

6 IL PROGETTO DEGLI IMPIANTI MBR: CONFIGURAZIONE DEI REATTORI, COMPONENTI E PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Santo Fabio Corsino¹, Michele Torregrossa¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali,
Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Ed. 8, 90128 Palermo

6.1 Introduzione

I bioreattori a membrana (MBR) derivano dalla combinazione del processo biologico a fanghi attivi (CAS) e del processo di filtrazione su membrana. Tali sistemi sono ad oggi sempre più diffusi e vengono applicati sia al trattamento di reflui civili che industriali. I sistemi MBR consentono di ottenere un'elevata qualità degli effluenti trattati e di rispettare, in tal modo, i restrittivi limiti allo scarico imposti dalle vigenti al riguardo. Al contempo garantiscono un minore ingombro planimetrico rispetto ai processi depurativi convenzionali. Oltre a tali vantaggi, i sistemi MBR producono una minore quantità di fanghi di supero, in quanto operano con valori del tempo di residenza cellulare maggiori rispetto ai sistemi convenzionali, e ciò contribuisce alla riduzione dei costi operativi legati allo smaltimento dei fanghi. Inoltre, essi garantiscono un processo affidabile, in quanto il rendimento depurativo prescinde dalle caratteristiche di sedimentabilità dei fanghi. Tali vantaggi fanno sì che la tecnologia MBR sia ad oggi sempre più consolidata e applicata in molti casi, soprattutto laddove la ridotta disponibilità di spazi costituisce un problema non secondario.

Tuttavia, ci sono ancora oggi delle problematiche di natura gestionale che affliggono tale tecnologia, legati prevalentemente alla progressiva riduzione del flusso di permeato nel tempo. Tali disfunzioni sono rappresentate dal fouling e dal foaming, ovvero rispettivamente il fenomeno dello sporcamento delle membrane e della formazione di schiume, che determinano notevoli problemi di carattere gestionale. L'attenzione del mondo scientifico e tecnico è pertanto volta prevalentemente alla caratterizzazione di tali fenomeni e alla definizione di strategie operative che siano in grado di minimizzarne la formazione nel tempo. Tuttavia, non sono solo queste le problematiche tecniche e gestionali che riducono le funzionalità dei sistemi MBR. Secondo un sondaggio effettuato tra gli operatori del settore, è emerso che le principali problematiche in

ambito gestionale negli impianti MBR, oltre a quelle già citate, riguardano i pretrattamenti, i consumi energetici e la formazione degli operatori (Figura 6.1).

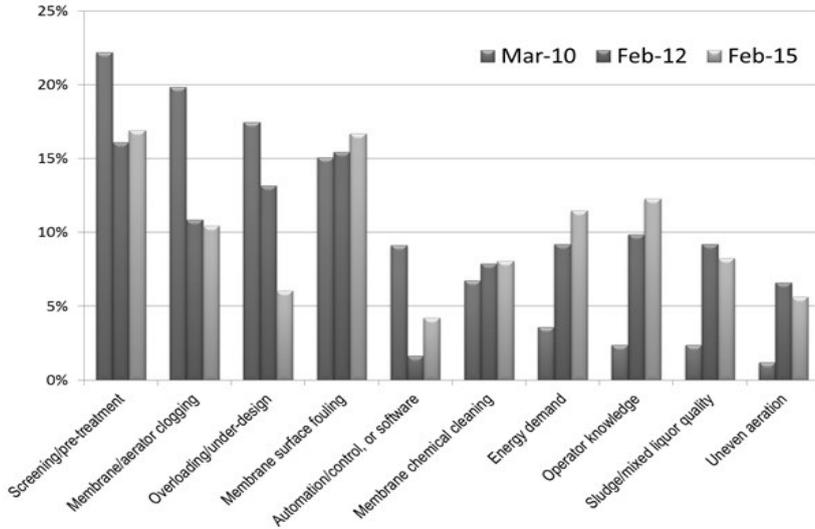


Figura 6.1. Risultati di tre sondaggi effettuati negli anni 2010, 2012 e 2015 riguardanti le principali problematiche gestionali riscontrate negli impianti MBR (Judd, 2015).

Nel prosieguo si analizzeranno e approfondiranno alcuni aspetti della progettazione, come la scelta della configurazione, la scelta delle membrane, delle dotazioni elettromeccaniche e delle opere accessorie degli impianti MBR, e, inoltre verranno riportati dei cenni sulle soluzioni tecnologiche più innovative atte a minimizzare le disfunzioni dei sistemi MBR e di conseguenza dei costi operativi.

6.2 Configurazione dei reattori

Dal punto di vista impiantistico è possibile distinguere tre principali configurazioni: side-stream (sMBR), sommersa (iMBR) e di tipo misto. Nella prima (Figura 6.2), i moduli di membrane sono esterni al reattore biologico e in essi la miscela aerata viene pompata e successivamente ricircolata al reattore biologico.

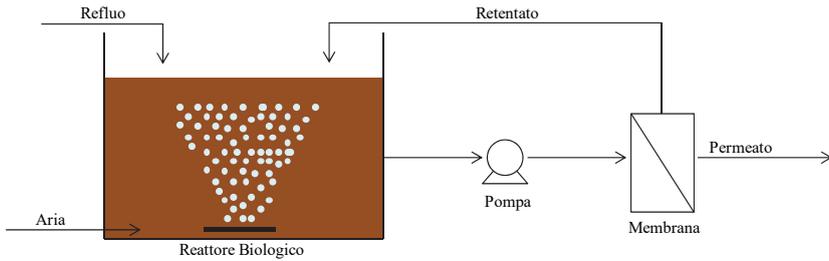


Figura 6.2. Schema di un impianto MBR con configurazione side-stream.

La direzione della filtrazione è dall'interno verso l'esterno negli impianti con configurazione side-stream, mentre è dall'esterno all'interno negli impianti a configurazione sommersa. La tipologia di filtrazione può essere del tipo *dead-end* o *cross flow*, a seconda se il flusso di permeato è rispettivamente ortogonale o tangenziale alla membrana. Entrambe le configurazioni richiedono, però, lo sviluppo di sollecitazioni tangenziali sulla superficie della membrana al fine di promuovere il flusso di permeato e contenere il fouling, ovvero il fenomeno di progressivo sporcamento delle membrane. Nello schema di installazione side-stream, quindi, la forte turbolenza indotta dall'elevata velocità assiale del flusso, ostacola la formazione dello strato di solidi ritenuti all'interfaccia liquido/membrana, strato che altrimenti aumenterebbe rapidamente di spessore con conseguente incremento della resistenza alla filtrazione della membrana e relativa diminuzione del flusso di permeato. L'alta velocità necessaria a controllare la crescita dello strato di materiale sporcante sulla superficie delle membrane viene ottenuta mediante un elevato ricircolo di retentato nel reattore. Si tenga conto che il fattore di recupero per un passaggio della sospensione pressurizzata in un modulo non è normalmente superiore al 10% della portata di alimento. Ciò evidentemente comporta apprezzabili consumi energetici, dovuti alla presenza del circuito di ricircolo, stimabili intorno a $2 \div 10 \text{ kWh/m}^3$ di acqua trattata. Principalmente per questo motivo, gli MBR in configurazione side-stream risultano molto energivori a causa delle elevate pressioni e della velocità imposta necessaria a contenere il fouling. Al fine di sfruttare al massimo l'energia latente del fluido in movimento, il percorso del fluido deve essere il più lungo possibile, in modo che quanta più energia possibile del fluido in moto sia usata per la filtrazione. Al fine di ottenere un fattore di recupero nell'ordine del 40-50%, è in generale richiesto un percorso anche superiore ai 20 metri, ragion per cui le membrane in questa configurazione vengono poste in serie. Ciò, dall'altra parte, comporta delle elevate perdite di carico attraverso i moduli delle membrane che determinano l'aumento della richiesta di energia. Questo riciclo ha inoltre altre conseguenze negative sul

funzionamento del processo depurativo: nel passaggio della biomassa attraverso le pompe di ricircolo del retentato si hanno sforzi di taglio che possono rompere le pareti cellulari dei batteri e quindi ridurre l'attività biologica dei fanghi (Brockmann & Seyfried, 1996). Dato che la deflocculazione del fango attivo dipende dalla frequenza di passaggio dei fanghi attraverso le pompe, la diminuzione dell'attività biologica sarà quindi una funzione del fattore di ricircolo.

