima.

Quando invece il diagramma risulta più regolare, può essere più vantaggioso adottare una soluzione a pompaggio continuo, purché le variazioni di portata siano contenute e le distanze di distribuzione non elevate.

3.3.1 Dimensionamento del serbatoio di accumulo

Il serbatoio ha la funzione di accumulare il fluido nei periodi di bassa richiesta (fase di carico) e di restituirlo durante i picchi di domanda (fase di scarico), garantendo la continuità di servizio e un funzionamento regolare della pompa.

Il volume totale del serbatoio è espresso come:

$$V_{serb} = V_{min} + \Delta V_0 + \Delta V$$

dove:

- V_{min} rappresenta il volume minimo di sicurezza (di solito per l'impianto antincendio);
- ΔV_0 è il volume libero superiore, necessario al corretto funzionamento del regolatore di livello;
- ΔV è il volume utile legato alla variabilità della richiesta idrica.

Determinazione del volume utile

Il calcolo di ΔV si basa sull'analisi del diagramma di richiesta giornaliera delle utenze. Conoscendo le portate richieste q e i periodi di tempo di utilizzo, si calcola prima il volume cumulativo richiesto $V_{ut,CUM}$ e quello pompato nel serbatoio $V_{P,CUM}$.

Per ogni intervallo temporale, determiniamo la differenza $(V_{P,CUM} - V_{ut,CUM})$ massima e minima di tali valori, i quali ci forniranno il volume di accumulo ΔV .

Un metodo più generale, utilizzato in ambito industriale, si basa sull'analisi della portata istantanea $q(t)$ e della portata media q_m del periodo considerato.

In questo caso, il volume necessario si ottiene integrando nel tempo la differenza tra la portata istantanea e quella media:

$$V = \int_0^t (q - q_m) dt$$

dove:

- il tratto OA indica la fase di carico ($q < q_m$);
- mentre il tratto AC rappresenta la fase di scarico ($q > q_m$).

Il volume massimo richiesto dal serbatoio risulta pari alla somma delle aree dei segmenti positivi e negativi della curva integrale, corrispondenti ai periodi di accumulo e rilascio del fluido:

$$V_s \geq V_{max} = AA' + CC'$$

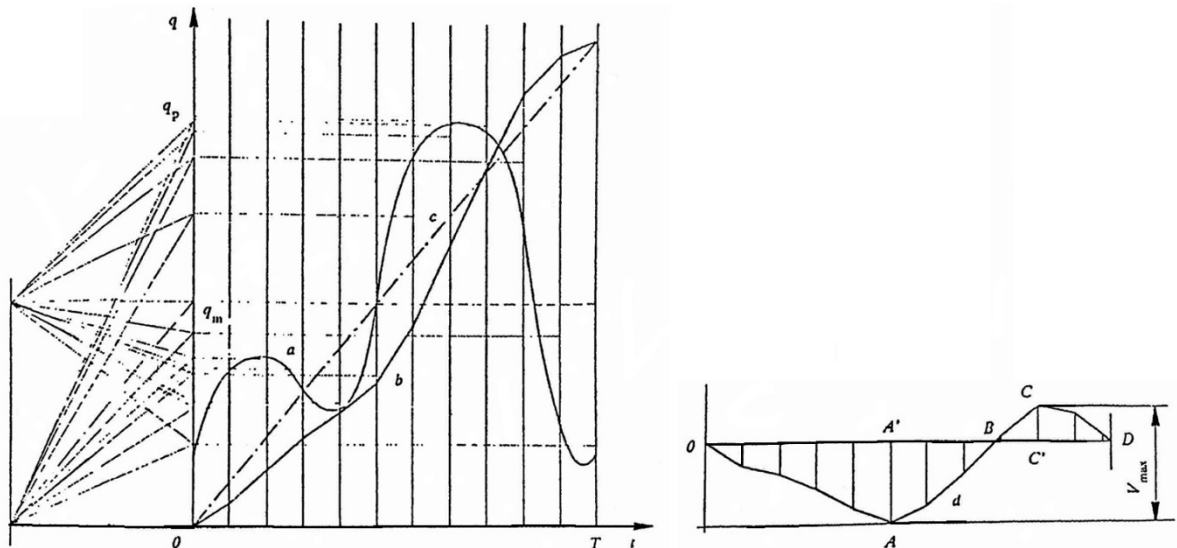


Figura 16 - Determinazione del volume del serbatoio per completa disponibilità del servizio

Dimensionamento economico ottimale

Dal punto di vista economico, il dimensionamento del sistema pompa–accumulatore deve garantire la continuità di servizio al minimo costo complessivo.

Un aumento della portata della pompa riduce il volume di accumulo necessario, ma comporta maggiori costi di investimento e di esercizio; al contrario, una pompa di minore potenza richiede un serbatoio più grande, con conseguente incremento dei costi di costruzione e di spazio.

L'obiettivo è quindi trovare un compromesso tra i due effetti, scegliendo una portata ottimale q_{max}^* tale da bilanciare i costi del generatore C_g e quelli dell'accumulatore C_a :

$$C_g(q_{max}) + C_a(V) = \min$$

In corrispondenza di tale condizione, la somma dei costi di impianto risulta minima, assicurando un funzionamento regolare e sostenibile del sistema nel tempo.

3.3.2 Dimensionamento delle autoclavi

Le autoclavi sono serbatoi in pressione che hanno lo scopo di:

- limitare il numero di accensioni e spegnimenti della pompa;
- mantenere la pressione in rete entro un intervallo prefissato.

Nel dimensionamento di un'autoclave si determinano:

- il volume utile;
- le pressioni minima e massima di esercizio.

La pressione minima p_{min} deve risultare non inferiore a quella richiesta dall'utenza più sfavorita, considerando le perdite di carico lungo la rete; mentre la pressione massima p_{max} deve invece essere inferiore alla pressione nominale dei componenti, o in caso di utenze poste a quota inferiore, ridotta del dislivello geodetico:

$$p_{max} \leq p_{nom} - \rho g \Delta h$$

Volume utile dell'autoclave

Considerando la variazione di volume dell'aria interna durante le fasi di compressione ed espansione, e assumendo un comportamento isoterma ($pV = cost$), si ottiene:

$$V_u = V_0 \left(1 - \frac{p_0}{p_1} \right)$$

dove:

- V_0 è il volume totale dell'autoclave;
- p_0 e p_1 sono rispettivamente le pressioni minima e massima operative.

Il numero massimo di cicli di accensione della pompa N_{max} è generalmente limitato a 10 accensioni/ora per evitare sovraccarichi elettrici e surriscaldamento del motore.

