

**OSSERVATORIO SUGLI
IMPIANTI DI
DEPURAZIONE MBR**

Rapporto 2017

Publicato da Gruppo di Lavoro “Gestione Impianti di depurazione”
Università degli Studi di Brescia, via Branze 43, 25123 Brescia (Italia)
2017
ISBN 978-88-97736-05-9
<http://gdl-gringsan.unibs.it/>

ELENCO DEGLI AUTORI

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

Giuseppe d’Antonio, Massimiliano Fabbricino, Antonio Panico, 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

Laura Borea, Vincenzo Belgiorno, 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: A2A Ciclo
Idrico, Caldic Italia, Evoqua Water Technologies, GE Power & Water, Ingeco, Kubota, Koch Membrane
System, Setam, MG, Waste 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	6
3. BENEFICI E CRITICITÀ SOTTO IL PROFILO GESTIONALE.....	17
4. RECENTI SVILUPPI TECNOLOGICI	21
4.1 I processi MBR.....	21
4.2 Mercato attuale degli MBR	25
4.3 Recenti sviluppi tecnologici	27
4.3.1 Sviluppi nei moduli di membrane.....	27
4.3.2 Interventi per migliorare le prestazioni dei sistemi MBR.....	31
4.3.3 Sviluppi nelle configurazioni degli impianti e nelle tipologie di processo	38
4.3.4 Trattamenti anaerobici MBR.....	42
5. RECENTI RICERCHE.....	51
5.1 Principali ricerche comparse in riviste scientifiche.....	51
5.2 Presentazione di progetti di ricerca in corso/recentemente conclusi.....	58
5.2.1 Progetti di ricerca internazionali.....	58
5.2.2 Progetti di ricerca nazionali.....	60
5.3 Approfondimenti su alcuni temi specifici.....	62
6. CONVEGNI RECENTI SUGLI IMPIANTI MBR.....	70
6.1 Convegni internazionali.....	70
6.2 Convegni nazionali.....	70
7. LIBRI RECENTI SUGLI IMPIANTI MBR	72

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 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 270 impianti MBR. Ad oggi sono stati censiti 222 impianti, di cui 106 trattano reflui civili e 116 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.

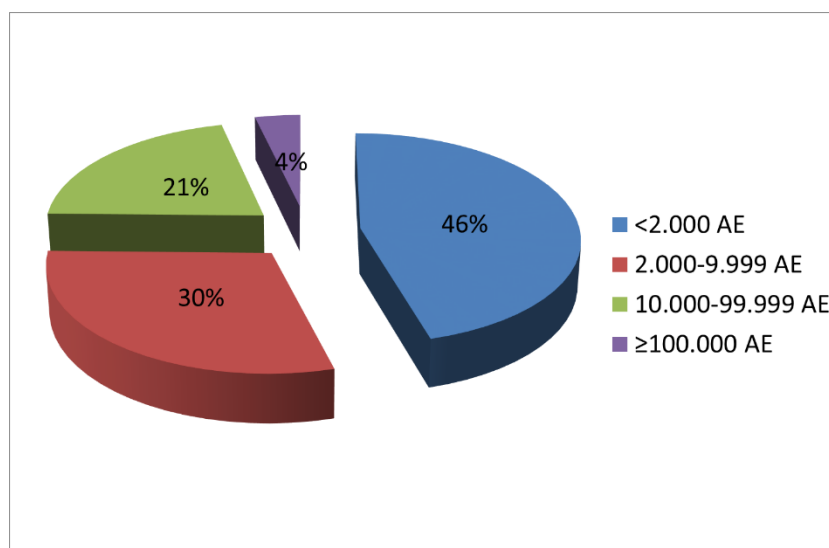


Figura 1.1: Suddivisione degli impianti che trattano reflui civili in base alla popolazione equivalente servita

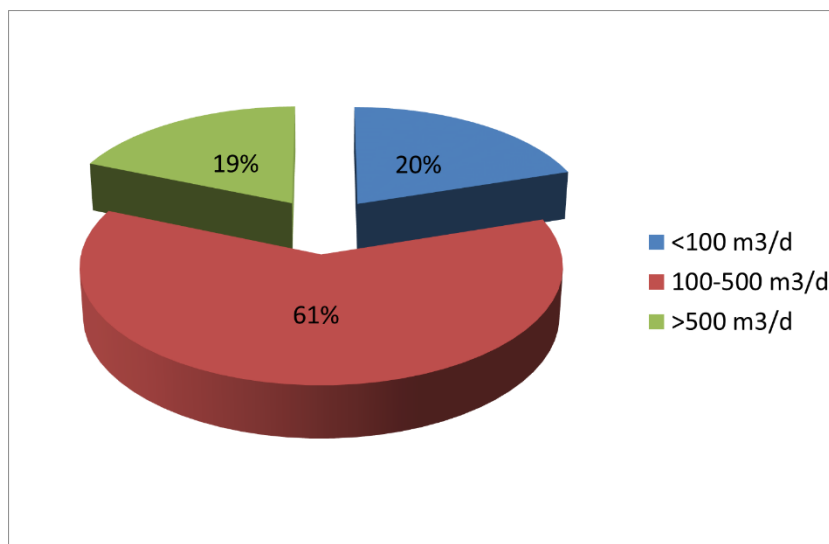


Figura 1.2: Suddivisione degli impianti che trattano reflui industriali in base alla portata giornaliera trattata

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.

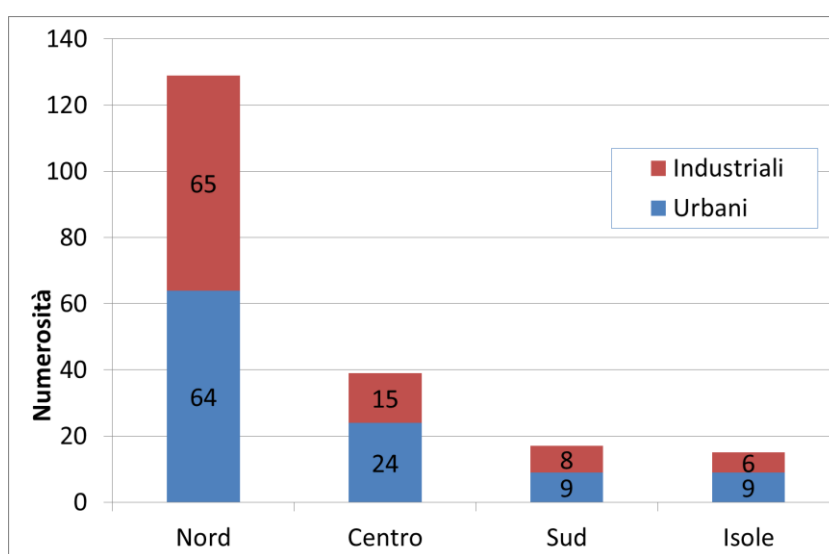


Figura 1.3: Suddivisione degli impianti MBR censiti in base alla localizzazione ed alla tipologia di refluo trattato

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.

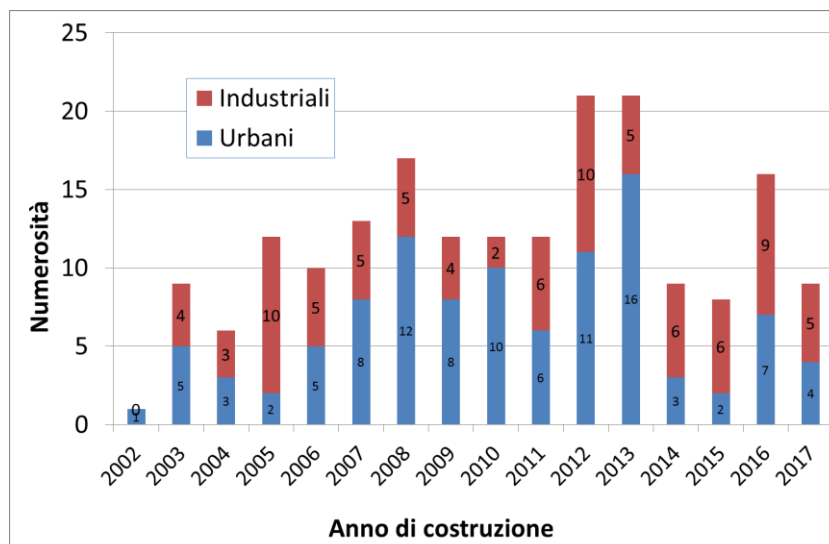


Figura 1.4: Suddivisione degli impianti in base all'anno di realizzazione e tipologia di refluo trattato

Le membrane installate negli impianti italiani sono perlopiù piane (69%) e a fibra cava (27%) (Figura 1.5). Recentemente si sono affacciate sul mercato membrane cosiddette “ibride”.