Indubbiamente un simile schema assicura elevate prestazioni in termini idraulici e facili operazioni di mantenimento legate alla agevole accessibilità ai moduli di membrana installati esternamente. I flussi di permeato ottenibili con tale configurazione sono nell'ordine dei 50-120 l/m²·h. Tuttavia vi sono dei costi associati alla costruzione di appositi edifici di contenimento delle membrane, al mantenimento di TMP elevate, comprese tra 1-5 bar, e al pompaggio della miscela aerata (6-8 kWh/m³). Inoltre, è da sottolineare che le elevate TMP, che sono richieste per mantenere un'elevata velocità di cross-flow sulla superficie della membrana, piuttosto che per ottenere un flusso maggiore, inducono la compattazione dello strato di materiale depositato sulla superficie della membrana (*cake layer*), riducendo sensibilmente la permeabilità. Il fouling viene controllato dalle elevate velocità tangenziali nei moduli dell'ordine di 2-5 m/s, da cui discende il vantaggio diretto del minore sporco. D'altra parte, l'effetto combinato degli elevati costi di investimento e di gestione per la circolazione del mixed liquor (miscela aerata), rende questa configurazione economicamente poco sostenibile per applicazioni in impianti di trattamento delle acque reflue civili.

Di maggior interesse è la configurazione sommersa (iMBR) mostrata in Figura 6.3 in cui le membrane vengono direttamente immerse all'interno dei reattori biologici.

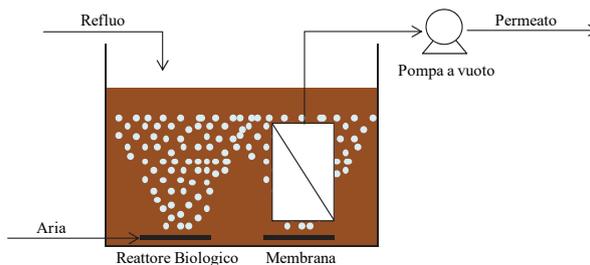


Figura 6.3. Schema di un impianto MBR in configurazione sommersa.

In questo caso non è necessario operare un ricircolo della miscela aerata e il consumo energetico è attribuibile in parte alla pompa a vuoto necessaria per imporre la TMP alla membrana, che si aggira attorno a 0,003-0,02 kWh/m³, e in parte all'immissione di aria nel

modulo per rallentare il processo di sporcamento superficiale (*scouring*). La TMP in gioco è relativamente bassa, dell'ordine di 0,1 – 0,6 bar mentre il flusso di permeato, in condizioni operative medie, è compreso tra 10 e 20 L/(m²·h) (Judd, 2011). La tipologia di filtrazione può essere del tipo *dead-end* o *crossflow* e il fouling è controllato attraverso l'immissione di bolle d'aria all'interno del modulo in modo da scuotere le fibre e contrastare il deposito di materiale; tale tecnica è esaltata dal fatto che le membrane, in particolare quelle a fibre cave, sono più lunghe rispetto alla distanza che separa i supporti, inferiore e superiore che le sorreggono, ovvero sono realizzate a fasci fissati nella sola parte inferiore e pertanto liberi di fluttuare. Le modeste TMP applicate, comportano una moderata compattazione del *cake layer* e un mantenimento relativamente elevato della permeabilità. Inoltre in tali sistemi il *cake layer* assolve alla funzione di pre-filtro proteggendo ulteriormente la superficie della membrana.

Gli impianti in configurazione side-stream hanno una maggiore propensione al fouling rispetto a quelli in configurazione sommersa, in quanto i maggiori flussi applicati risultano in una minore permeabilità perché il fouling stesso cresce all'aumentare del flusso. Inoltre, i maggiori sforzi di taglio, necessari per garantire la turbolenza, possono causare la rottura dei fiocchi di fango. Ciò ha effetti negativi sul fenomeno del fouling che aumenta al diminuire delle dimensioni dei fiocchi e a causa dell'aumento di materiale polimerico contenuto all'interno dei fiocchi stessi. Senza ricircolo, è stato dimostrato che le dimensioni dei fiocchi sono comprese tra 20 e 500 µm, e solo il 15% delle particelle ha un diametro inferiore ai 100 µm. La presenza del ricircolo causa la disgregazione dei fiocchi, le cui dimensioni sono ben al di sotto dei 100 µm, per cui il potere sporcante del fango aumenta in maniera drastica. Gli impianti in configurazione side-stream offrono tuttavia numerosi vantaggi:

- il fouling decresce linearmente all'aumentare della velocità del flusso tangenziale; velocità nell'ordine di 2-3 m/s sono infatti sufficienti a prevenire la formazione del fouling reversibile
- il lavaggio chimico può essere effettuato direttamente in loco senza dover necessariamente rimuovere le membrane dal comparto ad esse dedicato
- i costi legati alla manutenzione si riducono, in quanto i tempi ad essi dedicati sono ampiamente inferiori
- è possibile operare con una concentrazione di solidi generalmente maggiore

Esiste anche la possibilità di fare una scelta impiantistica che stia a metà tra le due proposte, in configurazione cioè di tipo misto (Figura

6.4), che prevede l'installazione delle membrane in configurazione sommersa in un comparto separato e posto a valle rispetto al reattore biologico. Sebbene più complessa dal punto di vista impiantistico, questa soluzione coniuga il vantaggio della tipologia *side-stream* di limitare il fouling, con quello della configurazione *sommersa* di contenere il dispendio energetico. In tale schema tuttavia è richiesta la presenza di sollevamento che serve, o per l'alimentazione del comparto membrane (Figura 6.4a), e in tal caso il ricircolo del retentato al reattore biologico avviene a gravità, ovvero per il ricircolo del retentato qualora il comparto membrane venga alimentato a gravità (Figura 6.4b).

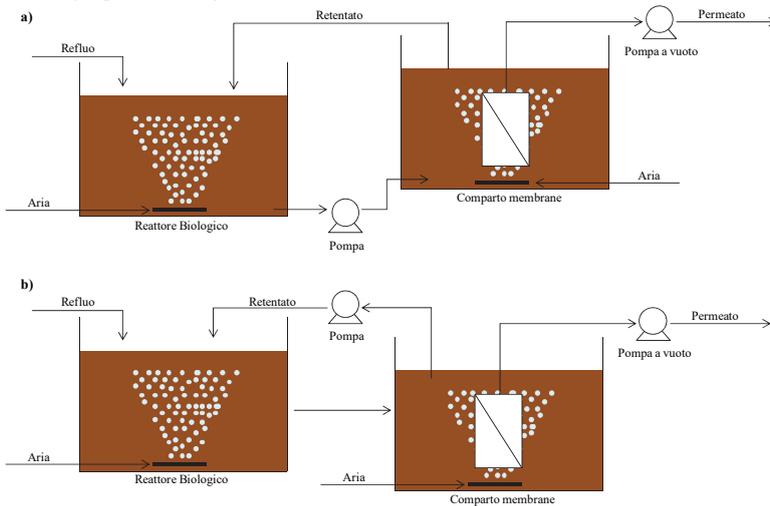


Figura 6.4. Schema di un impianto MBR in configurazione mista.

Delle due soluzioni, la prima è quella che sembra offrire maggiori vantaggi dal punto di vista operativo, in quanto regolando opportunamente il flusso di alimentazione del comparto membrane, è possibile aumentare gli sforzi di taglio sulle membrane stesse, riducendo la formazione del fouling. Tale scelta è tuttavia energeticamente dispendiosa, in quanto la portata di alimentazione del comparto membrane è pari in genere a 4-6 volte quella del portata influente.

Sul circuito di ricircolo del fango, in impianti per la rimozione dei nutrienti, viene spesso inserito un piccolo reattore con un volume modesto, avente la funzione di deossigenazione, che viene dimensionato imponendo un tempo di detenzione idraulica di 10-20 minuti. Tale tipo di soluzione consente di potere operare in maniera più agevole la pulizia chimica delle membrane, che può avvenire

senza dover rimuovere la membrana dal comparto ad essa dedicato, e al contempo senza danneggiare la biomassa del reattore.

6.3 Idrodinamica dei reattori: flusso a pistone (PFR) o completa miscelazione (CSTF)?

La scelta dell'idrodinamica del reattore biologico ha un'importante ruolo sulle cinetiche metaboliche che in esso si svolgono, in quanto essa determina la distribuzione spaziale del substrato e quindi la velocità di degradazione dello stesso da parte delle popolazioni batteriche. Negli impianti convenzionali spesso si fa ricorso a reattori con idrodinamica con flusso a pistone (ovvero più unità funzionanti in serie) al fine di selezionare metabolicamente i batteri fiocco-formatori a scapito di quelli filamentosi, e migliorare in tal modo la sedimentabilità dei fanghi. Tale motivazione in un sistema MBR perde di significato, in quanto le caratteristiche di sedimentabilità dei fanghi non sono più il collo di bottiglia del sistema. La scelta di un reattore con flusso a pistone in un impianto MBR può tuttavia causare una serie di problematiche. Infatti, sebbene l'alternanza di condizioni di alto e basso carico riduca il tasso di crescita dei batteri filamentosi, e di conseguenza il fenomeno del foaming dovrebbe risultare attenuato, l'elevata disponibilità di substrato presente delle sezioni di monte del bacino stimola i microrganismi a produrre un'eccessiva quantità di polimeri extracellulari, il cui effetto sul fouling della membrana è ben noto (Di Bella et al., 2011). Inoltre, a causa dell'elevato carico che si ha nella zona di immissione del refluo, la richiesta di ossigeno è molto elevata, e l'eccessiva aerazione necessaria a far fronte alla maggiore richiesta di ossigeno da parte della biomassa, può causare anch'essa problemi di foaming.

