

**OSSERVATORIO SUGLI
IMPIANTI DI
DEPURAZIONE MBR**

Rapporto 2016

Publicato da Gruppo di Lavoro “Gestione Impianti di depurazione”
Università degli Studi di Brescia, via branze 43, 25123 Brescia (Italia)
2016
ISBN 978-88-97736-08-0
<http://gdl-gringsan.unibs.it/>

ELENCO DEGLI AUTORI

Carlo Collivignarelli, Andrea Perteghella, Mentore Vaccari - Gruppo di Lavoro “Gestione impianti di depurazione”, Università degli Studi di Brescia

Francesco Pirozzi - Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Gaspare Viviani, Alida Cosenza, Daniele Di Trapani, Giorgio Mannina, Michele Torregrossa - Università degli Studi di Palermo – e Gaetano Di Bella, Riccardo Campo - Università “Kore” di Enna

Vincenzo Belgiorno, Laura Borea, Vincenzo Naddeo - Università degli Studi di Salerno

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le aziende che hanno partecipato attivamente all’attività dell’Osservatorio sugli impianti di depurazione MBR, arricchendo il presente report con la presentazione della loro esperienza tecnica e gestionale: A2A Ciclo Idrico, Ingeco Srl, Setam Srl, Evoqua Water Technologies, GE Power & Water, Waste Italia, Kubota, Koch Membrane System, Caldic Italia.

Si ringraziano inoltre tutte le aziende e gli Enti che hanno partecipato al censimento degli impianti MBR e all’indagine sugli aspetti gestionali.

Infine, per evitare dimenticanze, si ringraziano tutti coloro che, a vario titolo, hanno dato consigli, informazioni e indicazioni utili alla stesura di questo lavoro, rivolgendo un ringraziamento anticipato a chi vorrà segnalarci osservazioni utili per migliorarlo nel futuro.

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. CENSIMENTO DEGLI IMPIANTI DI DEPURAZIONE MBR IN ITALIA	3
1.1 Impostazione dell'indagine	3
1.2 Censimento degli impianti	3
2. RECENTI REALIZZAZIONI E REVAMPING DI IMPIANTI MBR	7
3. BENEFICI E CRITICITÀ SOTTO IL PROFILO GESTIONALE.....	14
3.1 Indagine presso i gestori.....	14
3.2 Esperienze e pareri di gestori di impianti MBR.....	17
4. RECENTI SVILUPPI TECNOLOGICI	24
4.1 I processi MBR.....	24
4.2 Mercato attuale degli MBR	28
4.3 Recenti sviluppi tecnologici	30
4.3.1 Sviluppi nei moduli di membrane.....	30
4.3.2 Interventi per migliorare le prestazioni dei sistemi MBR.....	32
4.3.3 Sviluppi nelle configurazioni degli impianti e nelle tipologie di processo	36
5. RECENTI RICERCHE.....	44
5.1 Principali ricerche comparse in riviste scientifiche.....	44
5.2 Presentazione di progetti di ricerca in corso/recentemente conclusi.....	48
5.2.1 Progetti di ricerca internazionali.....	48
5.2.2 Progetti di ricerca nazionali.....	50
5.3 Approfondimenti su alcuni temi specifici.....	52
6. CONVEGNI RECENTI SUGLI IMPIANTI MBR.....	60
6.1 Convegni internazionali.....	60
6.2 Convegni nazionali.....	60
7. LIBRI RECENTI SUGLI IMPIANTI MBR	63

INTRODUZIONE

I reattori biologici a membrana (MBR, dall'inglese Membrane Biological Reactor) derivano dall'accoppiamento dei tradizionali processi a biomassa sospesa con i processi di filtrazione su membrane microporose o ultraporose, a seconda delle dimensioni nominali dei pori. I maggiori vantaggi legati a questa tecnologia vanno ricercati nella possibilità di eliminare, a valle della fase biologica, quella dei vincoli gestionali ed operativi a quest'ultima connessi. La sostituzione della sedimentazione con una fase di filtrazione su membrane comporta: una notevole riduzione dell'ingombro planimetrico dell'impianto di depurazione, dovuta sia alla eliminazione delle unità di sedimentazione che alla diminuzione di quelli necessari allo svolgimento del processo biologico, in conseguenza del possibile incremento della concentrazione di solidi sospesi totali; la possibilità di gestire il processo biologico in maniera totalmente indipendente dalle fluttuazioni di carico idraulico (il tempo di residenza cellulare ed il tempo di ritenzione idraulica sono completamente svincolati tra loro); la diminuzione dei fanghi di supero, associata ai più alti tempi di detenzione delle frazioni solide sospese e alla conseguente idrolisi; l'eliminazione dei problemi di sedimentabilità del fango solitamente riscontrabili negli impianti a fanghi attivi convenzionali; il sensibile miglioramento delle caratteristiche qualitative dell'effluente, compatibili con il potenziale riuso agricolo dell'acqua depurata.

A fronte di questi vantaggi, la progettazione e gestione dei sistemi MBR comporta la necessità di tenere conto di diversi aspetti, che, se trascurati o sottovalutati, si riflettono negativamente sulle prestazioni e sui costi gestionali: flussi massimi e flussi sostenibili del permeato; pretrattamenti; fenomeni di sporramento delle membrane ("fouling") e strategie di cleaning; aerazione e consumi energetici.

Benché i primi casi di processi biologici abbinati a micro-ultrafiltrazione su membrane risalgano agli anni '70, i sistemi MBR così come intesi oggi sono stati sviluppati a partire dalla fine degli anni '80, quando furono realizzati numerosi impianti a piccola scala per il trattamento di reflui civili ed industriali. Negli ultimi vent'anni, sia il significativo calo del costo delle membrane che l'ottimizzazione dei consumi energetici, hanno dato luogo ad una forte crescita del numero di impianti nel mondo. Informazioni commerciali fornite dai costruttori di impianti MBR portano a stimare che in Italia siano presenti in totale circa 260 impianti MBR, prevalentemente ubicati nelle regioni settentrionali. La maggior parte degli impianti sono dotati di membrane piane, utilizzate soprattutto nel trattamento di reflui industriali, mentre le membrane a fibre cave sono diffuse in impianti urbani di grande potenzialità. Recentemente, poi, si sono affacciate sul mercato membrane ibride.

Gli impianti MBR sono una tecnologia consolidata, ma recente, con conoscenze ancora poca approfondite relativamente agli aspetti legati alla loro gestione. Per questo motivo, il Gruppo di Lavoro "Gestione impianti di depurazione", operativo presso l'Università di Brescia, ha attivato nel 2013 un

sottogruppo riguardante la gestione degli impianti di depurazione MBR, con l'intento di far fruttare le esperienze gestionali consolidate, evitare un uso improprio di tale tecnologia (con conseguenti risultati deludenti) e supportarne lo sviluppo (con utili indicazioni a costruttori e gestori). L'attività del sottogruppo (concretizzatasi nell'organizzazione di due giornate di studio, tenutesi a Brescia nel luglio 2014 e giugno 2015, e nella stesura di un volume di prossima pubblicazione sulla conduzione degli impianti di depurazione MBR) ha evidenziato da un lato un crescente interesse nei confronti degli impianti MBR, dall'altro alcune problematiche che devono essere risolte sotto il profilo impiantistico e gestionale. Per questo motivo, congiuntamente ai Gruppi di ricerca di Ingegneria Sanitaria-Ambientale delle Università di Napoli "Federico II", di Palermo e Salerno - che da numerosi anni conducono ricerche sui processi di depurazione biologica a membrane e che dal 2012 organizzano con cadenza annuale uno specifico incontro di natura tecnico-scientifica, dal titolo BIOMAC - si è deciso di istituire un "Osservatorio sugli impianti di depurazione MBR in Italia".

L'Osservatorio svolge e promuove attività tecnico-scientifiche, di ricerca, culturali, didattico-formative, corsi, seminari, workshop, per favorire l'approfondimento e la diffusione di conoscenze ed esperienze in merito alla progettazione, alla costruzione e alla gestione degli impianti MBR. In particolare:

- monitora la diffusione degli impianti MBR in Italia;
- monitora l'efficienza e l'affidabilità di tali impianti sotto il profilo tecnico, ambientale ed economico;
- rileva il giudizio dei gestori;
- aggiorna sulle novità in campo processistico, impiantistico e, gestionale;
- diffonde informazioni sullo stato e sui possibili/probabili sviluppi del settore;
- pubblica un rapporto annuale sugli impianti di depurazione MBR.

Le attività dell'Osservatorio sono aperte a chiunque sia interessato: ricercatori, gestori di impianti, esponenti di enti pubblici e/o di controllo, professionisti, imprese che operano nel settore della depurazione.

1. CENSIMENTO DEGLI IMPIANTI DI DEPURAZIONE MBR IN ITALIA

1.1 Impostazione dell'indagine

Il presente capitolo riporta l'esito di un'indagine condotta recentemente dal Gruppo di Lavoro "Gestione impianti di depurazione" con l'intento di censire gli impianti MBR realizzati in Italia e individuare le loro principali caratteristiche sotto il profilo tecnico-impiantistico.

L'indagine ha visto il coinvolgimento dei principali costruttori di impianti MBR attivi sul mercato italiano ed è avvenuta mediante l'impiego di un questionario sintetico, nel quale sono state richieste le seguenti informazioni: localizzazione dell'impianto, tipologia di refluo trattato, carico organico giornaliero medio (in termini di BOD₅ e/o COD), portata media giornaliera, tipo di membrane installate, data di realizzazione della sezione MBR. Talvolta i questionari, per motivi di riservatezza commerciale, sono stati compilati parzialmente; per questa ragione, le statistiche che seguono riportano differenti numerosità del campione.

1.2 Censimento degli impianti

Informazioni commerciali fornite dai costruttori di impianti MBR portano a stimare che in Italia siano presenti in totale circa 260 impianti MBR. Ad oggi sono stati censiti 206 impianti, di cui 101 trattano reflui civili e 105 reflui di natura industriale. Gli impianti mancanti all'appello (una cinquantina circa) sono per la quasi totalità a servizio di attività produttive e dotati di membrane piane.

Gli impianti MBR che ricevono reflui civili sono stati classificati in funzione della popolazione servita, misurata in abitanti equivalenti (AE) (Figura 1.1), mentre quelli che trattano reflui industriali sono stati suddivisi in base alla portata media giornaliera trattata (Figura 1.2). Si può osservare che sia gli impianti MBR civili sia quelli industriali sono prevalentemente di medio-bassa potenzialità.

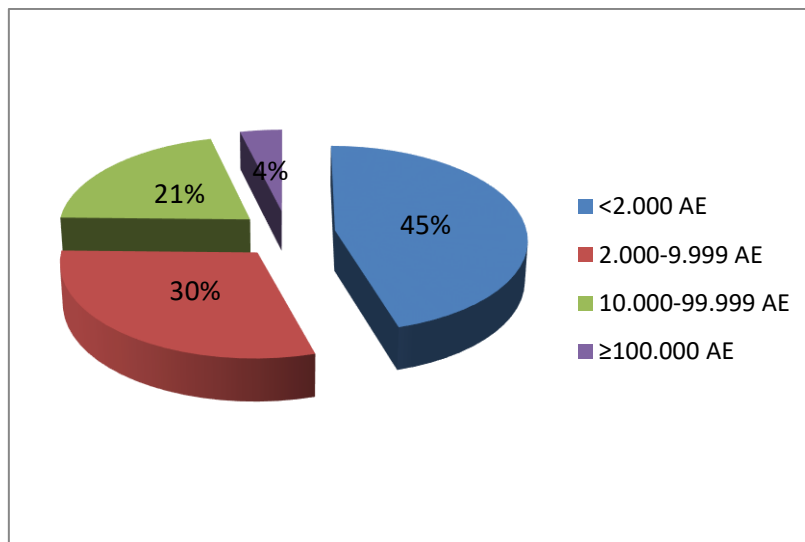


Figura 1.1: Suddivisione degli impianti che trattano reflui civili in base alla popolazione equivalente servita

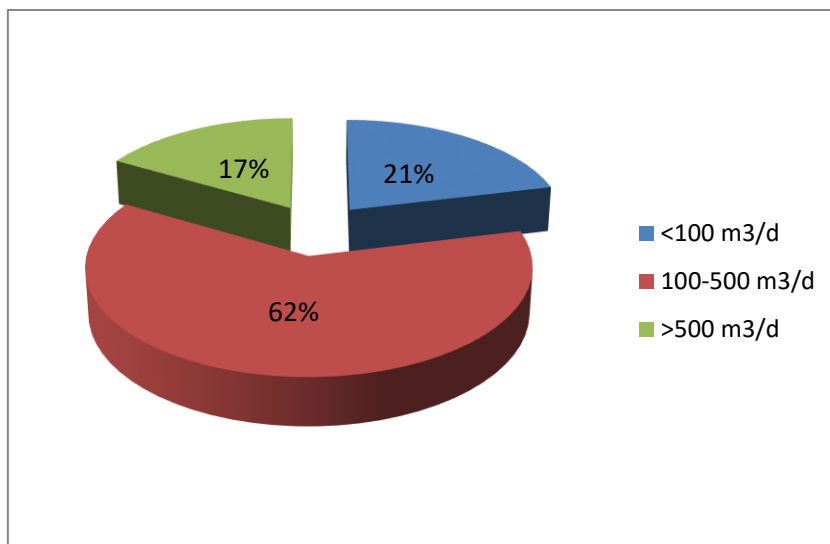


Figura 1.2: Suddivisione degli impianti che trattano reflui industriali in base alla portata giornaliera trattata

La Figura 1.3 mostra la distribuzione del campione censito in base alla localizzazione ed alla tipologia di refluo trattato. Risulta evidente che la maggior parte degli impianti si concentra nel Nord Italia. Ciò può essere imputabile, almeno parzialmente, alla presenza di un tessuto industriale più denso (il 67% degli impianti industriali censiti è localizzato in detta macro-regione).

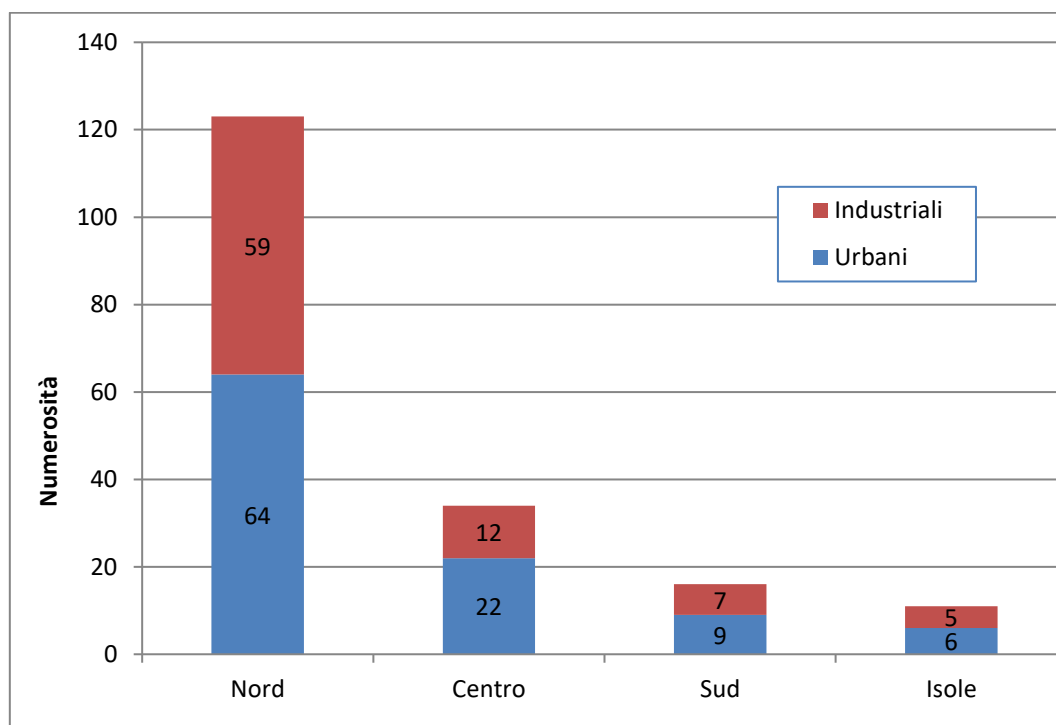


Figura 1.3: Suddivisione degli impianti MBR censiti in base alla localizzazione ed alla tipologia di refluo trattato

La Figura 1.4 riporta il campione di impianti censiti suddivisi per anno di realizzazione. A partire dal 2002 il numero di nuove installazioni è andato via via crescendo fino al 2013. Dal 2014, probabilmente a causa della crisi economica, il numero di realizzazioni di nuovi MBR si è ridotto a 8-10 all'anno.

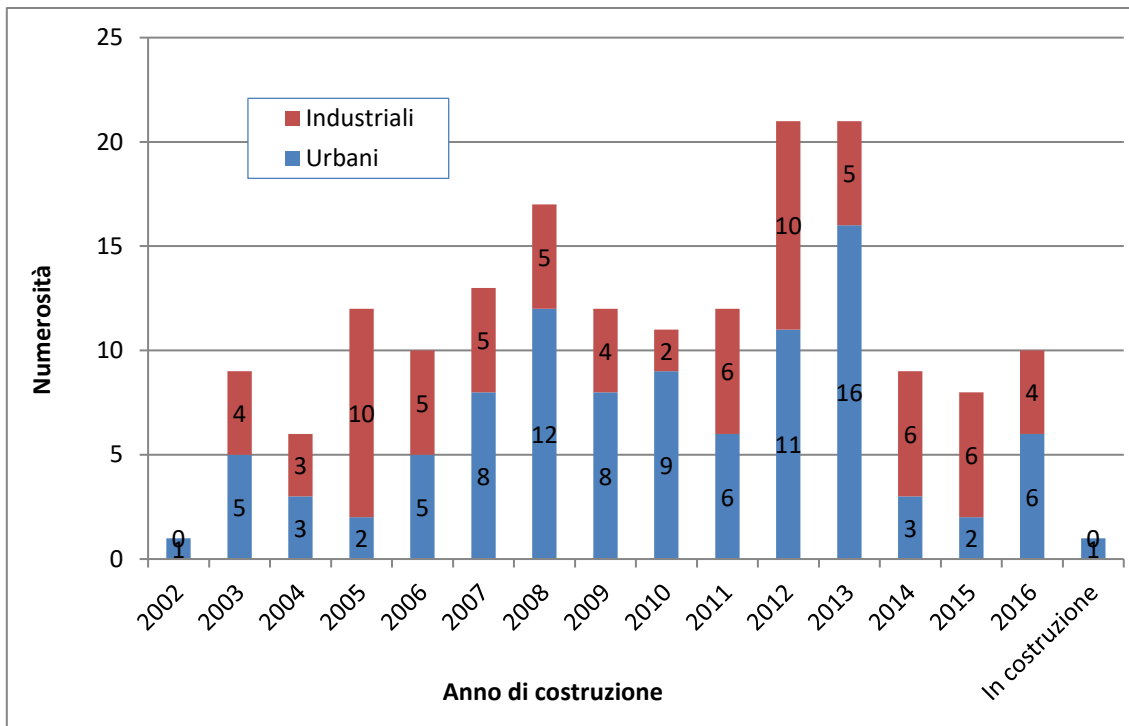


Figura 1.4: Suddivisione degli impianti in base all'anno di realizzazione e tipologia di refluo trattato

Le membrane installate negli impianti italiani sono perlopiù piane (70%) e a fibra cava (27%) (Figura 1.5). Recentemente si sono affacciate sul mercato membrane cosiddette “ibride”.

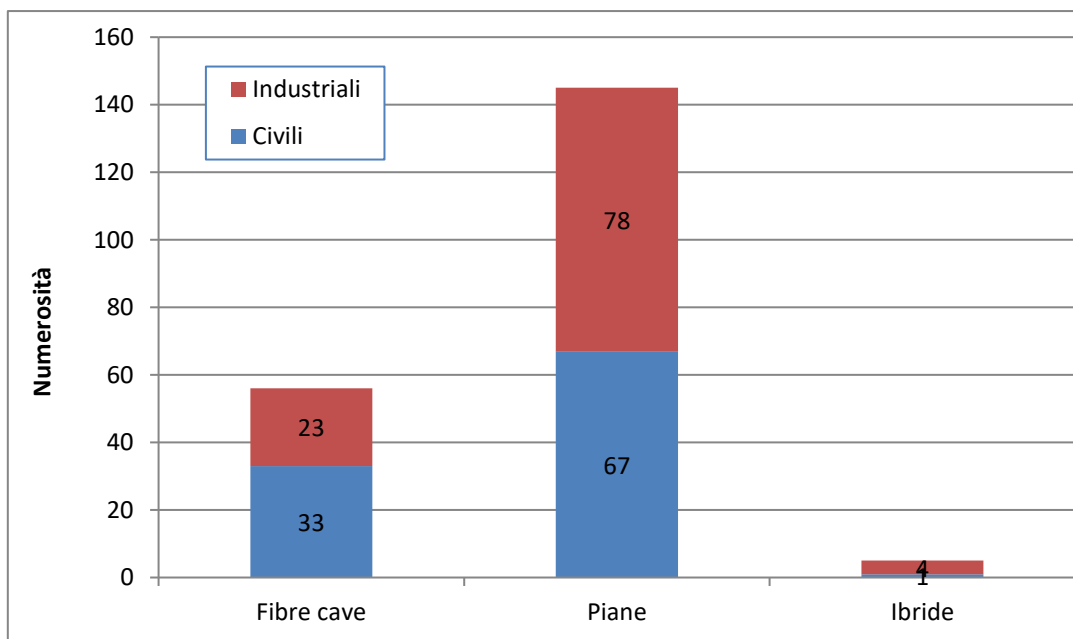


Figura 1.5: Suddivisione degli impianti in base alla tipologia di membrane installate e tipologia di refluo trattato

Dall'analisi delle Figure 1.6 e 1.7 emerge che le membrane piane sono principalmente utilizzate in impianti sia urbani sia industriali di piccola taglia, mentre quelle a fibra cava negli impianti di media-grande potenzialità.

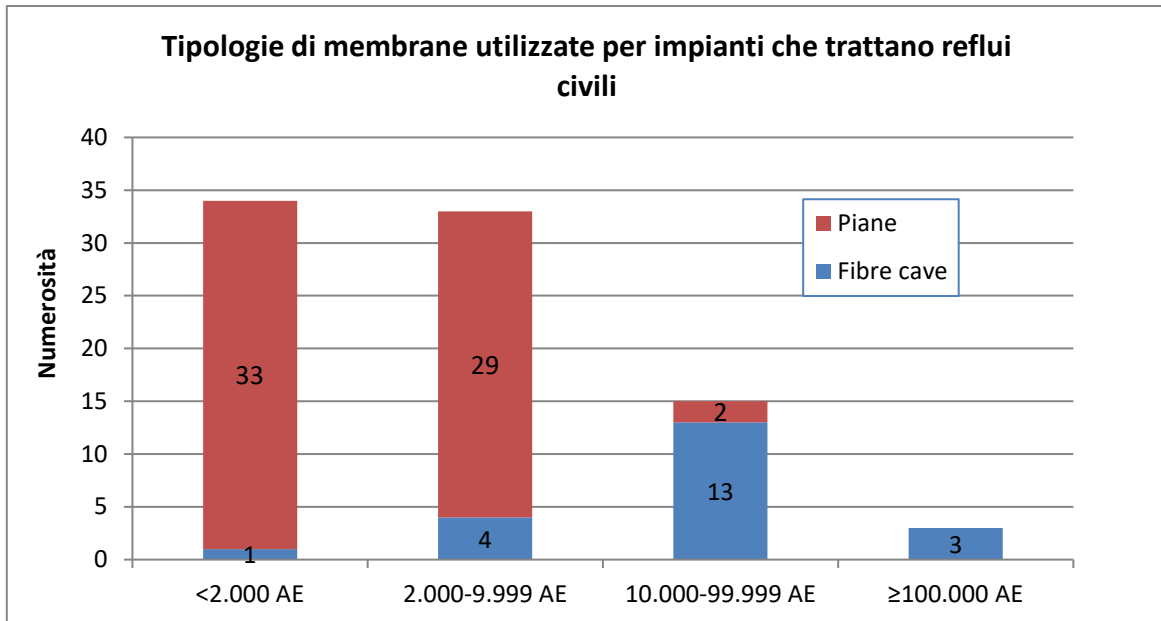


Figura 1.6: Suddivisione degli impianti che trattano reflui civili in base alla potenzialità ed alla tipologia di membrane

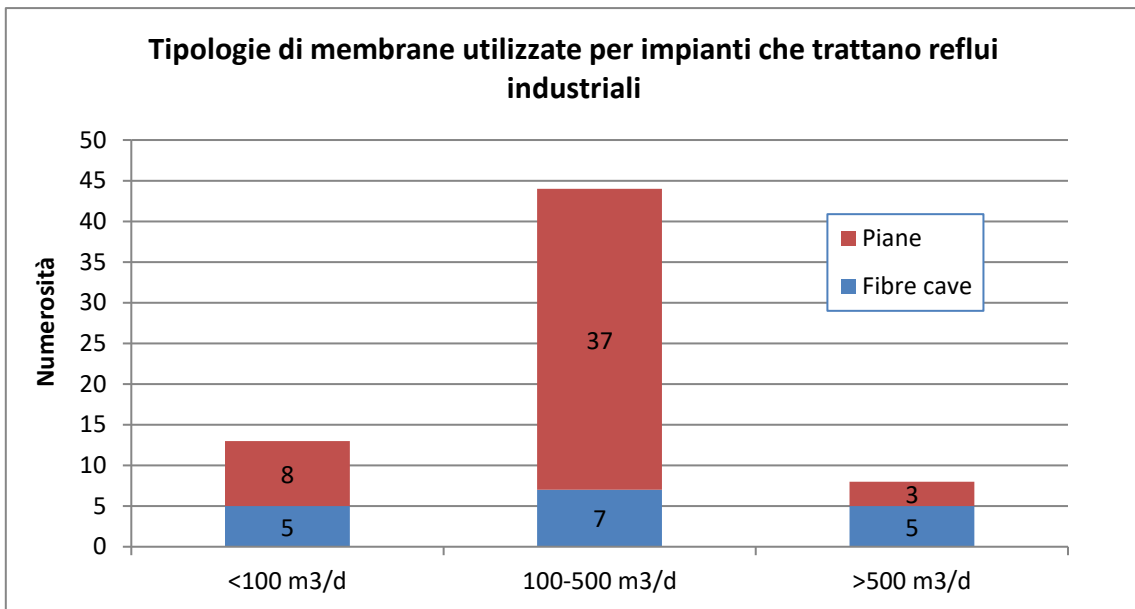



Figura 1.7: Suddivisione degli impianti che trattano reflui industriali in base alla potenzialità ed alla tipologia di membrane

2. RECENTI REALIZZAZIONI E REVAMPING DI IMPIANTI MBR

Di seguito si riportano, sotto forma di scheda, i dati tecnici salienti di alcuni impianti MBR realizzati recentemente.