Dalle condizioni di funzionamento risulta:

$$N = \frac{Q_{ut,max}}{2V_u}$$

da cui si ricava il volume minimo dell'autoclave:

$$V_0 = \frac{Q_{ut,max}}{2N_{max}} \cdot \frac{p_1}{p_1 - p_0}$$

Al volume così calcolato si aggiunge un volume di riserva V_{min} , ad esempio destinato all'impianto antincendio o a garantire la continuità di servizio:

$$V_{tot} = V_{min} + V_0$$

3.4 Scelta e verifica della pompa

La scelta della pompa all'interno di un impianto idrico dipende dalle prestazioni di portata e prevalenza richieste, determinate in base alla configurazione del sistema e alle necessità delle utenze servite.

La portata di progetto della pompa varia a seconda della tipologia di impianto. Nei sistemi con pompaggio continuo o con autoclave, la pompa deve garantire la portata massima prevista in esercizio, così da coprire i momenti di maggiore richiesta. Nel caso, invece, di impianti con serbatoio sopraelevato, la pompa è dimensionata sulla portata media, poiché le oscillazioni di consumo vengono compensate dal volume di accumulo.

Per quanto riguarda la prevalenza, essa rappresenta l'energia specifica che la pompa deve fornire al fluido per consentirne la movimentazione, tenendo conto delle perdite di carico presenti nel circuito e dei dislivelli geodetici tra la fonte e le utenze.

A causa di tali dissipazioni, la prevalenza dipende non solo dalle caratteristiche della rete, ma anche dalla posizione delle utenze più sfavorevoli e dalle dimensioni delle tubazioni.

Negli impianti a pompaggio continuo che alimentano più utenze, la pompa deve essere in grado di colmare il dislivello energetico più elevato, ossia quello necessario per raggiungere l'utenza situata nella condizione più sfavorevole.

Nel caso di impianti con serbatoio sopraelevato, la prevalenza complessiva è data dalla somma tra il dislivello geodetico esistente tra la pompa e il serbatoio e le perdite di carico lungo la linea di mandata.

Infine, per i sistemi dotati di autoclave, ai termini appena citati si aggiunge il contributo dovuto alla pressione di esercizio del serbatoio, che deve rimanere compresa all'interno del campo di funzionamento previsto.

Capitolo 4

Innovazioni e sostenibilità

4.1 Efficienza energetica nei sistemi di pompaggio

L'efficienza energetica rappresenta oggi uno degli aspetti centrali nella progettazione e gestione dei sistemi di pompaggio. Poiché le pompe costituiscono una delle principali fonti di consumo elettrico negli impianti idrici e industriali, l'ottimizzazione del loro funzionamento consente di conseguire significativi risparmi energetici e riduzioni di emissioni indirette di CO₂.

L'attenzione all'efficienza ha portato, nel corso degli ultimi anni, all'evoluzione della normativa europea in materia di Ecodesign e alla definizione di indicatori di prestazione energetica applicati non solo al singolo componente, ma all'intero sistema pompa-motore-controllo.

4.1.1 Indicatori e quadro normativo

In ambito europeo, la normativa Ecodesign ha introdotto specifici requisiti minimi di rendimento per le pompe centrifughe. Tra i principali indicatori vi è il Minimum Efficiency Index (MEI), che definisce la soglia minima di efficienza idraulica in funzione della portata e

della prevalenza, fungendo da parametro di riferimento per la classificazione energetica. Oltre al rendimento della pompa, l'efficienza complessiva del sistema viene valutata attraverso l'Energy Efficiency Index (EEI), che considera il comportamento reale del gruppo di pompaggio durante l'anno.

Negli ultimi anni, l'approccio progettuale si è evoluto verso la visione dell'Extended Product Approach (EPA), che valuta la pompa come parte di un sistema integrato con motore e controlli elettronici, ponendo l'attenzione sul rendimento globale piuttosto che sui singoli componenti.

4.1.2 Aspetti sull'efficienza energetica

L'energia assorbita da una pompa dipende dal punto di funzionamento, che rappresenta l'intersezione tra la curva caratteristica della pompa e quella dell'impianto. Quando il sistema è soggetto a variazioni di portata nel tempo, il mantenimento di un'elevata efficienza richiede l'adattamento della velocità di rotazione della pompa.

In assenza di regolazione, la variazione della portata viene spesso ottenuta tramite valvole di strozzamento, con conseguente dissipazione di energia. In alternativa, l'adozione di un convertitore di frequenza (inverter) consente di modulare la velocità del motore in funzione della richiesta reale, con un notevole incremento dell'efficienza.

Il principio è descritto dalle leggi di affinità:

$$Q \propto n, \quad H \propto n^2, \quad P \propto n^3$$

dove Q è la portata, H la prevalenza e P la potenza assorbita.

Da tali relazioni si deduce che una riduzione del numero di giri del motore comporta una diminuzione della potenza richiesta secondo la terza potenza della velocità. Ciò implica che per sistemi a carico variabile, anche piccole riduzioni della velocità possono generare risparmi energetici significativi.

I risultati sperimentali riportati da Maria Chiara Conte (2020) confermano come l'impiego di inverter consenta di ridurre l'energia assorbita fino al 40% rispetto al funzionamento a velocità costante, a parità di condizioni operative. Inoltre, la regolazione elettronica permette di mantenere il punto di lavoro più vicino alla zona di massima efficienza idraulica della pompa, riducendo anche l'usura meccanica e migliorando la stabilità del sistema.

4.1.3 Motori ad alta efficienza e componenti ausiliari

Un ulteriore contributo al miglioramento delle prestazioni complessive deriva dall'impiego di motori elettrici ad alta efficienza (classi IE2, IE3 e per applicazioni più recenti, IE4). Tali motori presentano perdite ridotte grazie a materiali magnetici migliorati e a un design ottimizzato del rotore e dello statore.

Anche l'uso di sistemi di tenuta a basso attrito, cuscinetti ottimizzati e materiali resistenti all'usura contribuisce al mantenimento dell'efficienza nel tempo, evitando degradazioni dovute a fenomeni di cavitazione o abrasione.

L'efficienza complessiva di un gruppo di pompaggio può quindi essere espressa come:

$$\eta_{tot} = \eta_{pompa} \cdot \eta_{motore} \cdot \eta_{inverter}$$

e risulta fortemente influenzata non solo dal rendimento dei singoli componenti, ma soprattutto dal corretto dimensionamento e dal coordinamento tra essi.