Per le ragioni esposte, la scelta di sistemi con flusso a pistone in impianti MBR ha impatti negativi sia sulla per quanto concerne il fenomeno del foaming che quello del fouling.

6.4 Tipologie di membrane

Le tipologie di membrane vengono generalmente raggruppate in tre gruppi (Figura 6.5):

- a) piane (FS)
- b) a fibre cave (HF)
- c) tubolari o multicanale (MT/MC)

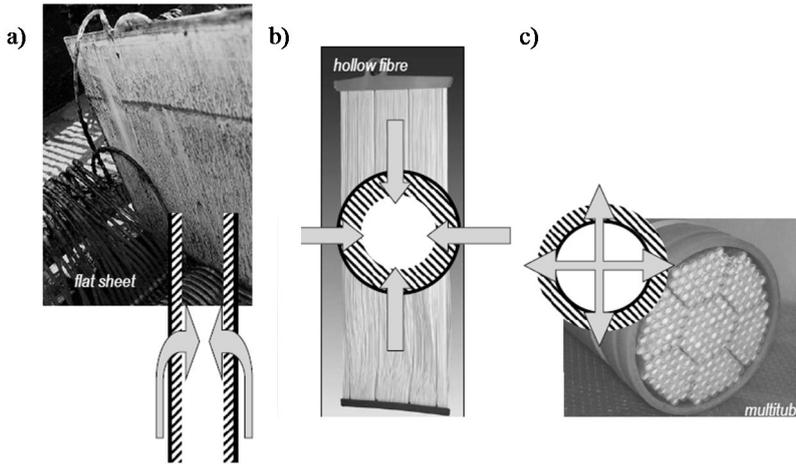


Figura 6.5. Esempi di membrane tubolari (a), a fibre cave (b) e piane (c).

Ciascuna di queste tipologie tende ad essere più adatta per specifiche applicazioni, per cui la scelta del tipo di membrana dipende dal particolare uso.

In generale, risulta che le membrane piane (Figura 6.6) siano utilizzate quasi esclusivamente in impianti a configurazione sommersa, sia nell'ambito dei trattamenti di reflui industriali che civili, e in ogni caso per comunità medio-piccole, dove si ritiene che il loro utilizzo sia maggiormente appropriato sulla base della loro semplicità operativa.



Figura 6.6. Esempio di modulo di membrane piane.

Le membrane piane hanno una forma rettangolare, anche se esistono altre geometrie (moduli a spirale avvolta). L'elemento

filtrante viene comunemente definito “pannello”, la maggiorparte dei quali sono rigidi o semi-rigidi, anche se alcuni elementi, specie quelli più sottili, sono flessibili e vengono montati su un supporto rigido. I pannelli rigidi sono dotati di una piastra di supporto in plastica, al quale la membrana viene saldata da entrambe le estremità. L'acqua fluisce dall'esterno all'interno dei pannelli e il permeato viene collettato o attraverso un collettore che solitamente si trova nella parte sommitale del modulo. Il fango viene pompato attraverso i pannelli mediante un sistema di aerazione a bolle grosse poste al di sotto del modulo di membrane per ridurre il deposito sulle superfici delle membrane stesse.

Le membrane a fibre cave (Figura 6.7) vengono anch'esse utilizzate quasi esclusivamente in impianti a configurazione sommersa, anche in questo caso sia per applicazioni industriali che civili, ma a differenza del precedente caso, vengono maggiormente utilizzate per installazioni di grandi dimensioni, sulla base della loro minore domanda di energia per l'aerazione (*scouring*). Le membrane a fibre cave sono normalmente orientate verticalmente e sono dotate di un sistema di aerazione integrato alla base del modulo stesso. Le fibre sono solitamente non tese e pertanto libere di muoversi lateralmente grazie anche al flusso d'aria che viene immesso inferiormente.



Figura 6.7. Esempio di modulo di membrane cave.

La movimentazione delle fibre limita così il deposito del fouling sulle stesse. Il flusso è dall'esterno verso l'interno della singola fibra e termina verso una o entrambe le estremità del modulo dove si raccoglie all'interno di una camera di raccolta.

Le membrane tubolari (Figura 6.8) sono invece utilizzate per il trattamento di piccoli flussi provenienti prevalentemente da impianti

industriali, dove trovano maggiori applicazioni sia per la loro robustezza che per la loro maggiore flessibilità e controllo operativo.



Figura 6.8. Esempio di modulo di membrane tubolari.

Attualmente, questo tipo di configurazione è l'unico ad essere usato solamente in configurazione side-stream, dato che all'interno del cilindro il flusso è quasi monodimensionale, la membrana tubolare rappresenta la configurazione che meglio realizza un regime di moto cross-flow, garantendo elevata turbolenza sul lato membrana.

Un modulo di membrane comprende un fascio di tubi posti all'interno di un involucro cilindrico (vessel) di dimensioni standard (200 mm di diametro) in acciaio inox o PRFV, e il flusso di permeato avviene dall'interno all'esterno dei tubi.

Per quanto riguarda i materiali costruttivi, si rimanda al paragrafo 1.8, dove si discuterà sulle varie tipologie di materiali disponibili in commercio e sui criteri di scelta delle stesse.

6.5 Criteri di scelta delle apparecchiature di processo

Nei paragrafi successivi sono mostrati e discussi alcuni accorgimenti sia progettuali che gestionali e i criteri di scelta delle principali apparecchiature di processo degli MBR.

6.5.1 Pretrattamenti

L'importanza di un efficiente sistema di pretrattamenti a monte di un bioreattore a membrana è stato ampiamente riconosciuto (van der Roest et al., 2002) e rimane una delle principali preoccupazioni per gli addetti che operano nella gestione degli MBR. La quantità di materiale grigliato in un impianto MBR è di gran lunga superiore rispetto a quella prodotta in un sistema convenzionale, e questo aspetto va tenuto in considerazione nella progettazione e nella

gestione di tale unità. Un efficace sistema di grigliatura-stacciatura consente di proteggere la membrana da danni meccanici potenzialmente derivanti da particelle taglienti o abrasive, responsabili del cosiddetto fenomeno del "*debris-fouling*" (Figura 6.9), garantendo in tal modo l'aumento della vita utile della membrana.

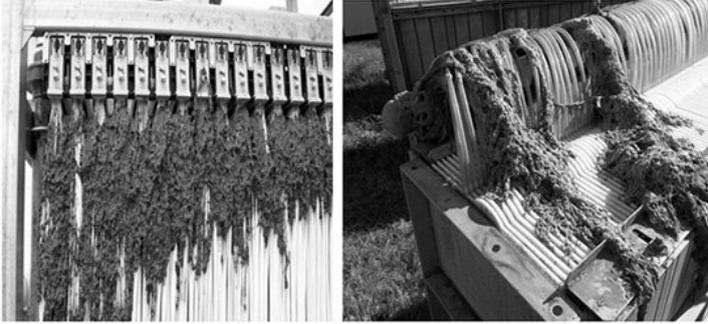


Figura 6.9. Sporco delle membrane dovuto all'accumulo di materiale grossolano.

Le tipologie di griglie vanno scelte in maniera opportuna in funzione della tipologia di membrana installata. In particolare, i costruttori suggeriscono di adottare una grigliatura grossolana a monte di quella fine o dell'unità di stacciatura, al fine di salvaguardarne il funzionamento, e di scegliere l'unità a valle secondo quanto riportato in Tabella 6.1.

Tabella 6.1. Tipologia di pretrattamenti indicati in funzione della tipologia di membrana installata.

Grigliatura fine	2-3 mm	Membrane piane (FS)
Stacciatura	< 1-2 mm	Membrane a fibre cave (HF)

Le prestazioni offerte dalle diverse tipologie di installazioni dipendono dal tipo di griglia, ossia griglie a barre, a piastra forata, o a tamburo con luci circolari (Figura 6.10).

Tra le griglie grossolane quelle maggiormente utilizzate sono quelle a coclea e a gradoni, in quanto consentono una frequente rimozione del materiale grigliato evitando in tal modo il pericolo che ci siano fenomeni di trascinarsi.

Per quanto concerne l'unità di grigliatura fine, le griglie maggiormente utilizzate sono le griglie a tamburo rotante che anche in questo caso consentono una più rapida rimozione dei solidi intercettati.