Nuova installazione - Impianto Municipale	
	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Levanto (SP)
2) Nome del gestore	Levante Sviluppo S.p.A.
3) Tipologia di refluo trattato	Refluo civile
4) Potenzialità impianto (AE)	17539 AE complessivi, di cui 5300 AE alla linea MBR
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	930 kgBOD/d complessivi, di cui 280 kgBOD/d alla linea MBR
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	149 m ³ /h complessivi, di cui 45 m ³ /h alla linea MBR
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	2016

Nuova installazione - Impianto Municipale



1) Localizzazione impianto e indirizzo

Recco (GE)

2) Nome del gestore

Iren S.p.A.

3) Tipologia di refluo trattato

Refluo civile

4) Potenzialità impianto (AE)

35000 AE

5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)

2102 kgBOD/d

6) Portata media oraria trattata (m³/h)

292 m³/h

7) Tipologia di MBR installato

Fibre cave

8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR

2016

Nuova installazione - Impianto Municipale



1) Localizzazione impianto e indirizzo

Santa Giustina-Rimini (RN)

2) Nome del gestore

Hera S.p.A.

3) Tipologia di refluo trattato

Refluo civile

4) Potenzialità impianto (AE)

560000 AE complessivi, di cui 340000 AE alla linea MBR

5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)

33072 kgBOD/d complessivi, di cui 19970 kgBOD/d alla linea MBR

6) Portata media oraria trattata (m³/h)

5300 m³/h complessivi, di cui 3200 m³/h alla linea MBR

7) Tipologia di MBR installato

Fibre cave

8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR

2016

Nuova installazione - Impianto Municipale	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Lazio
2) Nome del gestore	ACEA
3) Tipologia di refluo trattato	Refluo civile
4) Potenzialità impianto (AE)	55200 AE
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	1656 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	115 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Dicembre 2016

Nuova installazione - Impianto a servizio di azienda casearia	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Emilia Romagna
2) Nome del gestore	n.d.
3) Tipologia di refluo trattato	Refluo industriale
4) Potenzialità impianto (AE)	n.d.
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	1344 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	7 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Marzo 2016

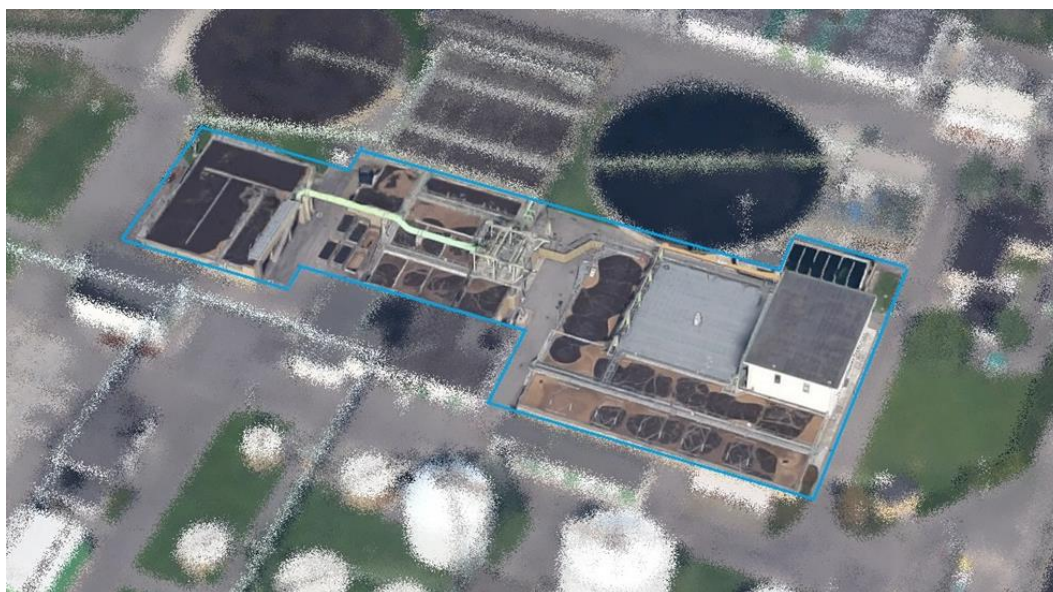
Nuova installazione - Impianto a servizio di azienda cosmetica	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Toscana
2) Nome del gestore	n.d.
3) Tipologia di reflu trattato	Reflu Industriale
4) Potenzialità impianto (AE)	n.d.
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	480 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	4000 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Dicembre 2016

Nuova installazione - Impianto a servizio di azienda produttrice di fertilizzanti	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Veneto
2) Nome del gestore	n.d.
3) Tipologia di reflu trattato	Reflu Industriale
4) Potenzialità impianto (AE)	n.d.
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	2400 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	11 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Ottobre 2016

Nuova installazione – Impianto municipale	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Piemonte
2) Nome del gestore	n.d.
3) Tipologia di refluo trattato	Refluo civile
4) Potenzialità impianto (AE)	13200 AE
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	1584 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	115 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Dicembre 2016

Nuova installazione - Impianto a servizio di un villaggio turistico	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Sardegna
2) Nome del gestore	n.d.
3) Tipologia di refluo trattato	Refluo civile
4) Potenzialità impianto (AE)	2000 AE
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	120 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	5 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Gennaio 2016

Revamping – Impianto Municipale



1) Localizzazione impianto e indirizzo

Verziano (BS)

2) Nome del gestore

A2A CICLO IDRICO SPA

3) Tipologia di refluo trattato

Acque reflue urbane

4) Potenzialità impianto (AE)

131.000 AE (2015) – ante ristrutturazione/potenziamento

5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)

10506 kgCOD/d (2015)

6) Portata media oraria trattata (m³/h)

1480 m³/h (2015)

7) Tipologia di MBR installato

Fibre cave immerse

8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR

Realizzazione iniziata nel Marzo 2001 e terminata con l'avvio nell'Agosto 2002

9) Data di inizio ristrutturazione della linea MBR e durata dei lavori

01/11/2015 – durata totale 6 mesi compreso riavvio

10) Tempo di esercizio delle membrane alla sostituzione

13 anni

3. BENEFICI E CRITICITÀ SOTTO IL PROFILO GESTIONALE

3.1 Indagine presso i gestori

Nel presente paragrafo si riportano i risultati di un'indagine svolta dal Gruppo di Lavoro "Gestione impianti di depurazione" con l'obiettivo di identificare da un lato le motivazioni che hanno portato alla scelta di installare un impianto MBR, dall'altro i vantaggi e gli svantaggi che tale tipologia di impianti presentano sotto il profilo gestionale.

L'indagine è avvenuta per mezzo di un apposito questionario, che è stato compilato da gestori di impianti MBR. In totale sono stati compilati 37 questionari; 21 (57%) riguardano impianti urbani e 16 (43%) impianti a servizio di attività produttive. La Figure 3.1 e 3.2 mostrano la distribuzione del campione indagato in base alla potenzialità dell'impianto ed alla tipologia di refluo trattato; la Figura 3.3. riporta la tipologia di membrane installate.

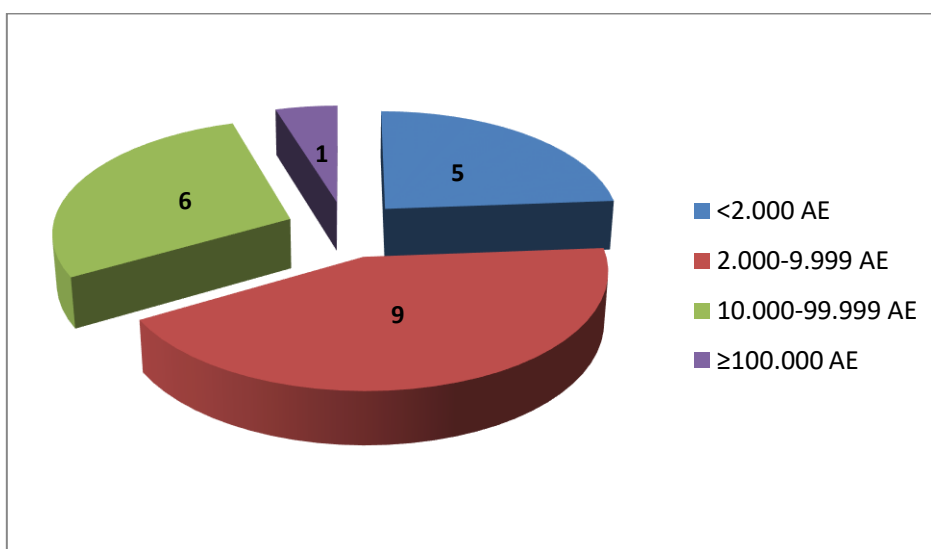


Figura 3.1: Classificazione degli impianti che trattano reflui civili in base alla popolazione servita

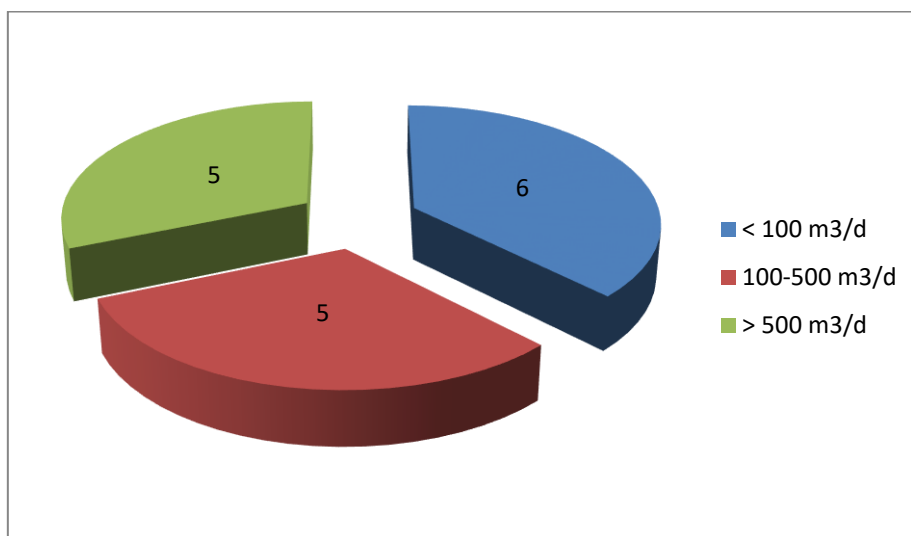


Figura 3.2: Classificazione degli impianti che trattano reflui industriali in base alla portata giornaliera trattata

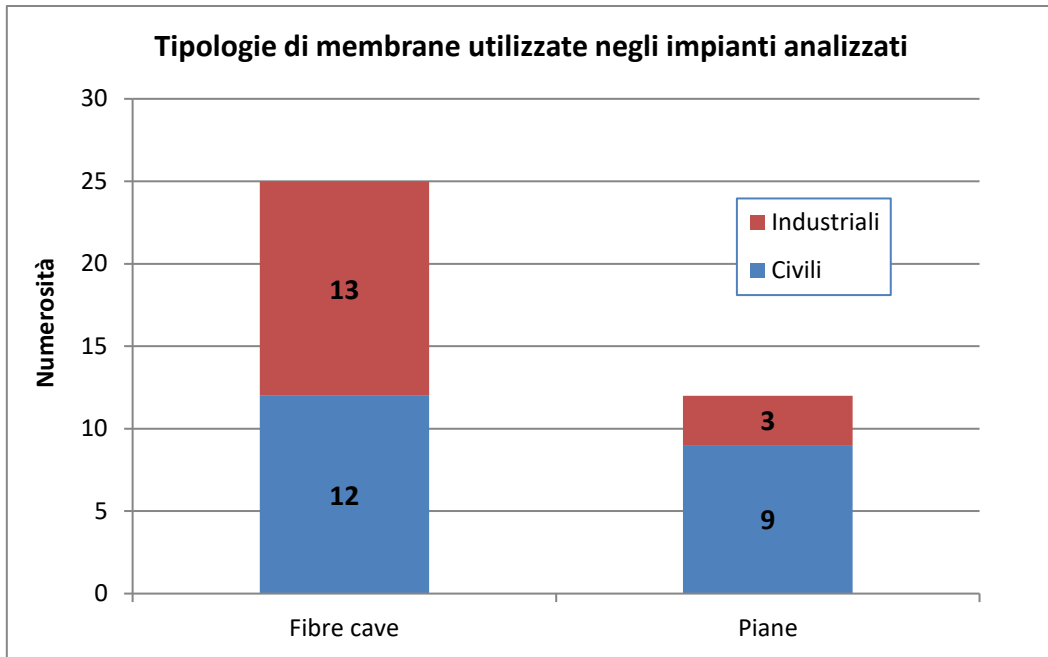


Figura 3.3: Suddivisione degli impianti in base alla tipologia di membrane installate e tipologia di refluo trattato

La Figura 3.4 indica le motivazioni che hanno portato all'installazione del sistema MBR: le principali sono la carenza di spazio e la possibilità di aumentare la potenzialità di trattamento, sia per gli impianti industriali che per quelli civili. Anche l'ottima qualità dell'effluente finale, legata ad autorizzazioni d'esercizio e a limiti allo scarico più restrittivi, è una motivazione più volte citata dai gestori di entrambe le tipologie di impianti.

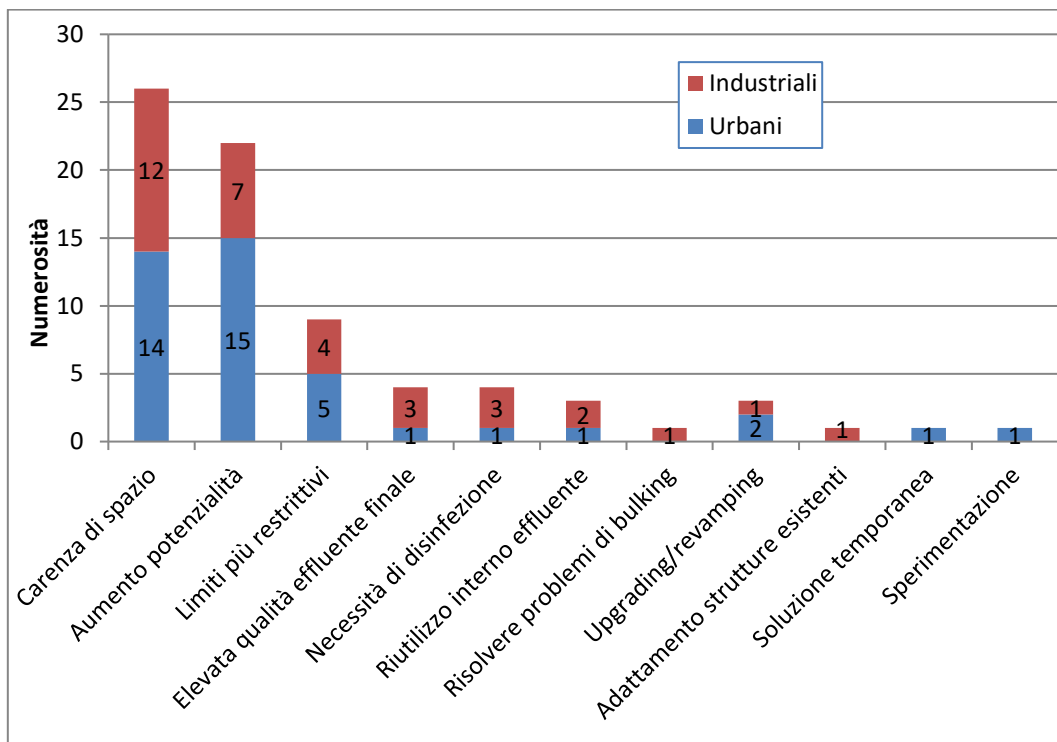


Figura 3.4: Motivi dell'installazione del processo MBR

La Figura 3.5 riporta i vantaggi gestionali ottenuti grazie all'installazione del processo MBR: anche in questo caso i gestori evidenziano il rispetto dei limiti allo scarico e l'aumento della capacità depurativa come vantaggi principali, oltre all'automazione del processo, all'abbattimento della carica microbica ed alla riduzione della produzione di fango.

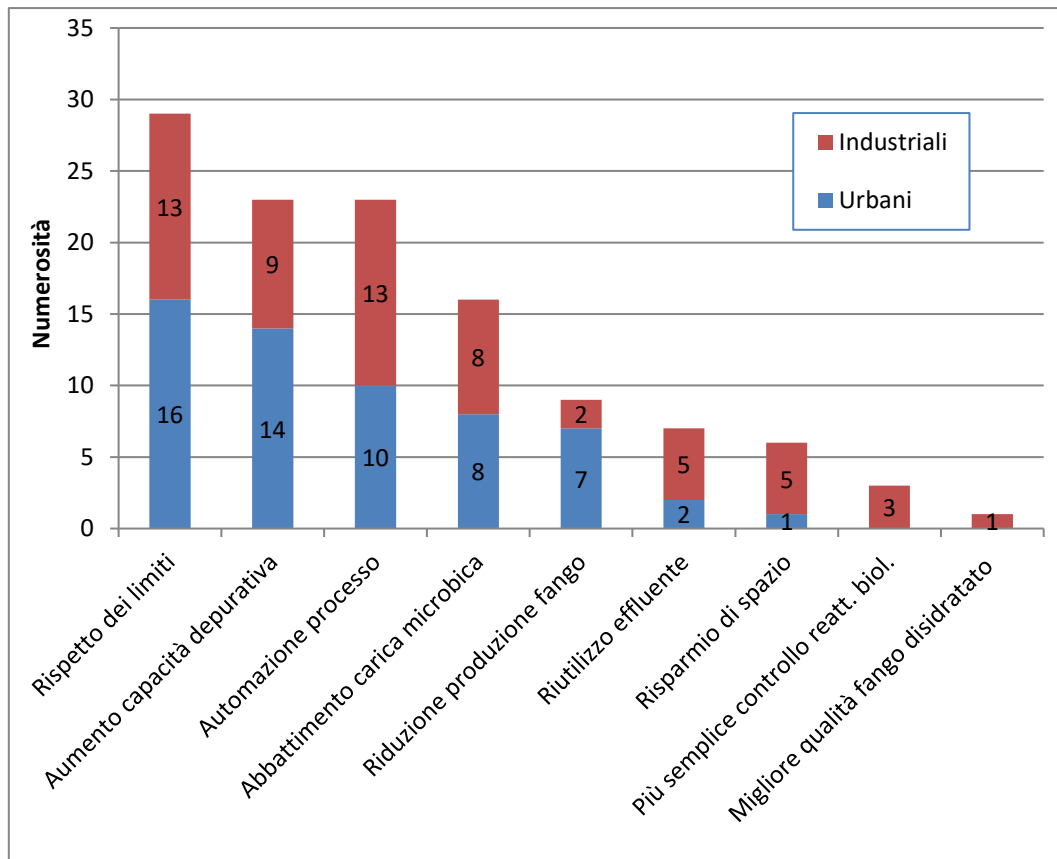


Figura 3.5: Vantaggi gestionali ottenuti grazie al processo MBR

La Figura 3.6 indica le principali problematiche gestionali connesse al processo MBR: il fouling, cioè lo sporcamento delle membrane, ed i fermi impianto risultano le più segnalate, anche se nella maggior parte dei casi sono indicate come occasionali o rare.

Lo sporcamento delle membrane è un problema tipico degli MBR e, al fine di ridurne gli effetti negativi, è importante la collaborazione tra il produttore delle membrane ed il gestore dell'impianto. Anche il problema dei fermi impianto può essere eliminato o quanto meno limitato con operazioni regolari di recovery e cleaning. Questo ha comportato la necessità di personale specializzato poiché le competenze necessarie per gestire internamente alcune problematiche richiede tempo per garantire conoscenza e padronanza del nuovo processo, il che rappresenta anche un'opportunità di crescita tecnica delle risorse umane del gestore.

La variabilità delle prestazioni è dovuta alla sensibilità alle condizioni meteorologiche e si osserva non in termini di rese del processo ma di consumi energetici e di reagenti; questo, unito al fenomeno delle schiume biologiche (foaming), che è invece un problema legato alle condizioni della biomassa, ed al carico in ingresso, sottolinea la grande importanza dei pretrattamenti e dell'equalizzazione.

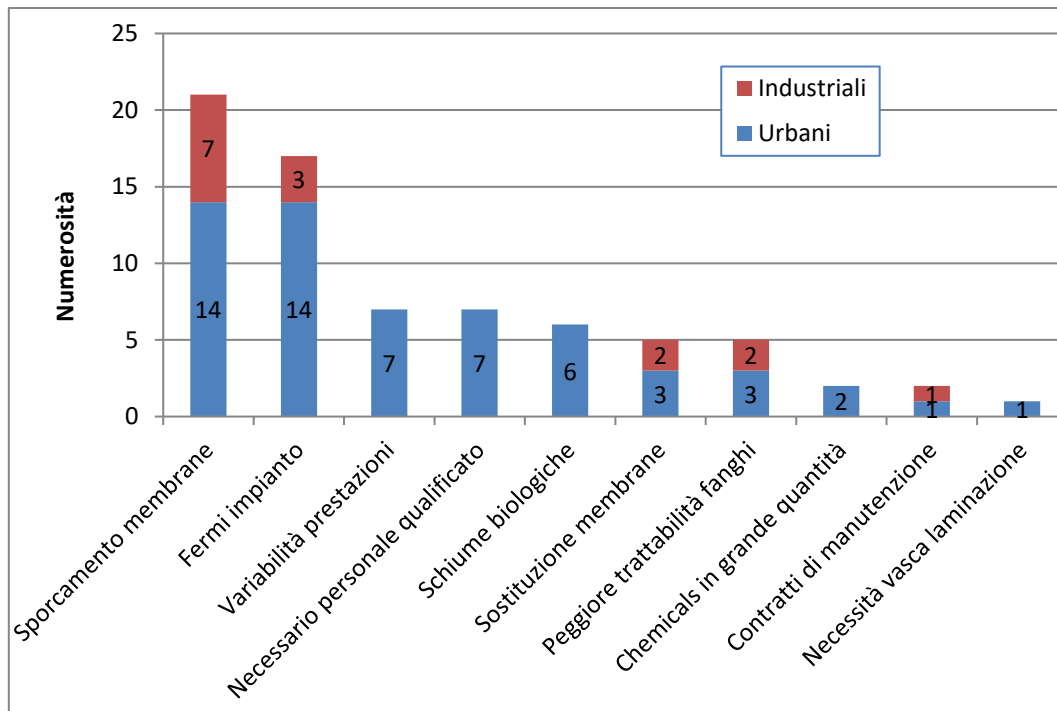


Figura 3.6: Principali problematiche gestionali della sezione MBR

3.2 Esperienze e pareri di gestori di impianti MBR

Di seguito si riportano le esperienze e i commenti di alcuni gestori di impianti MBR.

Impianto di Verziano - Revamping & upgrading della linea MBR (di R. Romano e L. Massafra; A2A Ciclo Idrico, Brescia)

L'impianto di depurazione di Verziano tratta le acque reflue provenienti dalla rete fognaria della città di Brescia e di alcuni comuni limitrofi.

L'impianto è strutturato su tre linee depurative:

- le linee "A" e "C", caratterizzate da un processo biologico di trattamento "convenzionale" (pre-denitrificazione, nitrificazione, sedimentazione finale); la linea "A" è inoltre dotata di una sezione di micro ed ultra filtrazione come ulteriore trattamento di affinamento dell'effluente depurato;
- la linea "B", per la quale è adottato un processo analogo a quello delle altre due linee, ma con la variante che la separazione fisica solido/effluente depurato avviene non mediante sedimentazione ma mediante un sistema di ultrafiltrazione realizzato con fibre cave immerse, costituite da una membrana semi-permeabile.

Recentemente, è sorta l'esigenza di potenziare l'impianto e di ristrutturare la linea MBR in virtù delle:

- previsioni di ulteriori collettamenti al sistema fognario di Brescia di comuni limitrofi, secondo i piani territoriali di gestione e uso delle acque, e la limitata disponibilità di superficie all'interno dell'area dell'impianto da destinare a nuove linee di trattamento,
- criticità meccaniche emerse sui frame delle membrane a dispetto di una condizione ancora ottima del polimero filtrante e il tempo di esercizio delle membrane ben più lungo rispetto alla vita utile stimata dal costruttore (13 anni di esercizio – stimati 7)

La progettazione è stata condotta avvalendosi di software di calcolo e simulazione del processo biologico; dalle simulazioni condotte sono emersi alcuni punti di attenzione, che hanno portato alla scelta di impiegare sistemi ad alta efficienza di trasferimento dell'ossigeno nelle vasche di nitrificazione e alla

necessità di ampliare il volume del ricircolo della miscela aerata per deossigenare il mixed liquor di ritorno dalla sezione di ultrafiltrazione.

I lavori di *revamping* della linea sono stati effettuati tra il novembre 2015 e l'aprile 2016 e sono stati articolati in:

- STRALCIO I riguardante tutte le opere civili e le opere elettromeccaniche afferenti alle sezioni biologiche;
- STRALCIO II riguardante la sostituzione delle membrane e l'implementazione di nuove logiche di controllo informatizzate.

I principali interventi del 1° stralcio hanno riguardato la sostituzione dei mixer posizionati nei comparti di denitrificazione con apparecchiature più performanti dal punto di vista energetico e la sostituzione dei diffusori di aria in vasca di ossidazione/nitrificazione (con S.O.T.E. > 30%).

Per quel che concerne in particolare il comparto di ultrafiltrazione, cuore dell'intervento di *revamping* effettuato, la sostituzione delle vecchie membrane cave immerse con il nuovo modello ZeeWeed 500C ft ha portato ad un incremento dell'11% della superficie filtrante disponibile, con la possibilità di trattare fino al 21% in più di portata.

Con la fase di start up è stato effettuato un aggiustamento fine dei parametri che regolano il processo. Ad esempio l'installazione di nuove membrane ha portato a condizioni di lavoro differenti rispetto alla situazione preesistente, anche per la variazione del grado di porosità efficace del nuovo polimero utilizzato. È stato indispensabile quindi rimodulare accuratamente i parametri di resistenza limite per i nuovi campi di lavoro. E' stato eseguito anche un fine tuning applicando procedure di damping (dell'ordine di qualche secondo) sulle misure ritenute sensibili, quali pressioni e portate, che avrebbero potuto indurre altrimenti a variazioni repentine delle regolazioni e dei parametri calcolati.