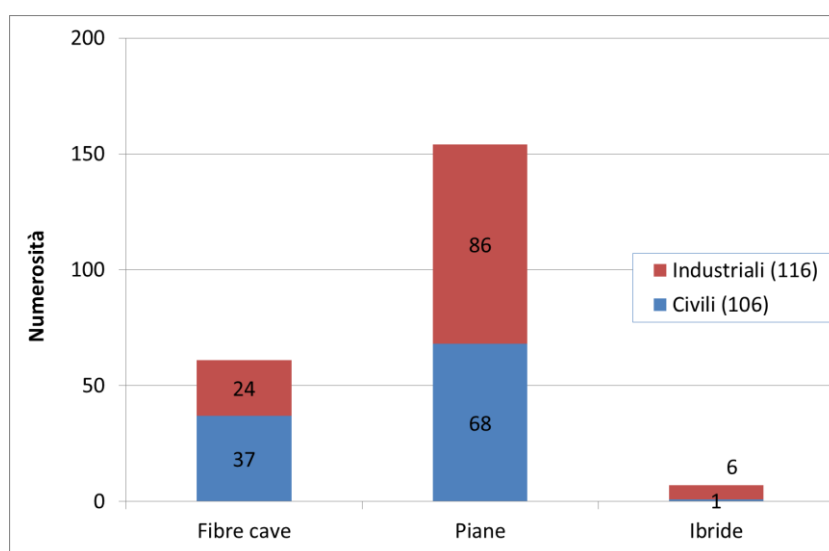



Figura 1.5: Suddivisione degli impianti in base alla tipologia di membrane installate e tipologia di refluo trattato

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 nel 2016 e nel 2017.

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 reflu trattato	Reflu 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 (m ³ /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 reflu trattato	Reflu 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 (m ³ /h)	7 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Fibre cave
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Marzo 2016

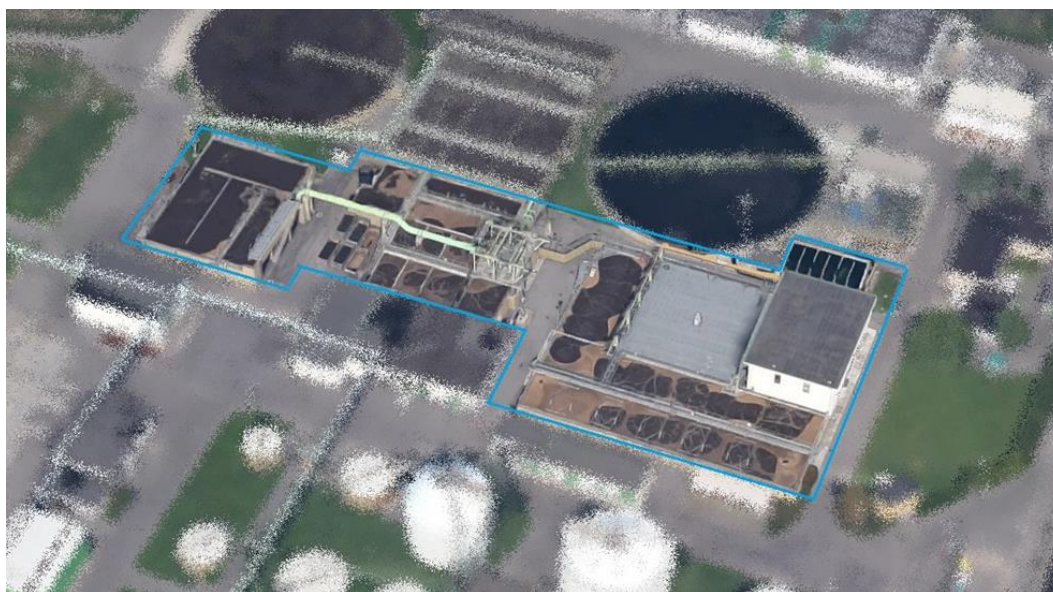
Nuova installazione - Impianto a servizio di azienda cosmetica	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Toscana
2) Nome del gestore	n.d.
3) Tipologia di refluo trattato	Refluo Industriale
4) Potenzialità impianto (AE)	n.d.
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	480 kgCOD/d
6) Portata 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 refluo trattato	Refluo 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

Nuova installazione - Impianto containerizzato per trattamento reflui municipali	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Lazio
2) Nome del gestore	Acea
3) Tipologia di refluo trattato	Municipale
4) Potenzialità impianto (AE)	500 AE
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	30 kgBOD/giorno
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	100 m ³ /d = 5,4 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Membrane piane
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	2017

Nuova installazione - Impianto a servizio di un'industria farmaceutica	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Lazio
2) Nome del gestore	-
3) Tipologia di refluo trattato	Acque reflue da industria farmaceutica
4) Potenzialità impianto (AE)	-
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	768 kgCOD/giorno
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	8 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	N. 2 modulo Bio-Cell (Microdyn-Nadir) BC 416. Superficie totale 2 x 416 m ² = 832 m ²
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Ottobre 2016

Nuova installazione - Impianto a servizio di un'azienda alimentare	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	
	Caivano (NA)
2) Nome del gestore	
	-
3) Tipologia di refluo trattato	
	Acque reflue da azienda alimentare
4) Potenzialità impianto (AE)	
	-
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	
	720 kgCOD/giorno
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	
	10 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	
	Membrane piane
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	
	2017

Nuova installazione - Impianto a servizio di un impianto di imbottigliamento	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	
	Bedonia (PR)
2) Nome del gestore	
	-
3) Tipologia di refluo trattato	
	Acque reflue impianto di imbottigliamento
4) Potenzialità impianto (AE)	
	-
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	
	168 kgCOD/giorno
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	
	480 m ³ /giorno = 24 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	
	Membrane piane
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	
	Avviamento Novembre 2016

Nuova installazione – Impianto municipale	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Montella (AV)
2) Nome del gestore	-
3) Tipologia di refluo trattato	Municipale
4) Potenzialità impianto (AE)	12.000 AE
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	720 kgBOD/giorno
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	140 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Membrane piane
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	Maggio 2016

Nuova installazione - Impianto di trattamento percolato da discarica	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	Agrigento
2) Nome del gestore	SEAP
3) Tipologia di refluo trattato	Acque reflue da piattaforma ecologica e percolato di discarica
4) Potenzialità impianto (AE)	-
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	2.000 kgCOD/giorno
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	400 m ³ /giorno = 16,7 m ³ /h
7) Tipologia di MBR installato	Membrane piane
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	2017

Nuova installazione – Impianto a servizio di un'azienda tessile	
1) Localizzazione impianto e indirizzo	
	Romagnano Sesia (NO)
2) Nome del gestore	
	Alberto Mercandino
3) Tipologia di refluo trattato	
	Tessile – lavaggio lane
4) Potenzialità impianto (AE)	
5) Carico organico giornaliero medio (kgBOD/d e/o kgCOD/d)	
	2500 kgCOD/d
6) Portata media oraria trattata (m³/h)	
	Totale: 50
7) Tipologia di MBR installato	
	Membrane piane
8) Data di realizzazione e avvio della sezione MBR	
	Marzo 2016

3. BENEFICI E CRITICITÀ SOTTO IL PROFILO GESTIONALE

Nel presente paragrafo si riportano i risultati di un'indagine svolta nel 2017 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 40 questionari; 21 riguardano impianti urbani e 19 impianti a servizio di attività produttive. Le Figure 3.1 e 3.2 mostrano la distribuzione del campione indagato in base alla potenzialità dell'impianto ed alla tipologia di reflu trattato; la Figura 3.3 riporta la tipologia di membrane installate.