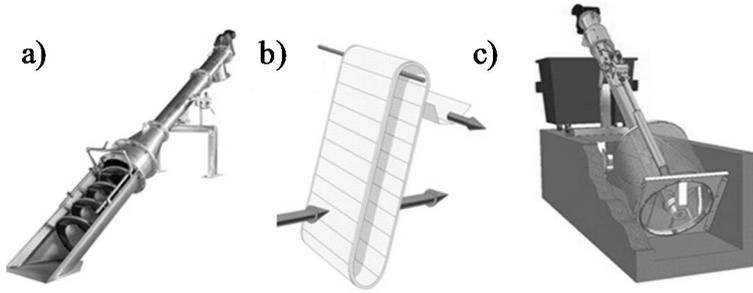


Figura 6.10. Tipologie di griglie utilizzate come pretrattamenti in impianti MBR: griglie a coclea (a), griglie a gradoni (b), griglie a tamburo rotante (c).

Relativamente a queste ultime, i costruttori suggeriscono l'utilizzo di luci di passaggio di tipo circolare, in ciò garantisce una maggiore efficacia di trattenimento dei corpi solidi, indipendentemente dall'orientamento che il materiale intercettato può assumere in corrispondenza della griglia, e perché sono più efficaci nei confronti di materiali fibrosi.

Il parametro di dimensionamento che viene adottato per le griglie, oltre al diametro delle luci, è la velocità di rotazione della superficie filtrante o della coclea, che determina il tasso di rimozione dei solidi, espresso come il rapporto tra la quantità di solidi intercettati e quelli totali nell'influente. L'aumento della velocità di rotazione e di quella della corrente attraverso le luci, determinano la riduzione dell'efficienza di rimozione dei solidi, sostanzialmente perché diminuisce il tempo di permanenza dei solidi sull'elemento filtrante. Dall'altra parte, una velocità di rotazione troppo bassa causa la cattura quasi istantanea di una eccessiva quantità di solidi sul tamburo che non vengono efficacemente rimossi dal sistema di pulizia automatica. Ciò causa anche in questo caso, un aumento degli sforzi di trascinarsi e la riduzione dell'efficienza di rimozione dei solidi grossolani. Le griglie che sono maggiormente suscettibili a tale fenomeno sono le griglie a gradoni che, pertanto, non si prestano bene ad essere implementate come unità di pretrattamento a monte degli impianti MBR. Per quanto concerne la scelta dei materiali costruttivi, è preferibile utilizzare apparecchiature interamente realizzate in acciaio inossidabile.

Infine, è utile a monte del reattore MBR prevedere l'installazione di un'unità per la rimozione degli oli e dei grassi che possono causare ed aggravare l'insorgenza dei fenomeni del fouling e del foaming. Tale unità dovrà garantire delle elevate rese di rimozione sia dei materiali inerti i quali, oltre a poter danneggiare le apparecchiature elettromeccaniche poste a valle, possono causare fenomeni di abrasione delle membrane, che dei grassi, i quali possono incidere in maniera significativa sul fouling della membrana. Le unità

convenzionalmente adottate sono i dissabbiatori centrifughi e quelli a aerati. I primi, a fronte di una maggiore compattezza e di costi di investimento ridotti, hanno una ridotta flessibilità per quanto riguarda i range di portate e una minore efficienza di rimozione degli oli e grassi. I secondi invece, seppure hanno ingombri e costi di realizzazione maggiori, offrono una elevata flessibilità operativa e una più efficace azione di rimozione degli oli e dei grassi.

6.5.2 Equalizzazione

Le unità di equalizzazione vengono quasi sempre previste nella progettazione di un impianto MBR. Infatti, per garantire un'elevata efficienza del sistema è necessario fornire un alimento che abbia caratteristiche, qualitative e quantitative, che siano il più costante possibile nel tempo. Questa condizione serve ad evitare innanzitutto sensibili variazioni del carico organico che può avere effetti sul processo biologico, e inoltre, con riferimento al funzionamento delle membrane, a ridurre le variazioni di pressione innescate dalle pompe di aspirazione, che se in aumento, comporterebbero una maggiore velocità di sporcamiento delle membrane, con conseguente intasamento e quindi la necessità di ricorrere con maggiore frequenza al lavaggio dei moduli.

Esistono due possibili tipi di configurazione (Figura 6.11):

- equalizzazione in linea;
- equalizzazione fuori linea.

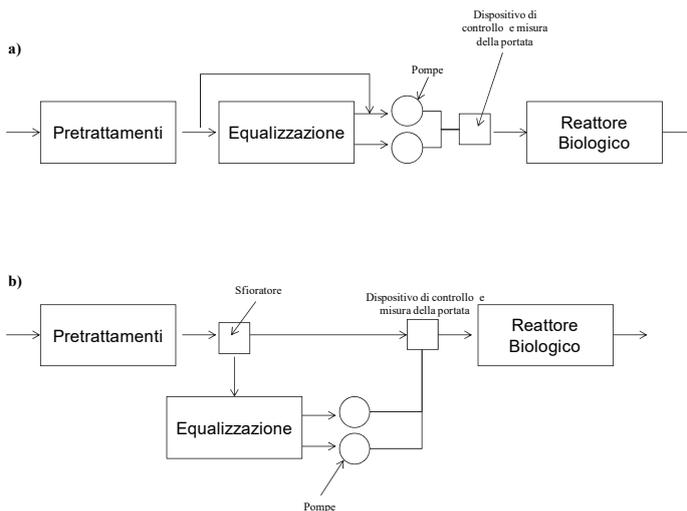


Figura 6.11. Sistema di equalizzazione in linea (a) e fuori linea (b).

Il primo schema (Figura 6.11a) prevede il posizionamento dell'unità di equalizzazione subito a valle dei pre-trattamenti. Con tale schema è possibile ottenere una consistente regolazione delle portate e dei carichi che alimentano le unità a valle, e di potere agire, attraverso un sistema di controllo automatico, sulle portate influenti. Con il secondo schema (Figura 6.11b) l'unità di equalizzazione è collocata "fuori linea": il controllo della portata in questo caso è affidato ad uno sfioratore che permette, in caso di portate eccedenti quella media, di derivare l'eccesso verso l'unità di equalizzazione. Questo sistema offre il vantaggio di dover sollevare volumi minori, nel caso in cui le portate in ingresso siano inferiori a quelle medie giornaliere, ma per contro ha uno svantaggio cioè quello di fare arrivare al reattore biologico un carico maggiormente variabile nel tempo.

Nei sistemi MBR è consigliabile adottare lo schema di compensazione in linea perché esso è in grado di garantire un alimento costante ai trattamenti biologici e quindi di ridurre al minimo gli shock di portate con conseguente possibilità di danneggiare le membrane. Lo schema di compensazione fuori linea viene invece generalmente scelto in caso di up-grade di impianti già esistenti.

Per il calcolo del volume, si può fare ricorso al dimensionamento classico per le vasche di compenso. I dati di progetto da utilizzare nel dimensionamento sono la portata influente in tempo di pioggia, pari a un multiplo della portata media nera ($Q_{\max,p}=3 \cdot Q_n$), e la portata in uscita dal sistema ovvero il flusso di permeato. È da tenere presente che il flusso di permeato può essere aumentato in tempo di pioggia fino a un valore prossimo a 35-40 L/(m²·h) nel caso di membrane a fibre cave, mentre a circa 130-150 L/(m²·h) nel caso di membrane piane. Fissato tale valore massimo ($J_{\max,p}$), e fissata la durata massima di suzione al flusso $J_{\max,p}$ (da 8 a 24 ore), dal bilancio dei volumi di liquami grezzi ammessi all'impianto e di quelli di permeato scaricato, si risale al volume di compenso da assegnare al bacino di accumulo. Sulla base di questo criterio, il volume del bacino di equalizzazione, per la funzione di compenso, sarà all'incirca pari al 10% del volume giornaliero in tempo secco.

6.5.3 Sistemi di miscelazione

Nei sistemi MBR la progettazione e la scelta di un opportuno sistema di miscelazione ha un ruolo chiave nella buona riuscita del processo. In generale, poiché la concentrazione di solidi sospesi totali nel reattore è maggiore rispetto a un sistema convenzionale a fanghi attivi (CAS), ciò comporta una minore possibilità di scelta dei mixer. I sistemi di miscelazione maggiormente utilizzati sono i mixer sommersi. Questa tipologia di miscelatori viene installata su un dispositivo guida che permette di poter regolare la distanza del mixer

dal fondo, e allo stesso tempo, di poter estrarre l'apparecchiatura in maniera agevole in caso di guasti o manutenzione. Per il dimensionamento del sistema di miscelazione è necessario calcolare la spinta da fornire al liquido, e la potenza da dissipare al fine di mantenere in agitazione la miscela aerata. La spinta può essere calcolata tramite la seguente relazione:

$$F = K \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot A$$

dove:

- K: fattore di perdita e di forma (funzione del diametro dell'elica e della geometria della vasca);
- A: proiezione dell'area di flusso (funzione del diametro dell'elica);
- ρ : densità del fluido;
- v: velocità di rotazione dell'elica (2-2,7 m/s).