4.1.4 Gestione e ottimizzazione energetica

La corretta selezione della pompa in funzione della curva del sistema e del profilo di carico giornaliero rappresenta la chiave per garantire l'efficienza. L'uso di software di simulazione e strumenti di monitoraggio consente oggi di analizzare il funzionamento reale dell'impianto, individuando gli scostamenti dal punto di massima efficienza e programmando interventi di manutenzione preventiva.

In quest'ottica, la tendenza attuale è quella di integrare algoritmi di controllo intelligente e modelli predittivi capaci di adattare la velocità di rotazione e il numero di pompe attive alle condizioni operative, riducendo così al minimo l'energia consumata e le sollecitazioni meccaniche.

In sintesi, l'efficienza energetica dei sistemi di pompaggio non è più valutata soltanto in termini di rendimento idraulico della macchina, ma come risultato complessivo di un sistema complesso in cui motore, azionamento e controllo interagiscono per garantire un funzionamento ottimale, sostenibile e conforme alle direttive europee in materia di risparmio energetico.

4.2 Monitoraggio e digitalizzazione

Negli ultimi anni, la crescente attenzione verso l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale ha favorito l'introduzione di tecnologie digitali anche negli impianti idrici e nei sistemi di pompaggio. La digitalizzazione consente di acquisire, elaborare e interpretare in tempo reale i dati di funzionamento, migliorando la gestione delle risorse idriche e riducendo gli sprechi energetici.

4.2.1 Sistemi di monitoraggio e sensoristica

Un sistema di monitoraggio moderno è basato su una rete di sensori installati in punti strategici dell'impianto (mandata, aspirazione, serbatoi, linee di distribuzione). Questi dispositivi rilevano parametri fondamentali come pressione, portata, temperatura, consumo elettrico e vibrazioni meccaniche, fornendo un quadro continuo dello stato operativo.

I dati raccolti vengono trasmessi a un'unità centrale o a una piattaforma cloud tramite protocolli di comunicazione industriale (come Modbus, Profibus o Ethernet/IP). Attraverso l'integrazione con software SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), è possibile visualizzare in tempo reale l'andamento dei parametri, impostare soglie di allarme e registrare storicamente le grandezze per successive analisi.

Questi sistemi consentono non solo di controllare l'efficienza operativa, ma anche di identificare precocemente anomalie legate a perdite, ostruzioni, cavitazione o malfunzionamenti dei motori, permettendo così interventi tempestivi di manutenzione predittiva.

4.2.2 Automazione e controllo intelligente

L'integrazione della sensoristica con sistemi di automazione avanzata ha dato origine a veri e propri sistemi di pompaggio intelligenti. Attraverso algoritmi di controllo basati su logiche PID o su modelli predittivi, il sistema può modulare in autonomia la velocità di rotazione delle pompe o l'attivazione di gruppi di pompaggio multipli in base alla domanda reale.

Questa forma di controllo adattivo consente di mantenere costante la pressione nelle reti di distribuzione e di minimizzare il consumo di energia elettrica, poiché la pompa lavora sempre in prossimità del punto di massima efficienza.

Nei contesti industriali e civili complessi, tali algoritmi vengono affiancati da sistemi di machine learning in grado di apprendere dai dati storici del funzionamento, migliorando progressivamente la precisione delle regolazioni e la previsione dei guasti.

4.2.3 Digital twin e manutenzione predittiva

Un'evoluzione significativa del monitoraggio digitale è rappresentata dal concetto di digital twin (gemello digitale), ovvero un modello virtuale dinamico dell'impianto reale. Questo modello replica il comportamento del sistema fisico, aggiornandosi costantemente con i dati provenienti dai sensori.

Il digital twin consente di simulare diversi scenari di funzionamento, valutare in anticipo l'impatto di modifiche operative e pianificare gli interventi di manutenzione più appropriati. La combinazione tra digital twin, analisi predittiva e strumenti di diagnostica permette di ridurre i tempi di fermo impianto, aumentare l'affidabilità e prolungare la vita utile delle apparecchiature.

4.2.4 Vantaggi della digitalizzazione

L'adozione di tecnologie digitali nei sistemi di pompaggio comporta numerosi vantaggi:

- ottimizzazione dei consumi energetici e idrici;
- riduzione dei costi di manutenzione;
- miglioramento dell'affidabilità operativa;
- tracciabilità dei dati e maggiore sicurezza gestionale;
- integrazione con sistemi di supervisione energetica a livello di stabilimento (Energy Management Systems).

Inoltre, la digitalizzazione facilita la conformità alle direttive europee in materia di efficienza e sostenibilità, promuovendo un approccio integrato alla gestione delle risorse.

In prospettiva, l'evoluzione delle tecnologie di monitoraggio, unita all'intelligenza artificiale e all'Internet of Things (IoT), renderà i sistemi di pompaggio sempre più autonomi e interconnessi, contribuendo in modo concreto agli obiettivi di decarbonizzazione e transizione energetica.

4.3 Materiali innovativi e soluzioni anticorrosione

La scelta dei materiali per le reti di distribuzione idrica e per i sistemi di pompaggio riveste un ruolo cruciale non solo per la durata e l'affidabilità dell'impianto, ma anche per la sua sostenibilità e per l'efficienza complessiva del servizio. Negli ultimi anni, grazie ai progressi nella scienza dei materiali e alla crescente attenzione verso la riduzione dei costi di manutenzione e dell'impatto ambientale, sono state introdotte soluzioni costruttive sempre più orientate alla resistenza alla corrosione, alla leggerezza e alla riciclabilità.

4.3.1 Materiali metallici e trattamenti protettivi

Le pompe e le condotte di distribuzione realizzate in acciaio al carbonio o ghisa continuano a essere impiegate per le loro elevate caratteristiche meccaniche, ma richiedono una protezione superficiale adeguata a resistere all'azione corrosiva dei fluidi e dell'ambiente.

I trattamenti più diffusi sono:

- zincatura a caldo, che conferisce uno strato protettivo di zinco resistente alla corrosione elettrochimica;
- verniciatura epossidica, utilizzata per creare una barriera impermeabile al contatto con l'acqua;
- passivazione e lucidatura meccanica per le parti in acciaio inox, che migliorano la resistenza agli agenti aggressivi e riducono le perdite per attrito.



Figura 17 - Esempio di trattamento anticorrosivo su raccordo metallico

Tuttavia, la tendenza attuale è quella di sostituire o integrare i materiali metallici tradizionali con soluzioni composite o polimeriche, che uniscono buone proprietà meccaniche a un'elevata durabilità nel tempo.