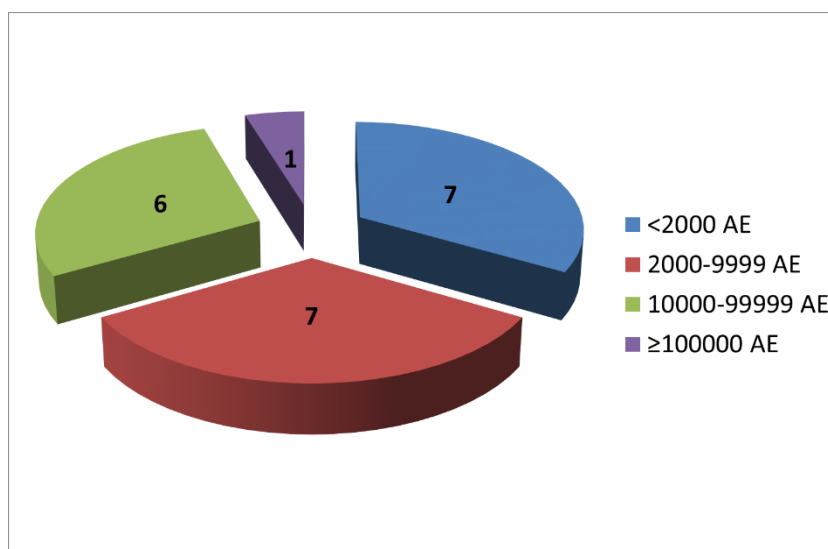


Figura 3.1: Classificazione degli impianti che trattano reflui civili in base alla popolazione servita

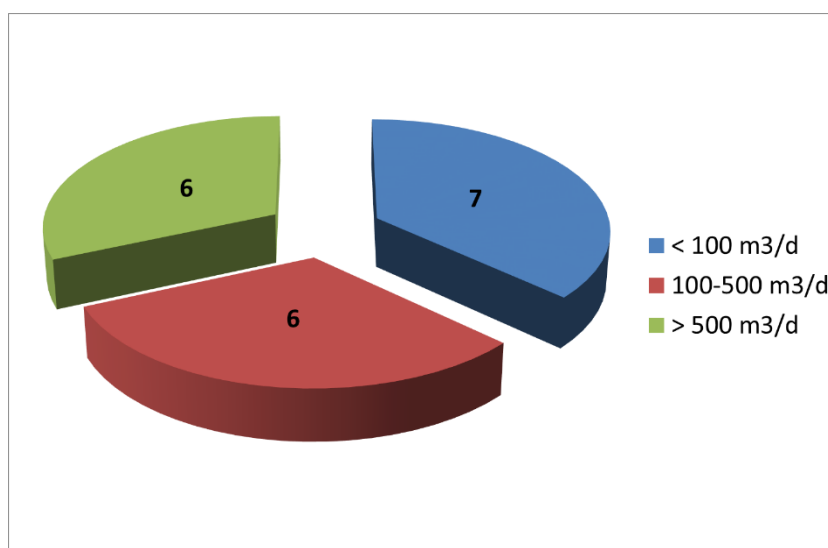


Figura 3.2: Classificazione degli impianti che trattano reflui industriali in base alla portata giornaliera trattata

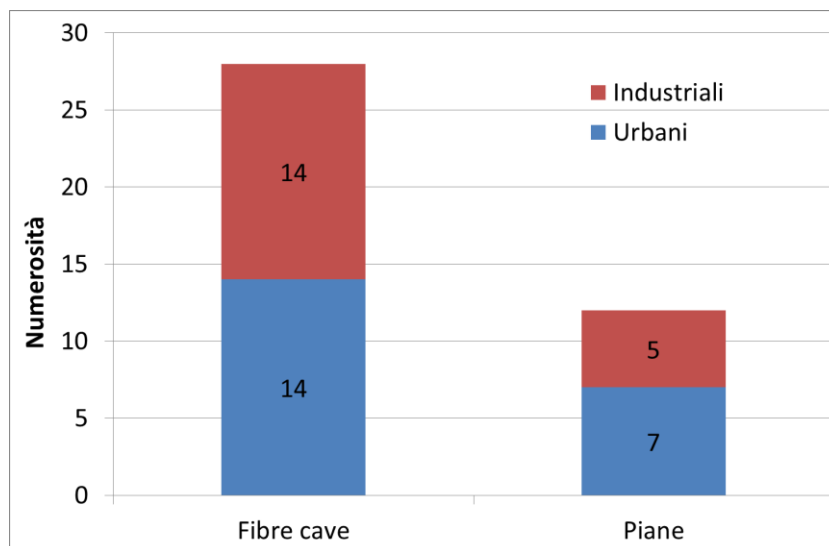


Figura 3.3: Suddivisione degli impianti in base alla tipologia di membrane installate e tipologia di refluo trattato

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.

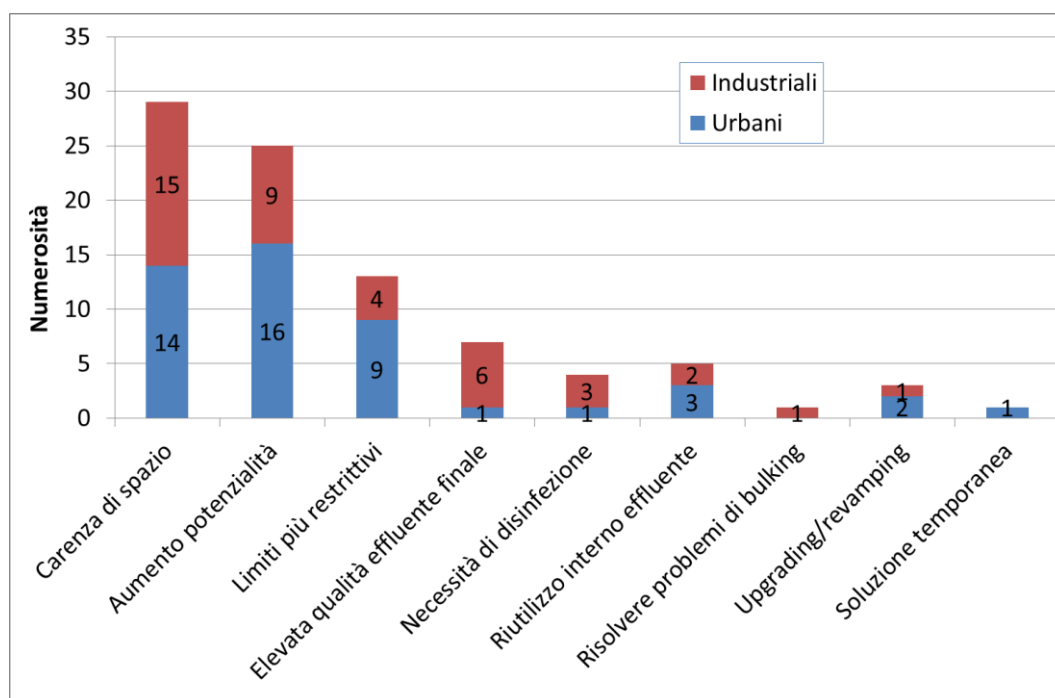


Figura 3.4: Motivi dell'installazione del processo MBR

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, al possibile riutilizzo interno del refluo depurato e alla riduzione della produzione di fango.