La potenza da dissipare si calcola in funzione del gradiente di velocità, tramite la seguente relazione:

$$P = \mu \cdot G^2 \cdot V$$

dove:

- P: è la potenza dissipata;
- G: è il gradiente medio di velocità
- μ : viscosità del fluido;
- V: volume della vasca

Il gradiente di velocità si sceglie all'interno di un range di valori compresi tra 20-70 s⁻¹. Il mixer va quindi scelto, dai cataloghi commerciali, in funzione di questi due parametri. Si tenga presente che la miscelazione all'interno di una vasca è garantita da un valore della potenza specifica intorno a 10-15 W/m³, con i tradizionali miscelatori meccanici ad asse verticale e girante a pale inclinate o sagomate, mentre utilizzando mixer sommersi ad elevata efficienza, tale valore può essere anche prossimo a 5 W/m³.

Poiché i sistemi MBR sono maggiormente compatti rispetto ai CAS, i minori tempi di ritenzione idraulica fanno aumentare i rischi di cortocircuitazioni idrauliche, per cui il posizionamento dei mixer è molto importante. La scelta consigliabile è quella di utilizzare con mixer compatti dotati di anello convogliatore orientati in modo da evitare la formazione di zone morte e di innescare dei moti rotatori che consentono di ottenere un'adeguata miscelazione, contenendo al

contempo i costi energetici. In Figura 6.12 vengono riportati, a titolo di esempio, due possibili soluzioni riguardo il posizionamento di mixer sommersi in bacini a pianta rettangolare e circolare.

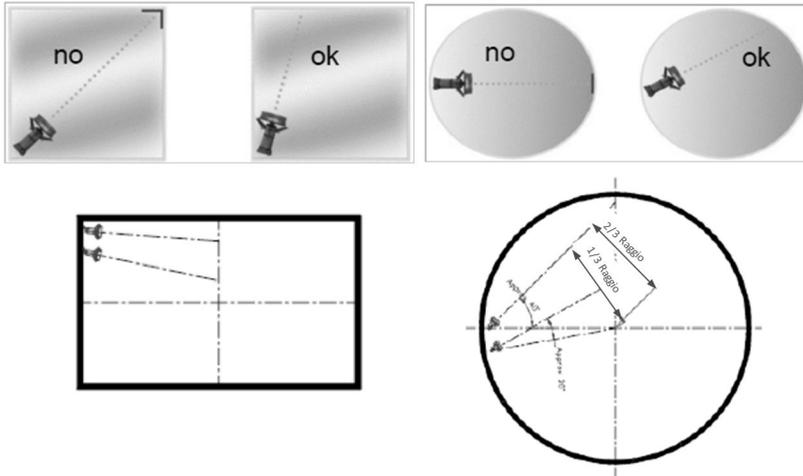


Figura 6.12. Orientamento dei mixer sommersi in bacini a pianta rettangolare e circolare (Doc. Xylem).

6.5.4 Sistemi di aerazione

Nei sistemi MBR la fornitura di aria ha una duplice funzione: la prima è quella di fornire l'ossigeno necessario alla biomassa per ossidare la sostanza organica e l'azoto ammoniacale, e l'altra è quella di garantire una sufficiente turbolenza in corrispondenza delle fibre della membrana (scouring) per attenuare il fenomeno del fouling. L'aerazione nei sistemi MBR è la voce di costo che ha un peso maggiore nei costi di esercizio, ed incide fino anche al 50-70% degli interi consumi di energia elettrica. In particolare, mediamente circa il 20-30% dei consumi elettrici è associato alla fornitura di aria di processo, mentre ben il 30-40% per lo scouring delle membrane. Si stima che, nel caso di membrane a fibre cave, la richiesta specifica di aria per lo scouring delle fibre, relativo all'unità di superficie della membrana, sia compreso tra $0,18-0,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, che equivalgono a circa $25-30 \text{ m}^3$ di aria per m^3 di permeato. Per quanto concerne la fornitura d'aria per il mantenimento delle condizioni aerobiche, non vengono forniti valori generalizzabili, in quanto questi dipendono dalle condizioni operative, quali la concentrazione di solidi nel reattore, il tempo di residenza cellulare, il carico organico, ecc, e dallo schema di processo a seconda se l'impianto è finalizzato alla rimozione del solo carbonio o anche dell'azoto. Nel dimensionamento occorre tenere conto della maggiore concentrazione di solidi sospesi totali

che determinano un minore fattore di trasferimento dell'ossigeno rispetto ai sistemi a fanghi attivi convenzionali. Inoltre, è da tenere in considerazione il contributo all'ossigenazione fornito dal sistema a bolle grosse utilizzato per lo scouring delle membrane.

Sebbene i produttori di membrane stiano cercando di sviluppare delle soluzioni atte a mitigare il fenomeno dello sporcamento, la riduzione dei costi gestionali legati all'aerazione risulta essere un passaggio chiave per una maggiore diffusione della tecnologia MBR. Negli anni, i costi legati allo scouring delle membrane si sono gradualmente ridotti, grazie all'introduzione di sistemi di aerazione ad intermittenza. Il mixed liquor, viene richiamato nella parte inferiore dei moduli dall'effetto air-lift che si genera in seguito all'impulso d'aria, e si mescola alle bolle d'aria creando una miscela che consente un'efficace rimozione del fouling superficiale.

L'ottimizzazione dei costi di aerazione tuttavia, passa necessariamente anche attraverso la scelta di macchine elettriche altamente efficienti, che tuttavia devono essere tali che il punto di lavoro ottimale sia sufficientemente prossimo a quanto richiesto dalla tipologia di membrana. In particolare alcuni costruttori di membrane suggeriscono l'utilizzo di compressori centrifughi che consentono un maggiore controllo delle portate erogate anche al variare della viscosità della miscela aerata.

6.5.5 Sollevamento, suzione e controlavaggio

Oltre ai costi legati all'aerazione, una delle voci di costo che maggiormente incide negli impianti MBR, è quella legata al pompaggio della miscela aerata all'unità di filtrazione. La portata che alimenta il comparto membrane, sia che le membrane siano in configurazione side-stream, che sommerse ma in un comparto separato, è in generale pari a circa 4-6 volte la portata influente. Nel primo caso, il flusso elevato è necessario a garantire una sufficiente turbolenza per limitare la formazione del fouling, mentre nel secondo per limitare l'accumulo di solidi nel comparto della membrana, anche in questo caso limitare l'insorgenza del fouling. Ciò chiaramente incide in maniera determinante sui consumi energetici. Si stima infatti, che la voce di costo "movimentazione dei fanghi", negli impianti MBR sia circa pari a 0,2 kWh/m³ di permeato, e che questo incida per circa il 15-20% dei costi energetici complessivi. Uno degli aspetti su cui riporre maggiore attenzione, oltre a quello connesso ai consumi energetici, riguarda gli effetti della pompa sulla struttura dei fiocchi di fango. La destrutturazione del fiocco infatti, oltre a causare la riduzione dell'attività metabolica della biomassa aumenta l'insorgenza del fenomeno del fouling. Infatti è stato dimostrato che il deterioramento dei fiocchi è responsabile dell'aumento di

concentrazione di EPS non legate (SMP) e di conseguenza della riduzione della filtrabilità (LeClech et al., 2006). Di conseguenza è opportuno ricorrere all'uso di pompe ad elica a bassa prevalenza in grado di generare elevate portate.

L'altro impiego delle pompe è quello legato all'estrazione del permeato e al controlavaggio dei moduli di membrane. Il sistema di pompaggio deve soddisfare alcuni requisiti imprescindibili, tra i quali quello di essere sufficientemente delicato per evitare la rottura delle membrane, e in secondo luogo deve avere l'opportunità di invertire il flusso, per effettuare il controlavaggio delle membrane, operazione che avviene periodicamente per rimuovere parte dei depositi superficiali che si accumulano sulla membrana stessa. Durante questa fase, inoltre, il pompaggio deve essere eseguito con una portata, quindi, molto più alta rispetto al normale, ed è importante che la pompa abbia sia la possibilità di variare la portata sia quella di mantenere un rendimento elevato a portate diverse, affinché il controlavaggio non si tramuti in un incremento dei costi di esercizio. Altre caratteristiche che deve avere il sistema di pompaggio sono una buona capacità di adescamento e la possibilità di funzionare anche in presenza di aria, situazione non abituale ma comunque possibile durante l'attività.