4.3.2 Materiali compositi e polimeri avanzati

Negli impianti di sollevamento e nelle reti di distribuzione moderna si stanno affermando materiali come il PVC (policloruro di vinile), il PEAD (polietilene ad alta densità) e il PRFV (plastica rinforzata con fibre di vetro).

Questi materiali presentano numerosi vantaggi:

- assenza di corrosione e lunga vita utile anche in ambienti umidi o in presenza di sostanze aggressive;
- leggerezza e facilità di installazione, che si traducono in riduzione dei costi di trasporto e posa;
- bassa rugosità interna, che riduce le perdite di carico e migliora l'efficienza idraulica complessiva del sistema;
- elevata resistenza chimica e stabilità termica per applicazioni con fluidi caldi o aggressivi.

In particolare, il polietilene reticolato (PEX) e il polipropilene random (PPR) vengono impiegati nei circuiti industriali e civili dove sono richieste buone prestazioni meccaniche, facilità di giunzione mediante saldatura termica e totale assenza di fenomeni corrosivi.

4.3.3 Soluzioni anticorrosione e sostenibilità

Le innovazioni più recenti riguardano lo sviluppo di rivestimenti ibridi e nanotecnologici, in grado di combinare le proprietà di barriera dei materiali polimerici con la resistenza meccanica dei metalli.

Tra le soluzioni emergenti si segnalano:

- rivestimenti ceramici o a base di ossidi metallici, che proteggono le superfici interne delle pompe e dei condotti dall'abrasione e dall'ossidazione;
- nano rivestimenti epossidici o fluoropolimeri, capaci di ridurre l'adesione di incrostazioni e biofilm;
- trattamenti anticorrosione a base di zinco-nickel o alluminio-magnesio, che migliorano la durata dei componenti metallici soggetti a cicli di bagnamento e asciugatura.

Oltre ai benefici in termini di durabilità, tali tecnologie consentono di ridurre gli sprechi di materiale, prolungare la vita utile delle pompe e delle tubazioni.

4.4 Recupero e riutilizzo delle acque

Il recupero e il riutilizzo delle acque rappresentano oggi una delle strategie più efficaci per la riduzione dei consumi idrici e dell'impatto ambientale degli impianti industriali. In un contesto di crescente scarsità delle risorse e di costi energetici elevati, l'ottimizzazione dei cicli idrici interni consente non solo di ridurre la domanda di acqua potabile, ma anche di minimizzare i volumi di scarico e i costi di trattamento.

Negli impianti industriali e civili moderni, l'acqua può essere recuperata da diverse fonti: acque meteoriche, reflui di processo o acque di raffreddamento; e successivamente riutilizzata in applicazioni non potabili, come lavaggi, irrigazione, alimentazione di torri evaporative o sistemi antincendio. Tale approccio si inserisce pienamente nella logica dell'economia circolare, in cui l'acqua è considerata una risorsa da gestire e valorizzare lungo tutto il suo ciclo di utilizzo.

4.4.1 Recupero delle acque meteoriche

Uno degli interventi più diffusi riguarda il recupero delle acque piovane mediante sistemi di raccolta e accumulo. Le acque meteoriche provenienti da superfici impermeabili, come coperture o piazzali, vengono convogliate verso serbatoi di accumulo in cui vengono filtrate e stoccate per un successivo impiego.

Come illustrato nella tesi di Maria Chiara Conte (2020), il dimensionamento di tali serbatoi si basa sull'analisi del bilancio tra afflussi meteorici e fabbisogni idrici, adottando criteri di volume utile che consentono di soddisfare la domanda idrica prevista minimizzando al contempo i costi d'impianto.

L'efficacia di questi sistemi è strettamente legata al profilo climatico del sito e alla superficie di raccolta disponibile, ma anche alla capacità di integrazione con i sistemi di pompaggio e di controllo della pressione. Infatti, attraverso pompe ad alta efficienza e sistemi di regolazione elettronica, è possibile gestire l'erogazione dell'acqua recuperata in modo stabile e continuo, garantendo un servizio idrico di qualità anche durante i periodi di ridotta piovosità.

4.4.2 Riutilizzo delle acque di processo

Oltre alle acque meteoriche, un'importante quota di recupero può derivare dai flussi di scarico dei processi industriali o civili.

Mediante opportuni trattamenti fisico-chimici o biologici, queste acque possono essere reimmesse nel circuito per alimentare utenze secondarie. Nei sistemi industriali, ad esempio, è possibile riutilizzare l'acqua depurata per alimentare circuiti di raffreddamento, sistemi di lavaggio o impianti di servizio, riducendo il fabbisogno di acqua di rete e le spese di smaltimento.

Come evidenziato nella tesi di Antonino Andrea Impellicieri (2022), il riutilizzo interno dell'acqua contribuisce anche a migliorare l'efficienza energetica complessiva del sistema, poiché consente di recuperare parte dell'energia termica contenuta nei reflui. Questo principio è particolarmente rilevante nei sistemi con pompe e motori ad alta efficienza, dove il recupero del calore o della pressione residua riduce ulteriormente i consumi energetici globali.

4.4.3 Integrazione con la gestione digitale

Le moderne soluzioni di monitoraggio e controllo permettono oggi una gestione automatizzata dei flussi idrici recuperati, ottimizzando i livelli di accumulo e la portata delle pompe in funzione della disponibilità e della domanda. Attraverso sensori di livello, misuratori di portata e algoritmi di controllo predittivo, è possibile bilanciare in tempo reale l'immissione e il prelievo dai serbatoi, garantendo continuità operativa e riducendo gli sprechi.

Questa integrazione tra recupero idrico e digitalizzazione rappresenta uno dei principali sviluppi verso impianti industriali intelligenti e sostenibili, capaci di adattarsi dinamicamente alle condizioni operative ed ambientali.

4.4.4 Benefici ambientali ed economici

Oltre al risparmio diretto di acqua e di energia, i sistemi di recupero e riutilizzo comportano significativi vantaggi ambientali ed economici:

- riduzione del prelievo da fonti naturali e dell'impatto sulle falde acquifere;
- diminuzione dei volumi di scarico e dei costi di depurazione;
- miglioramento dell'efficienza complessiva dei processi produttivi;
- riduzione delle emissioni indirette di CO₂ associate alla produzione e al trasporto dell'acqua potabile.

In tal modo, il recupero e il riutilizzo delle acque diventano una componente chiave delle strategie di sostenibilità ambientale nei moderni impianti idrici industriali.