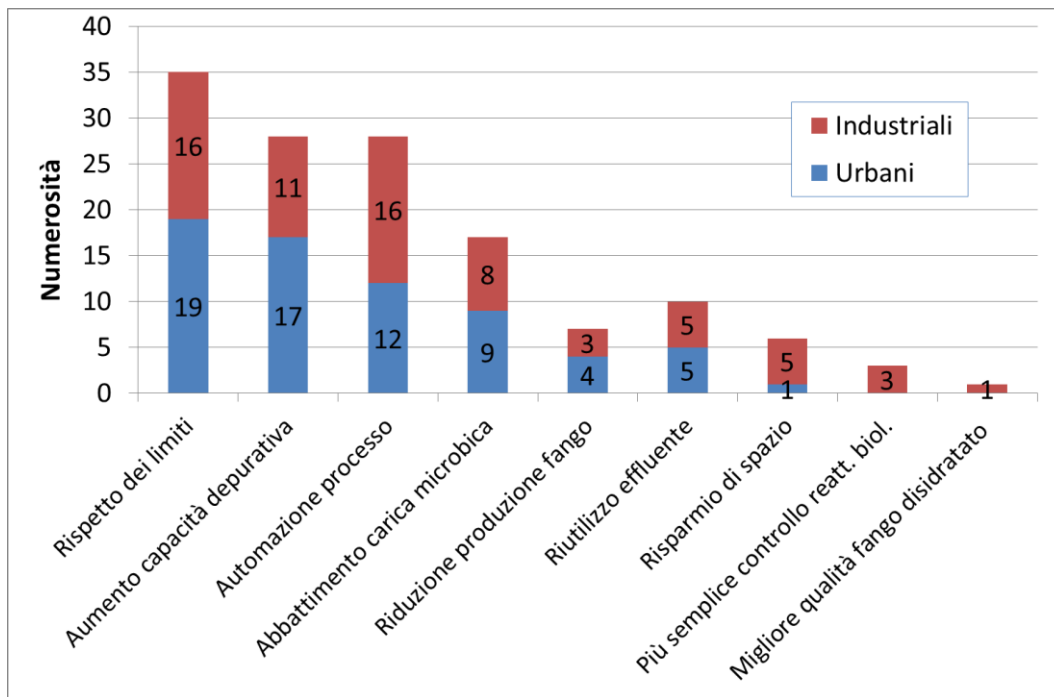


Figura 3.5: Vantaggi gestionali ottenuti grazie al processo MBR

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 ridurre 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.

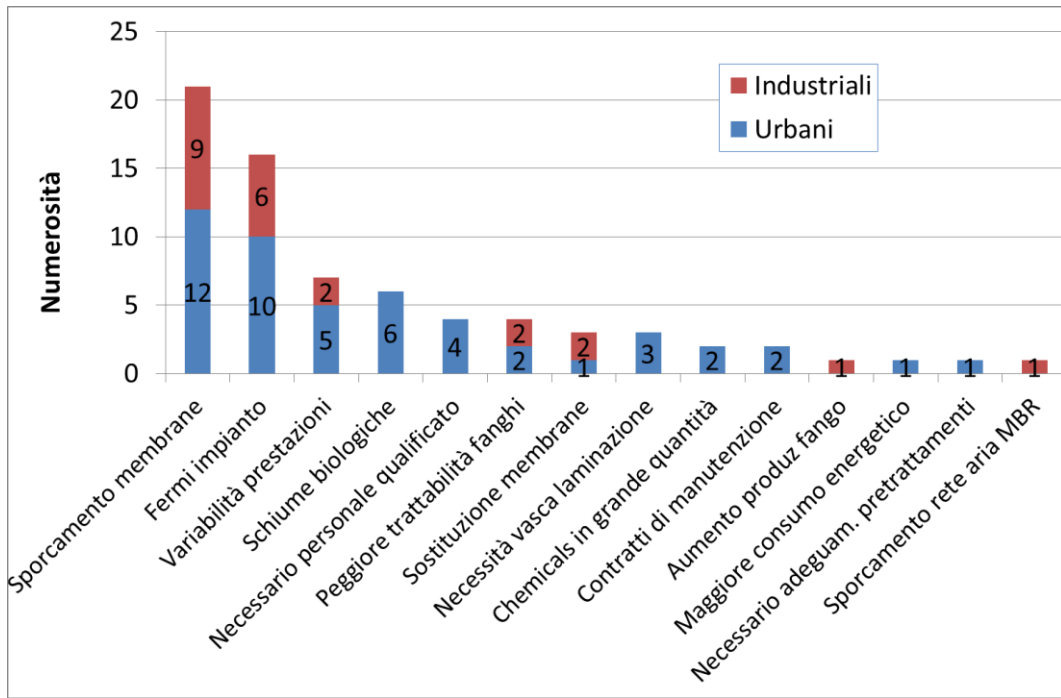


Figura 3.6: Principali problematiche gestionali della sezione MBR

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).

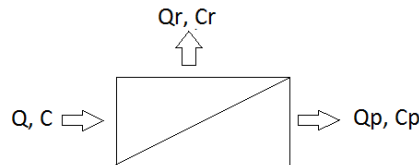


Figura 4.1: Principi di funzionamento della filtrazione su membrana

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.

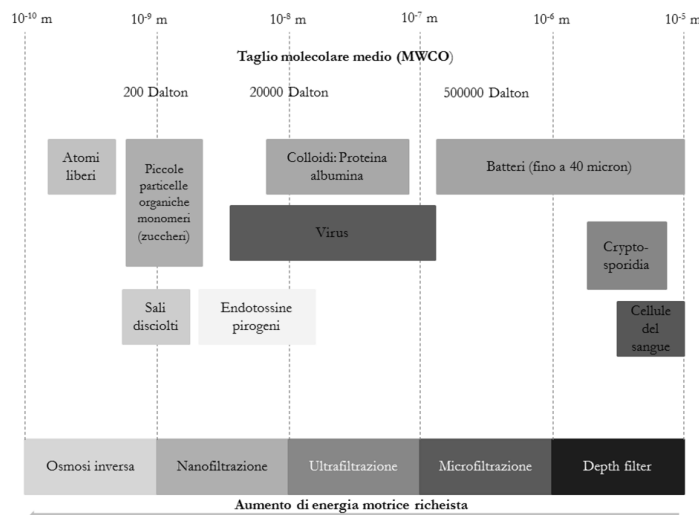


Figura 4.2: Classificazione delle membrane in funzione del diametro dei pori (adattato da Stephenson et al., 2000)

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.

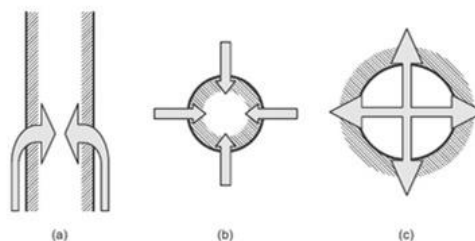


Figura 4.3: Rappresentazione schematica del flusso attraverso le membrane: (a) FS, (b) HF e (c) CT o MT (Judd, 2011)

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.

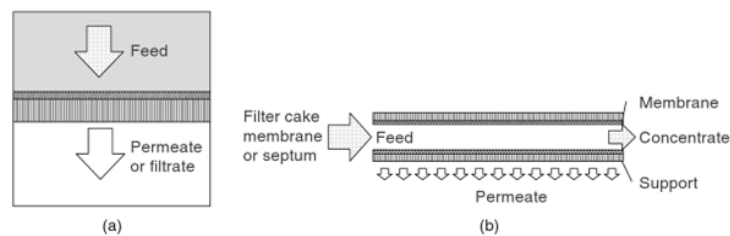


Figura 4.4: Filtrazione dead-end (a) e cross-flow (b) (adattata da Judd, 2011)

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).

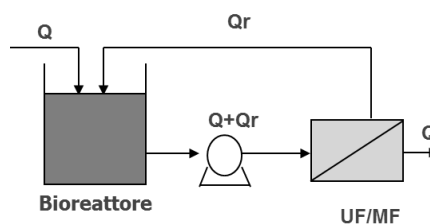


Figura 4.5: Configurazione side-stream

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.

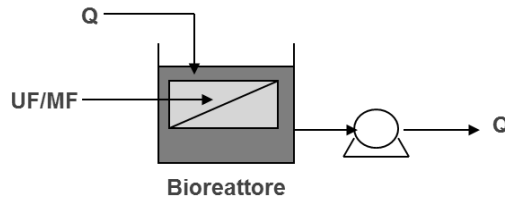


Figura 4.6: Configurazione sommersa

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.