Nel corso della fase di start up sono inoltre emerse criticità inerenti la gestione del fouling control, che provocava il passaggio delle tempistiche di accensione/spegnimento dall'aerazione ai fini dello scuotimento delle membrane dalla modalità 10/30 alla modalità 10/10 (energeticamente più dispendiosa), a causa di una discrepanza nella misura di pressione (da cui poi dipendono tutti i calcoli) durante la turnazione delle pompe di permeazione. Una verifica del piping ha evidenziato che il misuratore di pressione risentiva differentemente della cinetica di aspirazione poiché più vicino ad una pompa rispetto all'altra.

Dai riscontri gestionali dei primi due mesi di funzionamento della linea MBR a seguito del *revamping*, è emersa la necessità di intervenire ulteriormente sul bacino realizzato per deossigenare la portata di ritorno in denitrificazione dal comparto di ultrafiltrazione (migliorandone ad esempio l'idrodinamica).

Da un punto di vista energetico, gli interventi effettuati hanno portato a:

- Consumo specifico sezione di denitrificazione ↓ 76,9%
- Consumo specifico sezione ossidazione ↓ 1,6%
- Consumi specifico sezione aerazione UF ↓ 3,7%
- Consumi specifici sezione ricircolo ML per m³ ↓ 9,1%
- Possibilità di richiesta di TEE

Si evidenzia, per concludere, come il comparto UF NON può essere trattato come sezione a sé stante, ma deve esserci una visione integrata con le altre sezioni di trattamento, sia in fase progettuale che gestionale.

Ad esempio, è stato verificato come le più alte concentrazioni di biomassa che possono essere mantenute nelle sezioni biologiche grazie al più efficace sistema di separazione solido/effluente depurato influenzano i parametri tipici legati alla fornitura di ossigeno nel comparto di nitrificazione (alfa, SOTE), nonché il rendimento dei pompaggi (che risulta inferiore per via di una maggiore viscosità del fango). Il

rapporto di ricircolo del mixed liquor deve essere attentamente valutato, al fine di conciliare la necessità di deconcentrare il fango nella sezione UF con l'esigenza di riportare in denitrificazione quantitativi di ossigeno disciolto i più bassi possibili, al fine di non inficiare il processo biologico di rimozione dell'azoto.

L'esperienza di Acquedotto del Fiora sugli impianti con tecnologia MBR. L'impianto di depurazione di Rosia (SI) (di E. Di Nunno; Acquedotto del Fiora, Grosseto)

L'impianto di depurazione di Rosia, situato nel Comune di Sovicille (SI), ha una potenzialità di progetto pari a 2.500 AE, con un portata giornaliera massima di 400 m³/d. La fognatura di adduzione del refluo è prevalentemente separata, ma con cospicue infiltrazioni di acque bianche e meteoriche.

Nel 2012 l'impianto (un tradizionale CAS) è stato sottoposto ad un importante intervento di adeguamento, che ha comportato la trasformazione in un sistema a fanghi attivi con tecnologia MBR, con modifiche riguardanti sia il comparto biologico che le sezioni di trattamento primario.

Tale scelta impiantistica è derivata da ragioni tecniche, ambientali ed economiche ovvero:

- non sono stati necessari ampliamenti della superficie dell'impianto, eliminando i costi di esproprio e i conseguenti problemi di carattere burocratico, amministrativo e legale;
- rispetto ai sistemi tradizionali, offre alte garanzie qualitative per le acque di scarico e maggiori garanzie di efficienza offrendo la possibilità di un riutilizzo irriguo delle acque depurate;
- la possibilità di potenziare ulteriormente l'impianto nel caso di futuri aumenti del carico influente senza modificare le strutture presenti nell'impianto, in particolar modo della sezione di ossidazione.

La filiera dell'impianto è attualmente costituita da grigliatura automatica, dissabbiatura-disoleatura, sollevamento, flottazione tramite soffiante a canale laterale, grigliatura fine attraverso rotostacci (con luce <1,5 mm), equalizzazione, comparto biologico MBR, disinfezione con ipoclorito di sodio (eventuale). Il fango di supero viene stabilizzato in un ispessitore aerato fino a raggiungere circa il 2% di SS prima di essere inviato tramite autospurgo presso altri impianti in grado di fornire un idoneo trattamento.

Il processo biologico è costituito da una fase di ossidazione/nitrificazione preceduta da una fase di denitrificazione. La sezione di filtrazione è costituita da n.6 moduli contenenti pacchi di membrane piane con un diametro nominale dei pori pari a 0,4µm, per una superficie di filtrazione complessiva di 960 m². I moduli filtranti sono posizionati nella sezione di ossidazione/nitrificazione. Nella parte sottostante i moduli sono posizionati diffusori a bolle grandi con la duplice funzione di areare il refluo e creare uno scuotimento delle membrane in modo da evitare/rallentare i processi di intasamento (fouling e clogging). Il mixed liquor, prelevato dalla vasca in cui sono posizionate le membrane, viene ricircolato nella sezione di denitrificazione previo passaggio in una vasca di de-ossigenazione. Il permeato, estratto per aspirazione, viene collettato e raccolto in una vasca di accumulo (ex sedimentatore secondario) per poi essere eventualmente sottoposto a disinfezione con cloro prima del rilascio nel corpo idrico superficiale di recapito.

Il reattore MBR si è dimostrato in grado di fronteggiare forti variazioni di carico organico mantenendo ottime prestazioni. I dati di monitoraggio raccolti nel periodo 2013-2015 mostrano un abbattimento medio del COD e del BOD₅ del 95% e del 98% rispettivamente. Il contenuto di SST viene ridotto di circa il 98%, con concentrazioni in uscita di circa 10 mg/L. Grazie all'elevata età del fango ed al corretto dimensionamento della sezione di aerazione, la rimozione dell'azoto Kjeldahl è molto elevata (oltre il 95%), mentre l'azoto totale viene abbattuto mediamente circa del 55%, indicando un processo di denitrificazione non del tutto completo.

I consumi specifici di energia sono nel range di 2-3 kWh/m³ di refluo trattato o 3-4 kWh/ kg COD rimosso, valori in linea con quanto riscontrato in letteratura nelle applicazioni di MBR su refluo di tipo urbano.

I problemi gestionali riscontrati sono principalmente legati a fenomeni di formazione di schiume e fenomeni di intasamento delle membrane, con conseguente necessità di ricorrere a lavaggi chimici più frequenti rispetto ai 6 mesi previsti in fase progettuale. Pulizie chimiche troppo frequenti hanno l'effetto di ridurre la vita utile delle membrane e quindi un aumento nella frequenza della relativa sostituzione. L'effetto di intasamento delle membrane provoca inoltre un incremento dell'energia assorbita. Tali problematiche devono essere controllate ai fini dell'efficacia e dell'efficienza del trattamento.

Gli impianti MBR e la loro gestione (di C. Cantoni; Ingeco, Fontanellato)

A seguire si riporta in breve il punto di vista della società Ing.eco. s.r.l., relativo all'applicazione ed alla gestione della tecnologia M.B.R. in impianti di trattamento acque reflue, frutto dell'esperienza acquisita prevalentemente in campo industriale, maturata con applicazioni di membrane del tipo a fibra cava su differenti tipologie di reflui.

La scelta dell'applicazione del MBR è spesso connessa ad esigenze ed obiettivi che la tecnologia permette di perseguire, anche richiesti dal cliente, sempre correlata ad opportunità commerciali.

In molte occasioni la scelta della tecnologia MBR è scaturita dalla volontà di perseguire il riutilizzo dell'effluente trattato, in altre il rimpiego dell'effluente è stato attuato a seguito dell'elevata qualità dell'acqua ottenuta dal trattamento. Di certo il riutilizzo dell'acqua reflua trattata nell'ambito di un ciclo idrico ottimizzato acquisisce in campo industriale una certa rilevanza, soprattutto negli ultimi anni in cui le aziende perseguono obiettivi di sostenibilità ambientale e ottimizzazione/risparmio dei costi.

La compattezza della struttura impiantistica, possibile con reattori MBR, ha consentito di contenere gli spazi occupati per il trattamento reflui, spesso obiettivo richiesto nel progetto di un nuovo impianto o di upgrading dell'esistente, per non sottrarre aree agli sviluppi aziendali. Il contenimento dei volumi ha consentito di adottare strutture impiantistiche chiuse, consentendo di confinare e governare le emissioni sonore ed odorigene, mitigazioni di impatti indispensabili in realtà incluse in insediamenti industriali.

Preme evidenziare che nella realtà industriale, quotidianamente abituata ad impianti avanzati e tecnologicamente molto automatizzati, un impianto MBR non si qualifica per la sua complessità impiantistica, bensì la tecnologia a membrane è particolarmente apprezzata proprio per la facilità di controllo gestionale e per l'elevato grado di automazione. Il gradimento del cliente è stato appurato soprattutto nei casi in cui l'applicazione della tecnologia MBR è avvenuta nell'ambito di un upgrading di un impianto di depurazione aziendale di tipo convenzionale.

L'elevato grado di automazione e l'impiantistica, caratterizzata da una serie di strumenti per la misura di parametri operativi ed analitici indispensabili per la conduzione dell'impianto MBR, non rappresentano quindi aspetti penalizzati, bensì agevolano la gestione e permettono di avere a disposizione dati operativi e archiviazioni di registrazioni. Questi dati, da analizzare a posteriori, risultano utili a comprendere eventuali disfunzioni sul processo che, nell'ambito industriale, sono associabili frequentemente a scarichi anomali della produzione, a sua volta correlati ad episodi di anomalie sulle linee produttive o generate da procedure errate da parte degli operatori all'interno dello stabilimento.

In tutti i casi di nostra esperienza in campo industriale il sistema di telecontrollo e di telecomando dell'impianto di depurazione MBR è stato integrato nel sistema di controllo generale delle *utilities* dello stabilimento, con comunicazione via reti mobili con dispositivi portatili e gestione anche da remoto.

Il personale addetto alla gestione dell'impianto di depurazione aziendale, quasi sempre interno alla ditta stessa, si è facilmente adattato alla conduzione e manutenzione di un impianto MBR. Dall'esperienza

maturata è stato constatato che la difficoltà maggiore nella formazione ed operatività del personale di conduzione dell'impianto resta legata alle nozioni di controllo del processo biologico e biochimico, e non certo alle nozioni di funzionamento impiantistico della sezione membrane.

Il controllo del processo biologico è comunque reso più semplice dall'adozione del sistema membrane. Questo acquista una particolare rilevanza nell'ambito del trattamento di scarichi industriali, generalmente caratterizzato da variazioni qualitative e quantitative, anche repentine, a cui fa fronte la flessibilità del reattore MBR, il tutto con margine di sicurezza della qualità inviata allo scarico fornita dalla separazione a membrana.

Per tutto quanto esposto l'esperienza maturata su impianti a tecnologia MBR è positiva, in quanto la tecnologia si adatta facilmente in campo industriale a soddisfare esigenze ed obiettivi di qualità, sicurezza e facilità gestionale.

Gli impianti MBR per il trattamento dei reflui dell'industria agroalimentare (di M. Lucchese e A. Merlo; Setam Srl, Flero)

Setam Srl, in qualità sia di società incaricata della progettazione di impianti di depurazione, che di soggetto impegnato nell'assistenza e nella consulenza alla gestione e conduzione degli stessi, ha avuto modo, nell'arco degli ultimi dieci anni, di seguire la realizzazione ed il funzionamento di circa una decina di impianti MBR (basati sull'impiego sia di membrane piane che del tipo a fibra cava), per la quasi totalità applicati al trattamento dei reflui derivanti dall'industria agroalimentare ed in particolare ai settori lattiero-caseario (compresa la lavorazione del siero di latte), vitivinicolo, bakery e produzione di sughi.

Gli impianti in questione si configurano come installazioni di piccola o media dimensione, con portate trattate variabili da alcune decine di m³/d, fino ad un massimo di quasi 1.000 m³/d, e con un carico inquinante in ingresso compreso nell'intervallo 1.000÷25.000 A.E.

Il bilancio complessivo di Setam, relativamente alla funzionalità di queste tipologia di impianti, è senza dubbio positivo: nonostante, infatti, anche gli MBR, al pari di altri sistemi di depurazione biologica ed in particolare degli impianti a fanghi attivi tradizionali, siano affetti da qualche "debolezza", essi si configurano come una concreta alternativa di trattamento. I costi di installazione, ancora un po' più elevati rispetto a quelli dei sistemi tradizionali, ed un maggiore consumo di energia per unità di carico organico trattato (parzialmente compensato da una minore produzione di fango di supero) ne limitano ancora l'applicazione a situazioni particolari, quali l'upgrading di impianti esistenti, la carenza di spazio per le strutture depurative e la volontà di disporre di un effluente finale di elevata qualità, specie ai fini di un possibile riutilizzo.

Di seguito si elencano i principali elementi, desunti dalla suddetta esperienza progettuale e gestionale, che depongono a favore di una installazione MBR e a seguire i possibili punti critici.

I principali punti di forza si possono così sintetizzare:

1. la elevatissima qualità dell'effluente finale, con particolare riferimento al parametro COD. L'assenza di solidi sospesi allo scarico assicura anche grande stabilità nel tempo delle concentrazioni di COD, a differenza degli impianti tradizionali, che, a seconda delle caratteristiche di sedimentabilità della biomassa, sono soggetti a maggiori fluttuazioni da questo punto di vista, pur garantendo rendimenti depurativi soddisfacenti;
2. la resistenza e robustezza delle membrane, che, anche in condizioni di manutenzione non puntualissima o a seguito di trattamenti di pulizia "intensiva", recuperano o conservano capacità di permeazione prossime a quelle di partenza, anche a distanza di qualche anno dall'installazione;
3. le dotazioni accessorie a corredo dell'impianto di filtrazione, quali la grigliatura fine, la strumentazione di misura (ad esempio di portata) e la logica di automazione PLC (unitamente agli

strumenti di misura consente di avere un maggiore controllo dei parametri gestionali, anche mediante la relativamente semplice elaborazione di trend o andamenti temporali). Tali attrezzature, utili anche per impianti tradizionali, tendono a volte ad essere sacrificate nel nome di una maggiore economicità di impianto, ma a scapito di una minore conoscenza dei fondamentali dati di processo e di qualche problema gestionale e manutentivo in più. La loro presenza invece non può essere messa in discussione quando si tratta di impianti MBR.

Per contro, tra le criticità degli impianti MBR si possono annoverare:

1. il fouling delle membrane (aspetto questo universalmente noto), a cui si ovvia con apposite procedure di pulizia e lavaggio previste dai produttori (lavaggi ordinari e straordinari), che, per la singola installazione, possono e devono essere adeguate alle specifiche condizioni operative, in termini di periodicità, durata e scelta dei reagenti di lavaggio. Se si escludono comunque alcune “isole felici”, la conduzione operativa dei sistemi MBR può richiedere anche saltuarie operazioni di estrazione dei moduli membrane dalle vasche di permeazione per l'esecuzione di operazioni di manutenzione e pulizia manuale anche piuttosto impegnative, in termini di tempo e manodopera. Per ridurre al minimo la frequenza di questi interventi e per garantire comunque il funzionamento dell'impianto durante la loro esecuzione, il sistema MBR è opportuno che sia progettato tenendo conto dei seguenti capisaldi:
 - disponibilità di adeguate capacità di accumulo a monte del trattamento biologico;
 - dimensionamento generoso delle superfici di filtrazione;
 - modularità dell'impianto di filtrazione;
 - verifica della possibilità di destinare ad altro trattamento eventuali flussi di acqua con caratteristiche qualitative potenzialmente problematiche per le membrane (ad esempio acque molto dure);
2. l'intasamento e sporcamento della rete aria, aspetto questo da non sottovalutare, perché condizioni di irregolarità nella distribuzione dell'aria al di sotto dei moduli membrane diventano rapidamente causa di impaccamento delle membrane medesime, con conseguente incremento delle TMP in permeazione. In certe situazioni le procedure standard previste dai produttori per mantenere in efficienza i sistemi di distribuzione aria possono risultare insufficienti e richiedere l'implementazione di dispositivi aggiuntivi per contenere tale fenomeno (ad esempio dei veri e propri lavaggi della rete aria con soluzioni di prodotti chimici, come si fa per le membrane). Su questo aspetto e più in generale sulle modalità di fornitura d'aria per lo scouring delle membrane, gli stessi produttori stanno ancora lavorando per conseguire risultati migliorativi sia in termini di consumi energetici che di affidabilità ed efficacia;
3. la necessità di disporre di personale addetto alla conduzione/manutenzione adeguatamente istruito e caratterizzato da una certa “sensibilità”, per evitare che gli effetti di inidonee manovre correttive (si citano, ad esempio, la pulizia delle membrane con pulivapor o il tentativo di disintasarle le stesse immettendo aria compressa, perché situazioni realmente accadute) possano avere rilevanti effetti negativi di carattere economico (danneggiare anche solo parzialmente dei moduli membrane comporta di norma costi di ripristino decisamente superiori a quelli che si accompagnano al funzionamento a secco di una pompa, oppure alla mancata/errata lubrificazione di un soffiatore) o compromettere addirittura la possibilità di esercire l'impianto.

In sintesi, gli impianti MBR, che ancora non costituiscono il sistema principe di trattamento per le limitazioni di cui sopra, oltre che per il superiore impegno economico, rappresentano comunque una possibile e valida alternativa di trattamento, essendo caratterizzati da ottime prestazioni qualitative e da

una buona affidabilità. La loro funzionalità dipende poi in buona parte da una attenta progettazione, che non deve prescindere dalla valutazione delle condizioni al contorno.

4. RECENTI SVILUPPI TECNOLOGICI

4.1 I processi MBR

La filtrazione su membrana e tipologie di membrane esistenti

La filtrazione mediante membrana consente la separazione fisica selettiva di determinati componenti da un fluido in funzione della dimensione dei pori della membrana che agisce da barriera. A partire dal refluo da trattare, detto “alimento”, a concentrazione C_r , si formano 2 flussi separati, quello che attraversa la membrana, detto permeato, a concentrazione $C_p < C_r$, e quello del refluo trattenuto, denominato concentrato o retentato, a concentrazione $C_c > C_r$ (Figura 4.1).

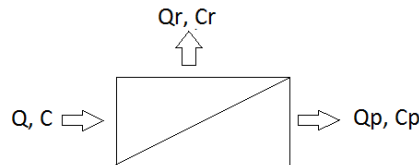


Figura 4.1: Principi di funzionamento della filtrazione su membrana

I quattro processi di separazione a membrana più ampiamente utilizzati sono la microfiltrazione (MF), l'ultrafiltrazione (UF), nanofiltrazione (NF) e l'osmosi inversa (RO). Tale classificazione delle membrane può essere effettuata in base alla dimensione dei pori che può essere definita in termini di diametro efficace equivalente dei pori, normalmente in μm , o in massa equivalente, in Dalton (Da), della più piccola molecola che la membrana è in grado di respingere, dove il Dalton rappresenta la massa di un atomo di idrogeno (Judd, 2011). In Figura 4.2 è riportata la classificazione delle diverse tipologie di membrane unitamente alle categorie di contaminanti che esse sono in grado di rimuovere.

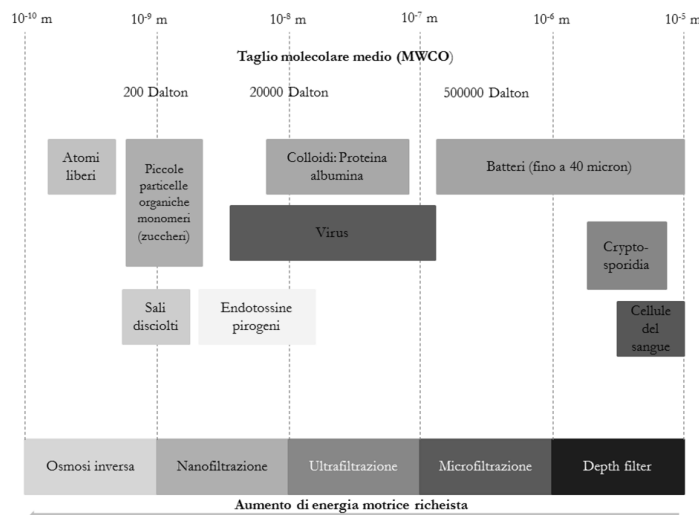


Figura 4.2: Classificazione delle membrane in funzione del diametro dei pori (adattato da Stephenson et al., 2000)

Per tali tipologie di membrane identificate e applicate principalmente per il trattamento delle acque reflue, la forza motrice che consente la rimozione dei contaminanti dall'acqua è la differenza di pressione definita come pressione di transmembrana (ΔP). La porosità di una membrana influenza, pertanto, insieme alla pressione di esercizio, l'efficienza del processo depurativo.

I principali materiali di cui sono costituite le membrane sono quelli polimerici (organici), quali acetato di cellulosa, polipropilene, polietilene, polivinilidene di cloruro, e quelli ceramici (inorganici), caratterizzati da

una maggiore resistenza all'attacco chimico ma anche da costi più elevati. Più della metà dei prodotti dei moduli MBR offerti è in polivinildenfluoruro (PVDF) o in polietersulfone (PES). La combinazione di buona resistenza chimica e struttura superficiale ha determinato la prevalenza di tali materiali polimerici. In genere, le membrane aventi come forza motrice la pressione tendono ad essere anisotrope con uno strato superficiale selettivo mentre lo strato sottostante fornisce la stabilità meccanica (Stephenson et al., 2000). Le membrane sono, solitamente, progettate per avere un design che ne facilita il lavaggio e che ne permette la modularizzazione, per avere una certa resistenza all'aggressione termica e chimica dovute a condizioni estreme di temperatura, pH e/o di concentrazioni di ossidanti che normalmente sorgono quando la membrana viene pulita chimicamente.

In base alle caratteristiche geometriche, in particolare geometria piana o cilindrica, le membrane vengono distinte in (Radjenovic et al, 2008):

- lastra piana (flat sheet, FS)
- fibra cava (hallow fibre, HF)
- multitubo (multitubular, MT)
- tubo capillare (capillar tube, CT)
- cartuccia filtrante pieghettata (pleated filter cartridge, FC)
- spirale (spiral wound, SW).

Di questa classificazione, solo le prime tre sono utilizzabili per i reattori MBR in quanto i moduli di membrane devono consentire la turbolenza, attraverso il passaggio dell'acqua di alimentazione o di una miscela aria / acqua lungo la superficie della membrana al fine di facilitare il passaggio del permeato attraverso di essa ed un effettivo e regolare lavaggio chimico (Judd et al., 2011).

Le membrane piane hanno una configurazione planare e sono principalmente rettangolari, semirigide anche se alcuni prodotti sono più flessibili e montati su telaio rigido. I singoli elementi vengono definiti come foglio, cartuccia o pannello. L'acqua fluisce dall'esterno all'interno del pannello, flusso OUT-IN (Figura 4.3), ed il permeato è raccolto dal tubo di uscita o da un collettore laterale centrale. Canali di diffusione dell'aria sono distribuiti al sotto del modulo di membrane. Le membrane piane sono caratterizzate da un minor consumo di reagenti chimici, da una maggiore semplicità di impianto, non necessitano generalmente di controlavaggio ma, al contempo, hanno una maggiore domanda specifica di aerazione e aree di impronta superiori.

Le membrane a fibre cave sono normalmente orientate verticalmente con aeratori integrati. L'elemento è indicato comunemente come modulo e le fibre riescono a muoversi lateralmente per effetto del flusso d'aria. L'acqua fluisce dall'esterno all'interno delle singole fibre, flusso OUT-IN (Figura 4.3), e viene raccolta in una camera o in un collettore posto all'estremità delle fibre. Le membrane a fibre cave sono caratterizzate da aree di impronta e consumi energetici inferiori, per la minore domanda specifica di aerazione.

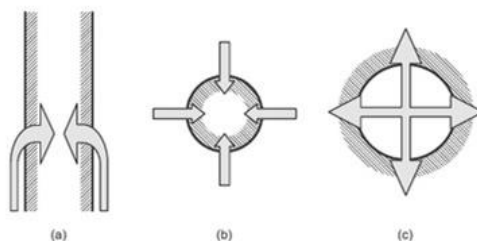


Figura 4.3: Rappresentazione schematica del flusso attraverso le membrane: (a) FS, (b) HF e (c) CT o MT (Judd, 2011)

Le membrane tubolari sono attualmente gli unici prodotti ad essere standardizzati, e sono utilizzate per configurazione side-stream. Un modulo comprende un fascio di tubi all'interno di un involucro cilindrico di dimensioni standard, spesso 200 mm di diametro, e l'acqua scorre dall'interno all'esterno dei tubi

membrana, con flusso IN-OUT (Figura 4.3). Le membrane multitubo lavorano a flussi più elevate ed ad alti valori di MLSS con maggiori consumi energetici.

I parametri, pertanto, che le caratterizzano sono il diametro del tubo per le MT, le distanze tra i filamenti per le HF e la larghezza dei canali per le FS. Ognuna delle configurazioni ha la tendenza ad essere più adatta per applicazioni particolari.

I processi a membrana convenzionali con permeazione del liquido possono operare in due modalità (Judd S., 2011):

- filtrazione dead-end (Figura 4.4a) quando la direzione del flusso è ortogonale al mezzo filtrante e non è presente un flusso di concentrato. Dal momento che non vi è alcuna corrente di retentato il processo è definito a flusso totale (dead-end) o fondo cieco;
- filtrazione cross-flow (Figura 4.4b) quando la direzione del flusso è parallela alla superficie della membrana e si ha la formazione di una corrente di retentato o concentrato, nel quale si accumulano le sostanze trattenute, e di un permeato costituito dal liquido che ha attraversato la membrana.

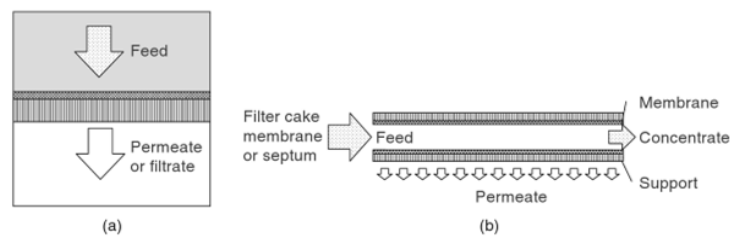


Figura 4.4: Filtrazione dead-end (a) e cross-flow (b) (adattata da Judd, 2011)

Nella filtrazione dead-end si verifica la formazione di uno strato superficiale sulla superficie della membrana che funge a sua volta da mezzo filtrante (filter cake), che determina una riduzione del flusso ed un incremento della resistenza proporzionale allo spessore dello strato. Nella filtrazione cross-flow i depositi sulla membrana sono limitati a causa del moto del fluido tangenziale alla superficie della membrana stessa. Per far avvenire ciò sono, però, necessarie velocità di cross-flow elevate con un conseguente incremento dei costi.