4.5 Contributo alla decarbonizzazione

Negli ultimi anni, la transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio ha assunto un ruolo centrale nelle strategie di sviluppo sostenibile del settore industriale. Anche gli impianti idrici, tradizionalmente considerati come sistemi a elevato consumo energetico, sono oggi chiamati a contribuire in modo significativo agli obiettivi di decarbonizzazione attraverso il miglioramento dell'efficienza dei sistemi di pompaggio, l'integrazione di fonti rinnovabili e l'adozione di tecnologie digitali per la gestione intelligente dell'energia.

4.5.1 Efficienza energetica per la sostenibilità

Come mostrato nella letteratura tecnica e nelle tesi di riferimento, la componente energetica rappresenta il principale fattore di impatto ambientale negli impianti di sollevamento e distribuzione dell'acqua. L'impiego di pompe ad alta efficienza, motori elettrici IE4–IE5 ed inverter a velocità variabile consente una riduzione dei consumi fino al 30%, con una conseguente diminuzione proporzionale delle emissioni indirette di CO₂ associate all'elettricità utilizzata.

Secondo l'analisi riportata dal *Council of the Great Lakes Region* (2024), l'ammodernamento dei sistemi di pompaggio è una delle misure più efficaci per raggiungere gli obiettivi di net zero, poiché ogni incremento dell'efficienza energetica si traduce direttamente in una riduzione delle emissioni lungo l'intera catena di approvvigionamento energetico. L'articolo evidenzia inoltre come un'adeguata progettazione dei cicli di funzionamento e l'uso di sensori di pressione, portata e temperatura permettano di ottimizzare la regolazione della pompa in base alle reali condizioni operative, evitando sovraccarichi e sprechi di energia.

4.5.2 Gestione digitale degli impianti idrici

Un altro aspetto fondamentale della decarbonizzazione è rappresentato dall'integrazione dei sistemi di monitoraggio digitale. Come descritto nel blog tecnico di *Schneider Electric* (2024), il settore idrico-industriale è responsabile di circa il 22% del consumo globale di acqua e di una quota rilevante delle emissioni legate alla sua gestione.

L'articolo propone un approccio basato sui tre principi Reduce – Replace – Recover:

- Reduce, riducendo i consumi energetici mediante l'uso di inverter, pompe intelligenti e piattaforme di analisi dati;
- Replace, sostituendo le fonti fossili con energia proveniente da fonti rinnovabili;
- Recover, recuperando energia e risorse dai processi di trattamento e distribuzione.

Esempi applicativi mostrano come l'implementazione di sistemi digitali di monitoraggio e controllo abbia portato, in alcuni impianti industriali, a una riduzione dei consumi energetici fino al 15 % in pochi mesi di esercizio.

La convergenza tra tecnologie operative (OT) e sistemi informativi (IT) consente oggi di raccogliere, analizzare ed utilizzare in tempo reale i dati energetici, trasformando l'impianto idrico in un sistema dinamico capace di autoregolarsi e migliorare le proprie prestazioni in ottica sostenibile.

4.5.3 Integrazione con le energie rinnovabili

La decarbonizzazione passa anche attraverso l'integrazione dei sistemi di pompaggio con fonti rinnovabili. Studi recenti, come quello pubblicato su *Nature* (2025), propongono soluzioni innovative basate su stazioni di pompaggio alimentate da impianti fotovoltaici integrati con sistemi di accumulo e produzione di idrogeno verde tramite elettrolisi.

In queste configurazioni, l'energia in eccesso generata dal fotovoltaico viene convertita e immagazzinata sotto forma di idrogeno, da riutilizzare successivamente per alimentare le pompe nei momenti di picco o di scarsa produzione solare. L'analisi tecnico-economica condotta mostra che tali impianti possono raggiungere livelli di autosufficienza energetica molto elevati, riducendo in modo significativo le emissioni totali di CO₂.

Sebbene queste tecnologie siano ancora in fase sperimentale, esse rappresentano un'evoluzione concreta verso sistemi idrici completamente carbon neutral, nei quali i processi di pompaggio non solo consumano, ma contribuiscono anche alla produzione e gestione sostenibile dell'energia.

4.5.4 Verso la neutralità carbonica negli impianti idrici

Il contributo alla decarbonizzazione dei sistemi di pompaggio non si limita al miglioramento. Il percorso verso la neutralità carbonica negli impianti idrici richiede un approccio sistemico che vada oltre il semplice miglioramento dell'efficienza meccanica delle pompe. La riduzione delle emissioni di gas serra passa infatti attraverso una visione dell'intero sistema di pompaggio, considerato come nodo energetico all'interno dell'impianto industriale. Le strategie più efficaci si basano su tre direttrici principali: l'impiego di pompe e motori ad alta efficienza, l'adozione di tecnologie digitali per il monitoraggio e l'ottimizzazione dei consumi, e l'integrazione con fonti di energia rinnovabile per l'alimentazione del sistema. Tali interventi non solo contribuiscono alla sostenibilità ambientale, ma permettono anche un

contenimento dei costi operativi e un aumento della vita utile delle apparecchiature favorendo così una transizione energetica duratura e conveniente.

In questa prospettiva, i sistemi idrici industriali non sono più meri utilizzatori di energia, ma componenti attivi della strategia di decarbonizzazione, capaci di concorrere in modo concreto al raggiungimento degli obiettivi europei di neutralità climatica.

Capitolo 5

Caso applicativo semplificato

5.1 Dati ipotetici di progetto

Il seguente caso di studio ha lo scopo di illustrare in modo semplificato, il dimensionamento preliminare di un impianto idrico industriale per la distribuzione interna dell'acqua in uno stabilimento manifatturiero. L'obiettivo è fornire un esempio applicativo dei criteri di calcolo e delle metodologie illustrate nei capitoli precedenti.

5.1.1 Descrizione dell'impianto

Si ipotizza l'impianto a servizio di un capannone industriale destinato a lavorazioni meccaniche dotato di:

- rete di alimentazione idrica proveniente da acquedotto comunale;
- gruppo di pompaggio con accumulo interrato;
- rete di distribuzione interna con ramificazioni verso reparti produttivi, servizi igienici e impianto antincendio.

L'impianto è concepito per garantire:

- continuità di approvvigionamento anche in caso di interruzioni momentanee della fornitura;
- pressione di esercizio costante e adeguata anche alle utenze più sfavorite;
- efficienza energetica del gruppo di pompaggio.