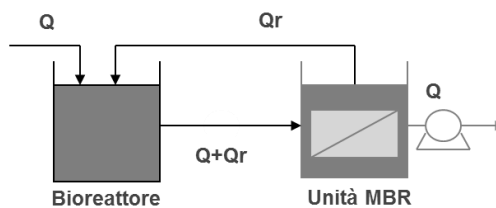


Figura 4.7: Configurazione mista

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/m²h. 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

Dato che il costo delle membrane è significativamente diminuito negli ultimi 15 anni, la tecnologia MBR è diventata una soluzione più attraente per impianti di medie dimensioni, caratterizzati da una popolazione equivalente pari a 10.000- 100.000 (Krzeminski et al., 2017). Sono stati, inoltre, registrati progressi significativi nella progettazione e nel funzionamento dei sistemi MBR, che hanno consentito la riduzione dei costi capitali e di funzionamento. L'attuale crescita del mercato degli MBR è significativa, ma non alta quanto prevista negli anni precedenti. Nel 2008, era stato presunto un tasso di crescita annuo (CAGR), relativo al mercato MBR mondiale per il periodo 2008-2018, pari a 22,4%. In accordo alla BCC Research, il mercato globale dei MBR registra un CAGR del 12,8% nel periodo 2014-2019 (Krzeminski et al., 2017). La Figura 4.8 mostra il CAGR previsto per il 2014-2019 per diverse aree del mondo. Il CAGR dovrebbe essere del 9,6% in Europa e dell'11,9% nel Nord America, mentre l'Asia è caratterizzata da una maggiore crescita (17,4%) soprattutto per la Cina. I valori inferiori dei tassi di crescita, rispetto a quelli previsti, possono essere attribuiti al costo degli impianti MBR ancora superiore rispetto agli impianti a fanghi attivi convenzionali, soprattutto per gli impianti di dimensioni inferiori e decentralizzati.

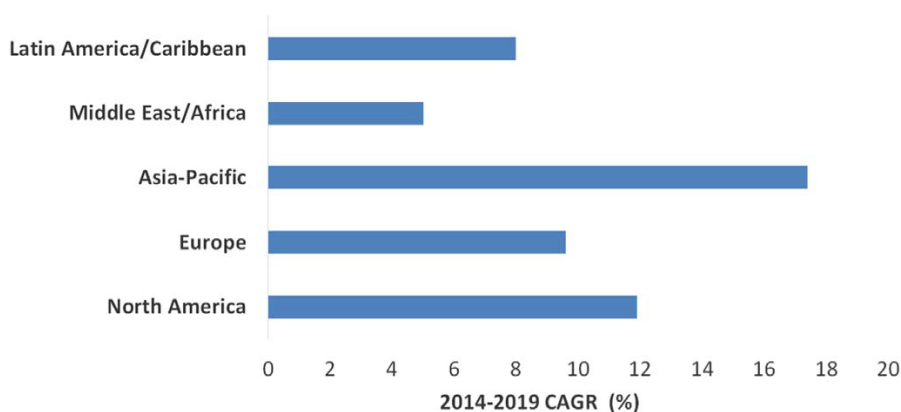


Figura 4.8: CAGR previsti per il mercato MBR per il periodo 2014-2019 (Krzeminski et al., 2017)

La crescita del mercato degli MBR ha contribuito all'espansione in campo commerciale 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 ($> 10.000 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$), 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 in configurazione immersa 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 immersa sia per applicazioni industriali che civili, dove sono preferite per installazioni più grandi a causa della loro richiesta inferiore di energia per l'areazione. 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.

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.

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

Configurazione sommersa		Configurazione side - stream		
<u>Membrane piane</u>	<u>Membrane a fibre cave</u>	<u>Membrane tubolari/multicanale</u>		
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™ ^{JP} Beijing Origin Water Technology ^{CN} Ecologix – EcoFlon™, EcoFil™ ^{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™; SADFTM ^{JP} Tianjin Motimo – Flat Plat FP11 ^{CN} Philos ^{KR} SENUO Filtration Technology – SENUOFIL ^{CN} Shanghai Dehong Biology Medicine Sci. & Tech. Dev. ^{CN} MEMCOR®, an Evoqua brand – MemPulse™ ^{DE} Sumitomo – POREFLON™ ^{JP} Zena Membranes – P5 ^{CZ}	Berghof – HyPerm-AE; HyPerflux ^{DE} Norit X-Flow – F4385, F5385 ^{NL} Orelis Environment – Kerasep®; Pleiade® ^{FR} Memos – MEMCROSS ^{DE}		
				<u>Membrane a fibre cave</u>
				Ultra-flo – Ultra-flo® ^{SG} Polymem – IMMEM ^{FR}
				<u>Membrane ceramiche piane</u>
				Kerafol ^{DE} Grundfos – Biobooster ^{DK}

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:

- le tipologie e le configurazioni dei moduli di membrane utilizzabili;
- gli interventi per migliorare le prestazioni dei sistemi MBR;
- 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 4.9).

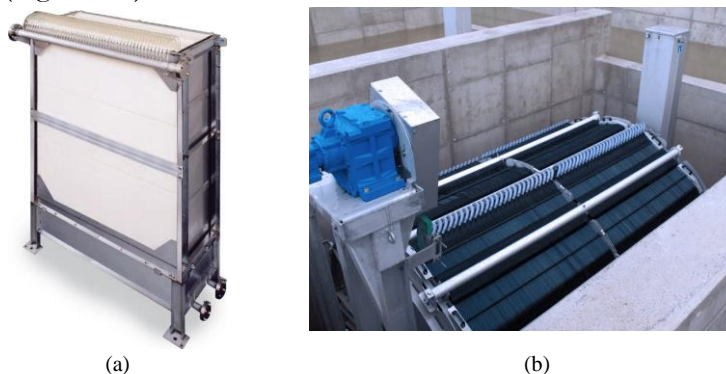


Figura 4.9: Membrane piane in configurazione planare (a) e girevole (b) (doc. Toray e Huber)

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 $0,04 \mu\text{m}$). 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 4.10a). 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 4.10b).



Figura 4.10: 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.

Scelta dei materiali

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

Nell'ambito del trattamento dei reflui industriali, la composizione chimica della membrana assume un ruolo molto importante e i criteri di scelta del tipo di membrane prevedono un'accurata scelta del materiale in funzione della qualità e delle caratteristiche chimiche del refluo da trattare. In tal senso, i produttori si stanno impegnando nello sviluppo di membrane altamente performanti, in grado di essere compatibili con una grande varietà di reflui industriali. Di recente infatti, sono state testate con successo delle membrane ceramiche in carburo di silicio (SiC) (Figura 4.11). Si tratta di unità di filtrazione studiate appositamente per utilizzare al meglio le nuove membrane offrendo prestazioni elevate a costi contenuti. Grazie alla natura idrofila ed alla elevata versatilità del SiC, questa nuova tecnologia è in grado di assicurare elevati flussi di permeato combinato con una resistenza chimica e termica superiore alle normali membrane.



Figura 4.11: Membrana in carburo di silicio (SiC).

Il SiC permette di lavorare, quindi, con liquidi a pH estremi e ad alta temperatura senza venir attaccato da alcun agente chimico tanto da consentire l'utilizzo di procedure di lavaggio delle membrane stesse a condizioni estreme sia in termini di chemicals utilizzati (acidi forti, agenti ossidanti quali acqua ossigenata o ipoclorito, solventi, ecc.) che di temperatura, consentendo, in qualsiasi condizione, il ripristino dei cicli di lavoro. Le membrane in SiC sono utilizzate con successo in alcuni processi dove l'estrema idrofilicità

del SIC impedisce all'olio di filmare le membrane consentendo elevatissimi flussi di permeato con cicli di esercizio lunghi. Per tali caratteristiche, esse si prestano bene al trattamento di acque derivanti dall'industria siderurgia e da impianti di stoccaggio di idrocarburi.

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

Una soluzione molto innovativa nel campo delle membrane di ultima generazione è quella costituita dalla membrana *Helix* (Figura 4.12a), che consiste in una membrana tubolare di ultrafiltrazione all'interno della quale il moto della corrente è di tipo elicoidale (Figura 4.12b) (Corsino e Torregrossa, 2016).