Configurazione dei bioreattori a membrane

In funzione delle modalità di installazione dei moduli di membrane, sono distinguibili tre configurazioni impiantistiche alternative: side stream, integrata o sommersa e mista.

Nella configurazione side-stream (Figura 4.5) le membrane sono installate esternamente alle vasche di ossidazione biologica, dalle quali giunge in pressione la miscela aerata e nelle quali viene ricircolato parte del retentato. La miscela aerata è, quindi, pompata attraverso le membrane in modalità cross-flow ad elevate pressioni (2-3 bar).

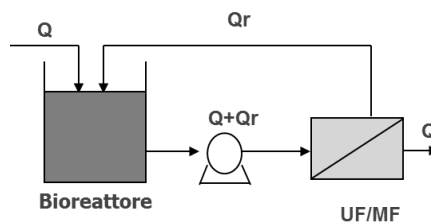


Figura 4.5: Configurazione side-stream

Nella configurazione sommersa (Figura 4.6) i moduli di membrana sono installati all'interno delle vasche di ossidazione, non vi è ricircolo del retentato ma il solo flusso di permeato che viene aspirato dalla membrana.

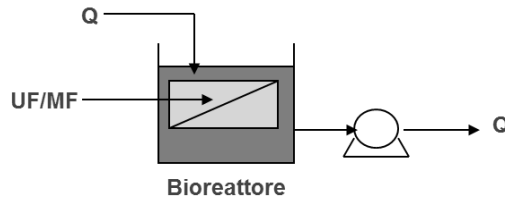


Figura 4.6: Configurazione sommersa

Nella configurazione mista (Figura 4.7) le membrane sono poste in unità differenti dalle vasche di ossidazione a fanghi attivi. Parte del retentato è ricircolato nelle vasche di ossidazione mentre il permeato è aspirato dalla membrana.

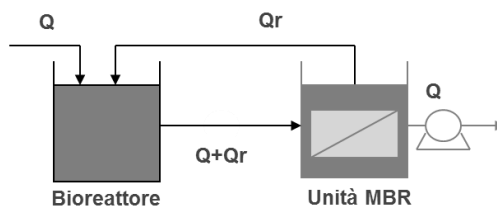


Figura 4.7: Configurazione mista

La configurazione sommersa è normalmente preferita alla configurazione side-stream per la domanda inferiore di energia che la caratterizza. La configurazione side-stream, per la minore area d'impronta e per la sua maggiore flessibilità operativa, è impiegata maggiormente per applicazioni industriali. La configurazione mista coniuga i vantaggi di entrambe le configurazioni.

Parametri operativi dei reattori MBR

Differenti sono i parametri operativi da monitorare in un bioreattore a membrane al fine di verificare il funzionamento del processo, quali il flusso del permeato per unità di superficie filtrante (J), la pressione di transmembrana (TMP) e la temperatura che incide sulle prestazioni del sistema a causa della variazione della viscosità dell'acqua.

La portata di permeato che attraversa l'unità di superficie delle membrane nell'unità di tempo costituisce il flusso di permeato J e si misura in $L/m^2 h$. Il flusso può essere espresso come (Stephenson et al., 2000):

$$J = \frac{TMP}{\mu R_m}$$

Dove μ è la viscosità del fluido e R_m è la resistenza della membrana in m^{-1} . La pressione di transmembrana è determinata dalla differenza di pressione tra i due lati della membrana a seguito della resistenza esercitata dalla membrana stessa. La pressione di transmembrana è differente in funzione del tipo di flusso. Nel caso di flusso cross-flow, la pressione è pari a:

$$TMP = \frac{(P_f - P_c)}{2} - P_p$$

dove:

- P_f è la pressione del flusso alimentato nel reattore;
- P_c è la pressione del flusso di concentrato;
- P_p è la pressione del flusso di permeato.

Nel caso di flusso dead-end, invece, la pressione risulta essere:

$$TMP = P_f - P_c$$

dove:

- P_f è la pressione del flusso alimentato nel reattore;
- P_c è la pressione del flusso di concentrato.

Generalmente i bioreattori a membrane operano con flussi compresi tra 15 e 35 L/(m² h).

Il fattore di permeazione o di conversione esprime la percentuale di permeato ottenuto rispetto alla portata di alimentazione ed è definito come:

$$F_p = \frac{Q_p}{Q_{IN}} \cdot 100$$

dove Q_{in} corrisponde alla portata di alimentazione (m³/h) ed Q_p alla portata di permeato (m³/h). Essendo la membrana una barriera selettiva consente il passaggio di determinate sostanze bloccando altre. Questa proprietà corrisponde alla reiezione del soluto, ossia:

$$SR = \frac{1 - C_p}{C} \cdot 100$$

dove C è la concentrazione in ingresso al reattore e C_p è la concentrazione dei soluti nella corrente di permeato.

E' necessario, altresì, mantenere una determinata concentrazione di ossigeno disciolto (OD) in vasca. Bassi livelli di OD riducono l'idrofobicità cellulare e quindi provocano il deterioramento del fiocco (Le-Clech et al., 2006), ne conseguono la deflocculazione e la riduzione della filtrabilità. Il sistema di aerazione deve, difatti, consentire le condizioni aerobiche nel reattore ed, al contempo, mantenere condizioni di miscelazione completa e limitare il fenomeno del fouling. Generalmente i bioreattori a membrane operano con una domanda specifica d'aerazione, definita come rapporto tra la portata d'aerazione e la superficie complessiva della membrana (SADm) e come rapporto tra la portata d'aerazione e la portata di permeato (SADp), compresa tra 0,3-1,5 Nm³/(m² h) per la SADm e tra 10 e 50 Nm³/m³ per la SADp (Judd, 2011).

4.2 Mercato attuale degli MBR

Negli ultimi anni, il continuo e sempre più crescente interesse verso i reattori biologici a membrane, ha contribuito all'espansione in campo commerciale ed economico di differenti aziende e case costruttrici. Ciascuna di esse ha immesso sul mercato moduli di membrane differenti tra di loro per vari aspetti. Essi si distinguono in base alla configurazione, al tipo di materiale polimerico, alla dimensione dei pori e per le fibre cave, in base al diametro del filamento. Quello che emerge da un'analisi di mercato è che il tempo che intercorre tra il lancio di un prodotto e l'installazione di un grande impianto MBR (> 10.000 m³ d⁻¹) realizzato utilizzando quello stesso prodotto è diminuito in modo significativo nel corso degli ultimi 10 anni, ciò fa riflettere sulla crescente accettazione riposta nella tecnologia MBR (Judd, 2011). A livello internazionale si assiste ad una forte competizione fra le maggiori industrie produttrici per l'immissione sul mercato di membrane nuove e sempre più performanti. Le membrane maggiormente utilizzate in ambito commerciale sono a fibra cava (HF), piane (FS) o tubolari (MT). Generalmente, le membrane piane sono utilizzate principalmente per MBR sommersi sia per applicazioni industriali che civili, dove sono favorite per piccole installazioni sulla base della loro semplicità operativa. Anche le membrane a fibra cava sono quasi esclusivamente impiegate per MBR in configurazione sommersa, sia per applicazioni industriali che civili, dove sono preferite per installazioni più grandi a causa della loro richiesta inferiore di energia per l'aerazione. I sistemi multitubo sono spesso impiegati per il trattamento

di piccole portate in installazioni industriali, sulla base della loro robustezza e flessibilità operativa e di controllo.

La tabella 4.1 elenca i principali fornitori di moduli di membrane in funzione della configurazione e della tipologia di membrana, con alcuni come Mitsubishi Rayon e Huber che forniscono più di un prodotto per una singola configurazione.

Tabella 4.1: Principali aziende produttrici di impianti MBR (Santos e Judd, 2010).

Configurazione sommersa		Configurazione side - stream
<i>Membrane piane</i>	<i>Membrane a fibre cave</i>	<i>Membrane tubolari/ multicanale</i>
A3-MaxFlow ^{DE} Alfa Laval - Hollow Sheet ^{SE} Brightwater - MEMBRIGHT [®] IRL Colloide - SubSnake ^{NIR} Huber -VRM [®] ; ClearBox [®] Biomem ^{DE} Jiangsu Lantian Peier Membrane ^{CN} KOReD - Neofil ^{KR} Kubota - ES/EK ^{JP} MICRODYN-NADIR -BioCel [®] DE Pure Envitech – ENVIS ^{KR} Shanghai Megavision Memb. Eng. & Tech. ^{CN} Shanghai SINAP Membrane Sci. & Tech. ^{CN} Toray -MEMBRAY [®] TMR ^{JP} Vina Filter - VINAP ^{CN} Weise Water Systems GmbH - MicroClear [®] ^{DE}	Asahi Kasei - Microza TM ^{JP} Beijing Origin Water Technology ^{CN} Ecologix – EcoFlon TM , EcoFil TM ^{CN} ENE – SuperMAK ^{KR} GE Zenon – ZeeWeed [®] ^{NA} Hangzhou H-Filtration Memb. Tech. & Eng. – MR ^{CN} Koch Membrane Systems – PURON [®] ^{NA} Korea Membrane Separations – KSMBR ^{KR} Litree Purifying Technology – LH3 ^{CN} Memstar Tech. – SMM ^{SG} Micronet Porous Fibers –Micronet [®] ^{SP} Mitsubishi Rayon Eng. – Sterapore SUR TM ; SADP TM ^{JP} Tianjin Motimo – Flat Plat FPII ^{CN} Philos ^{KR} SENUO Filtration Technology – SENUOFIL ^{CN} Shanghai Dehong Biology Medicine Sci. & Tech. Dev. ^{CN} MEMCOR[®] , an Evoqua brand. – MemPulse TM ^{DE} Sumitomo – POREFLON TM ^{JP} Zena Membranes – P5 ^{CZ}	Berghof – HyPerm-AE; HyPerflux ^{DE} Norit X-Flow – F4385, F5385 ^{NL} Orelis Environment – Kerasep [®] ; Pleiade [®] ^{FR} MEMOS – MEMCROSS ^{DE}
		<i>Membrane a fibre cave</i>
		Ultra-flo – Ultra-flo [®] ^{SG} Polymem – IMMEM ^{FR}
		<i>Membrane ceramiche piane</i>
		Kerafol ^{DE} Grundfos – Biobooster ^{DK}

Kubota e GE/Zenon hanno commercializzato i primi impianti MBR negli anni '90 e conservano ancora oggi il loro predominio sul mercato globale per il trattamento di reflui civili. Nuovi produttori stanno emergendo e acquisendo quote di mercato con la nascita all'incirca di altre 45 aziende produttrici di MBR dal 2009.

4.3 Recenti sviluppi tecnologici

Numerose novità di tipo tecnologico sono state introdotte nell'ambito dei sistemi MBR in quest'ultimo decennio, in conseguenza del rapido sviluppo e della diffusione che tale tecnologia ha avuto nel settore della depurazione delle acque.

Le novità introdotte riguardano in sintesi:

- a) le tipologie e le configurazioni dei moduli di membrane utilizzabili;
- b) gli interventi per migliorare le prestazioni dei sistemi MBR;
- c) le nuove configurazioni e tipologie di processo in cui i moduli di membrane sono utilizzati.

Appresso si danno informazioni su ciascuno dei temi prima definiti.

4.3.1 Sviluppi nei moduli di membrane

E' noto che le membrane possono essere classificate in base al tipo di materiale utilizzato, alla struttura della stessa e alla configurazione adottata per alloggiare le membrane all'interno dei *moduli*, indispensabile per poter ottenere in poco spazio elevate superfici di filtrazione, necessarie per il trattamento anche di contenute portate di alimento.

I materiali adoperati per la realizzazione delle membrane sono, come detto, di duplice tipo: polimerici e ceramici. Le membrane polimeriche sono anisotrope e costituite dall'accoppiamento di uno strato sottile superficiale, che garantisce le caratteristiche perm-selettive della membrana, e uno sottostante più spesso e poroso, che invece ne garantisce la resistenza meccanica.

Invece, per quanto riguarda la struttura dei moduli, va evidenziato che i moduli a lastra piane e a fibre cave sono utilizzabili in entrambe le configurazioni (a membrane sommerse e side-stream), mentre le tubolari sono utilizzabili solo nella configurazione side-stream.

Membrane piane

Le membrane piane hanno configurazione planare, con forma tipicamente rettangolare (a "pannello"). Esistono tuttavia anche configurazioni diverse, che consentono la rotazione delle membrane all'interno del reattore biologico (Figura 4.8).

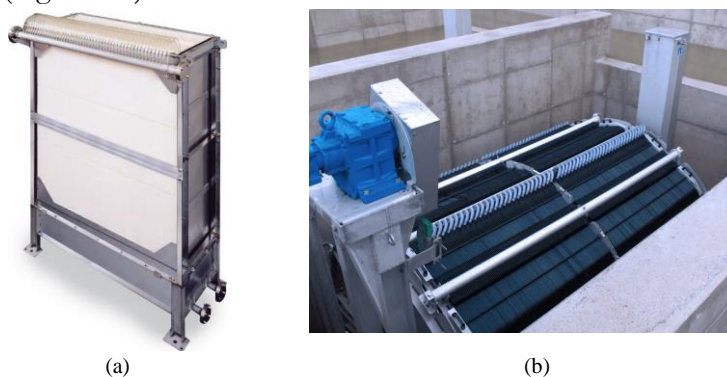


Figura 4.8: Membrane piane in configurazione planare (a) e girevole (b) (doc. Toray e Huber)

La maggior parte dei pannelli in commercio sono rigidi o semi-rigidi, ottenuti mediante la saldatura di due membrane al telaio fisso perimetrale. Il flusso è tipicamente out-in. Più pannelli sono assemblati insieme per formare un modulo, con un numero di pannelli che può variare da qualche decina a diverse centinaia. Alla sommità di ogni cartuccia filtrante è previsto un tubo per la suzione del permeato. Il permeato estratto da ogni pannello è avviato ad un collettore generale collegato alla pompa di suzione. Un singolo modulo è composto da due parti sovrapposte; la parte superiore costituisce la zona di alloggiamento delle membrane, mentre la parte inferiore costituisce la zona di risalita per le bolle d'aria

grossolane, atte alla pulizia meccanica della superficie filtrante. Il modulo è dotato di un collettore perimetrale dotato di fori per la fornitura di aria, necessaria alla pulizia delle membrane. Il modulo ha struttura portante in acciaio inox. A seconda dell'applicazione le membrane possono essere assemblate in moduli di dimensioni differenti, anche in modalità "double-deck", ossia con due moduli montati uno sull'altro.

Le membrane possono essere immerse nel comparto di ossidazione ovvero in un apposito comparto. Le membrane piane sono utilizzate quasi esclusivamente in sistemi MBR con configurazione sommersa, sia per applicazioni su reflui di origine industriale sia per applicazioni con reflui civili, dove sono a volte favorite nelle piccole installazioni per la semplicità operativa che le contraddistingue.

Non mancano comunque esempi applicativi di impianti di grossa potenzialità: ad esempio, l'impianto di Swanage (UK) e Al Ansab in Oman.

Membrane a fibre cave

Nei moduli a fibre cave la filtrazione avviene dall'esterno verso l'interno della fibra. L'estrazione del permeato può avvenire solo alla base o da entrambe le estremità del modulo. Si utilizzano in genere membrane di ultra filtrazione (UF, con dimensione dei pori prossima a 0.04μ). Più moduli vengono raggruppati in modo da formare cassette e il permeato estratto da ciascuna cassetta viene inviato ad un collettore a sua volta connesso alla pompa di suzione. I diffusori d'aria sono integrati o con il singolo modulo o con il telaio. I fasci di fibre sono progettati con distanze prestabilite tra le singole fibre e con un gioco nel movimento laterale delle stesse, per ottimizzare la circolazione del fango attivo all'interno del reattore e per prevenire l'occlusione/intasamento (*clogging*) del modulo stesso.

Le membrane a fibra cava sono generalmente orientate verticalmente (Figura 4.9a). Ogni modulo raccoglie un elevato numero di fibre cave, usualmente vincolate sia inferiormente sia superiormente ad un telaio fisso. Recentemente sono state messi a punto moduli che prevedono il solo fissaggio inferiore, lasciando le estremità superiori libere di muoversi (Figura 4.9b).



Figura 4.9: Membrane a fibre cave, con fibre fissate su entrambi i lati (a) e fibre fissate solo inferiormente (b) (doc. GE e Koch Membrane Systems Inc.)

Per quanto riguarda i materiali, sono utilizzati diversi polimeri. A titolo di esempio, le fibre dei moduli GE sono realizzate con un polimero proprietario, lavorato in modo tale da conferire alla membrana una struttura asimmetrica, idrofila, non-ionica e resistente al cloro.

Lo schema di processo più diffuso con membrane a fibre cave prevede l'immersione delle membrane all'interno di uno specifico comparto di filtrazione o, nei piccoli impianti, direttamente nel comparto biologico.

Le membrane a fibra cava sono utilizzate quasi esclusivamente per MBR con configurazione sommersa, sia per applicazioni industriali sia civili. Negli impianti ad elevata potenzialità si osserva una prevalenza di soluzioni basate su fibra cava, per il limitato "footprint" e per la moderata domanda di energia necessaria per l'aerazione.

Membrane tubolari

Le membrane tubolari sono utilizzate quasi esclusivamente per i reattori side-stream. In tale configurazione le membrane tubolari sono allo stato attuale le uniche che possono avvalersi di un casing standardizzato, in cui si possono intercambiare i moduli di diversi produttori.

Un modulo comprende un fascio di tubi all'interno di un involucro cilindrico di dimensioni standard (pari a circa 200 mm di diametro). Il flusso di permeato è di tipo in-out. I moduli possono essere gestiti sia applicando una pressione positiva (pompaggio), sia applicando una depressione. Nei sistemi side-stream con pompaggio i moduli sono posti in serie, per consentire l'impiego di un'elevata superficie filtrante. Si prevede altresì una serie di loops orizzontali (normalmente 2-4 in tutto) in una disposizione a serpentina. In alternativa, alcuni produttori propongono sistemi side-stream di tipo air lift. In tal caso i moduli sono discreti, verticalmente orientati e generalmente più lunghi di quelli utilizzati per i sistemi con pompaggio. I sistemi side stream con pompaggio sono spesso preferiti nel caso di trattamento di piccole portate di origine industriale, grazie alle caratteristiche di robustezza, flessibilità e possibilità di controllo operativo che tali soluzioni offrono. Per tale configurazione esiste anche l'alternativa tecnologica che fa impiego di membrane ceramiche, particolarmente indicate per reflui aggressivi e/o ad altra temperatura, condizioni non sempre idonee per le membrane polimeriche.

La configurazione con moduli con air lift viene spesso proposta nei piccoli impianti civili o negli impianti industriali come alternativa ai sistemi immersi a fibre cave o a pannelli piani.

4.3.2 Interventi per migliorare le prestazioni dei sistemi MBR

A questa tematica possono essere ricondotte alcune forme di intervento mirate a migliorare le prestazioni delle membrane, sia per quanto riguarda il meccanismo di filtrazione che ne è alla base, sia per prevenire e limitare i fenomeni di fouling.

Soluzioni per incrementare l'azione degli sforzi di taglio sulla membrana

Sono state sviluppate soluzioni per sfruttare l'energia contenuta nel flusso incrociato pur mantenendo bassa la velocità a flusso incrociato (CFV), incrementando le sollecitazioni di taglio per consentire l'aumento del flusso di permeato. Un esempio tipo di applicazione di queste è stato implementato nelle membrane tubolari a fibre cave che vengono ora dotate di una spirale elicoidale avvolta all'interno della membrana (sistema *Helix*, Figura 4.10). Questa è realizzata con lo stesso materiale della membrana che la circonda, partecipa alla filtrazione e subisce anch'essa il controlavaggio.

L'azione indotta dalla presenza della spirale produce la formazione di flussi secondari e l'aumento localizzato della velocità alla parete interna.

Entrambi questi meccanismi, che agiscono sinergicamente, hanno l'effetto di aumentare la tensione tangenziale alla parete interna della membrana e quindi consentono di potere incrementare il flusso. Infatti, con tale accorgimento, si possono applicare flussi di circa il 15% più elevati di quelli usuali.

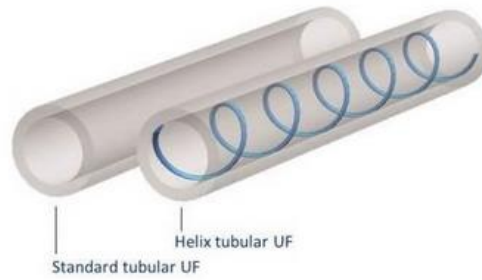


Figura 4.10: Particolare membrane a fibre cave con sistema Helix

Soluzioni per il miglioramento dell'azione anti-fouling

L'elevata portata d'aria necessaria per lo scouring delle membrane immerse costituisce una delle voci di maggiore costo operativo di un impianto MBR.

Nel corso degli ultimi anni diverse innovazioni tecnologiche sono state proposte per diminuire l'energia necessaria per l'air-scouring, grazie alle quali sono stati raggiunti risultati anche dell'ordine del 75% di riduzione, passando da 1,2 m³ aria/m³ di permeato a 0,3 m³ aria/m³ di permeato.

Le tecniche adottate si differenziano sostanzialmente per la modalità con cui le bolle d'aria vengono erogate e per come queste scorrono sulle pareti delle membrane, potendosi ottenere in entrambi i casi effetti positivi con portare d'aria erogate inferiori.

In particolare, nel primo caso, l'aria a bolle fini viene erogata a impulsi, cosicché in un breve tempo una consistente massa d'aria investe le superfici delle pareti, compensando in tal modo la bassa energia, e quindi lo sforzo di taglio, prodotta da una singola bolla. Nel secondo, viene invece imposta la formazione di bolle di maggiore dimensione (bolle grosse), che strisciano sulle superfici delle membrane in modalità plug-flow. In tal modo, le bolle si muovono generando flussi secondari provocando la rottura del cake e, successivamente, la miscelazione locale vicino alla superficie della membrana, causando in tal modo la formazione di sforzi di taglio elevati e quindi un maggiore distacco di solidi dalla superficie della membrana.

I due modi d'intervento sono stati applicati di recente anche in modo congiunto, con sistemi pulsanti a bolle grosse striscianti; ne è un esempio il sistema PURON-PULSION della Koch Membrane Systems, Inc. (Figura 4.11).

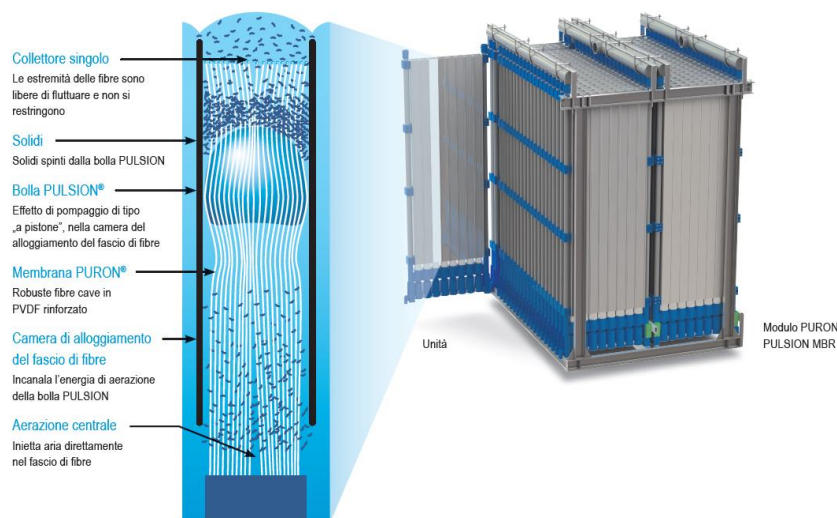


Figura 4.11: Moduli di membrane a fibre cave con sistema PURON-PULSION (doc. Koch Membrane Systems, Inc.)

Un'altra strategia innovativa per il controllo del *fouling* è data dall'aggiunta di piccoli supporti all'interno dei bioreattori a membrane che consentono un lavaggio meccanico in quanto:

- i supporti raschiano la superficie della membrana;
- la turbolenza indotta dai supporti può migliorare il trasporto dei foulants lontano dalla superficie della membrana stessa;
- i supporti creano una vibrazione della membrane ad alta frequenza.

Microdyn-Nadir ha brevettato i moduli di membrane piane BIO-CEL[®] che subiscono una pulizia meccanica continua brevettata ed effettuata grazie a piccoli granuli in materiale plastico (BIO-CEL[®]-MCP) con diametro che varia da 4 a 6 mm (Figura 4.12). I granuli vengono aggiunti nella vasca di filtrazione e sono trasportati verso l'alto grazie all'aria insufflata dai diffusori, in tal modo urtando contro la superficie delle membrane riescono a rimuovere lo strato superficiale di fango. Il valore iniziale di concentrazione dei granuli MCP oscilla tra 4 e 10 kg/m³ di fango contenuto nella vasca di filtrazione. I granuli utilizzati sono stati progettati per un uso permanente e vengono trattenuti nel reattore attraverso un sistema di separazione.

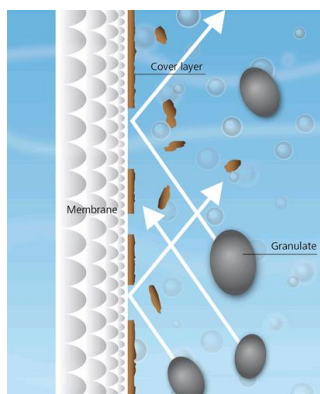


Figura4.12: Pulizia meccanica BIO-CEL[®]-MCP con granuli (<http://www.microdyn-nadir.com/>)

Un'ulteriore strategia per limitare il *fouling* consiste nella vibrazione e rotazione delle membrane che può generare un'elevata azione tangenziale o turbolenza sulla superficie della membrana stessa, consentendo una pulizia in linea delle membrane (Prip Beier and Jonsson, 2009). Attualmente, i sistemi di vibrazione utilizzati includono, ad esempio, il processo avanzato di vibrazione tangenziale (VSEP), moduli HF vibranti (VHFM) e moduli FS con vibrazione torsionale (Bilad et al., 2012).