Le pompe maggiormente utilizzate negli impianti di depurazione sono quelle di tipo volumetrico e centrifugo. Nei sistemi volumetrici, attraverso una semplice logica di funzionamento è possibile cambiare la direzione del flusso e passare dalla suzione al controlavaggio. Utilizzando le pompe centrifughe invece sono necessari due dispositivi indipendenti, uno per la suzione e l'altro per il controlavaggio. Ciò naturalmente comporta un maggiore costo di investimento legato sia alla presenza di due pompe con tutto il relativo corredo di apparecchiature idrauliche di servizio. Le pompe volumetriche invece, avendo una maggiore forza di aspirazione riescono a lavorare meglio anche quando le membrane sono parzialmente intasate. Ciò significa che i cicli di suzione possono essere più lunghi, e chiaramente ciò si traduce in un risparmio dei tempi e dei consumi elettrici specifici. Le loro capacità autoadescanti consentono inoltre una notevole flessibilità di installazione, infatti queste possono essere collocate in posizione più elevata rispetto alla vasca, e inoltre riescono a funzionare anche in presenza di aria senza cavitazioni.

Inoltre le pompe volumetriche rispetto a quelle centrifughe sono in grado di assicurare una perfetta regolazione della portata un maggiore intervallo di rendimento massimo che consente un notevole margine nella scelta della portata di esercizio e di controlavaggio, nonché tempi di controlavaggio ridotti grazie al rapido raggiungimento della portata richiesta.

Tra le pompe volumetriche, una tipologia molto utilizzata è quella a lobi rotativi. Tale tipologia di pompa è reversibile, e quindi consente l'inversione del flusso. Inoltre, rispetto sia alle altre pompe volumetriche, che alle pompe centrifughe, quelle a lobi hanno dimensioni più contenute, tali da permetterne la collocazione in spazi angusti, e ciò comporta minori perdite di energie per attrito e maggiore resistenza agli stress meccanici.

La scelta delle apparecchiature, da adottare caso per caso, va effettuata considerando le dimensioni dell'impianto, gli aspetti funzionali e gli schemi realizzati.

6.5.6 Sistemi di estrazione delle schiume

Una delle disfunzioni maggiormente ricorrenti negli impianti MBR è l'accumulo di schiume di natura biologica sulla superficie dei reattori aerobici. Tale fenomeno, noto come fenomeno del foaming, è spesso associato alla presenza di batteri filamentosi idrofobici (*Nocardioformi*, *Microthrix parvicella*). Anche se negli impianti MBR è stato osservato che tale fenomeno si riscontra anche in assenza di batteri foam-foaming (Di Bella e Torregrossa, 2016). In particolare, la causa del foaming in questo caso è da attribuire alle elevate concentrazioni di EPS che si hanno negli impianti a membrana. Il foaming, oltre che possibile causa di tracimazione delle schiume dal reattore biologico e/o dal comparto membrane, può avere conseguenze anche sull'aumento del fouling della membrana, stante che entrambi i fenomeni sono fortemente influenzati dalle EPS. Se da un lato i metodi specifici che agiscono sull'origine del problema richiedono lunghi tempi di applicazione, dall'altra, alcuni accorgimenti impiantistici pratici possono contrastare efficacemente, seppur in maniera temporanea e non definitiva, il problema. In generale, si consiglia sempre di prevedere dispositivi di evacuazione superficiale della schiuma, utilizzando stramazzi laterali a livello di sfioro regolabile o mediante inghiottitoi dotati di galleggiante. Esistono in commercio dei dispositivi realizzati ad hoc per i sistemi MBR che consentono l'estrazione in continuo delle schiume, come quello riportato nella Figura 6.13.

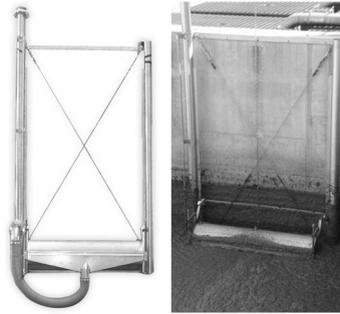


Figura 6.13. Sistema per la rimozione delle schiume (doc. Topino s.n.c.).

Tale dispositivo è formato da una parte ad immersione costituita da un telaio guida fisso, ancorato alla parete della vasca, nel quale scorre un galleggiante, a cui è connessa una canaletta di raccolta schiume regolabile, in grado di seguire il variare del livello del liquame, rimanendo sul pelo dell'acqua. Una seconda parte costituita da una pompa a membrana atta all'aspirazione delle schiume ed alla loro degasatura. La pompa non è vincolata al telaio e può essere posizionata diversamente a seconda del tipo di impianto.

6.6 Accorgimenti strutturali per la riduzione del fouling

Un accorgimento strutturale che è stato proposto da alcuni ricercatori (Shim et al., 2002) prevede l'inserimento di un elemento interno al reattore, avente la stessa geometria della vasca, ma di dimensioni minori, posto in maniera coassiale alla membrana e al sistema di aerazione ad essa dedicato. Tale configurazione viene chiamata "air-lift" (Figura 6.14).

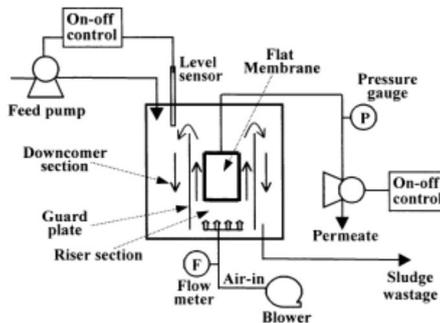


Figura 6.14. Sistema della configurazione sommersa con air-lift.

Dal punto di vista idrodinamico la presenza del sistema di aerazione al di sotto di questo elemento, genera un flusso ascendente al suo interno (riser), mentre il flusso si inverte al suo esterno (downcomer). Il flusso ascendente all'interno del riser limita il deposito del fango sulla superficie della membrana, riducendone il fouling e la frequenza dei lavaggi. Dal punto di vista geometrico è stato dimostrato che al diminuire delle dimensioni del riser, il fouling si riduce in maniera sensibile. Il criterio di dimensionamento di tali reattori prevede la scelta ottimale della sezione del riser e del downcomer. In particolare, è stato dimostrato che valori del rapporto tra l'area del downcomer e del riser compresi tra 3.6 e 4.5 sembrano essere quelli maggiormente appropriati per la riduzione del fouling (Shim et al., 2002).

6.7 Soluzioni tecnologiche innovative per la riduzione del fouling

6.7.1 Membrane con flusso elicoidale

Una soluzione molto innovativa nel campo delle membrane di ultima generazione è quella costituita dalla membrana *Helix* (Figura 6.15a), che consiste in una membrana tubolare di ultrafiltrazione all'interno della quale il moto della corrente è di tipo elicoidale (Figura 6.15b).

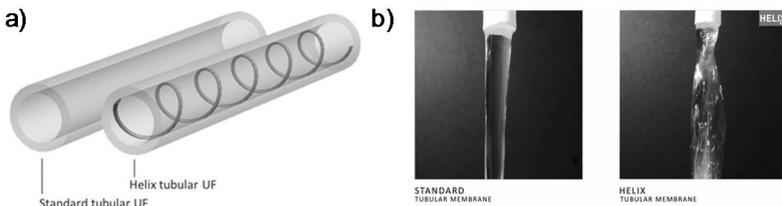


Figura 6.15. Membrana a flusso elicoidale (*Helix*) (a), e confronto tra il flusso in una membrana tubolare convenzionale e la *Helix*. (Doc. Pentair).

Tale tipologia di membrana è stata testata con successo sia su reflui industriali che municipali, sia in impianti su scala pilota che in piena scala. Ad oggi ci alcune installazioni di questa particolare tipologia di membrana, in un impianto anaerobico a servizio di un birrifico, e in un impianto side-stream per il trattamento del percolato di discarica.

I risultati ottenuti in tali installazioni hanno permesso di osservare che la membrana *Helix* ha determinato un significativo del flusso di permeato (fino al 100%), migliorando sia la produttività dell'installazione in termini di prestazioni di filtrazione, e riducendo al contempo il consumo specifico di energia.

La tecnologia che sta alla base della membrana *Helix* è stata sviluppata per sfruttare l'energia contenuta nel flusso tangenziale allo scopo di massimizzare le sollecitazioni di taglio per aumentare il flusso di permeato. Le membrane *Helix* (Figura 6.16a) sono caratterizzate da una cresta elicoidale che si sviluppa longitudinalmente all'interno della membrana. La cresta è realizzata dello stesso materiale della membrana circostante, e quindi partecipa alla sia filtrazione che al controlavaggio. All'interno della membrana, la presenza di tale cresta, non crea la presenza di sono spigoli vivi o comunque di punti in cui il materiale particellare può accumularsi e causare occlusioni. I meccanismi che stanno alla base del principio di funzionamento delle membrane *Helix* sono due:

- 1) l'induzione di flussi secondari, che determinano la formazione di vortici di Dean in corrispondenza della struttura ad elica;
- 2) il flusso elicoidale della corrente di alimentazione lungo le pareti della membrana che comporta l'aumento della velocità della corrente in corrispondenza della parete della membrana (Figura 6.16b).