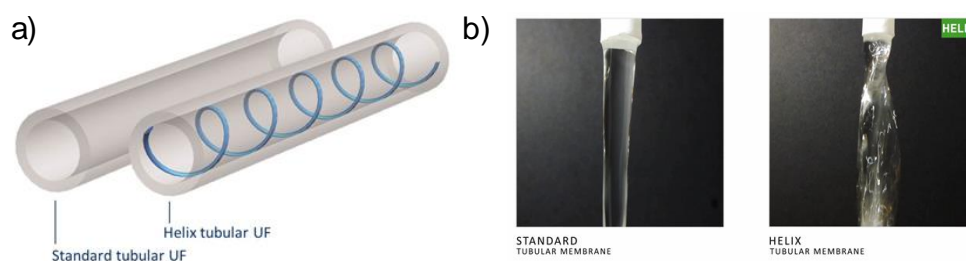


Figura 4.12: Membrana a fibre cave a flusso elicoidale (*Helix*) (a); confronto tra il flusso in una membrana tubolare convenzionale e la *Helix*. (Doc. Pentair).

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

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

La tecnologia alla base della membrana *Helix* è stata sviluppata per sfruttare l'energia contenuta nel flusso tangenziale allo scopo di massimizzare le sollecitazioni di taglio per aumentare il flusso di permeato. Le membrane *Helix* (Figura 4.13a) sono caratterizzate da una cresta elicoidale che si sviluppa longitudinalmente all'interno della membrana. La cresta è realizzata dello stesso materiale della membrana circostante, e quindi partecipa alla sia filtrazione che al controlavaggio. All'interno della membrana, la presenza di tale cresta, non determina la formazione di spigoli vivi o comunque di punti in cui il materiale particellare può accumularsi e causare occlusioni. I meccanismi alla base del principio di funzionamento delle membrane *Helix* sono:

- 1) l'induzione di flussi secondari, che determinano la formazione di vortici di Dean in corrispondenza della struttura ad elica;

- 2) il flusso elicoidale della corrente di alimentazione lungo le pareti della membrana che comporta l'aumento della velocità della corrente in corrispondenza della parete della membrana (Figura 4.13b).

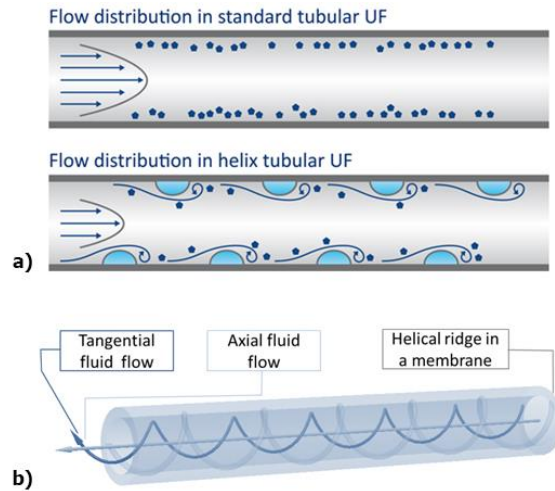


Figura 4.13: Distribuzione del flusso in una membrana tubolare standard e in una Helix (a) e moto del flusso all'interno della membrana Helix (b) (doc. Pentair).

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 4.14).

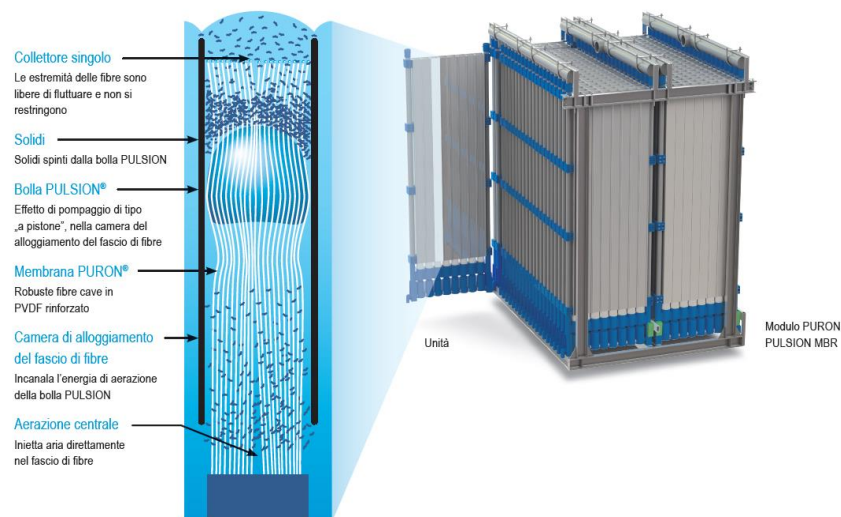


Figura 4.14: Moduli di membrane a fibre cave con sistema PURON-PULSION (doc. Koch Membrane Systems, Inc.)

Oltre ai convenzionali metodi di lavaggio chimico e fisico, si stanno sempre più diffondendo strategie alternative per il contenimento del fouling diminuendo, al contempo, i consumi energetici. Additivi possono essere inseriti nel reattore per modificare le caratteristiche della miscela aerata, favorendo il processo di filtrazione e riducendo il fouling. Tali sostanze possono essere coagulanti, polielettroliti o agenti adsorbenti (Krzeminski et al., 2017). I coagulanti introducono cariche positive, neutralizzando le cariche negative della biomassa, migliorando così la flocculazione (Wu et al., 2006). Zeolite e carbone attivo sono adsorbenti che vengono aggiunti nella miscela aerata degli MBR al fine di mitigare il fouling mediante adsorbimento di sostanze colloidali e solubili (Sheng-bing et al., 2006).

Vengono anche aggiunti piccoli supporti all'interno dei bioreattori a membrane che consentono un lavaggio meccanico in quanto:

- 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 4.15). 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. Il granuli utilizzati sono stati progettati per un uso permanente e vengono trattenuti nel reattore attraverso un sistema di separazione.

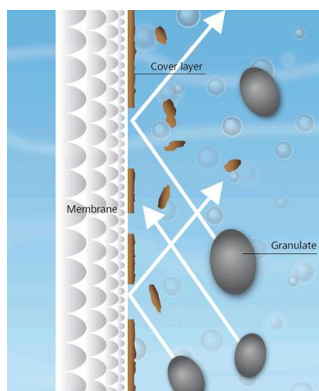


Figura 4.15: Pulizia meccanica BIO-CEL®-MCP con granuli (<http://www.microdyn-nadir.com/>)

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). Gli sforzi di taglio sulla superficie della membrana sono assicurati dalla vibrazione o rotazione della membrana stessa. 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). I vari sistemi proposti consentono di superare le limitazioni idrodinamiche dell'*air scouring* e contribuire ad un inferiore *air scouring* a causa dell'implementazione periodica di un movimento meccanico (Krzeminski et al., 2017). Vari prodotti commerciali di MBR con membrane rotanti sono attualmente disponibili sul mercato (Wang et al., 2014), tra cui il sistema MBR con dischi in ceramica rotanti della Grundfos, BioBooster-Rotation Cross-flow (RCF) MBR system (Bentzen et al., 2012). Huber realizza moduli di membrane piane di ultrafiltrazione rotanti, Membrane Filtration VRM® (Figura 4.16), 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. Si generano diversi movimenti e forze meccaniche, longitudinalmente, trasversalmente, torsionalmente che sviluppano un'azione di taglio sulla superficie della membrana mitigando il fouling.

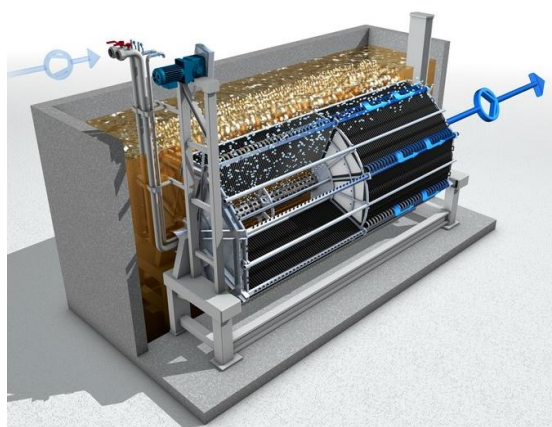


Figura 4.16: Moduli di membrane piane di ultrafiltrazione rotanti, Membrane Filtration VRM® della Huber (<http://www.huber.de/>)

Filtrazione con airlift

Il concetto di filtrazione con airlift è stato introdotto al fine di ridurre al minimo il consumo di energia in applicazioni su larga scala. L'idea che sta alla base di questa soluzione prevede l'immissione di un flusso di gas all'interno delle membrane, che combinato al flusso tangenziale del liquido crea un flusso multifase (Corsino e Torregrossa, 2016). Le caratteristiche della bolla che viene a crearsi all'interno della membrana

dipendono dalla quantità di aria immessa e determinano le differenti situazioni idrodinamiche mostrate in figura. Quando l'aerazione è insufficiente, le bolle che si formano sono troppo piccole (Figura 4.17a) e non producono l'effetto desiderato, mentre quando viene insufflata una quantità eccessiva d'aria si viene a creare una situazione come quella riportata in Figura 4.17c. Al contrario, quando il flusso d'aria è corretto (Figura 4.17b), la bolla risale attraverso la membrana, e la turbolenza che viene a crearsi interrompe la formazione del cake e di conseguenza consente un significativo aumento del flusso di permeato.