Sono stati anche industrializzati moduli di membrane rotanti (Wang et al., 2014). Un prodotto commercializzato dalla Grundfos, BioBooster-Rotation Cross-flow (RCF) MBR system, è disponibile sul mercato (Bentzen et al., 2012). Huber realizza moduli di membrane piane di ultrafiltrazione rotanti, Membrane Filtration VRM[®] (Figura 4.13), con una riduzione dei consumi energetici attraverso la pulizia sequenziale delle membrane rotanti che prevede l'utilizzo di un flusso d'aria altamente efficace agente su un sesto o ottavo della superficie immersa delle membrane per ciascun ciclo.

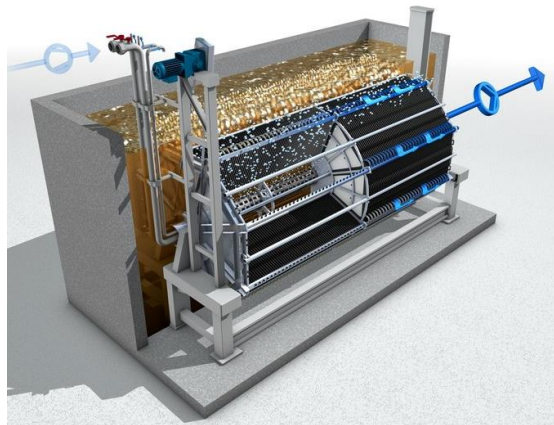


Figura 4.13: Moduli di membrane piane di ultrafiltrazione rotanti, Membrane Filtration VRM® della Huber (<http://www.huber.de/>)

Miglioramento del sistema di distribuzione dell'aria

Al fine di ridurre i consumi energetici legati all'aerazione, diverse aziende produttrici di impianti MBR hanno sviluppato sistemi innovati di distribuzione dell'aria. Ciò ha consentito di ottenere valori della domanda specifica di aerazione (SAD) significativamente inferiori a $10 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ di permeato estratto per acque reflue civili. Studi recenti hanno mostrato come tale valore possa essere ridotto anche al di sotto di $5 \text{ Nm}^3/\text{m}^3$ attraverso l'applicazione di un'aerazione intermittente o riprogettando la geometria dei moduli di membrane.

GE ha realizzato un sistema di distribuzione dell'aria, LEAPmbr Aeration Technology (Figura 4.14a), che impiega bolle grandi rilasciate ad intervalli di tempo brevi con una migliore azione di "scouring". Il flusso d'aria è continuo ma l'aerazione è controllata variando la portata del flusso d'aria. Tale sistema è più efficiente in quanto riduce il flusso di aerazione ed anche il compressore può essere scelto di dimensioni inferiori.

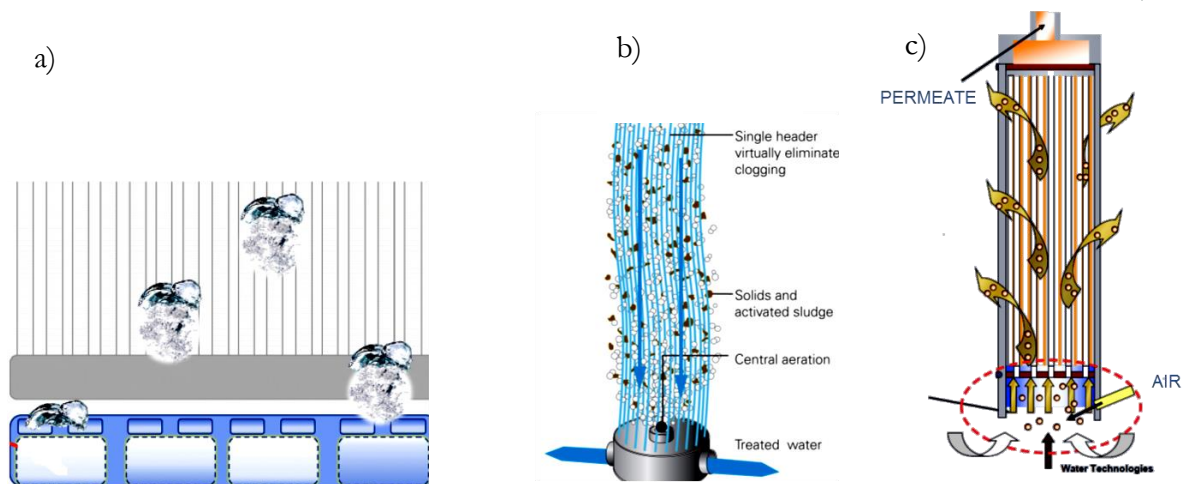


Figura 4.14: Sistemi di distribuzione dell'aria: a) LEAPmbr Aeration Technology-GE (<http://www.gewater.com>); b) PURON Single Header Design-Koch membrane systems (www.kochmembrane.com); c) Air scouring MemPulse™ - Evoqua (<http://www.evoqua.com>)

Koch membrane systems, nei moduli PURON MBR Series (Figura 4.14b), ha sviluppato un sistema di aerazione con ugello al centro del fascio di fibre in grado di sviluppare un'azione di scouring sull'intera lunghezza della fibra, minimizzando i consumi energetici.

Nella tecnologia MemPulse™ di Evoqua (Figura 4.14c), invece, la miscela di aria e mixed liquor viene introdotta alla base dei moduli attraverso un sistema di alimentazione bi-fase che permette di ottenere

un'efficiente azione di agitazione e pulizia, dal momento che il mixed liquor sale verso l'alto lambendo tangenzialmente la superficie delle membrane, provvedendo in tal modo ad un efficace "air scouring" della superficie delle membrane stesse e prevenendo l'accumulo e la polarizzazione di solidi sulle stesse. Il flusso uniforme di fluido impedisce, altresì, l'eccessiva formazione di solidi sospesi sulle pareti delle fibre. Attraverso la distribuzione uniforme del mixed liquor si ottengono condizioni ottimali di funzionamento del sistema a membrane.

Si converte, pertanto, un flusso continuo di aria in una pulsazione. Come risultato si ottiene un incremento dell'efficienza di aerazione (air scouring) ed una generale riduzione del consumo energetico richiesto per la somministrazione di aria.

Incremento della vita utile delle membrane

La vita utile delle membrane è limitata ma evidenze sperimentali testimoniano che il deterioramento delle membrane è accelerato da lavaggi eccessivi con agenti chimici ossidanti. La tendenza attuale è, quindi, di aumentare la frequenza dei lavaggi chimici con l'utilizzo di soluzioni di ipoclorito di sodio a basse concentrazioni 2-8 volte al mese per mantenere la permeabilità o 1-2 volte all'anno con soluzioni più concentrate al fine di recuperare la permeabilità. E' preferibile, altresì, mantenere una qualità costante dell'acqua reflua influente. Il miglioramento del materiale costituente le membrane ha consentito un incremento della vita utile delle stesse fino a superare una decade con garanzie offerte da alcuni produttori anche fino a 10 anni.

4.3.3 Sviluppi nelle configurazioni degli impianti e nelle tipologie di processo

Appresso sono descritte alcune configurazioni particolari di sistemi MBR, aventi differenti obiettivi. Questi sono indirizzati verso il miglioramento delle prestazioni (quali p.e. quelli mirati a contenere la variazione delle portate influenti), o verso l'uso delle membrane in configurazione diverse da quelle per le quali gli MBR sono stati originariamente concepiti (p.e. in reattori SBR o in processi a biomassa mista o anaerobici).

Configurazioni mirate alla limitazione della variabilità della portata

Al fine di limitare il più possibile le variazioni delle portate alimentate alle membrane sia in tempo secco, sia ancor più in tempo di pioggia, e quindi di ridurre la superficie delle membrane, è possibile fare ricorso a diverse configurazioni d'impianto. In particolare, sono possibili tre configurazioni:

- a) *reattore biologico con livello variabile*, in modo che questo funga da compenso tra le portate massime e minime in arrivo al reattore stesso;
- b) *impianto con vasca di equalizzazione* in parallelo, a cui sono avviate a mezzo di uno scaricatore di piena le portate in eccesso rispetto a quella massima ammessa; il volume così accumulato in vasca verrà avviato all'impianto durante il periodo in cui esso è alimentato con portate inferiori al valore medio (Figura 4.15);
- c) *impianto "ibrido"*, costituito dall'accoppiamento in serie o parallelo di una linea MBR, alimentata con portata costante, e una CAS o chimico-fisica, a cui sono avviate le portate in eccesso rispetto al loro valor medio (Figura 4.16); nel caso della soluzione in serie, l'impianto MBR è in coda ed è by-passato dalle portate in esubero già trattate con la linea che lo precede; in entrambi i casi, quindi, la qualità complessiva del refluo trattato deriverà dalla media pesata dei due flussi in uscita dall'impianto MBR e da quello convenzionale (Brepols et al, 2008; WEF, 2012).

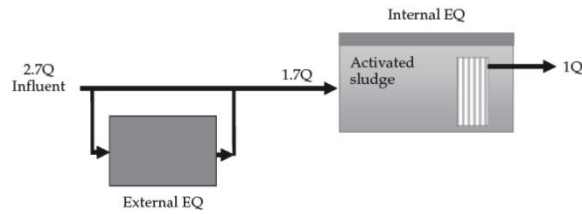


Figura 4.15: Configurazione con vasca di equalizzazione e reattore a livello variabile (da WEF, 2012)

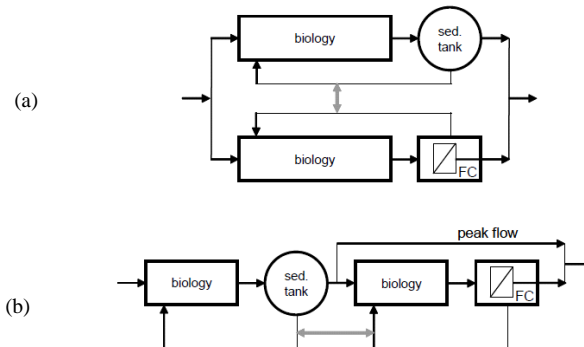


Figura 4.16: Impianto ibrido con accoppiamento in serie (a) e in parallelo (b) (da Brepols et al., 2008)

Configurazioni MB-MBR (Moving Bed-MBR)

Recentemente è stata proposta la combinazione dei sistemi a membrana con i sistemi a biomassa adesa con l'obiettivo finale di migliorare le prestazioni del sistema nel suo complesso, in termini di rimozione degli inquinanti e di performance idrauliche di filtrazione su membrana (Figura 4.17).

In particolare, è stato proposto l'utilizzo combinato di un reattore MBR e di un reattore a biomassa adesa a letto mobile (MBBR) per la crescita di biofilm. Nei sistemi MBBR, la biomassa può crescere sia in forma di fiocchi sospesi, sia sottoforma di biofilm. La combinazione tra un sistema MBR e uno MBBR in letteratura è nota come sistema MB-MBR (*Moving Bed-Membrane BioReactor*) o sistema BF-MBR (*BioFilm-Membrane Bioreactor*). Questa configurazione è stata applicata con successo negli ultimi anni, evidenziando le migliori prestazioni legate alla presenza di un biofilm "specializzato" all'interno del bioreattore.

Inoltre in tal modo è possibile sia ridurre il volume del reattore biologico, grazie all'aumento di biomassa complessivamente presente all'interno di esso, stante la compresenza delle forme sospese e adese, sia tenere più basse le concentrazioni della biomassa sospesa, riducendo in tal modo il pericolo di foaming delle membrane, a parità di volume del reattore (Leiknes e Ødegaard, 2006; Ødegaard, 2006).

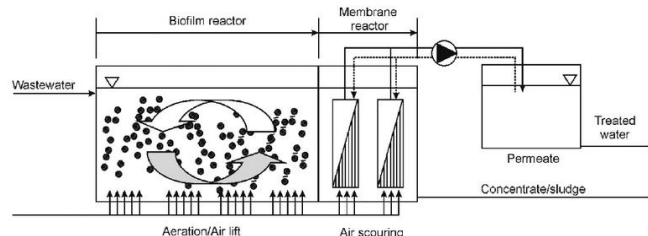


Figura 4.17 Impianto MB-MBR (da Leiknes e Ødegaard, 2006)

In particolare, i processi MBRm pur essendo molto efficaci per il trattamento delle acque reflue di origine sia civile sia industriale, sono affetti da fenomeni di fouling delle membrane che ne possono inficiare l'utilizzabilità nei diversi settori di interesse (Poorasgari et al., 2014).

Quindi, il sistema MB-MBR, grazie alla possibilità di sviluppo all'interno del reattore sia una biomassa sospesa che una adesa, consente di mantenere un'elevata frazione di biomassa attiva nel reattore limitando

al contempo lo sporcamento della membrana, legato sostanzialmente alla concentrazione di SST in vasca (Leiknes e Ødegaard, 2006; Leyva-Díaz et al., 2013; Di Trapani et al., 2014; Tang et al., 2016). Brevemente, il processo MBBR si basa sull'utilizzo di piccoli elementi plastici in costante movimento nell'intero volume del reattore su cui si sviluppa una pellicola biologica (biofilm) attiva nella depurazione del refluo..

Studi molto recenti hanno dimostrato che i sistemi ibridi MB-MBR presentano significativi vantaggi nella rimozione dei micr inquinanti e nutrienti con ridotti tassi di fouling delle membrane (Luo et al., 2015; Zhu et al., 2015). Altri studi hanno invece evidenziato le ottime prestazioni di tali sistemi per il trattamento di reflui salini contenenti sostanza recalcitranti come gli idrocarburi (Di Bella et al., 2015).

La configurazione maggiormente utilizzata prevede la realizzazione di due comparti separati in cui inserire supporti e membrana, rispettivamente (Leyva-Díaz et al., 2013; Di Trapani et al., 2014). Non mancano però esempi di realizzazioni impiantistiche in cui i supporti mobili e il modulo di membrana sono inseriti all'interno dello stesso reattore, con l'obiettivo di ridurre il fouling della membrana grazie ai continui urti con il materiale di riempimento. In tal caso, però, è preferibile utilizzare un mezzo di riempimento realizzato in materiale spugnoso reticolare (p.e. poliuretano espanso) per ridurre il rischi di danneggiamento delle fibre della membrana a seguito dei continui urti con il materiale di riempimento (Deng et al., 2014; Di Bella et al., 2015).

In Figura 4.18 sono riportati un esempio di sistema MB-MBR con comparti separati per supporti e membrana e uno schema di sistema integrato con supporti e membrana allocati nello stesso comparto.

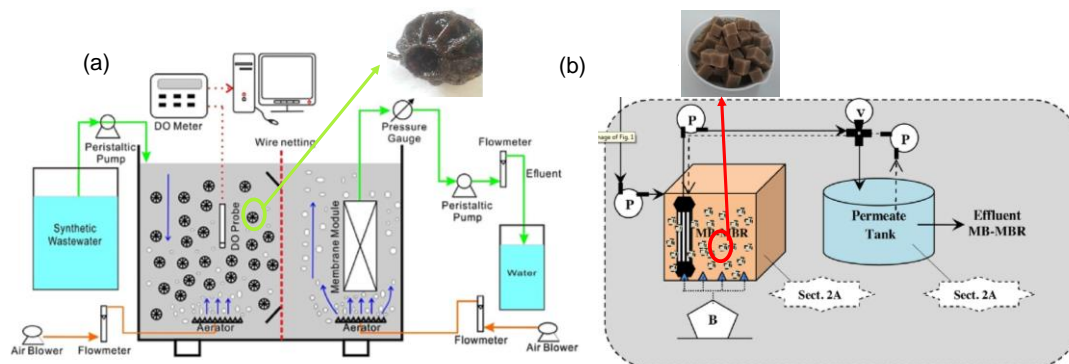


Figura 4.18 Schema di un impianto MB-MBR con comparti separati (a) (da Tang et al., 2016); schema di un processo MB-MBR a comparto unico (b) (da Di Bella et al., 2015).

Configurazioni SB-MBR (Sequencing Batch-MBR)

Tra le diverse alternative di processo, i sistemi SBR (Sequencing Batch Reactors) sono proposti per la rimozione del carbonio organico e dei nutrienti dai reflui; il processo è concettualmente semplice da gestire, in quanto caratterizzato da notevole flessibilità operativa. Infatti, il ciclo di funzionamento può essere facilmente modificato in qualunque momento agendo sulle durate delle varie fasi che si susseguono, in base alla variazione di specifiche condizioni operative, variazioni delle caratteristiche dell'influente o variazioni negli obiettivi di depurazione. Tuttavia, i sistemi SBR annoverano tra gli svantaggi la potenziale torbidità dell'effluente legata a scarse caratteristiche di sedimentabilità della biomassa (Zhang et al., 2006). Per tale motivo, nel corso degli ultimi anni è stato proposto di accoppiare ad un sistema SBR un processo di filtrazione su membrana, realizzando il cosiddetto SB-MBR (Sequencing Batch Membrane Bio-Reactor). Negli impianti SB-MBR il reattore funziona in discontinuo, con alternanza di fasi di reazione (aerobica, anaerobica, anossica) e fasi di estrazione del permeato

attraverso le membrane; in tal modo si può ottenere la rimozione simultanea anche dell'azoto e del fosforo (Figura 4.19).

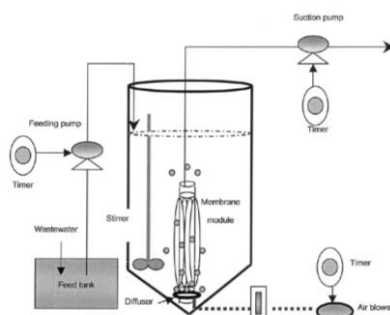


Figura 4.19 Schema di un impianto SB-MBR (da Bae et al., 2003)

La combinazione di un processo SBR con uno MBR è stata utilizzata per trattare diversi tipi di reflui, dimostrando buone qualità degradative e ottime performance di separazione solido-liquido. Interessanti risultati in tal senso sono stati ottenuti da Zhang et al. (2006), mettendo a confronto un impianto pilota così attrezzato con uno CAS. In particolare, ottime performance di depurazione sono state ottenute in sistemi SB-MBR per il trattamento di reflui casarei, stante la significativa capacità di trattamento di tale configurazione nei confronti di elevati carichi organici (Bae et al., 2003).

Processi MABR

Nuove configurazioni a biomassa mista trovano applicazione soprattutto per i trattamenti di rimozione dei nutrienti o dove si abbiano reattori sottodimensionati.

I processi MABR (*Membrane Aerated Biofilm Reactor*) consentono di ottenere un basso consumo energetico in un ingombro ridotto, sfruttando una particolare configurazione dei moduli di membrana, a fibre cave, sui quali si sviluppa volutamente la biomassa adesa nitrificante e attraverso le quali, dal loro interno viene introdotta aria compressa.

In pratica, viene sfruttata la sinergia tra le membrane, qui utilizzate solo per trasferire ossigeno, che viene trasportato per diffusione all'interno del biofilm con altissima efficienza, e il biofilm, che si sviluppa su di esse su strutture filiformi ad alta resistenza meccanica solidali alle fibre cave.

In tali processi, la separazione solido liquido a valle del reattore può essere ottenuta o con tradizionali sistemi di sedimentazione o con sistemi di micro o ultrafiltrazione.

Configurazioni MBR anaerobici (AnMBR)

Nel caso del trattamento di reflui a elevato carico organico, i processi anaerobici notoriamente presentano notevoli vantaggi. Infatti, oltre all'energia che può essere recuperata dal biogas ricco di metano, l'applicazione di processi anaerobici riduce nettamente il fabbisogno energetico complessivo dell'impianto di depurazione. Inoltre, i processi anaerobici producono nutrienti mineralizzati in forma di ammoniaca e ortofosfato, consentendo un uso irriguo diretto dell'effluente. La lentezza del processo derivante dal basso tasso di crescita delle biomasse può allora essere ben compensato dall'effetto barriera delle membrane, che consente l'accumulo di biomassa all'interno del reattore, riducendo i tempi di digestione e garantendo al contempo una maggiore qualità dell'effluente (Liao et al., 2006, Judd, 2011; Lubello, 2013).

I processi MBR anaerobici (AnMBR) hanno pertanto suscitato l'interesse della comunità tecnico/scientifica con diversi studi condotti sul trattamento dei reflui, come possibile alternativa ai convenzionali processi anaerobici (Martin et al., 2011; Santos et al., 2011).

I maggiori problemi sin qui riscontrati sono tuttavia legati all'elevato sporcamento delle membrane, che può in qualche modo ovviarsi utilizzando la configurazione side stream, dove le elevate velocità di flusso garantiscono la pulizia della membrana; nella soluzione a membrana sommersa si può prevedere l'insufflazione di biogas (Figura 4.20).

Nonostante tali vantaggi, rimangono ancora delle criticità che necessitano di essere superate per giungere ad un uso estensivo e consolidato dei processi AnMBR. I principali svantaggi riguardano: bassi flussi di permeato, fouling delle membrane, elevati costi di investimento ed operativi (Hu and Stuckey, 2007).

Infatti, i sistemi AnMBR operano in genere con concentrazioni più elevate di SST rispetto ai processi MBR aerobici, influenzando significativamente la reologia della miscela, l'idrodinamica del reattore e i sistemi di pompaggio. Maggiori concentrazioni di MLSS producono una formazione più veloce di un cake layer, spesso più denso, rispetto ai processi aerobici. Tale circostanza richiede più frequenti interventi di lavaggio fisico-chimici per il mantenimento del flusso di progetto (che comunque viene in genere mantenuto più basso rispetto ai processi aerobici). Inoltre, i costi operativi, collegati al ricircolo del gas e del liquido per il controllo del fouling e agli agenti chimici per il lavaggio delle membrane rappresentano ancora oggi un onere importante ai fini della fattibilità economica dei sistemi AnMBR. Al contrario, i costi di acquisto/sostituzione delle membrane si sono ridotti sensibilmente nel corso degli ultimi anni, per effetto della riduzione del costo dei moduli. Diverse tipologie di reattori anaerobici sono stati studiati recentemente, inclusi i sistemi a completa miscelazione (completely stirred tank reactors, CSTR), upflow anaerobic sludge blanket (UASB), expanded granular sludge bed (EGSB), in combinazione con differenti tipi di membrane (Ozgun et al., 2013). Tuttavia, non è stata ancora individuata una configurazione ottimale e l'attività di ricerca in tal senso è ancora in corso.

A titolo di esempio, in Figura 4.21 si riportano alcuni schemi alternativi di processi AnMBR.

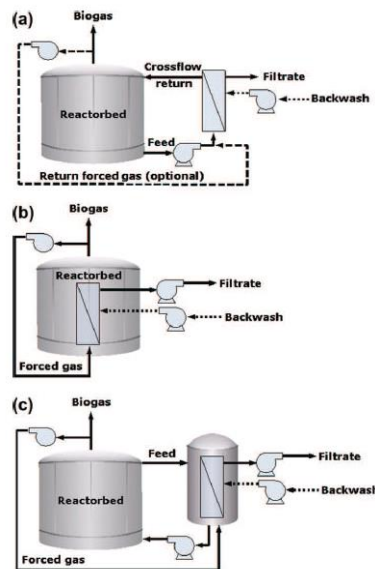


Figura 4.20: Schemi di impianti AnMBR: a) side stream; b) a membrana sommersa; c) a membrana sommersa in comparto separato (da Judd, 2011)

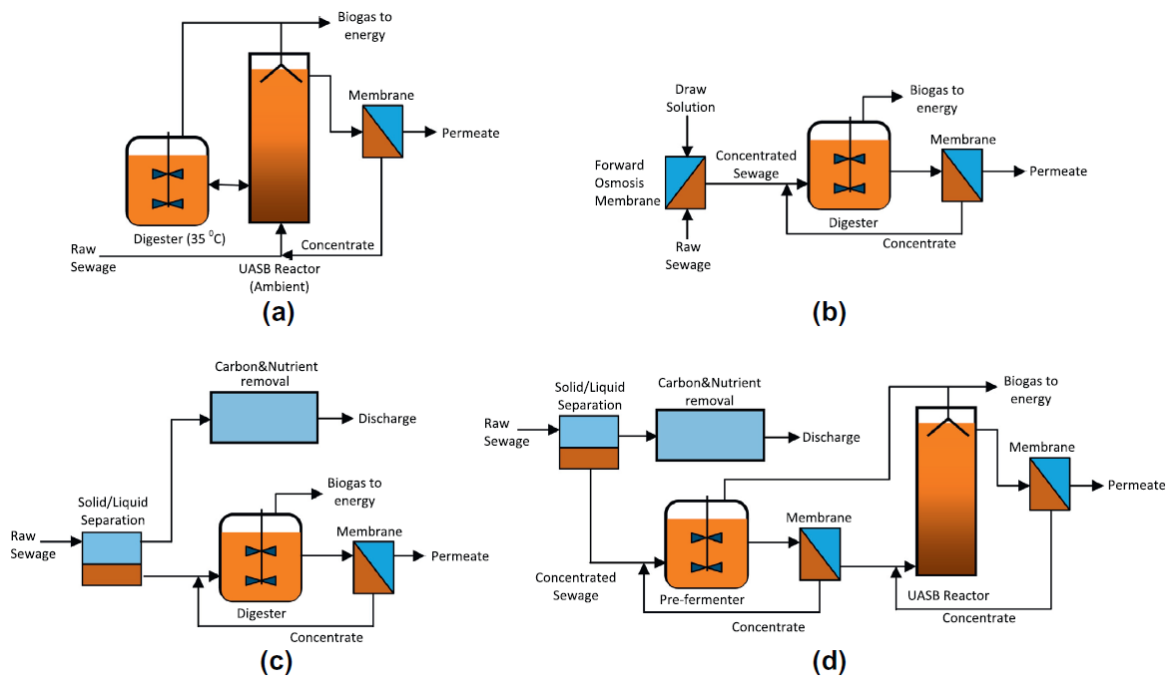


Figura 4.21 Schemi alternativi di impianti AnMBR: integrazione di MBR ad un processo accoppiato digestore-UASB (a); sistema MBR ad osmosi diretta (b); sistema AnMBR per la linea fanghi (c); sistema AnMBR integrato con digestore e reattore di drolisi (d) (da Ozgun et al., 2013)

Grazie alla combinazione della digestione anaerobica e della tecnologia a membrane, di fatto, viene separato il tempo di ritenzione dei solidi dal tempo di ritenzione idraulica, garantendo così un processo biologico più stabile e robusto, mantenendo tutti i batteri metanigeni all'interno del reattore anaerobico, aumentando la produzione di metano senza solidi in sospensione nel permeato e migliorando la qualità del digestato liquido.