5.1.2 Parametri di progetto

Sulla base delle caratteristiche tipiche di stabilimenti di medie dimensioni, si adottano i seguenti dati ipotetici:

Parametro	Simbolo	Valore	Unità di misura
Fabbisogno idrico giornaliero	V_g	40	$\frac{m^3}{gg}$
Ore di funzionamento giornaliero	t	8	h
Portata media oraria	Q_m	5	$\frac{m^3}{h}$
Portata massima	Q_{max}	8	$\frac{m^3}{h}$
Dislivello geodetico totale	h_g	12	m
Lunghezza equivalente della rete principale	L	180	m
Temperatura dell'acqua	T	20	$^{\circ}C$
Densità del fluido	ρ	998	$\frac{kg}{m^3}$
Viscosità dinamica	μ	$1,002 \cdot 10^{-3}$	$Pa \cdot s$

Tabella 2 - Parametri di progetto

5.1.3 Configurazione impiantistica

L'impianto è costituito da una rete di distribuzione a maglia chiusa, alimentata da un gruppo di pompaggio collegato ad un serbatoio di accumulo interrato.

La rete principale distribuisce l'acqua alle utenze mediante diramazioni secondarie, con tubazioni dimensionate in funzione delle portate e delle perdite ammissibili.

I materiali più comunemente impiegati sono riportati nella tabella seguente, conforme alle norme UNI EN ISO 6708, UNI EN 10255 e UNI EN ISO 4427-2.

Materiale	Norma	DN [mm]	D_{int} [mm]	PN [bar]	Campo d'impiego
Acciaio zincato	UNI EN 10255 – ISO 65	80	76,1	16	Condotte principali, circuiti industriali
PE100 (HDPE)	UNI EN ISO 4427-2	50	54,2	10	Reti secondarie, acqua potabile o di processo
Rame	UNI EN 1057	28	26,2	10	Linee sanitarie, piccoli circuiti interni
PVC-U	UNI EN ISO 1452	90	86,0	10	Condotte interrate a bassa pressione
Ghisa sferoidale	UNI EN 545	100	98,0	25	Reti di adduzione o impianti antincendio

Tabella 3 - Dimensioni e materiali dei tubi

5.1.4 Schema dell'impianto

Il sistema può essere schematizzato come segue:

1. Serbatoio di accumulo interrato, con sensore di livello e valvola di sicurezza.
2. Pompa centrifuga di sollevamento collegata alla rete principale.
3. Collettore di distribuzione con diramazioni per i reparti.
4. Autoclave (installata a valle della pompa) per mantenere la pressione costante.
5. Utenze di processo, servizi e antincendio.

5.2 Dimensionamento di tubazioni e pompe

Il dimensionamento preliminare dell'impianto idrico ha lo scopo di individuare le principali grandezze idrauliche necessarie per garantire il corretto funzionamento della rete: i diametri interni delle tubazioni, le perdite di carico complessive e la prevalenza richiesta alla pompa di sollevamento.

Il calcolo viene condotto in forma semplificata, assumendo un moto stazionario e trascurando le variazioni di temperatura e densità dell'acqua.

5.2.1 Calcolo dei diametri interni

Il diametro interno minimo di una condotta a sezione circolare si ricava dall'equazione di continuità:

$$Q = v \cdot A = v \cdot \frac{\pi D_{int}^2}{4}$$

da cui:

$$D_{int} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

Per evitare fenomeni di rumorosità, cavitazione o eccessive perdite di carico, si adottano solitamente le seguenti velocità:

- 2 ÷ 3 m/s per condotte principali;
- 1 ÷ 2 m/s per diramazioni secondarie.

Assumendo

$$Q_{max} = \frac{8}{3600} = 2,22 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s}$$

$$v = 2 \frac{m}{s}$$

si ottiene:

$$D_{int} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,22 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 2}} = 0,0376 \text{ m} \approx 38 \text{ mm}$$

Il diametro nominale immediatamente superiore secondo UNI EN 10255 è DN 40, corrispondente a un diametro interno di circa 41 mm.

Se volessimo considerare anche le diramazioni secondarie, il procedimento sarebbe analogo

$$Q = \frac{1,5}{3600} = 4,17 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

risultando:

$$D_{int} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,17 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 1,5}} = 0,019 \text{ m} \approx 19 \text{ mm}$$

Con diametro nominale immediatamente successivo DN 20.

5.2.2 Calcolo delle perdite di carico

Le perdite di carico totali saranno date dalla somma delle perdite distribuite e concentrate.

Perdite distribuite

Sono dovute all'attrito tra il fluido e le pareti interne della tubazione. Partiamo determinando Reynolds con i valori presenti nei paragrafi 5.1.2 e 5.2.1:

- Condotta principale (DN 40, $D_{int} \approx 41 \text{ mm}$, $v = 2 \text{ m/s}$)

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998 \cdot 2 \cdot 0,041}{1,002 \cdot 10^{-3}} \approx 8,2 \cdot 10^4$$

- Diramazione secondaria (DN 20, $D_{int} \approx 19 \text{ mm}$, $v = 1,5 \text{ m/s}$):

$$Re = \frac{998 \cdot 1,5 \cdot 0,019}{1,002 \cdot 10^{-3}} \approx 2,8 \cdot 10^4$$

Appurato che ci troviamo in moto turbolento, per tubi in acciaio zincato nuovo, assumiamo una scabrezza media $\varepsilon = 0,03 \text{ mm}$ e per un numero di Reynolds elevato come calcolatosi, il coefficiente λ è pari a circa 0,03.

Applicando la formula di Darcy–Weisbach:

$$h_d = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} = 0,03 \cdot \frac{180}{0,041} \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 26,85 \text{ m}$$

Perdite concentrate

Sono dovute a curve, valvole, raccordi e restringimenti, le quali si possono convertire in una lunghezza equivalente:

$$L_{eq} = \frac{kD}{\lambda} = \frac{4 \cdot 0,041}{0,03} = 5,47 \text{ m}$$

dove k è il coefficiente di perdita localizzata (ipotizziamo una rete con 4 curve, 2 valvole e 1 raccordo a T, si può assumere $k_{tot} \approx 4$).