Figura 4.17: Confronto tra gli effetti di diversi flussi d'aria sulla distribuzione delle bolle all'interno della membrana (doc. Pentair).

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

Le membrane rotative

Come si è detto uno dei metodi per attenuare il fenomeno del fouling della membrana è quello di creare degli sforzi tangenziali sulla superficie della membrana stessa che limiti il deposito del cake. Tali sforzi sono convenzionalmente ottenuti mediante insufflazione di bolle grosse alla base dei moduli di membrana, ovvero mediante il pompaggio della miscela aerata in prossimità delle fibre. Tuttavia, queste ultime non rappresentano le uniche soluzioni per la creazione di sforzi di taglio. In commercio esistono, infatti, alcune membrane costituite da elementi filtranti a disco. Tali membrane sono disposte verticalmente l'una sull'altra e ruotano in maniera solidale ad un albero con asse ortogonale al piano della membrana, con una velocità di 1-2 rpm (Figura 4.18).

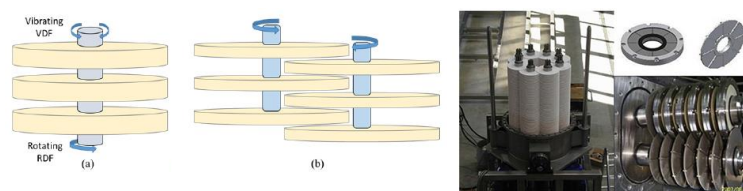


Figura 4.18: Membrane rotative (Zsirai et al., 2016).

Tali elementi, che costituiscono i moduli, possono essere individuali ovvero messi in serie, e in questo caso i singoli dischi si intersecano come mostrato in figura. I moduli con elementi singoli possono vibrare e ciò limita il deposito del cake sulla superficie delle membrane, mentre nell'altra configurazione, è l'attrito generato dalla compenetrazione degli elementi filtranti che ruotano a ridurre la formazione del cake (Corsino e Torregrossa, 2016).

Membrane ibride, flessibilità impiantistica, MBR in container

La società tedesca WTA Vogtland, ha realizzato un nuovo modulo a membrane sommerse, H2L 'Hybrid 2nd Level' (Figura 4.19). Tale modulo unisce i vantaggi delle due configurazioni geometriche dei moduli di membrane ossia la fibra cava, con la sua capacità di essere controllata e le densità elevate di impaccettamento, e le membrane piane con il buon comportamento idraulico e pretrattamenti richiesti meno spinti. La configurazione multistrato dei vari moduli di membrane assicura la ritenzione dei batteri e dei solidi anche nel caso in cui la membrana è soggetta ad un danneggiamento. Tale tipologia di modulo è adatta per dimensioni delle vasche limitate. Il sistema H2L è modulare, costruito con 'Single filtration Single Blocks' (USB). Sulla base di questo concetto, H2L è disponibile in 64 diverse dimensioni standard caratterizzate da una superficie di membrane che va da 20 a 500 m². Grazie al suo design modulare, il modulo H2L può essere costruito, smontato o riparato facilmente e direttamente nel serbatoio di filtrazione senza la necessità di utilizzare sollevatori o gru. Ciò contribuisce a ridurre i costi ed i tempi ed è un prerequisito per i progetti caratterizzati da basse altezze di installazione.

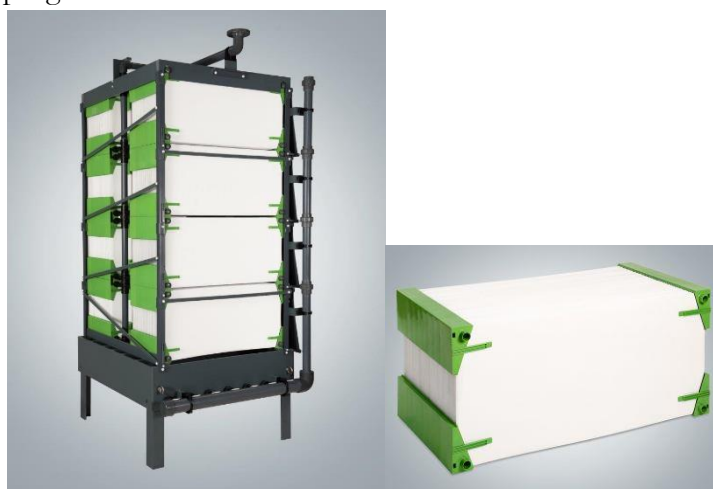


Figura 4.19: Modulo di membrane H2L della WTA Vogtland (www.wta-vogtland.de)

Una nuova tecnologia flessibile FlexMBR™ è stata sviluppata da H₂O Innova Inc. per applicazioni avanzate nel trattamento delle acque reflue. Questa tecnologia offre flessibilità all'interno dei sistemi MBR consentendo di scegliere tra più prodotti per lo stesso sistema in fase di costruzione o in seguito. Tale sistema è il primo progetto MBR per il trattamento delle acque reflue *open source* che permette l'utilizzo di moduli MBR da diversi fornitori. Fornisce, difatti, la flessibilità per passare da una membrana ad un'altra senza dover ridisegnare l'impianto di trattamento. La tecnologia flexMBR™ è ideale per i nuovi sistemi, ma può anche essere incorporata in un sistema di trattamento delle acque reflue esistente. Con questo approccio *open-source*, la sostituzione dei moduli diventa un processo competitivo ed è aperto a nuovi modelli di moduli che verranno sviluppati in futuro. Questo consente di trarre vantaggio dalle più recenti tecnologie e dalle opzioni di prezzo offerte dai fornitori di membrane.

Si stanno, altresì, sempre più proponendo sistemi MBR in containers che consentono il trattamento delle acque reflue in piccole realtà. Hyflux Ltd ha annunciato l'espansione delle configurazioni disponibili per i suoi sistemi MBR PoroCep®, che comprendono attualmente configurazioni di 100, 200 e 400 m³/d in versioni containerizzate e non containerizzate. I quattro nuovi modelli lanciati estendono la gamma in capacità di trattamento superiori di 600, 1.000, 2.000 e 3.000 m³/d. Pre- e post-trattamento sono opzionali, nonché componenti aggiuntivi di ottimizzazione del sistema sono disponibili per la personalizzazione in base alle esigenze del cliente. I componenti aggiuntivi opzionali includono il monitoraggio di assistenza remota (RAM) e il programma di prestazione avanzata (EPP), adottando il sistema proprietario SuperBiotiX™, una miscela speciale di formulazione microbica che consente la

riduzione del BOD, COD, solidi sospesi e odori. I sistemi PoroCep® MBR incorporano membrane PoroCep® brevettate da Hyflux, realizzate in polietilene ad alta densità (HDPE), materiale non tossico e non estratto. Il PoroCep® skid è caratterizzato da una delle più alte densità di impacchettamento delle membrane tra le membrane sommerse per sistemi MBR disponibili sul mercato. L'elevata capacità di filtrazione e l'impronta minore del serbatoio dovrebbero tradursi in un risparmio dei costi per gli utenti. I sistemi PoroCep® MBR sono già stati installati nei settori tessile ed alimentare in Asia, America Centrale, Europa e Medio Oriente per trattare le acque reflue e garantire che siano soddisfatti i requisiti previsti allo scarico. Culligan ha annunciato il lancio di un sistema MBR in container per il trattamento di acque reflue in diverse realtà al fine di renderle idonee al riutilizzo. Il sistema MBR di Culligan combina il trattamento a fanghi attivi con la separazione dei solidi mediante membrane microporose. Il sistema utilizza membrane piane con una dimensione dei pori di 0,15 µm, con un conseguente effluente chiarificato idoneo al riutilizzo o ad un ulteriore trattamento con altre tecnologie come l'osmosi inversa. I sistemi sono disponibili in due modelli standard di 25 m³/d e 50 m³/d come portata e sono installati in container isolati. Il sistema MBR può essere utilizzato per una varietà di applicazioni, tra cui centri commerciali, alberghi/resort e centri sportivi, piccole comunità municipali, settore alimentare, industrie chimiche e farmaceutiche e campi militari.