La storia dei processi MBR anaerobici ha inizio nel 1980 con configurazioni sidestream (ANS-MBR), quindi con membrana esterna al reattore, con le prime applicazioni effettuate in Giappone. Tecnologie commerciali sono state successivamente introdotte: il processo ADUF in Sud Africa, il processo "Biorek" in Danimarca e, più recentemente, il processo "Menthane" proposto da Veolia Water Systems. Allo stato attuale, tali sistemi forniscono flussi di permeato solo abbastanza modesti, non dissimili da quelli degli usuali processi aerobici ma, per reflui alimentari, ad esempio, si può arrivare a flussi di permeato anche 4-5 volte maggiori. Tuttavia, in tal caso il fabbisogno energetico è circa cinque volte più elevato di quello dei processi aerobici.

Questo squilibrio energetico ha contribuito allo sviluppo della configurazione sommersa (ANI-MBR), che in alcuni casi è stato implementato a piena scala per il trattamento delle acque reflue alimentari. Per la ANI-MBR il biogas generato può essere utilizzato per lo scouring della membrana, quindi potenzialmente eliminando il costo di funzionamento delle soffianti destinate a questo scopo. In questi sistemi il carico organico è elevato e tale da consentire la produzione di biogas, per metanogenesi, in quantità sufficiente per un'efficace scouring delle membrane.

Studi pilota del processo sono condotti utilizzando membrane sommerse piane con flussi di permeato di $4-6 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, mentre ancora pochi studi sono stati condotti con configurazioni di moduli a fibre cave.

Digestione Aerobica MBR

La digestione aerobica con contemporaneo ispessimento e utilizzo di membrane è un processo controllato in cui le membrane hanno lo scopo di addensare i fanghi di supero digeriti, fornendo costanti e migliori prestazioni di ispessimento rispetto ai sistemi convenzionali.

Questo processo offre elevati benefici operativi, economici e di processo quali: la capacità di addensare in modo affidabile fanghi fino a 4% di concentrazione di solidi senza l'uso di polimeri e senza particolare attenzione da parte degli operatori; la produzione fango stabilizzato utilizzando un ingombro ridotto della vasca; l'ottimizzazione delle prestazioni del trattamento in termini di riduzione delle quantità di fango da smaltire; la produzione di permeato di qualità tale da poter essere riutilizzato o tale da minimizzarne l'impatto sulla linea liquami in caso di ricircolo in testa al trattamento.

Questo processo consente anche l'ispessimento continuo, con la conseguente ottimizzazione dei tempi operativi. Attualmente, ci sono meno di 20 installazioni di digestione aerobica-ispessimento negli Stati Uniti, ma molti altri sono in costruzione.

Bibliografia

- Bae T-H, Han S-S, Tak T-M. (2003) Membrane sequencing batch reactor system for the treatment of dairy industry wastewater. *Process Biochem*;39(2), 221–31.
- Bentzen, T.R., Ratkovich, N., Madsen, S., Jensen, J.C., Bak, S.N., Rasmussen, M.R. (2012) Analytical and numerical modelling of Newtonian and non-Newtonian liquid in a rotational cross-flow MBR. *Water Sci. Technol.* 66, 2318–2327.
- Bilad, M.R., Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K., Vankelecom, I.F.J. (2012). Harvesting microalgal biomass using submerged microfiltration membranes. *Bioresour. Technol.* 111, 343–352.
- Brepols C., Dorgeloh E., Frechen F.B., Fuchs W., Haider S., Joss A., de Korte K., Ruiken C., Schier W., van der Roest H., Wett M., Wozniak T. (2008) Upgrading and retrofitting of municipal wastewater treatment plants by means of membrane bioreactor (MBR) technology. *Desalination*, 231, pp. 20-26.
- Deng L., W. Guo, H.H. Ngo, J. Zhang, S. Liang, S. Xia, Z. Zhang, J. Li, (2014), A comparison study on membrane fouling in a sponge-submerged membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor, *Bioresource Technology* 165, 69–74.
- Di Bella G., N. Di Prima, D. Di Trapani, G. Freni, M.G. Giustra, M. Torregrossa, G. Viviani, 2015, Performance of membrane bioreactor (MBR) systems for the treatment of shipboard slops: assessment of hydrocarbon biodegradation and biomass activity under salinity variation, *J. Hazard. Mater.* 300 765–778.
- Di Trapani D., Di Bella, G., Mannina, G., Torregrossa, M., Viviani, G., 2014. Comparison between moving bed-membrane bioreactor (MB-MBR) and membrane bioreactor (MBR) systems: influence of wastewater salinity variation. *Bioresour. Technol.* 162, 60–69.
- Hu A.Y., D.C. Stuckey, (2007) Activated carbon addition to a submerged anaerobic membrane bioreactor: effect on performance, transmembrane pressure, and flux, *J. Environ. Eng.* 133 73–80.
- Judd S. (2011) *The MBR book – Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Second edition. Elsevier Ltd, Oxford (UK).
- Le-Clech, P., Chen, V., Fane, T.A.G., 2006. Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *J. Membr. Sci.* 284, 17–53. doi:10.1016/j.memsci.2006.08.019
- Leiknes T., Ødegaard H. (2006) The development of a biofilm membrane bioreactor, *Desalination*, 202, 135-143.
- Leyva-Díaz, J.C., Calderón, K., Rodríguez, F.A., González-López, J., Hontoria, E., Poyatos, J.M., 2013. Comparative kinetic study between moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor and

- membrane bioreactor systems and their influence on organic matter and nutrients removal. *Biochem. Eng. J.* 77, 28–40.
- Liao B.Q., J.T. Kraemer, D.M. Bagley, (2006) Anaerobic membrane bioreactors: applications and research directions, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 36 489–530.
- Lubello C. (2013) Applicazione dei sistemi MBR al trattamento di reflui industriali. In G. Mannina, M. Torregrossa e G., Viviani (eds.) “Bioreattori a membrane (MBR) per la depurazione delle acque reflue”. Palermo, pp.137-149.
- Luo, Y., Jiang, Q., Ngo, H.H., Nghiem, L.D., Hai, F.I., Price, W.E., Wang, J., Guo, W., (2015), Evaluation of micropollutant removal and fouling reduction in a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system. *Bioresour. Technol.* 191, 355–359.
- Martin I., M. Pidou, S. Soares, S. Judd, B. Jefferson, (2011) Modelling the energy demands of aerobic and anaerobic membrane bioreactors for wastewater treatment, *Environ. Technol.* 32 921–932.
- Ødegaard, H., (2006), Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. *Water Sci. Technol.* 53, 17–33.
- Ozgun H., R.K. Dereli, M.E. Ersahin, C. Kinaci, H. Spanjers (2013) A review of anaerobic membrane bioreactors for municipal wastewater treatment: Integration options, limitations and expectations, *Separation and Purification Technology* 118, 89-104.
- Poorasgari, E., Konig, K., Fojan, P., Keiding, K., Christensen, M.L., (2014), Fouling of enhanced biological phosphorus removal-membrane bioreactors by humic-like substances. *Chemosphere* 117, 144–150.
- Prip Beier S., Jonsson G. (2009). Critical flux determination by flux-stepping. *Separations*, 56, 1739-1747.
- Radjenovic, J. (2008). Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology, 5(November 2007), 37–101.
- Santos A., Judd S. J. (2010). Metals removal and technological development of membrane bioreactors. Cranfield University. School of Applied Sciences. PhD thesis.
- Santos A., W. Ma, S.J. Judd, (2011) Membrane bioreactors: two decades of research and implementation, *Desalination* 73 148–154.
- Stephenson T., Judd S., Jefferson B., Brindle K. (2000) Membrane bioreactors for wastewater treatment. IWA publishing, London.
- Tang B., C. Yu, L. Bin, Y. Zhao, X. Feng, S. Huang, F. Fu, J. Ding, C. Chen, P. Li, Q. Chen, 2016 Essential factors of an integrated moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor: Adhesion characteristics and microbial community of the biofilm, *Bioresource Technology* 211, 574–583.
- Wang, Z., Ma, J., Tang, C. Y., Kimura, K., Wang, Q., & Han, X. (2014). Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. *Journal of Membrane Science*, 468, 276–307. doi:10.1016/j.memsci.2014.05.060
- WEF - Water Environment Federation (2012) Membrane BioReactors. WEF Manual of Practice No. 36. Mc Graw-Hill ed.
- Zhang H.M., Xiao J.N., Cheng Y.J., Liu L.F., Zhang X.W., Yang F.L. (2006) Comparison between a sequencing batch membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor. *Process Biochemistry*, 41, 87-95.
- Zhu, Y., Zhang, Y., Ren, H.Q., Geng, J.J., Xu, K., Huang, H., Ding, L.L., 2015. Physicochemical characteristics and microbial community evolution of biofilms during the start-up period in a moving bed biofilm reactor. *Bioresour. Technol.* 180, 345–351.

5. RECENTI RICERCHE

Appresso sono richiamati le principali ricerche comparse in recenti riviste scientifiche, distinte in base ai principali temi di interesse per i sistemi MBR.

Sono inoltre presentati i principali progetti di ricerca in corso o di recente conclusi, in campo internazionale e nazionale.

5.1 Principali ricerche comparse in riviste scientifiche

I sistemi MBR da circa trent'anni suscitano l'interesse di studiosi e ricercatori di tutto il mondo per le loro elevate efficienze di trattamento di reflui domestici e industriali.

Le ricerche scientifiche, negli anni, hanno prevalentemente concentrato l'attenzione su quelli che sono considerati i principali "limiti" alla diffusione di questa tecnologia.

Tra gli "svantaggi" i fenomeni di sporcamento (*fouling*) delle membrane, e l'acquisita conoscenza sulle disfunzioni di processo (quali il *foaming*), sembrano focalizzare ancora oggi l'attenzione del mondo scientifico e della ricerca. Per contro gli aspetti legati ai costi delle membrane, per quanto sempre attenzionati, hanno manifestato negli ultimi anni una riduzione in termini di pubblicazioni scientifiche, a causa della commercializzazione di prodotti ormai concorrenziali e di un numero maggiore di case produttrici di membrane.

Dall'altro lato, tra gli studi di completamento, cioè non direttamente legati agli svantaggi conclamati, ma all'individuazione di nuovi contesti di applicazione e all'ottimizzazione di processo (prevalentemente legata agli aspetti energetici e all'emissione di gas serra), rimangono di elevato interesse scientifico gli studi rivolti alla modellizzazione di sistema e all'applicabilità in nuovi contesti e condizioni (tra questi, gli MBR anaerobici, e i sistemi atti al trattamento dei contaminanti emergenti).

Nel seguito è stata posta l'attenzione su una dettagliata analisi del progresso della ricerca aggiornata al 2016, nel mondo e in Italia, basandosi sulla banca dati Scopus (con particolare riferimento all'ultimo ventennio).

L'analisi iniziale, ha previsto una ricerca effettuata utilizzando la principale keyword: "MBR". La ricerca ha restituito un risultato di 2.444 pubblicazioni, suddivise principalmente tra articoli scientifici su rivista, articoli scientifici di conferenza indicizzati e review (Figura 5.1). L'84% di tali lavori è rappresentato da articoli scientifici, denotando un notevole interesse dell'applicazione della tecnologia a svariati casi studio con un crescente interesse verso il trattamento di reflui industriali. Il 12% costituisce l'aliquota di lavori presentati in occasioni di conferenze internazionali, mentre il 4% rappresenta l'aliquota di articoli dedicati allo stato dell'arte della tecnologia che, essendo ormai da diversi anni consolidata seppur avanzata, non necessita di frequenti aggiornamenti riguardanti la logica di funzionamento e di processo.

In termini geografici, ad oggi la maggiore produzione scientifica in materia di MBR su scala mondiale è attribuibile alla Cina (Figura 5.2) che vanta una contestuale sempre più crescente produzione di membrane sul mercato. A seguire, vi sono gli Stati Uniti d'America. L'Italia occupa il sesto posto dopo Spagna, Germania e Korea del Sud e vanta circa 140 articoli ad oggi pubblicati su riviste scientifiche internazionali. In particolare, analizzando il trend della produzione scientifica di Cina, U.S.A. e Italia, è interessante notare come la Cina abbia registrato un trend pressoché esponenziale fino al 2013. Tuttavia, sebbene essa possa vantare il maggior numero di pubblicazioni annue, dal 2013 ha registrato un andamento decrescente (Figura 5.3), probabilmente legata a una "saturazione" del mercato e a una sempre minore domanda. Per quanto riguarda gli U.S.A., dopo un iniziale trend esponenziale nella ricerca sulla tecnologia MBR, dal 2006 hanno prodotto documentazione scientifica in maniera pressoché costante. Trend simile a quello degli U.S.A., ma su un numero di pubblicazioni inferiore, è stato registrato per l'Italia.

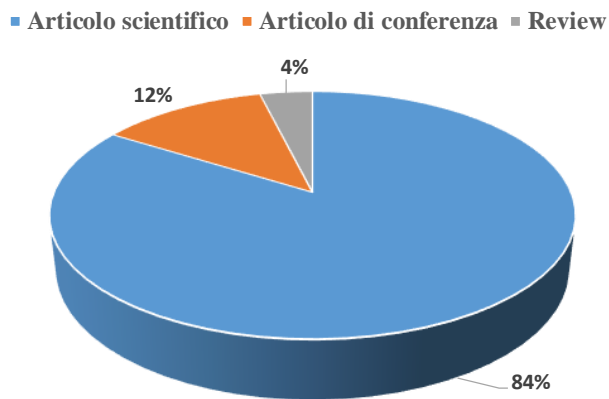


Figura 5.1: Suddivisione delle pubblicazioni sulla tecnologia MBR in articoli scientifici, articoli di conferenza e review (aggiornata al 2016).

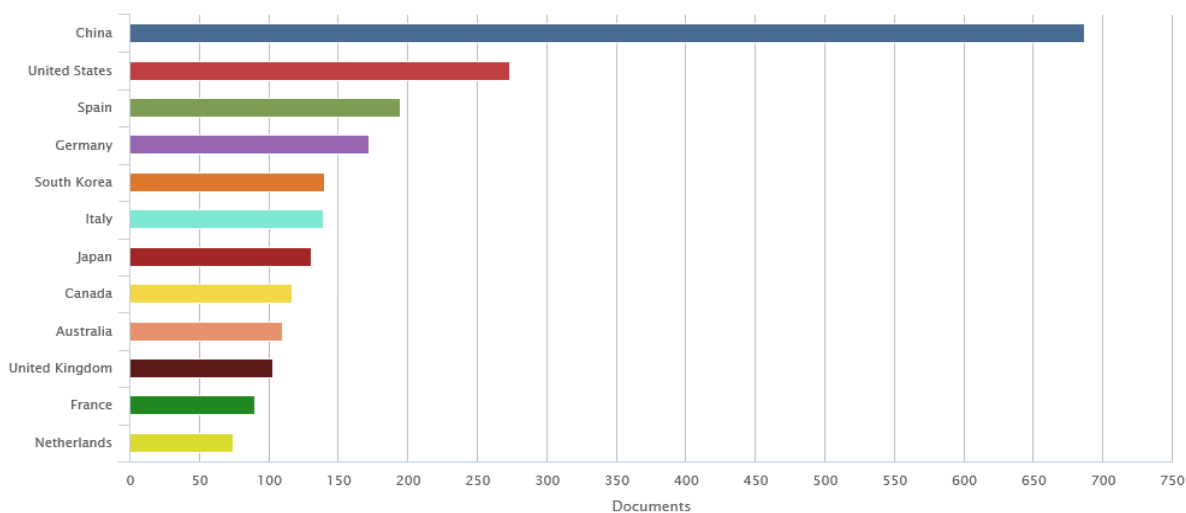


Figura 5.2: Ripartizione delle pubblicazioni sulla tecnologia MBR per area geografica di pertinenza (aggiornata al 2016).

Dall'analisi più di dettaglio riportata in Figura 5.4, si rileva che la maggiore fonte per la letteratura scientifica di settore proviene dagli U.S.A. sin dal 1994. La Cina si è affacciata al mondo dell'MBR a partire dal 1996 e soltanto dal 2005 ha superato gli Stati Uniti, guadagnando il primato della produzione scientifica.

L'Italia, sebbene abbia mosso i primi passi nel panorama MBR soltanto dal 2002, ha gradualmente aumentato il numero di pubblicazione riducendo velocemente il "gap" con gli Stati Uniti, registrando un tasso annuo di produzione scientifica via via maggiore, con un "rate" recente simile a quello della Cina (le due curve cumulate dal 2009 ad oggi corrono pressoché parallelamente). Quindi i 140 articoli prodotti in Italia (riportati in Figura 5.4) sono da intendersi praticamente nell'ultimo decennio.

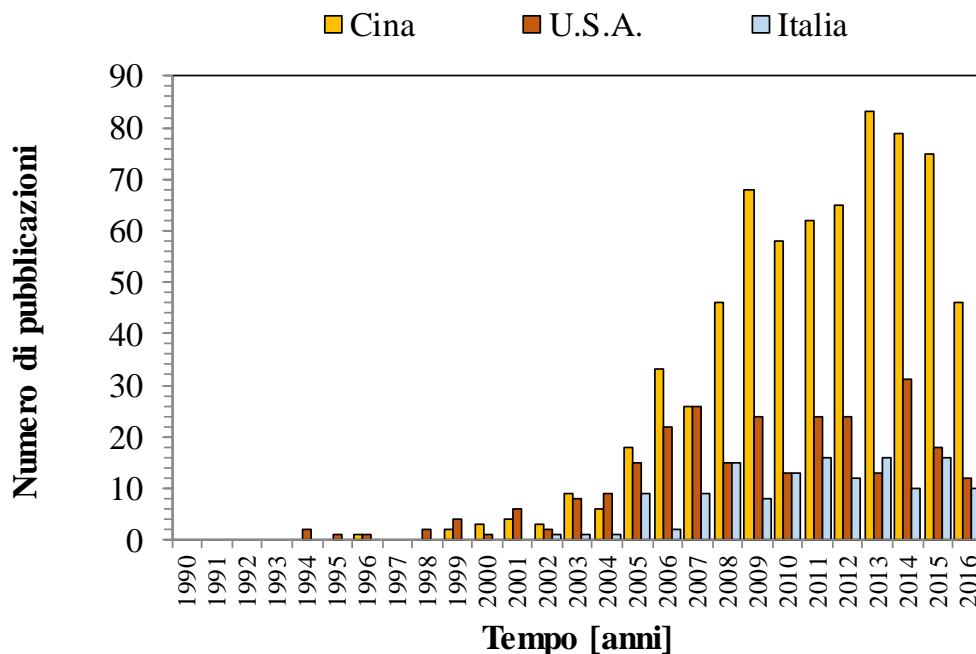


Figura 5.3: Trend annuale della produzione scientifica sulla tecnologia MBR di Cina, U.S.A. e Italia (periodo di riferimento 1990-2016).

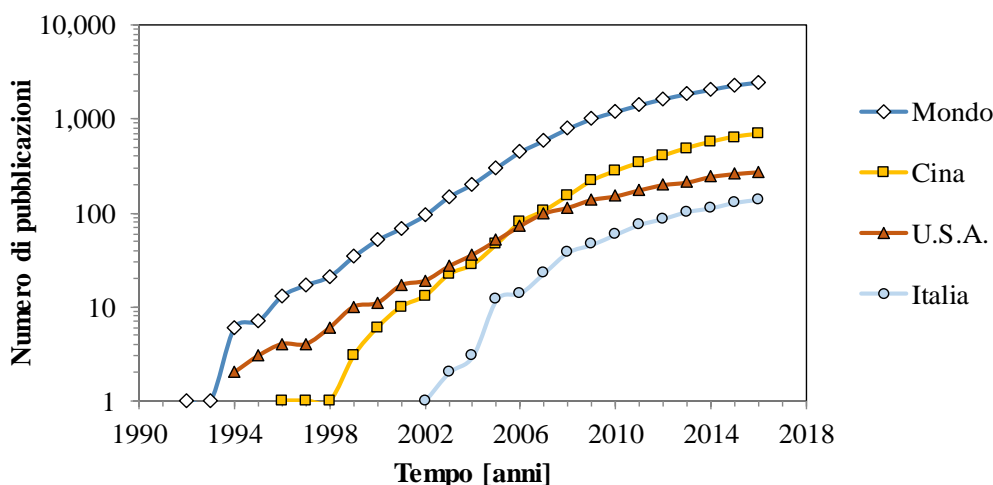


Figura 5.4: Trend cumulato della produzione scientifica sulla tecnologia MBR di Cina, U.S.A. e Italia (periodo di riferimento 1990-2016)

Focalizzando l'attenzione sullo scenario italiano, le recenti ricerche condotte in campo nazionale sull'utilizzo della tecnologia a membrana sono principalmente focalizzate sulle seguenti tematiche:

- 1) fouling (sporcamento) della membrana: monitoraggio e mitigazione;
- 2) utilizzo della tecnologia MBR per il trattamento di reflui industriali;
- 3) foaming (problemi di schiumeggiamento);
- 4) applicazione della tecnologia MBR per upgrading di impianti pre-esistenti;
- 5) applicazione dei sistemi MBR per la rimozione dei microinquinanti;
- 6) altro: utilizzo di tecnologie combinate (p.e. MBBR, MBR anaerobici; etc.).

Figura 5.5 riporta le pubblicazioni prodotte in Italia negli ultimi anni secondo i punti dell'elenco precedente. E' importante sottolineare che, nell'elenco precedente, il topic modellistico è stato accorpato alle varie classi (risulta infatti rivolto ai differenti approcci, gestionali o specifici).

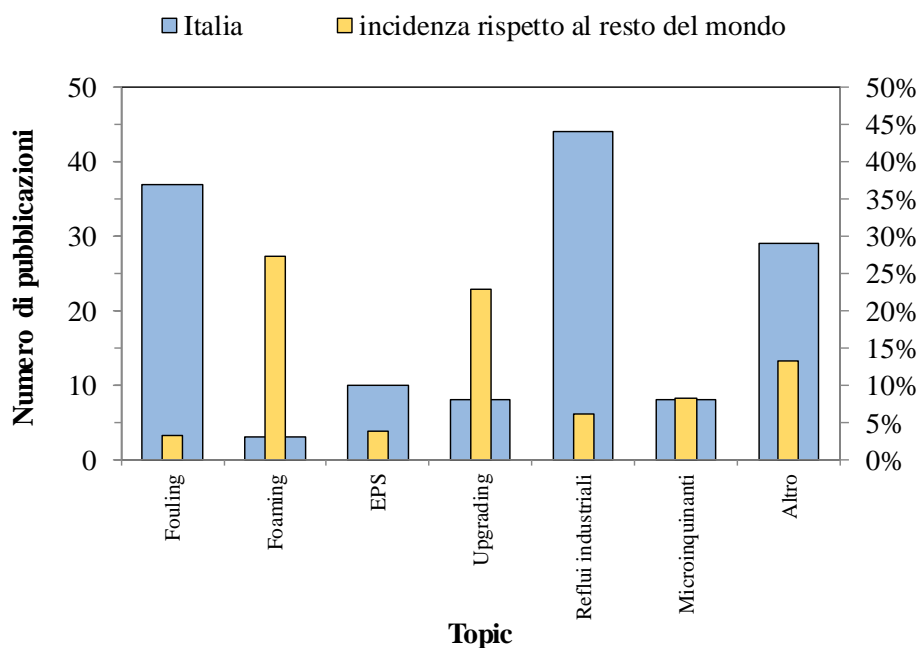


Figura 5.5: Distribuzione della produzione scientifica italiana per topic di riferimento, rapportato alla tendenza della ricerca del resto del mondo (aggiornata al 2016)

L'analisi dei dati evidenzia che una delle principali problematiche affrontate riguarda il fouling della membrana, comprendente lo studio degli effetti e dei meccanismi di deposito sulla superficie e all'interno dei pori. Il fenomeno (che comporta la riduzione del flusso di permeato, a parità di TMP applicata, o, viceversa, la necessità di aumentare la TMP al fine di mantenere costante la portata di permeato), risulta abbastanza complesso e dipende da molte cause, riassunte in Figura 5.6.

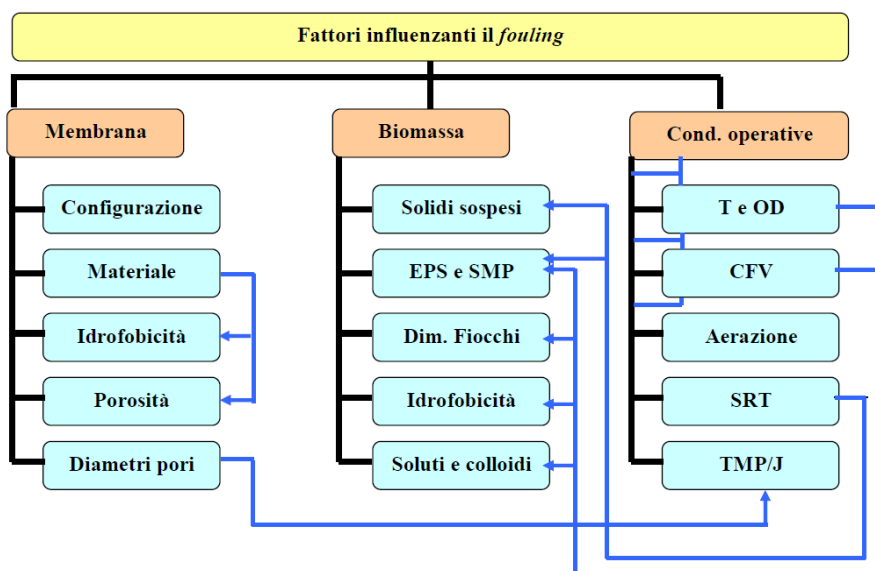


Figura 5.6: Fattori che influenzano il fouling

In tal senso, dunque, la maggior parte degli altri temi affrontati (foaming, EPS, trattamento dei contaminanti emergenti, etc.) sono da intendersi direttamente o indirettamente collegabili al topic “fouling”: più dell’80% degli questi studi, infatti, comprendono nella discussione dei risultati almeno un

paragrafo dedicato alla discussione delle performance idrauliche (in termini di evoluzione del fouling) o alla vita utile della membrana.