Pertanto, la lunghezza totale equivalente risulta:

$$L_{tot} = 180 + 5,47 = 185,47 \text{ m}$$

e le perdite totali diventano:

$$h_{d,tot} = 0,03 \cdot \frac{185,47}{0,041} \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 27,67 \text{ m}$$

5.2.3 Prevalenza e scelta della pompa

La prevalenza totale è data dalla somma del dislivello geodetico, delle perdite di carico e del termine di pressione necessario all'utenza più sfavorita. Assumendo una pressione minima richiesta all'utenza $p_{u,min} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ avremo:

$$H_p = h_g + h_{d,tot} + \frac{p_{u,min}}{\rho \cdot g} = 12 + 27,67 + \frac{2 \cdot 10^5}{998 \cdot 9,81} = 12 + 27,67 + 20,43 = 60,1 \text{ m}$$

Sulla base dei risultati ottenuti:

- Portata richiesta: $Q = 8 \text{ m}^3/\text{h} = 2,22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

- Prevalenza totale: $H_p = 60,1 \text{ m}$

Si seleziona una pompa centrifuga monostadio con curva caratteristica che intercetti il punto $(Q, H) = \left(8 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}; 60,1 \text{ m}\right)$ in prossimità del BEP (Best Efficiency Point), per garantire rendimento e stabilità operativa.

La potenza utile sull'albero (con rendimento idraulico stimato $\eta_h \approx 0,75$) sarà:

$$P = \frac{\rho g Q H_p}{\eta_h} = \frac{998 \cdot 9,81 \cdot 2,22 \cdot 10^{-3} \cdot 60,1}{0,75} = 1,74 \text{ kW}$$

Per margine operativo e compatibilità con i rendimenti complessivi, si prevede una taglia commerciale del motore $\geq 2,2 \text{ kW}$ (IE3/IE4), preferibilmente con inverter per modulare la portata nelle ore non di punta e contenere i consumi.

5.3 Verifica serbatoio ed autoclave

5.3.1 Architettura impianto

Il sistema di distribuzione idrica ipotizzato prevede la presenza contemporanea di un serbatoio di accumulo e di un'autoclave, disposti in serie. Questa configurazione consente di garantire continuità di approvvigionamento e stabilità di pressione, distinguendo due funzioni complementari:

- Serbatoio interrato di accumulo: funge da riserva idrica principale e permette di disaccoppiare il funzionamento della pompa dalle variazioni giornaliere della domanda;
- Pompa centrifuga monostadio: preleva l'acqua dal serbatoio e alimenta la rete attraverso l'autoclave;
- Autoclave: stabilizza la pressione di rete compensando le variazioni di portata e limitando la frequenza di accensione della pompa.

In questa architettura, il serbatoio gestisce le oscillazioni lente (profilo orario della domanda), mentre l'autoclave interviene sulle variazioni rapide di pressione.

5.3.2 Verifica del serbatoio di accumulo

Ipotizziamo un turno lavorativo di 8 ore, con una portata complessiva giornaliera di 40 m^3 , equivalente a una portata media:

$$Q_m = \frac{40}{8} = 5 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le richieste orarie di ciascun reparto sono riportate nella seguente tabella:

Ora	1	2	3	4	5	6	7	8
Portata richiesta $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right]$	3	4	6	8	7	6	4	2

Tabella 4 - Portate orarie richieste

La pompa alimenta il serbatoio a portata costante pari alla media $Q_p = 5 \text{ m}^3/\text{h}$. Durante le ore con domanda maggiore il serbatoio si svuota, mentre durante le ore di bassa richiesta si riempie. Confrontando l'acqua pompata e quella consumata, si ottiene la differenza cumulativa (riempimento o svuotamento del serbatoio):

Ora	Entrata $[\text{m}^3]$	Uscita $[\text{m}^3]$	Differenza cumulata $[\text{m}^3]$
1	+5	-3	+2
2	+5	-4	+3
3	+5	-6	+2
4	+5	-8	-1
5	+5	-7	-3
6	+5	-6	-4
7	+5	-4	-3
8	+5	-2	0

Tabella 5 - Cumulata del serbatoio

Il livello del serbatoio oscilla tra $+3 \text{ m}^3$ e -4 m^3 , per un'escursione complessiva di:

$$\Delta V = 3 - (-4) = 7 \text{ m}^3$$

Il volume complessivo aggiungendo tutti i contributi sarà:

$$V_{serb} = V_{min} + \Delta V_0 + \Delta V = 5 + 1 + 7 = 13 \text{ m}^3$$

Ipotizzando 5 m^3 di volume dedicato all'alimentazione antincendio, adotteremo quindi una capacità commerciale del serbatoio di accumulo di 15 m^3 , sufficiente a garantire una riserva anche in caso di imprevisti o brevi interruzioni di alimentazione.

5.3.3 Verifica dell'autoclave

L'autoclave è installata a valle della pompa e ha la funzione di stabilizzare la pressione in rete e ridurre il numero di cicli di accensione/spegnimento della pompa.

Si considera un vaso d'espansione a cuscino d'aria, con comportamento isoterma. Per limitare il numero di avviamenti, si impone $N_{max} = 10 \text{ cicli/ora}$. Combinandola con la relazione che troviamo al paragrafo 1.4.3 si ottiene:

$$V_0 = \frac{Q_{max}}{2N_{max}} \cdot \frac{p_1}{p_1 - p_0}$$

Considerando le pressioni di rete rispettivamente $p_0 = 4 \text{ bar}$ e $p_1 = 5 \text{ bar}$:

$$V_0 = \frac{8}{2 \cdot 10} \cdot \frac{5}{5 - 4} = 2 \text{ m}^3$$
$$V_u = V_0 \cdot \left(1 - \frac{p_0}{p_1}\right) = 2 \cdot \left(1 - \frac{4}{5}\right) = 0,4 \text{ m}^3$$

Ricavatosi il volume d'aria V_0 ed il volume utile d'acqua V_u , deduciamo che il volume totale dell'autoclave sia di circa $2\text{-}3 \text{ m}^3$.

Conclusioni

Il lavoro svolto ha permesso di analizzare in modo completo i principali aspetti legati alla progettazione e alla gestione di un impianto idrico industriale, mettendo in evidenza come efficienza, sostenibilità e innovazione rappresentino oggi fattori strettamente connessi. Dallo studio dei criteri progettuali è emerso che un impianto ben concepito non si limita a soddisfare le esigenze funzionali di distribuzione dell'acqua, ma deve anche garantire continuità di servizio, affidabilità e un consumo energetico contenuto. La scelta accurata dei materiali, il corretto dimensionamento delle condotte e delle pompe, così come la definizione dei volumi di accumulo, sono passaggi fondamentali per ottenere un sistema equilibrato e duraturo.

L'approfondimento delle innovazioni tecnologiche ha evidenziato come la digitalizzazione e i sistemi di controllo intelligente stiano trasformando il modo di gestire le reti idriche: il monitoraggio in tempo reale, la regolazione automatica delle pompe e l'uso di materiali anticorrosivi avanzati permettono di migliorare l'efficienza e ridurre gli sprechi. Parallelamente, l'attenzione crescente verso la sostenibilità ambientale spinge a promuovere il recupero e il riutilizzo delle acque contribuendo alla riduzione dei prelievi e all'obiettivo più ampio della decarbonizzazione dei processi industriali.