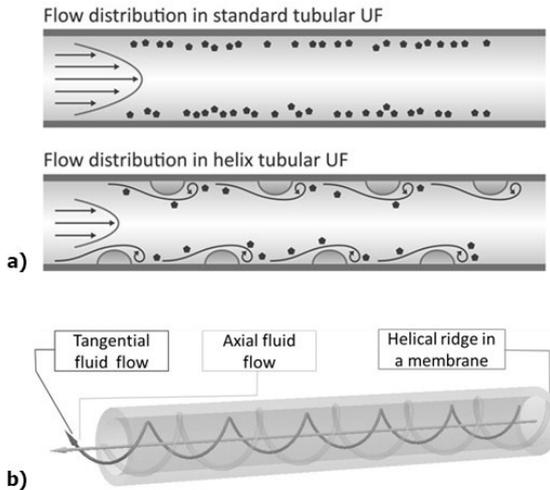


Figura 6.16. Distribuzione del flussioni una membrana tubolare standard e in una Helix (a) e moto del flusso all'interno della membrana Helix (b) (doc. Pentair).

6.7.2 Filtrazione con airlift

Il concetto di filtrazione con airlift è stato progettato al fine di ridurre al minimo il consumo di energia in applicazioni su larga scala. Il concetto che sta alla base di questa soluzione prevede l'immissione

di un flusso di gas all'interno delle membrane, che combinato al flusso tangenziale del liquido, crea un flusso multifase. Il tipo di bolla che viene a crearsi all'interno della membrana dipende dalla quantità di aria immessa e determina le differenti situazioni idrodinamiche mostrate in figura. Quando l'aerazione è insufficiente, le bolle che si formano sono troppo piccole (Figura 6.17a) e non producono l'effetto desiderato, mentre quando viene alimentata una quantità d'aria eccessiva si viene a creare una situazione come quella riportata in Figura 6.17c. Invece, quando il flusso d'aria è corretto (Figura 6.17b), la bolla risale attraverso la membrana, e la turbolenza che viene a crearsi interrompe la formazione del *cake* e di conseguenza consente un significativo aumento del flusso di permeato.



Figura 6.17. Confronto tra gli effetti di diversi flussi d'aria sulla distribuzione delle bolle all'interno della membrana (doc. Pentair).

L'aumento del flusso di permeato per unità di superficie è un parametro di grande importanza poiché, a parità di portata da trattare, la superficie della membrana da installare si riduce in maniera significativa. Analogamente, impianti già esistenti possono funzionare con una maggiore capacità.

6.7.3 I sistemi "pulsanti"

I sistemi cosiddetti "pulsanti" sono dei sistemi molto innovativi applicati ai moduli di membrane, caratterizzati da un basso consumo energetico, e che inoltre richiedono un ridotto ingombro e riducono i costi operativi nel lungo periodo. Il principio di funzionamento di tali sistemi si basa sull'immissione di bolle d'aria di grosse dimensioni a intermittenza attraverso il fascio di fibre, le quali creano un'efficiente azione di pulizia delle fibre, con conseguente riduzione del fabbisogno di aria (fino al 40%) ed energia rispetto ai metodi tradizionali per lo scouring. Il miglioramento che si può ottenere non è solo la riduzione dei costi energetici associati all'aerazione, ma anche la migliore circolazione del mixed liquor all'interno del modulo che

massimizza i flussi di permeato. L'accoppiamento tra l'aumento dei flussi di permeato ottenibili, insieme all'aumento della densità di impacchettamento del modulo, fa sì che l'ingombro complessivo del sistema si riduca di circa il 25% rispetto ad un sistema equivalente. A titolo di esempio si ricordano i sistemi "Pulsion MBR", brevettato dall'azienda Koch Membrane Systems, il sistema "LEAPmbr" della GEwater, e il sistema "MemPulse" della MEMCOR (Figura 6.18).

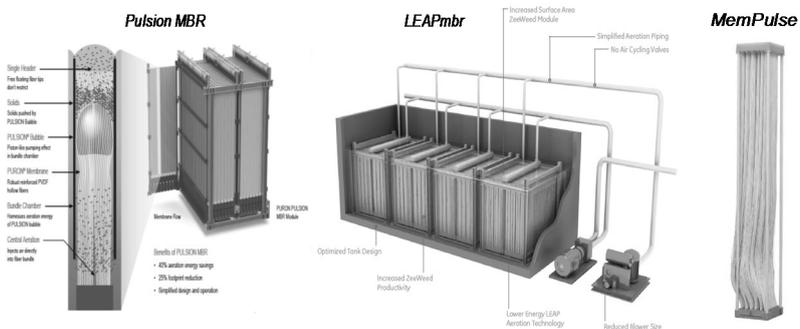


Figura 6.18. Principio di funzionamento del sistema "Pulsion", "LEAPmbr" e "MemPulse" (doc. Koch, GEwater, MEMCOR).

6.7.4 Le membrane rotative

Come si è detto uno dei metodi per attenuare il fenomeno del fouling della membrana è quello di creare degli sforzi tangenziali sulla superficie della membrana stessa che limiti il deposito del cake. Tali sforzi sono convenzionalmente ottenuti mediante insufflazione di bolle grosse alla base dei moduli di membrana, ovvero mediante il pompaggio della miscela aerata in prossimità delle fibre. Tuttavia queste non sono le uniche soluzioni per la creazione di sforzi di taglio. In commercio esistono infatti alcune membrane costituite da elementi filtranti a disco. Queste membrane sono disposte verticalmente l'una sull'altra e ruotano in maniera solidale ad un albero con asse ortogonale al piano della membrana, con una velocità di 1-2 rpm (Figura 6.19).

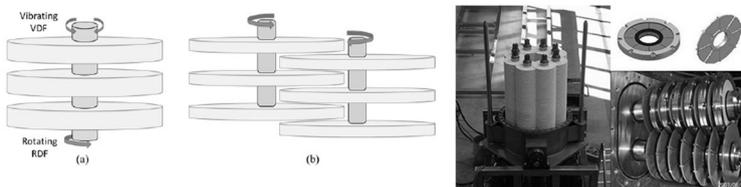


Figura 6.19. Membrane rotative (Zsirai et al., 2016).

Tali elementi, che costituiscono i moduli, possono essere individuali ovvero messi in serie, e in questo caso i singoli dischi si intersecano come mostrato in figura. I moduli con elementi singoli possono vibrare e ciò limita il deposito del cake sulla superficie delle membrane, mentre nell'altra configurazione, è l'attrito generato dalla compenetrazione degli elementi filtranti che ruotano a ridurre la formazione del cake.

6.8 Scelta dei materiali

I materiali più impiegati nella costruzione delle membrane di ultrafiltrazione (UF) sono il CA (acetato di cellulosa), il PVDF (polivinildenfluoruro), il PAN (poliacrilonitrile), il PES (polieteresulfone) e quelli ceramici. Dopo il 2005 sono state sviluppate membrane in PES e PVDF modificati allo scopo di aumentare l'idrofilicità del materiale destinato al contatto con l'acqua da filtrare. I materiali polimerici hanno un'elevata resistenza chimica e fisica, e sono idrofobici. Le membrane idrofobiche sono più inclini al fouling di quelle idrofile poiché la maggior parte delle interazioni tra membrana e foulants è di natura idrofobica (Chang e Lee, 1998; Choi et al., 2002). Le membrane disponibili in commercio sono pertanto modificate superficialmente in modo da risultare maggiormente idrofile mediante ossidazione chimica o trattamento al plasma. Dal punto di vista dei materiali la scelta è quindi tra membrane di tipo ceramico e polimerico. Mentre le membrane ceramiche sono più robuste in termini di resistenza alle incrostazioni e all'attacco chimico, il loro uso è limitato ad applicazioni di nicchia principalmente a causa del loro costo relativamente alto. Le membrane tubolari ceramiche hanno trovato impiego in alcune applicazioni prevalentemente in ambito industriale, e di recente sono state introdotte nuove membrane in ceramica del tipo piane. Tuttavia, la maggiorparte di membrane in commercio sono quasi tutti polimeriche. Infatti, più della metà dei prodotti dei moduli a membrana sono in polivinildenfluoruro (PVDF), ovvero in polietersulfone (PES). La combinazione tra la buona resistenza strutturale e chimica fa sì che questa tipologia di membrane sono quelle più utilizzate. In commercio esistono anche membrane costituite da altri materiali come il poliacrilonitrile (PAN), il polisulfone, l'alcool polivinilico (PVA) e polytetrafluorethane (PTFE) che, tuttavia, sono molto meno comuni.