Più specificatamente, risultano direttamente collegati gli studi riguardanti gli aspetti di seguito elencati:

- 1) *caratteristiche dell'alimento*. Infatti, nonostante lo sporco della membrana sia stato prevalentemente associato alla presenza di materiale particellato o disciolto a contatto con questa (e quindi più legato alla miscela aerata), le caratteristiche del refluo influente possono sollecitare fenomeni biologici o chimico-fisici, spesso deleteri per la durabilità della membrana (se non mitigati);
- 2) *concentrazione di solidi sospesi nella miscela aerata*. In tal senso, tuttavia, occorre sottolineare il fatto che non c'è pieno accordo in letteratura nel ritenere il fouling direttamente proporzionale alla concentrazione di SST nell'alimento. La concentrazione di SST viene ritenuta indicatrice del potenziale "rischio" associato ai fenomeni di deflocculazione biologica, e alle sue conseguenze, o agli effetti benefici dovuti all'effetto pre-filtro;
- 3) *condizioni operative*. Queste, spesso, sono state studiate con riferimento all'evoluzione dei meccanismi di sporco, piuttosto che alla valutazione delle performance. La valutazione è volta principalmente allo studio dei valori imponibili ai tempi di residenza idraulico e cellulare e alla presenza di composti organici di natura colloidale;
- 4) *studio dei microrganismi e della deflocculazione dei fiocchi*. Questo è un topic recentemente affrontato per valutare i possibili effetti di mitigazione del fouling è l'identificazione dei principali microrganismi responsabili del peggioramento dell'effetto "pre-filtrante" del cake layer che, una volta identificati, vengono controllati ed inibiti. Numerosi studi condotti identificano nei Proteobacteria i principali responsabili dello sporco delle membrane;
- 5) *studio della produzione di polimeri extracellulari e loro ruolo*. Numerosi studi suggeriscono quali principali agenti sporcanti i metaboliti (e.g., *extracellular polymeric substances* – EPS e *soluble microbial products* – SMP) prodotti o rilasciati dai microrganismi. La presenza dei suddetti metaboliti è fortemente dipendente non solo dai principali microrganismi presente ma anche dalle condizioni operative di processo e dalla presenza di sostanze tossiche o inibenti. Questi composti, recentissimamente, sono stati individuati anche come agenti che promuovono il foaming in impianti MBR, anche in assenza di batteri filamentosi (che quando presenti agiscono solamente da stabilizzatori).

5.2 Presentazione di progetti di ricerca in corso/recentemente conclusi

Di seguito sono citati i principali progetti, internazionali e nazionali, svolti o in corso di svolgimento, aventi come oggetto l'applicazione della tecnologia a membrana; di essi viene data una breve descrizione, rimandando ai documenti ufficiali dei progetti (in particolare i siti web in cui questi sono presentati) per maggiori approfondimenti.

5.2.1 Progetti di ricerca internazionali

Progetto "Research Centre for design of the microbial communities in Membrane Bioreactors, Ecodesign MBR". Il progetto, ancora in corso, è stato finanziato dal Danish Council of Strategic Research ed ha la durata di 6 anni con inizio nel 2010. Il progetto coinvolge i seguenti partner: Aalborg University, DTU, Danish Technological Institute, DHI, Alfa Laval, Krüger, Grundfos Biobooster, Novozymes, Veolia (Fr), Delft University, Vienna University, Norges tekniske-naturvidenskabelige universitet (NTNU), Udviklingsamarbejdet, Spildevandscenter Avedøre, Aalborg Forsyning. L'obiettivo del progetto è l'approfondimento di alcuni aspetti ancora scarsamente noti riguardanti la gestione degli impianti MBR e

la progettazione degli stessi. Nello specifico le attività di ricerca sono focalizzate sulla identificazione dei principali microrganismi coinvolti nella rimozione del fosforo, dell'azoto e dei microinquinanti in impianti MBR e nel ruolo che essi rivestono nello sporco della membrana. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://www.dti.dk/projects/project-research-centre-for-design-of-the-microbial-communities-in-membrane-bioreactors-ecodesign-mbr/32889>.

Progetto MBR-Train “*Process optimisation and fouling control in membrane bioreactors for wastewater and drinking water treatment*”. Della durata di 48 mesi a partire dal 2006, il progetto è stato finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del sesto Programma Quadro ed ha previsto il finanziamento di borse di ricerca nell'ambito delle azioni Marie-Curie. Il progetto ha coinvolto i seguenti partner: RWTH Aachen University (Germania), IRSA CNR (Italia), Aquafin N.V. (Belgio), Cranfield University (UK), Kompetenzzentrum Wasser (Germania), Ghent University (Belgio), Brno University of Technology (Repubblica Ceca), Politecnico di Milano (Italia), Thames Water (UK), Delft University of Technology (Olanda). L'obiettivo principale del progetto è stato quello di comprendere le mutue interazioni che intercorrono tra i processi biologici ed i processi fisici che si verificano in un sistema MBR. Tali interazioni sono state investigate adottando tutti gli ambiti disciplinari coinvolti: chimica, microbiologia, scienza dei polimeri, fluido dinamica, tecnologia dei sistemi, ingegneria civile e chimica. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://www.mbr-train.org/>.

Progetto “*EUROMBR4*”. Ha avuto la durata di 36 mesi a partire dal mese di ottobre 2005. Il progetto è stato finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del sesto Programma Quadro. Il progetto ha coinvolto i seguenti partner: NTNU - Norwegian University of Science and Technology (Norvegia), Cranfield University (UK), RWTH - Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen (Germania), IBET - Instituto de Biologia Experimental e Biológica (Portogallo), INSA (Francia), University of Montpellier (Francia), Delft University of Technology, (Olanda), Università degli Studi di Trento (Italia), University of KwaZulu-Natal (Sud Africa), University of Technology of Sydney (Australia), UNESCO-IHE, Institute for Water Education (Olanda), EAWAG - Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (Svizzera), Waterschap Hollandse Delta (Olanda), Erftverband (Germania), Polymem S.A. (Francia), Millenniumpore Ltd. (UK) KOCH Membrane Systems GmbH (Germania), FlowConcept GmbH (Germania). Gli obiettivi del progetto sono stati molteplici: i. riduzione dei costi operative e di installazione dei sistemi MBR in Europa; ii. Facilitare l'implementazione dei sistemi MBR per il trattamento dei reflui urbani e per il riuso; iii. Facilitare il mercato dei sistemi MBR in Europa.

Progetto “*AMEDEUS*”. Della durata di 36 mesi a partire dal mese di ottobre 2005, il progetto è stato finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del sesto Programma Quadro. Il progetto ha coinvolto i seguenti partner: Technical University of Berlin (Germania), University of New South Wales (Australia), Berlin Centre of Competence for Water (Germania), Flemish Institute for Technological Research (Belgio), Tecnotessile (Italia), Veolia (Francia), Aquafin (Belgio); Polymem (Francia), Millenniumpore (UK), A3 (Germania), Inge (Germania), Envi-Pur (Repubblica Ceca). Gli obiettivi del progetto sono stati molteplici: i. riduzione dei costi operative e di installazione dei sistemi MBR in Europa; ii. Facilitare l'implementazione dei sistemi MBR per il trattamento dei reflui urbani e per il riuso; iii. Facilitare il mercato dei sistemi MBR in Europa.

Progetto “*SANITAS - Sustainable and Integrated Urban Water System Management*”. Il progetto è stato finanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del settimo Programma Quadro (Marie Curie Initial

Training Network) ed ha avuto la durata di 48 mesi a partire dal 1 novembre 2011. Il progetto ha coinvolto i seguenti partner: Universitat de Girona (Spagna), ACCIONA Agua (Spagna), Aquafin (Belgio), Exeter University (UK), Catalan Institute for Water Research (ICRA) (Spagna), Ghent University (Belgio), Lund University (Svezia), Technical University of Denmark (Danimarca), Yarqon River Authority (Israele), Wageningen University (Olanda). Gli obiettivi del progetto sono stati molteplici, i principali sono: i. creare una struttura sostenibile di sistema di gestione integrata delle acque; ii. Divulgare la conoscenza sulle tecnologie innovative di gestione e trattamento delle acque. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://www.sanitas-itn.eu/project/overview-and-overall-objectives/>.

Progetto “*Membrane for ENERGY and WATER RECOVERY – Memory*”. Il progetto, ancora in corso, è stato finanziato dalla Comunità Europea nell’ambito del programma Life ed ha la durata di 48 mesi a partire dal 1 luglio 2014. Il progetto coinvolge i seguenti partner: Aqualia Gestion Integral del Agua S.A. (Spagna), Universitat Politècnica de València (Spagna), Koch Membrane Systems Division of John Zink KEU GmbH (Germania), Universitat de Valencia (Spagna). Il progetto ha il principale obiettivo di dimostrare l’applicabilità della tecnologia a membrana di tipo anaerobico per il trattamento dei reflui urbani. In particolare, il progetto si propone di: i. ridurre i consumi energetici legati al trattamento dei reflui urbani; ii. Ridurre la produzione di gas clima-alteranti; iii. incrementare la qualità delle acque trattate con l’obiettivo del riuso e minimizzare i prodotti residui. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://www.life-memory.eu/>

Progetto “*ENERWATER*”. Finanziato dalla Comunità Europea nell’ambito del programma H2020 “*Coordination and Support Action*”. Il progetto, ancora in corso, ha la durata di 36 mesi a partire dal 1 marzo 2015. Il principale obiettivo del progetto è quello di sviluppare, validare e disseminare metodologie standard innovative per la valutazione e la riduzione dell’impronta energetica degli impianti di depurazione dei reflui e per il miglioramento delle performance depurative. Il progetto coinvolge i seguenti partner: Universidade de Santiago de Compostela (Spain), Wellness Smart Cities and Solutions (Spain), AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación (Spain), Granfield University (UK), Università degli Studi di Verona (Italy), ETRA futuro sostenibile (Italy), Technical University of Cologne (Germany), Der Aggerverband (Germany), Edo Espina & Delfin (Spain). Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://www.enerwater.eu/>

5.2.2 Progetti di ricerca nazionali

Progetto “*STITAM - Sviluppo di Tecnologie Innovative per il trattamento dei rifiuti liquidi della navigazione finalizzate alla Tutela dell’Ambiente Marino*”. Il progetto è stato finanziato nell’ambito del Programma Operativo Nazionale (PON) Ricerca e Competitività 2007-2013 ed ha avuto una durata di 36 mesi a partire dal 1 gennaio 2012. Il progetto ha coinvolto i seguenti partner: Università di Palermo, Università di Messina, Università di Catania, Cantiere Navale di Augusta, Fincantieri, Nico e CNR (ITAE, IAMC, ISMN). Obiettivo principale del progetto di ricerca STITAM è stato quello di proporre un sistema di trattamento integrato includente fasi fisiche, chimiche e biologiche per la rimozione di contaminanti da rifiuti liquidi da attività di navigazione, incluse le acque di sentina e acque di lavaggio in particolare dei serbatoi delle petroliere, prodotti da attività di navigazione e trasporto marittimo. Nell’ambito dell’utilizzo del trattamento biologico la tecnologia a membrana è stata individuata quale possibile alternativa di

trattamento dei rifiuti liquidi di navigazione. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://www.ponrec.it/open-data/progetti/scheda-progetto?ProgettoID=5745#Beneficiari>.

Progetto “*SIBSAC - Sistema Integrato per la Bonifica e il Trattamento di Sedimenti e Acque Contaminate ad elevata salinità*”. Il progetto è stato finanziato nell’ambito del Programma Operativo Nazionale (PON) Ricerca e Competitività 2007-2013 ed ha avuto una durata di 36 mesi a partire dal 10 settembre 2010. Il progetto ha coinvolto i seguenti partner: T.I.M.E. – Trasporti Industria Meccanica - S.p.A., Università degli Studi di Enna "Kore", Consorzio Universitario della Provincia di Palermo, Scienza Industria Tecnologia srl, Consorzio Universitario Megara Ibleo, SARAS, Hydrogea Vision srl. Obiettivo principale del progetto è stato quello individuare soluzioni efficaci e verificabili per il miglioramento qualitativo delle aree portuali e dei depositi costieri di idrocarburi e la riduzione del derivante impatto sull'ambiente marino. Nell’ambito del suddetto obiettivo la tecnologia MBR è stata proposta come possibile trattamento di affinamento di acque contaminate da composti xenobiotici ed aventi elevata salinità.

Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) 2009 “*Caratterizzazione microbiologica, chimico-fisica e cinetica delle biomasse negli impianti di trattamento delle acque reflue che utilizzano bioreattori a membrana (MBR), finalizzata all'ottimizzazione delle condizioni di funzionamento ed alla modellazione matematica dei processi depurativi*”. Il progetto è stato finanziato dal Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR) ha avuto la durata di 24 mesi. Il progetto ha coinvolto le seguenti unità operative: Università di Napoli Federico II, Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Università di Palermo e Consiglio Nazionale delle Ricerche. Il progetto di ricerca ha avuto come obiettivo principale quello di approfondire il funzionamento dei sistemi a membrana, attraverso l’analisi sperimentale dei processi che in essi hanno luogo, e la loro modellazione matematica, volgendo l’attenzione sia alla fase biologica che a quella di separazione. Nell’ambito del progetto è stata valutata la reale convenienza circa l’applicabilità dei bioreattori a membrana attraverso una completa caratterizzazione dei cicli di trattamento in cui sono inseriti, comprensiva anche della linea fanghi.

Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) 2010-2011 “*Contaminanti emergenti in aria, acqua e suolo: dalla sorgente all'ambiente marino*”. Il progetto è stato finanziato dal Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR) ha avuto la durata di 36 mesi. Il progetto ha coinvolto le seguenti unità operative: Università di Catania, Università di Salerno, Università Milano-Bicocca, Università di Firenze, Università di Napoli Federico II, Università di Genova; Politecnico di Milano, Università di Modena e Reggio Emilia, Università di Palermo. Principale obiettivo del progetto è stato lo studio della presenza e del destino di contaminanti emergenti nell’ambiente, del relativo rischio ecologico e per la salute e delle misure di contenimento. Nello specifico, il progetto ha riguardato il monitoraggio di tutte le matrici ambientali: aria, suolo-sottosuolo e acque (incluse acque reflue, piovane, superficiali e marine). Nel corso del progetto sono stati investigate tecnologie avanzate quali trattamenti biologici a membrana, anche integrati da ulteriori trattamenti ibridi a biomassa adesa (MBBR) per la rimozione dei contaminanti emergenti.

Progetto di Ricerca di Interesse Nazionale (PRIN) 2012 dal titolo “*I consumi energetici e le emissioni di gas clima-alteranti negli impianti di depurazione: un sistema di supporto decisionale per il dimensionamento e la gestione*”. Il progetto, ancora in corso, è stato finanziato dal Ministero dell’Istruzione, dell’Università e della Ricerca (MIUR) ed ha la durata di 36 mesi a partire dal 8 marzo 2014. Il progetto coinvolge le seguenti unità operative: Università di Palermo, Università della Basilicata, Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Università di Firenze. L’obiettivo ultimo del progetto sarà la messa a punto di un sistema

di supporto decisionale per la progettazione e la gestione di impianti di depurazione con lo scopo di ridurre tanto il consumo di energia quanto la produzione di gas clima-alteranti, mantenendo sempre alta la qualità degli effluenti liquidi come indicato nella Direttiva Quadro 2000/60/CE. Nell'ambito delle attività sperimentali, mirate alla identificazione dei fattori che maggiormente influenzano la produzione di gas clima-alteranti, il progetto prevede l'investigazione dei sistemi a membrana per quanto attiene alla linea acque di un impianto di depurazione dei reflui. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: <http://ghgfromwwtp.unipa.it>

5.3 Approfondimenti su alcuni temi specifici

5.3.1 Stabilità e digeribilità dei fanghi di impianti MBR in confronto ai fanghi di impianti CAS

Tra i vantaggi dei sistemi *MBR* rispetto agli impianti che adottano il sistema convenzionale a fanghi attivi (*CAS*) viene spesso annoverata la maggiore stabilità del fango, dovuta alla più elevata età del fango (*SRT* - Sludge Retention Time), seppur con tempi di detenzione idraulica decisamente più ridotti (*HRT* - Hydraulic Retention Time).

Tale vantaggio è facilmente giustificabile nel caso di impianti *MBR* derivanti dall'attuazione di interventi di adeguamento su impianti *CAS*, dal momento che l'incremento della massa di microrganismi nella miscela aerata che ne consegue comporta l'aumento della *SRT*, non sempre compensata dalla maggiore produzione di fango di supero indotta dall'aumento del carico inquinante organico influente (e, quindi, degradato) all'interno dei reattori biologici.

Lo stesso suddetto vantaggio viene spesso attribuito, generalizzando, anche al caso di impianti costruiti ex-novo utilizzando la tecnologia *MBR*. In tali condizioni, tuttavia, questi ultimi sono caratterizzati, in confronto alla soluzione *CAS*, da una paragonabile massa complessiva di microrganismi, effettivamente ottenuta compensando con concentrazioni superiori della biomassa i volumi minori assegnati alle unità biologiche. Ne consegue che, con uguali caratteristiche del liquame influente, la massa di fango di supero prodotta dai due sistemi non è molto diversa, per cui non varia in maniera significativa nemmeno la *SRT*. Appare dunque discutibile l'opinione di ritenere in ogni caso stabile il fango prodotto dagli *MBR*, evitando di sottoporlo ad ulteriori trattamenti biologici nella linea fanghi.

Per valutare quanto appena detto, è stata avviata un'attività sperimentale (Pontoni et al., 2015), che ha portato, per il momento, all'esecuzione di prove di biometanazione (*BMP*) sui fanghi attivi provenienti da due impianti di depurazione del tipo *MBR* e da due impianti *CAS*, tutti siti in Provincia di Napoli. Nella fattispecie, gli impianti presi in considerazione sono stati i seguenti (nella Tabella 5.1 sono riassunti i relativi parametri operativi):

- Capri, denominato “*MBR 1*”;
- Marina del Cantone, denominato “*MBR 2*”;
- Nola, denominato “*CAS 1*”;
- Massa Lubrense, denominato “*CAS 2*”.

Tabella 5.1: Caratteristiche operative degli impianti di depurazione oggetto della sperimentazione

	HRT [h]	Portata [m ³ /h]	SRT [d]	COD [mg/L]	N-NH₄⁺ [mg/l]	Membrane
MBR1	20	12	30	450	40	Fibra cava
MBR2	24	65	35	350	35	Piane
CAS1	7	3300	40	310	22	-
CAS2	18	100	15	350	35	-

Per calcolare il potenziale di biometanazione, in scala banco, all'interno di bottiglie graduate in vetro borosilicato (DURAN e SYMAX), del volume di un litro, sono state riprodotte le condizioni operative di un digestore anaerobico mesofilo. Per la chiusura di ciascuna bottiglia, al disotto del tappo a vite (TAG GL45) è stato inserito un disco in silicone dello spessore di 5 mm, dotato di un foro del diametro di circa 3 cm nella parte centrale, che permette di operare scambi di materia, in particolare sostanze gassose, tra l'interno e l'esterno della bottiglia. All'uopo, è stato utilizzato un ago da siringa ipodermico sterile 22G x 1 1/2" (ago nero), introdotto nel disco e collegato a un tubicino in lattice, munito di regolatore meccanico di flusso. In tal modo è stato possibile valutare le produzioni giornaliere di metano a mezzo di un metodo di misura volumetrico (Esposito et al., 2011), dopo aver fatto gorgogliare il biogas in una soluzione fortemente basica (12% NaOH) per far solubilizzare la CO₂ presente nel biogas. Le condizioni mesofile del processo, caratterizzate da una temperatura operativa di 35±2 °C, sono state invece garantite da un bagno termostato realizzato all'interno di contenitori in plastica 35x55x35cm con immersione parziale delle bottiglie in acqua mantenuta costantemente a 37°C da termostati a sonda di potenza 200 W (TECHNO WARM, PHIL GREEN e TRONIC).

Una volta terminata la produzione di biogas, il digestato di ciascun reattore è stato nuovamente caratterizzato in termini di *ST* e di *SV* nonché soggetto all'estrazione dell'*EPS*.

Nella Figura 5.7 sono riportate le produzioni cumulate specifiche di metano per i 4 fanghi presi in esame. Sebbene sia stata misurata una produzione maggiore per i fanghi CAS1 e CAS2 (rispettivamente, 304 e 342 NmL/gVS), quelle dei fanghi MBR1 e MBR2 non sono risultate per nulla trascurabili (244 e 186 NmL/gVS, inferiori indicativamente di un terzo rispetto alle prime). Ovviamente, il limitato numero di prove non consente ancora di individuare l'effetto della *SRT*; tuttavia, già si rileva con una certa evidenza l'opportunità che i fanghi MBR siano sottoposti a trattamenti di stabilizzazione.

In merito alle conseguenze connesse a tale esigenza, degna di nota è l'osservazione degli andamenti assunti dalle curve riportate nel grafico della Figura 5.7, in particolare in corrispondenza dei tempi più vicini all'origine. Sembra, infatti, che con il fango *MBR* sia ritardata la produzione di metano, probabilmente a causa della prevalente presenza di substrati molto lentamente idrolizzabili, che rendono la fase di idrolisi, almeno per un certo lasso temporale, lo stadio limitante del processo.

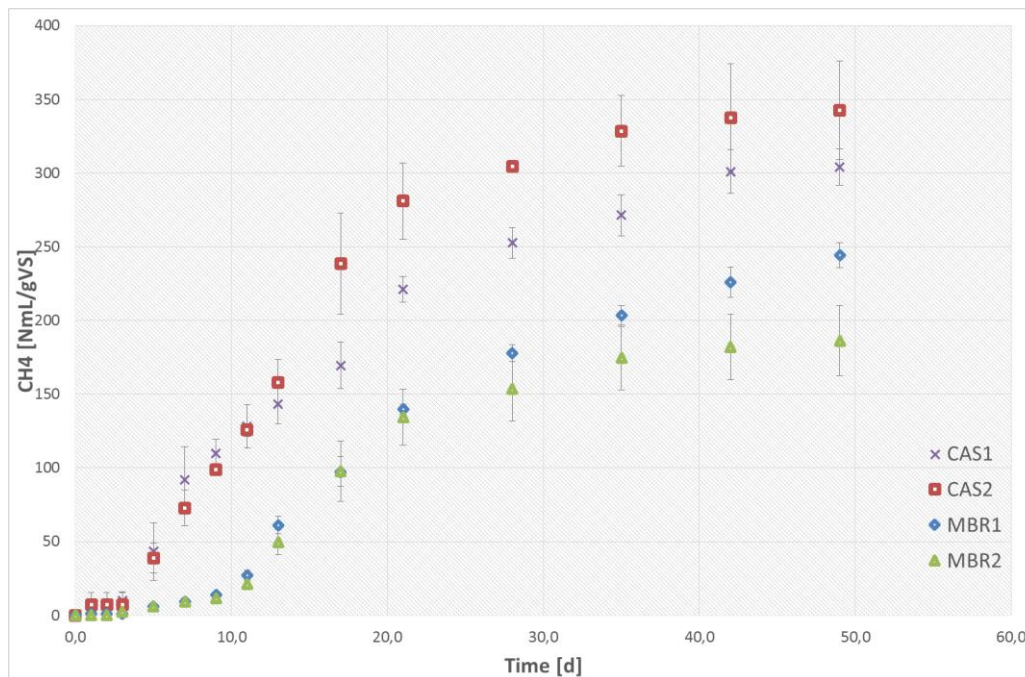


Figura 5.7: Produzioni cumulate specifiche di metano da fanghi CAS e MBR

5.3.2 Disidratabilità dei fanghi di impianti MBR in confronto ai fanghi di impianti CAS

I fanghi *MBR* sono di solito considerati più facilmente disidratabili dei fanghi *CAS*, anche se non è ancora del tutto chiarito l'effetto della digestione anaerobica, relativamente al quale i dati presenti in letteratura riguardano i soli fanghi di impianti *CAS*. Alcuni studi indicano, infatti, che la digestione anaerobica aumenta la disidratabilità, altri che piuttosto la peggiori (Lawler et al., 1986).

A riguardo, va considerato che la disidratabilità è influenzata da vari fattori, quali: proprietà e composizione del refluo influente all'impianto (Houghton and Stephenson, 2002); (Rosenberger et al., 2002); distribuzione granulometrica del fango (Karr and Keinath, 1978); tenore di solidi sospesi nella miscela areata (Rosenberger et al., 2002); presenza e concentrazione di particelle colloidali (Qi et al., 2011), abbondanza e struttura di sostanze poli-anioniche principalmente nella parte carboidratica delle sostanze polimeriche extracellulari (*EPS*) (Houghton and Stephenson, 2002). La co-presenza di molte ed eterogenee variabili rende il problema decisamente complesso da affrontare in maniera compiuta.

Sui quattro dei fanghi di cui al paragrafo precedente sono state condotte prove di disidratabilità, valutando la Resistenza Specifica alla Filtrazione (*SRF*) e il Tempo di Suzione Capillare (*CST*) (Meeten and Smeulders, 1995), ma anche misure degli *EPS*, i cui risultati sono sintetizzati nelle Tabelle 5.2 e 5.3 (Pontoni et al., 2015).

La *SRF* misura la resistenza dei fanghi ad essere disidratati per filtrazione. Tale parametro è largamente utilizzato per prevedere le prestazioni di filtri a scala reale così come per confrontare l'effetto della disidratazione su fanghi provenienti da differenti impianti di depurazione. Essa rappresenta la resistenza alla filtrazione di un teorico pannello di fango avente peso secco unitario per unità di superficie filtrante. La *SRF* è stata determinata quindi caricando 200 mL di campione in un imbuto Buchner preparato con carta da filtro Whatman N° 541. È stata quindi applicata una differenza di pressione negativa di 49 KN/m², mantenuta costante grazie ad un regolatore di pressione. Una prima frazione del filtrato, approssimativamente 20 mL, è stata scartata nell'attesa che si formasse il pannello sulla carta e il sistema raggiungesse condizioni di pressione costante. A questo punto, il volume di filtrato, raccolto in un cilindro

graduato (precisione 0,25 mL), è stato registrato ogni 30 s. La resistenza specifica è stata quindi calcolata attraverso la seguente relazione:

$$R = \frac{2PA^2}{\mu \cdot C} b \quad (10)$$

dove:

R = resistenza specifica,

P = differenza di pressione applicata,

A = Area del filtro nell'imbuto

$C = \frac{C_0 C_c}{(C_c - C_0)}$, con C_0 e C_c corrispondenti, rispettivamente, alle concentrazioni di solidi nel fango e nel pannello formatosi sul filtro.

Il parametro b è stato determinato sperimentalmente con il metodo fin qui descritto, dal momento che rappresenta la pendenza del tratto rettilineo della curva ottenuta riportando su un diagramma cartesiano: in ascissa, il volume filtrato (V); in ordinata, i valori del rapporto t/V , essendo t il tempo al quale è stato misurato il corrispondente valore di V .