In prospettiva, l'integrazione tra impianti idrici, fonti rinnovabili e sistemi di gestione energetica rappresenta la direzione più promettente per il futuro. L'ingegneria degli impianti, sempre più orientata alla sostenibilità, dovrà continuare a coniugare competenze tecniche e consapevolezza ambientale, affinché ogni progetto diventi non solo efficiente, ma anche responsabile nei confronti delle risorse e delle generazioni future.

Indice figure

Figura 1 - Allacciamento all'acquedotto pubblico	6
[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 187]	
Figura 2 - Impianto idrico senza serbatoio di compenso.....	7
[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 189]	
Figura 3 - Sezione tipica di un serbatoio sopraelevato per l'accumulo di acqua industriale ed antincendio.....	9
[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 191]	
Figura 4 - Impianto con serbatoio di accumulo sopraelevato per il servizio idrico ad uno stabilimento industriale	10
[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 192]	
Figura 5 - Impianto idrico con autoclave, pompa e pressostati per piccole e medie applicazioni	11
[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 200]	
Figura 6 - Giunto saldato, giunto a bicchiere cilindrico saldato, giunto a flange.....	15
[fonte: Monte A., Elementi di impianti industriali vol.2, Edizioni libreria Cortina Torino, 2009, IV edizione, p. 795-797]	
Figura 7 - Raccordo a gomito a 90°, curva a 90°, gomito con bocchettone, T a 90°, T a una curva, croce, riduzione, nipplo, calotta, tappo, distribuzione a gomito, distribuzione a croce	17
[fonte: Monte A., Elementi di impianti industriali vol.2, Edizioni libreria Cortina Torino, 2009, IV edizione, p. 804]	
Figura 8 - A sinistra la guarnizione ondulata: a) metallica; b) metalloplastica; c) spirometallica; mentre a destra la guarnizione piana	18

[fonte: Monte A., Elementi di impianti industriali vol.2, Edizioni libreria Cortina Torino, 2009, IV edizione, p. 805]

Figura 9 - Saracinesca e valvola (a flusso avviato)..... 20

[fonte: Monte A., Elementi di impianti industriali vol.2, Edizioni libreria Cortina Torino, 2009, IV edizione, p. 806]

Figura 10 - Sezione longitudinale di una pompa centrifuga 23

[fonte: E. Corti, Pompe Centrifughe - Dispense del corso di Macchine, Università di Bologna, Campus di Forlì, A.A. 2023/2024, p. 1]

Figura 11 - Curva caratteristica di una pompa centrifuga 24

[fonte: L. A. Catalano, M. Napolitano, Elementi di macchine operatrici a fluido, Pitagora Editrice Bologna, p. 74]

Figura 12 - Sezione di un serbatoio sopraelevato 27

[fonte: Fabio Pigatto, Dimensionamento degli impianti idrici e loro valutazione economica, Tesi di laurea triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica, Università degli studi di Padova, Anno 2015/2016, p. 17]

Figura 13 - Diagramma di Moody 30

[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 210]

Figura 14 - Tabella delle lunghezze equivalenti Leq (m) per le accidentalità più comuni 31

[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 212]

Figura 15 - Tipi di rete di distribuzione: a) rete aperta; b) rete chiusa..... 32

[fonte: Fabio Pigatto, Dimensionamento degli impianti idrici e loro valutazione economica, Tesi di laurea triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica, Università degli studi di Padova, Anno 2015/2016, p. 24]

Figura 16 - Determinazione del volume del serbatoio per completa disponibilità del servizio 36

[fonte: F. Turco, Principi generali di progettazione degli impianti industriali, CittàStudi Edizioni, ristampa 2012, p. 119]

Figura 17 - Esempio di trattamento anticorrosivo su raccordo metallico..... 44

[fonte: Holson Impianti s.r.l., Rivestimenti anticorrosivi, disponibile su:
<https://www.holsonimpianti.com/rivestimenti-anticorrosivi>]

Indice Tabelle

Tabella 1 - Valori tipici di scabrezza	30
[fonte: Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012, p. 209]	
Tabella 2 - Parametri di progetto.....	51
Tabella 3 - Dimensioni e materiali dei tubi	52
[fonte: rielaborazione da UNI EN 10255, UNI EN 1057, UNI EN 545, UNI EN ISO 4427-2, UNI EN ISO 1452]	
Tabella 4 - Portate orarie richieste.....	57
Tabella 5 - Cumulata del serbatoio	57

Bibliografia

1. E. Corti, Pompe Centrifughe - Dispense del corso di Macchine, Università di Bologna, Campus di Forlì, A.A. 2023/2024
2. Monte A., Elementi di impianti industriali vol.2, Edizioni libreria Cortina Torino, 2009, IV edizione
3. Fabio Pigatto, Dimensionamento degli impianti idrici e loro valutazione economica, Tesi di laurea triennale in Ingegneria Meccanica e Meccatronica, Università degli studi di Padova, A.A. 2015/2016
4. L. A. Catalano, M. Napolitano, Elementi di macchine operatrici a fluido, Pitagora Editrice Bologna
5. Pareschi A., Impianti meccanici per l'industria, Società editrice Esculapio, ristampa 10/2012
6. F. Turco, Principi generali di progettazione degli impianti industriali, CittàStudi Edizioni, ristampa 2012
7. Maria Chiara Conte, Efficienza energetica dei sistemi di pompaggio, Dottorato di ricerca in ingegneria dei sistemi civili, Università degli studi di Napoli, XXIX Ciclo
8. Antonino Andrea Impellicieri, Analisi tecnico-economica e dimensionamento di serbatoi per il recupero di acqua piovana a scala di edificio, Tesi di laurea magistrale in ingegneria civile, Politecnico di Torino, A.A. 2020/2021

Sitografia

1. Nature, “Decarbonization in industrial water systems”, Scientific Reports, 2025, disponibile su: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-02295-2>
2. Schneider Electric Blog, “Decarbonizing the industrial water sector: Understanding the path”, 14 novembre 2024. disponibile su: <https://blog.se.com/industry/2024/11/14/decarbonizing-the-industrial-water-sector-understanding-the-path>
3. Council of the Great Lakes Region, “The role of pump technology in achieving net-zero goals”, disponibile su: <https://councilgreatlakesregion.org/the-role-of-pump-technology-in-achieving-net-zero-goals>