Nell'ambito del trattamento dei reflui industriali, la composizione chimica della membrana assume un ruolo molto importante, e le i criteri di scelta del tipo di membrane prevedono un'accurata scelta del tipo di materiale in funzione della qualità e delle caratteristiche chimiche del refluo da trattare. In tal senso, i produttori si stanno

impegnando nello sviluppo di membrane altamente performanti in grado di essere compatibili con una grande varietà di reflui industriali. Di recente infatti, sono state testate con successo delle membrane ceramiche in carburo di silicio (SiC) (Figura 6.20). Si tratta di unità di filtrazione studiate appositamente per utilizzare al meglio le nuove membrane offrendo prestazioni elevate a costi contenuti. Grazie alla natura idrofila ed alla elevata versatilità del SiC, questa nuova tecnologia è in grado di assicurare elevati flussi di permeato combinato con una resistenza chimica e termica superiore alle normali membrane.

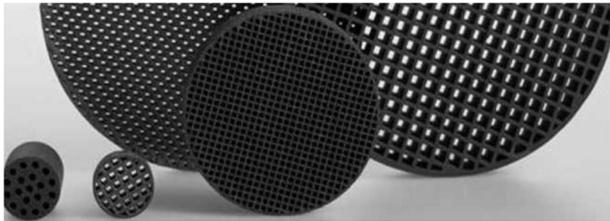


Figura 6.20. Membrana in carburo di silicio (SiC).

Il SiC permette di lavorare, quindi, con liquidi a pH estremi (0-14) e ad alta temperatura senza venir attaccato da alcun agente chimico tanto da consentire l'utilizzo di procedure di lavaggio delle membrane stesse a condizioni estreme sia in termini di chemicals utilizzati (acidi forti, agenti ossidanti quali acqua ossigenata o ipoclorito, solventi, etc.) che di temperatura, consentendo, in qualsiasi condizione, il ripristino dei cicli di lavoro. Le membrane in SiC sono utilizzate con successo in alcuni processi dove l'estrema idrofilicità del SiC impedisce all'olio di filmare le membrane consentendo elevatissimi flussi di permeato con cicli di esercizio lunghi. Per tali caratteristiche, esse si prestano bene al trattamento di acque derivanti dall'industria siderurgia e da impianti di stoccaggio di idrocarburi.

6.9 Strumentazione e controllo del processo

Il controllo del processo è divenuta negli anni una pratica fondamentale per la buona e corretta gestione degli impianti di depurazione al fine di ottimizzarne le performance e ridurre i costi di esercizio. Uno degli aspetti da tenere in maggiore considerazione nei sistemi MBR, oltre alla riduzione dei costi di esercizio, è la salvaguardia dell'integrità della membrana. Per questo motivo, i produttori delle membrane suggeriscono dei valori indicativi per alcuni dei parametri chiave del processo, quali la TMP, il flusso di permeato e i protocolli per il lavaggio delle membrane.

Le strategie utilizzate dai gestori per la riduzione del fouling sono generalmente due: il rilassamento delle membrane, attraverso l'interruzione della pressione transmembrana e la contemporanea insufflazione di bolle grosse che rimuovono parzialmente i depositi superficiali, e il controlavaggio, ovvero l'immissione di permeato in controcorrente. Altre operazioni, meno routinarie come i lavaggi chimici, vengono effettuate periodicamente, e molto spesso con cadenza programmata. Di conseguenza la maggiorparte dei reattori MBR vengono gestiti programmando la frequenza dei lavaggi fisici o chimici, o con tempi di suzione e controlavaggio prestabiliti, ovvero ancora con flussi d'aria per lo scouring delle fibre costanti, senza operare pertanto un controllo in tempo reale del processo che tenga conto delle effettive performance di filtrazione. Esistono dei sistemi di controllo in tempo reale che determinano la perdita di permeabilità della membrana in tempo reale e che vengono utilizzati per ottimizzare simultaneamente sia il processo biologico che quello di filtrazione (Fatone et al., 2008). La tendenza ad oggi sui metodi utilizzati per la riduzione del fouling è quella di utilizzare un'aerazione intermittente al fine di ottimizzare la filtrazione e di ridurre al contempo i consumi energetici. Nella letteratura scientifica (Comas et al., 2010) viene proposto un sistema intelligente di supporto alle decisioni basato sia su conoscenze teoriche ed empiriche sul fenomeno del fouling (knowledge based decision support system, KB-DSS), per il controllo automatico dei sistemi MBR. Questo sistema contiene una serie di informazioni di base ricavate sia da esperienze empiriche che teoriche, che, sulla base del confronto tra la permeabilità della membrana, valutata in tempo reale, con dei trend di riferimento, consentono di ridurre il tasso di sporcamento e di ottimizzare i costi gestionali legati all'aerazione. In pratica, il sistema regola un certo numero di parametri chiave (flusso di permeato, tempi di controlavaggio e rilassamento delle fibre, portata di controlavaggio, tasso di aerazione, frequenza dei lavaggi fisici e chimici, tasso di ricircolo dei fanghi) e ne identifica i valori ottimali in funzione delle caratteristiche del refluo influente (portata, presenza di sostanze particolate e di composti ad elevato peso molecolare), e delle caratteristiche della miscela aerata e delle condizioni operative (concentrazione di biomassa, temperatura, SRT, ecc.). Il sistema di controllo consiste in una serie di sensori per il monitoraggio del pH, OPR, ossigeno disciolto, concentrazione di solidi sospesi, temperatura, tutti connessi ad un PLC che acquisisce i dati in continuo. Il sistema KB-DSS successivamente va a processare questi dati e regola in maniera automatica il tasso di aerazione dei moduli di membrane, la portata di permeato da estrarre, il tempo e la portata di controlavaggio, ecc.

Altro aspetti da tenere in considerazione nella gestione del processo di filtrazione è la variazione di pressione che si ha nel passaggio dalla

suzione al controlavaggio ($\Delta P = 70-140$ mbar). Le membrane col tempo diventano suscettibili a queste variazioni di pressione che, a seconda del grado di sporcamento della membrana, potrebbero essere anche brusche. Un utile accorgimento potrebbe essere quello di utilizzare degli attuatori che regolino gradualmente la pressione, ovvero di ridurre gradualmente il flusso di permeato nella fase finale del periodo di suzione, e di aumentarlo gradualmente nel periodo successivo di controlavaggio.

6.10 Conclusioni

La tecnologia MBR consente di ottenere notevoli vantaggi in termini di qualità dell'effluente rispetto ai sistemi convenzionali. Se da il dimensionamento dei reattori è condotto con criteri simili a quelli utilizzati nella progettazione dei sistemi convenzionali, la progettazione degli impianti MBR deve essere effettuata attuando delle soluzioni volte alla minimizzazione dei costi, sia di investimento che operativi, attraverso scelte progettuali oculate, che vanno dalla scelta della configurazione dei reattori all'impiantistica di processo.

Bibliografia

Brockmann, M., Seyfried, C.F., 1996. Sludge activity and cross-flow microfiltration - A non-beneficial relationship. *Water Science and Technology*, 34 (9), 205-213.

Chang I.S., Lee C.H. (1998). Membrane filtration characteristics in membrane coupled activated sludge system - the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling. *Desalination*. 120, 221-233.

Choi J.G., Bae T.H., Kim J.H., Tak T.M., Randall A.A. (2002). The Behavior of Membrane Fouling Initiation on the Crossflow Membrane Bioreactor System, *J. Membr. Sci.* 203, 103.

Comas, J., Sancho, L., Monclus, H., Rodriguez-Roda, I. 2010. Knowledge-based system for automatic MBR control. *Water Science & Technology*, 62 (12), 2829-2836.

Di Bella, G., Torregrossa, M., Viviani, G., 2011. The role of EPS concentration in MBR foaming: analysis of a submerged pilot plant. *Bioresource Technology* 102 (2), 1628–1635.

Di Bella, G., Torregrossa, 2016. Foaming in MBRs: measurement and evaluation. <http://www.thembrsite.com/features/foaming-in-mbrs-measurement-and-evaluation/>

Fatone, F., Battistoni, P., Bolzonella, D., Pavan, P. & Cecchia, F. 2008 Long-term experience with an automatic process control for nitrogen removal in membrane bioreactors. *Desalination* 227(1–3), 72–84.

Judd S.J. (2011) *The MBR Book* (Second edition). Elsevier, Oxford, UK.

Roest, v.d. H., Lawrence, D.P., Bentem, v. A.G.N., 2002. *Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater Treatment*, STOWA Report 2002, ISBN 184339 011 6.

Shim, J.K., Yoo, I.K., Lee, Y.M., 2002. Design and operation considerations for wastewater treatment using a flat submerged membrane bioreactor. *Process Biochemistry* 38, 279-285.

Zsirai, T., Qiblawey, H., Al-Marri, M., and Judd, S.J. (2016). The impact of mechanical shear on membrane flux and energy demand, *J. Membrane Sci.* 516 56–63.

<http://www.thembrsite.com>