Il CST riflette, invece, la capacità di un determinato fango di ritenere l'acqua. Per la sua misura, il campione di fango viene introdotto all'interno di un imbuto cilindrico metallico, a sua volta posto su un foglio di carta cromatografica standard. L'acqua si muove attraverso il foglio di carta in condizioni di suzione capillare. Il tempo necessario per raggiungere una specifica distanza viene definito CST . Nel caso in esame, il CST è stato determinato utilizzando un apparato della TRITON, costituito da un imbuto con diametro di 18 mm e carta cromatografica standardizzata, in accordo alle procedure descritte dall'APHA nel metodo 2710G. Dal momento che il CST dipende fortemente dal tenore di solidi sospesi nel fango filtrato, i valori rilevati sperimentalmente sono stati normalizzati dividendoli per la concentrazione di solidi sospesi nel fango, esprimendoli, pertanto, in s·L/g.

Tabella 5.2: Caratteristiche di disidratabilità dei fanghi freschi e digeriti anaerobicamente

	Fango fresco		Fango digerito	
	SRF [m/kg]	CST [s·L/g]	SRF [m/kg]	CST [s·L/g]
MBR1	4.67×10^{10}	0.91	5.55×10^{10}	1.05
MBR2	2.96×10^{10}	0.96	2.55×10^{10}	1.29
CAS1	1.25×10^{10}	0.27	1.31×10^{10}	0.63
CAS2	8.40×10^{10}	1.23	8.11×10^{10}	1.29

La Tabella 5.3 riporta sia i valori delle EPS , espressi in mg di EPS per g di SST, che la relativa composizione in termini percentuali di carboidrati (CH), acidi uronici (UA), proteine (PR) e sostanze umiche (HS).

Tabella 5.3: Composizione delle EPS

	CAS1	CAS2	MBR1	MBR2	CAS1	CAS2	MBR1	MBR2
	Fango fresco				Fango digerito			
EPS [mg/gTS]	32,50	109,11	66,61	55,22	24,41	58,77	54,67	44,49
% CH	30,34	31,96	28,29	22,87	34,89	38,22	36,99	25,70
% UA	4,89	6,52	14,84	25,48	5,45	5,22	8,62	9,09
% PR	48,57	43,28	38,68	37,57	49,17	46,59	49,11	58,24
% HA	16,21	14,23	18,18	18,08	10,49	9,97	5,28	6,98

Dai risultati sperimentali sembrerebbe che possa sussistere una buona correlazione tra i valori della *SRF* e quelli della *EPS*, sia sul fango fresco (Figura 5.8) che su quello digerito (Figura 5.9). Ove tale risultato dovesse essere confermato da ulteriori risultati sperimentali, si potrebbe assumere la concentrazione totale di *EPS* quale parametro di riferimento per valutare la disidratabilità del fango.

I dati riportati in Tabella IV indicano anche che il processo di digestione anaerobica sembrerebbe avere effetti relativamente poco rilevanti sul contenuto delle *EPS*, che, nelle prove finora eseguite, sono rimaste in parte consistente refrattarie all'azione biologica, seppure con qualche influenza sulla distribuzione percentuale tra i diversi contributi. Tali ultime differenze potrebbero essere alla base degli effetti delle *EPS* sulla disidratabilità del fango.

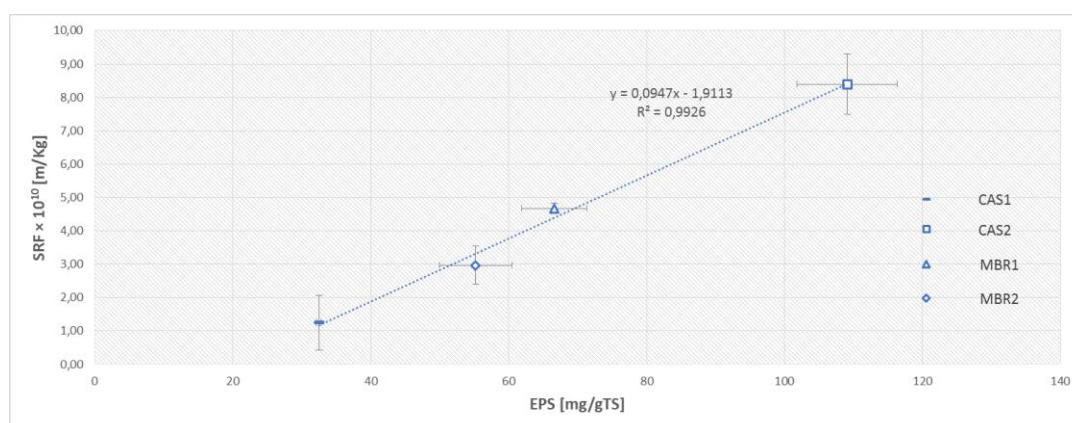


Figura 5.8: Correlazione EPS-SRF relativa al fango fresco

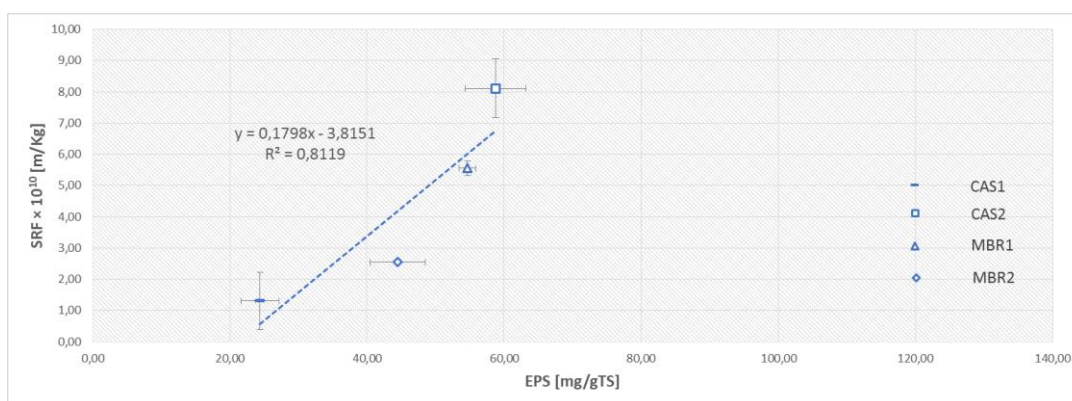


Figura 5.9: Correlazione EPS-SRF relativa al fango digerito

5.3.3 Difficoltà nella solubilizzazione dell'ossigeno nei sistemi MBR

I sistemi di depurazione biologica aerobici comportano elevati consumi di ossigeno, la cui solubilizzazione nella massa liquida in trattamento incide significativamente sui costi di esercizio degli impianti. Tali costi sono particolarmente rilevanti nei sistemi *MBR*, in quanto caratterizzati, in confronto ai sistemi *CAS*, da più ridotti tassi di solubilizzazione dell'ossigeno, per effetto, soprattutto, della necessità di assicurare più elevati valori delle concentrazioni della biomassa e dell'ossigeno disciolto nelle unità di processo, per compensare la riduzione dei volumi di queste ultime.

Il fango di un *MBR* assume, infatti, le caratteristiche di un fluido non newtoniano, presentando una viscosità via via maggiore al crescere della concentrazione di biomassa, con la duplice conseguenza che risulta limitato il trasferimento di massa dell'ossigeno e aumentano i costi dovuti all'aerazione.

L'entità della suddetta limitazione del tasso di solubilizzazione dell'ossigeno è stata rilevata nel corso di una sperimentazione eseguita presso l'*University of California - Irvine* (USA), i cui risultati sono descritti nel lavoro (Ciancia et al., 2015).

In particolare, la sperimentazione è consistita nell'aerazione di uno stesso volume di acqua (Figura 5.10), in 9 differenti condizioni operative, ottenute variando: la portata di aria immessa; la concentrazione di Gomma di Xantano (XG) all'interno dell'acqua (avendo verificato preliminarmente l'affinità delle viscosità delle soluzioni di XG con quelle delle sospensioni costituenti la miscela aerata). Le concentrazioni di XG e le portate d'aria immesse sono quelle indicate, rispettivamente, nella colonna 1 nonché nelle colonne 2 e 3 della Tabella 5.4; a sua volta, la colonna 4 riporta i valori misurati del coefficiente globale di trasferimento, K_{La} . L'andamento di quest'ultimo è anche rappresentato nella Figura 5.11. I risultati mostrano con chiarezza la riduzione di K_{La} all'aumentare della concentrazione di XG, con le conseguenziali ripercussioni sul tasso di solubilizzazione dell'ossigeno nella miscela aerata.



Figura 5.10: Apparato sperimentale

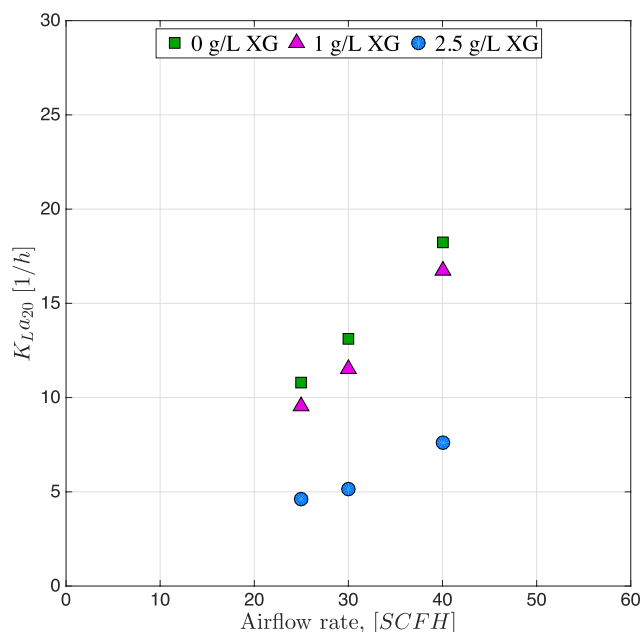


Figura 5.11: Valori di K_{La} nelle diverse condizioni operative

Tabella 5.4 Condizioni operative delle prova di solubilizzazione dell'ossigeno e valori

XG [g/L]	Portata di aria		K_{La} [1/h]
	[SCFH]	[Nm ³ /h]	
(1)	(2)	(3)	(4)
0	25	0,708	10.78
	30	0.850	13.13
	40	1.133	18.22
1	25	0,708	9.52
	30	0.850	11.50
	40	1.133	16.73
2.5	25	0,708	4.60
	30	0.850	5.12
	40	1.133	7.59

5.3.4 Cenni sull'uso di nanomateriali nei sistemi MBR

Nel campo del trattamento delle acque, interesse sempre maggiore viene rivolto all'utilizzo dei nanomateriali, tipicamente definiti come quelli caratterizzati da almeno una dimensione con lunghezza inferiore a 100 nm. Per effetto di tale caratteristica, essi possono presentare proprietà del tutto peculiari, che le differenziano dai materiali macroscopici e soprattutto riconducibili agli elevati valori che assumono: la superficie specifica; la reattività; il potere adsorbente; la permeabilità; la conducibilità.

Nel campo delle membrane, il ricorso ai nanomateriali è considerato una grande opportunità per migliorarne: la permeabilità; la facilità di pulizia; la resistenza al fouling; la stabilità meccanica e termica; la capacità di degradazione dei contaminanti.

La riduzione del *fouling* è stata già sperimentata aggiungendo a membrane polimeriche nanoparticelle di ossido di metallo comprendenti alluminio, silice, zeolite e TiO₂. A loro volta, l'aggiunta di nanomateriali antimicrobici, quali quelli a base di Argento (nano-Ag) o i nanotubi di [carbonio](#) (CNT), possono ridurre il *biofouling* della membrana. Infine, le membrane che incorporano nanoparticelle foto-catalitiche (normalmente nano-TiO₂ o nano-TiO₂ modificati) combinano la loro funzione di separazione fisica con la reattività di un catalizzatore per ottenere la degradazione di contaminanti contenuti in acqua e refrattari all'azione biologica.

A titolo di esempio, nella Figura 5.12 (Belgiorno et al., 2014), sono riportati i valori della *TMP* misurati, a parità di condizioni, utilizzando membrane caratterizzate dall'introduzione di nanomateriali di natura polimerica (curve inferiori) ovvero in assenza di tali particelle (curva superiore): è evidente che nel primo caso i fenomeni di fouling sono consistentemente più limitati.

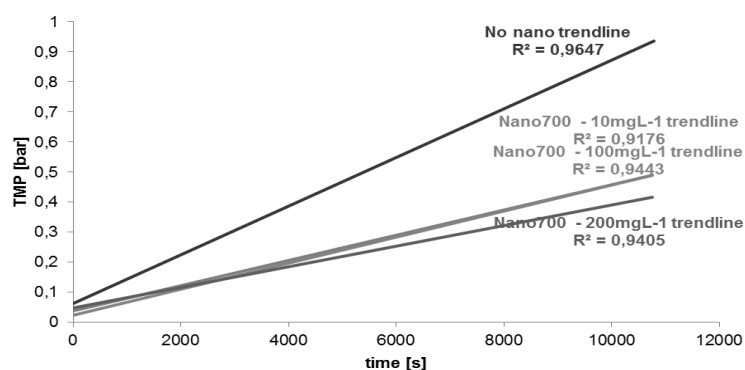


Figura 5.12: Effetto indotto sulla *TMP* dalla presenza sulle membrane di nanoparticelle

Bibliografia

- Belgiorno V., Borea L., Naddeo V., Scannapieco D. (2014). *Ricerca e Innovazione per il Controllo del Fouling*. Atti del Corso BIOMAC 2014, 87-101, Edizioni Aster.
- Ciancia V., Ambrosino M., Pirozzi F., Detwiler R., Mohraz A., Rosso D. (2015). *Effects of mixed liquor viscosity on alpha factors*. Submitted.
- Esposito G., Frunzo L., Panico A., Pirozzi F. (2011). *Model calibration and validation for OFMSW and sewage sludge co-digestion reactors*. Waste management, 31, 12, 2527-2535.
- Houghton J. I., Stephenson T. (2002). *Effect of influent organic content on digested sludge extracellular polymer content and dewaterability*. Water Research, 36, 14, 3620-3628.
- Karr P. R., Keinath T. M. (1978). *Influence of particle size on sludge dewaterability*. Journal Water Pollution Control Federation, 1911-1930.
- Lawler D. F., Chung Y. J., Hwang S.-J., Hull B. A. (1986). *Anaerobic digestion: effects on particle size and dewaterability*. Journal Water Pollution Control Federation, 1107-1117.
- Meeten G., Smeulders J. (1995). *Interpretation of filterability measured by the capillary suction time method*. Chemical Engineering Science, 50, 8, 1273-1279.
- Pontoni L., D'Alessandro G., d'Antonio G., Esposito G., Fabbicino M., Frunzo L., Pirozzi F. (2015). *Effect of anaerobic digestion on rheological parameters and dewaterability of aerobic sludges from MBR and Conventional Activated Sludge plants*, Chemical Engineering Transaction, 43, 2311-2316.
- Qi Y., Thapa K. B., Hoadley A. F. (2011). *Application of filtration aids for improving sludge dewatering properties—a review*. Chemical Engineering Journal, 171(2), 373-384.
- Rosenberger S., Kubin K., Kraume M. (2002). *Rheology of activated sludge in membrane bioreactors*. Engineering in Life Sciences, 2, 9, 269-275.

6. CONVEGNI RECENTI SUGLI IMPIANTI MBR

Di seguito verranno riportati tutti i convegni svolti in ambito nazionale ed internazionale inerenti la tematica dei sistemi MBR.

6.1 Convegni internazionali

Euromembrane 2012, European Membrane Society and Imperial College London. September 23–27, 2012, London, UK

3rd International Conference on Membrane Bioreactors (MBR) for Wastewater Treatment (MBR Asia 2013). January 21–22, 2013, Bangkok, Thailand

EUROMEMBRANE 2015. 6–10 settembre 2015, Aachen, Germany

6.2 Convegni nazionali

BioMAC 2012: bioreattori a membrane (MBRs) per la depurazione delle acque. Università degli studi di Salerno, Fisciano (Salerno) 5-6 luglio 2012.

BioMAc 2013: bioreattori a membrane (MBR) per la depurazione delle acque”. Università di Palermo, Palermo 4-5 luglio 2013.

51^a Giornata di Studio di Ingegneria Sanitaria-Ambientale *Impianti MBR - Membrane Biological Reactor: aspetti tecnici ed esperienze gestionali*. Università di Brescia, 9 luglio 2014

BioMAc 2014: bioreattori a membrane (MBR) per la depurazione delle acque. Università di NaPoli “Federico II”, Napoli, 6-7 ottobre 2014.

52^a Giornata di Studio di Ingegneria Sanitaria-Ambientale *La gestione degli impianti MBR: criticità, soluzioni attuate e sviluppi futuri*. Università di Brescia, 10 giugno 2015.

La progettazione e la gestione degli impianti MBR – organizzato da L’Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano in collaborazione con FAST con la collaborazione scientifica del Politecnico di Milano. Milano, 29 settembre 2015.

Workshop “Progettazione e gestione degli impianti di depurazione MBR” – 4 novembre 2015, ECOMONDO – Rimini

La progettazione e la gestione degli impianti MBR. 27 novembre, 2015 – Politecnico di Bari

BioMAc 2015: trattamenti biologici avanzati per la tutela dell’ambiente. Università di Salerno, Fisciano (Salerno), 22-23 ottobre 2015.

Innovative Wastewater Treatment Technologies for energy saving and environmental protection – Università di Palermo, 20 maggio 2016.

Sintesi della 52ª Giornata di Studio “La gestione degli impianti di depurazione MBR: criticità, soluzioni attuate e sviluppi futuri” - Aula Magna di Ingegneria, Brescia, 10 giugno 2015

Il convegno si è aperto con una relazione introduttiva del Prof. Carlo Collivignarelli (Università di Brescia) che, dopo aver richiamato le finalità dell'attività del GdL “Gestione impianti di depurazione” e del convegno, ha annunciato l'istituzione di un Osservatorio sugli impianti MBR in Italia. L'obiettivo dell'Osservatorio è promuovere iniziative tecnico-scientifiche (ad es. studi e ricerche) e formative (ad es. corsi e convegni) per favorire l'approfondimento e la diffusione di conoscenze ed esperienze in merito alla progettazione e alla gestione degli impianti MBR in Italia.

Sono seguiti tre interventi di carattere generale:

- il Prof. Gianni Andreottola (Università di Trento) ha illustrato l'applicazione dei processi MBR nel campo della depurazione delle acque reflue, soffermandosi sui principi di base del loro funzionamento, sulle possibili configurazioni impiantistiche e sui criteri progettuali, nonché sulla loro evoluzione tecnica;
- il Prof. Francesco Pirozzi (Università di Napoli “Federico II”) ha presentato le esperienze di ricerca nel trattamento dei reflui mediante processi biologici a membrana, soffermandosi in particolare su quelle concernenti il fouling, nonché la stabilità, la digeribilità e la disidratabilità del fango biologico prodotto da tali processi;
- l'Ing. Mentore Vaccari (Università di Brescia) ha illustrato i risultati conclusivi dell'indagine che il GdL “Gestione impianti di depurazione” ha svolto con il duplice obiettivo di censire gli impianti MBR presenti in Italia e individuare i benefici e le problematiche gestionali che li caratterizzano.

La mattinata è continuata con l'illustrazione di esperienze gestionali che riguardano depuratori MBR sia urbani sia industriali:

- l'Ing. Roberto Romano (A2A Ciclo Idrico, Brescia) ha presentato il progetto di ristrutturazione e potenziamento dell'impianto di depurazione MBR di Montichiari (BS). Nello specifico sono state riportate le specifiche del sistema MBR installato, i vantaggi e le relative problematiche gestionali legate alla tecnologia stessa;
- il P.I. Enzo Paradiso (Pavia Acque, Pavia) ha descritto i principi di progettazione e le motivazioni che hanno portato alla ristrutturazione dell'impianto di depurazione MBR di Cava Manara (PV);
- l'Ing. Enzo Di Nunno (Acea Ato2, Roma) ha illustrato le caratteristiche dell'intervento di potenziamento dell'impianto di depurazione MBR di Monterotondo (RM) al fine di rispondere alla domanda di incremento d'utenza proveniente dal Comune, a tutela del corpo idrico recettore, in concomitanza con la mancanza di spazi fisici disponibili per realizzare un ampliamento strutturale dell'impianto;
- dott. Nicola Tizzoni (ASM Voghera, Pavia) ha illustrato l'intervento di potenziamento del depuratore di Casteggio (PV) tramite l'installazione di una sezione di filtrazione su membrana in una delle due linee di trattamento esistenti;
- l'Ing. Francesco Ruggiero (Bema, Roma) ha presentato il caso del depuratore MBR di Rocca Priora (RM). Nello specifico ha riportato i primi risultati di funzionamento a distanza di 18 mesi dall'avviamento, che evidenziano un'ottima affidabilità ed efficienza depurativa del comparto di filtrazione a membrane, ma anche una serie di aspetti critici legati principalmente alla sezione dei pretrattamenti;
- l'Ing. Nello Corrao (Latte Arborea, OR) ha descritto l'intervento di potenziamento eseguito sull'impianto di depurazione delle acque reflue a servizio dello stabilimento lattiero-caseario Latte Arborea, sito ad Arborea (OR). L'impianto ha visto la necessità di installare la tecnologia a

membrane (MBR) a seguito del progressivo aumento delle portate da trattare e la conseguente difficoltà nel rispettare i limiti restrittivi imposti allo scarico in area sensibile;

- l'Ing. Cinzia Cantoni (Ing.eco., Fontanellato, PR) ha illustrato le caratteristiche costruttive e la gestione dell'impianto MBR a servizio di uno stabilimento di prodotti da forno e pasta fresca;
- l'Ing. Mauro Lucchese (Setam, Flero, BS) ha presentato il caso del depuratore MBR a servizio dello stabilimento Saves di Cazzago San Martino (BS), illustrando in particolare le principali motivazioni che hanno portato alla realizzazione dell'impianto, le modalità di conduzione e le principali problematiche gestionali affrontate;
- l'Ing. Maria Cristina Collivignarelli (Università di Pavia) ha illustrato il caso dell'impianto di depurazione MBR termofilo presente nella piattaforma di trattamento rifiuti liquidi Idroclean di Casirate D'Adda (BG). In particolare la relatrice ha riportato i risultati del monitoraggio di tale impianto, che, nel corso degli anni, ha avuto differenti configurazioni impiantistiche: (1) reattore biologico termofilo + sedimentatore (2002-2005); (2) reattore biologico termofilo + ultrafiltrazione (MBR termofilo) (2006); (3) MBR termofilo + nanofiltrazione (a partire dal 2007). Il continuo up-grading dell'impianto ha evidenziato un incremento nei rendimenti di rimozione del COD, con una notevole stabilità del processo.

Il Prof. Giorgio Bertanza (Università di Brescia) ha quindi coordinato la Tavola Rotonda intitolata "La gestione degli impianti MBR: quali prospettive?", alla quale hanno preso parte, in rappresentanza dei gestori, l'ing. Mauro Lucchese (Setam, Flero, BS) e l'ing. Roberto Romano (A2A Ciclo Idrico, Brescia), e i seguenti esperti di società che producono, commercializzano e/o costruiscono impianti di depurazione MBR: l'ing. Lucio Boveri (Evoqua), l'Ing. Giuseppe dell'Acqua (Ghezz International), il Dott. Stefano Scappazzoni (General Electric), l'Ing. Dario Gallottini (Kubota), l'Ing. Giuseppe Guglielmi (Koch), e il dott. Ivan Zerbinati (Microdyn Nadir).

Nel corso del dibattito, i gestori degli impianti hanno riferito che gli impianti di depurazione MBR garantiscono rese depurative molto elevate, però presentano una notevole complessità impiantistica rispetto agli impianti a fanghi attivi tradizionali e generalmente comportano consumi energetici superiori. Per questo, le aziende produttrici di membrane da tempo stanno sviluppando (e continueranno a farlo) nuovi sistemi e modalità di fornitura dell'aria che consentono di ridurre i consumi di energia (nell'ultimo decennio i consumi energetici degli impianti MBR si sono sostanzialmente dimezzati) e, conseguentemente, i costi operativi, pur mantenendo un adeguato grado di pulizia delle membrane. Data la complessità impiantistica, a parere delle aziende costruttrici è essenziale che il processo MBR sia dotato di una adeguata automazione (che regoli il processo in funzione di parametri chiave quali TMP e T), ma anche che i gestori siano adeguatamente formati e che mantengano un idoneo piano di manutenzione degli organi elettro-meccanici. In questo modo, la vita utile delle membrane può superare i 10 anni nel trattamento di reflui urbani e i 7 anni nel caso di reflui industriali. Non bisogna comunque dimenticare che i processi MBR risultano efficaci solo se a monte sono presenti pretrattamenti (in particolare di grigliatura e dissabbiatura/disoleatura) idonei ed efficaci.

Particolare rilevanza assumono anche i sistemi di pulizia e di lavaggio, che nel settore industriale possono essere diversificati sia come chemicals utilizzati che come periodicità delle operazioni in relazione al potere incrostante del filtrato del fango attivo, che come noto è correlato ai valori di pH, temperatura e durezza dell'acqua.

7. LIBRI RECENTI SUGLI IMPIANTI MBR

Judd S. (2011) The MBR book – Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment. Second edition. Elsevier Ltd, Oxford (UK).

Naddeo V e Belgiorno V. (eds.) “Bioreattori a membrane per il trattamento delle acque reflue”. Ed. Aster, Salerno 2012. ISBN: 978-1-4717-5097-7

WEF - Water Environment Federation (2012) Membrane BioReactors. WEF Manual of Practice No. 36. Mc Graw-Hill ed.

Mannina G., Torregrossa M. e Viviani G. (eds.) “BioMAc 2013: i bioreattori a membrane (MBR) per la depurazione delle acque reflue”. Ed. Caracol, Palermo 2013. ISBN: 978-88-89440-96-4.

d’Antonio G., Fabbricino M. e Pirozzi F. (eds.) “Bioreattori a membrane (MBR) per il trattamento delle acque reflue, BioMAc 2014”. Ed. Aster, Napoli 2014. ISBN: 978-1-326-01165-9

Belgiorno V. e Naddeo V. (Eds.) “Trattamenti biologici avanzati – BioMAc 2015”. Ed. Aster, Salerno 2015.

Park H.D., Chang I.S., Lee K.J (2015). Principles of membrane bioreactors for wastewater treatment. 1st edition, IWA, CRC Press.