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 Nm³/m³ di permeato estratto per acque reflue civili. Studi recenti hanno mostrato come tale valore possa essere ridotto anche al di sotto di 5 Nm³/m³ 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 4.20a), 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.

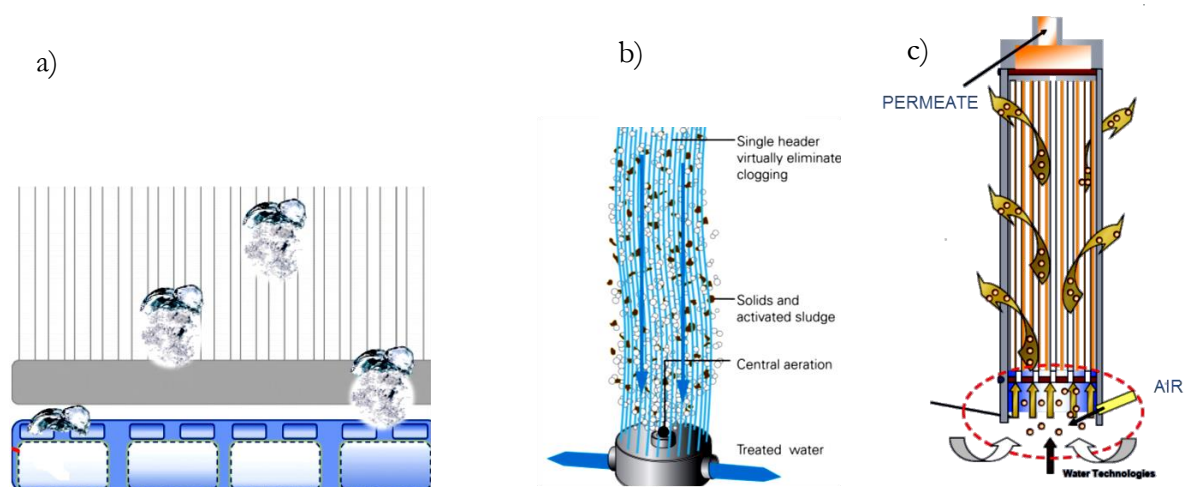


Figura 4.20: Sistemi di distribuzione dell'aria: a) LEAPmbr Aeration Technology-GE (<http://www.gewater.com>); b) PURON Single Header Design-Koch membrane systems (www.kochmembrane.com); c) Air scouring MemPulse™ - Evoqua (<http://www.evoqua.com>)

Kock membrane systems, nei moduli PURON MBR Series (Figura 4.20b), 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 4.20c), 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 4.21);
- 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 4.22); 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).

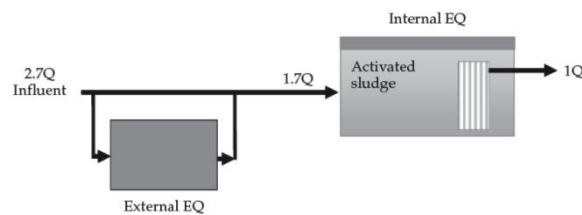


Figura 4.21: Configurazione con vasca di equalizzazione e reattore a livello variabile (da WEF, 2012)

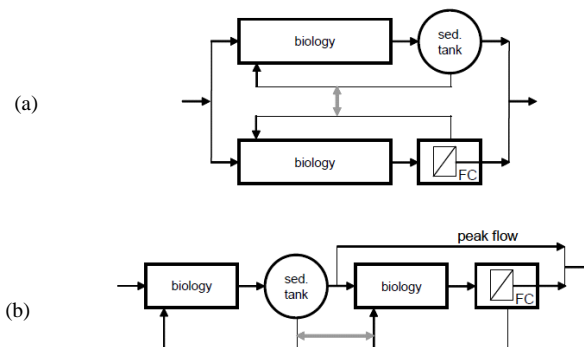


Figura 4.22: Impianto ibrido con accoppiamento in serie (a) e in parallelo (b) (da Brepols et al., 2008)

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 4.23).

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).

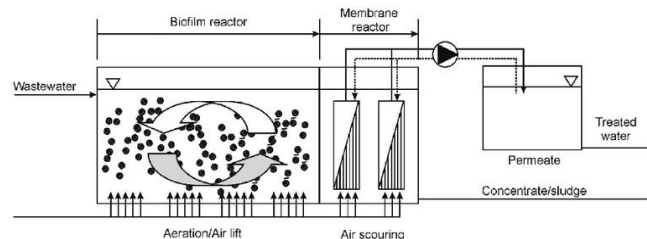


Figura 4.23 Impianto MB-MBR (da Leiknes e Ødegaard, 2006)

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 sporco 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 microinquinanti 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 4.24 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.

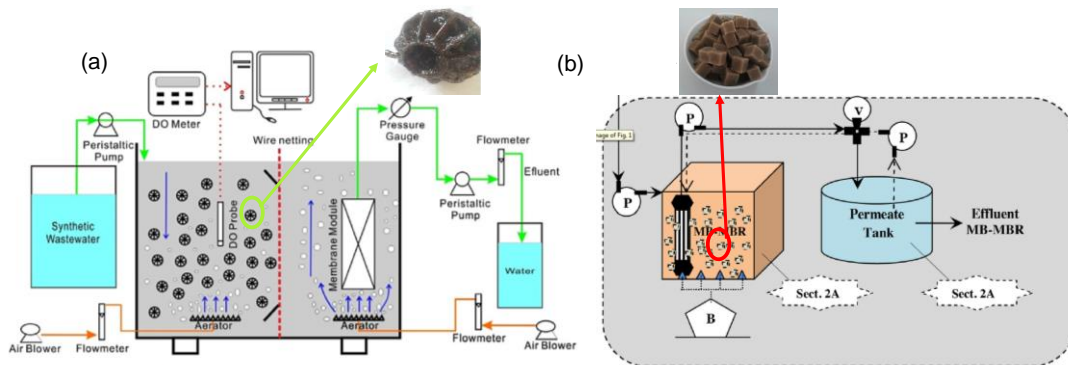


Figura 4.24 Schema di un impianto MB-MBR con comparti separati (a) (da Tang et al., 2016); schema di un processo MB-MBR a comparto unico (b) (da Di Bella et al., 2015).

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'influenza 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 4.25).

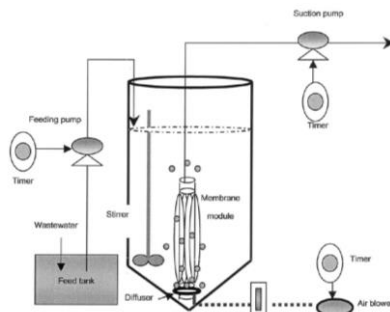


Figura 4.25 Schema di un impianto SB-MBR (da Bae et al., 2003)

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 caserei, stante la significativa capacità di trattamento di tale configurazione nei confronti di elevati carichi organici (Bae et al., 2003).

Processi MABR

Il bioreattore a membrane ad aerazione (MABR) è un nuovo sistema lanciato sul mercato, con poche tecnologie commerciali disponibili e con una o due installazioni a larga scala (sebbene ci siano state prove su larga scala dimostrative). Il reattore MABR utilizza una membrana per il trasferimento di ossigeno ad un biofilm sviluppato sulla superficie della membrana stessa (Figura 4.26), sfruttando la sinergia tra la membrana che consente il trasferimento del gas ed il biofilm. L'ossigeno viene erogato per diffusione al biofilm con un'elevata efficienza mentre il substrato organico ed ammoniacale si diffonde dalla miscela aerata al biofilm.

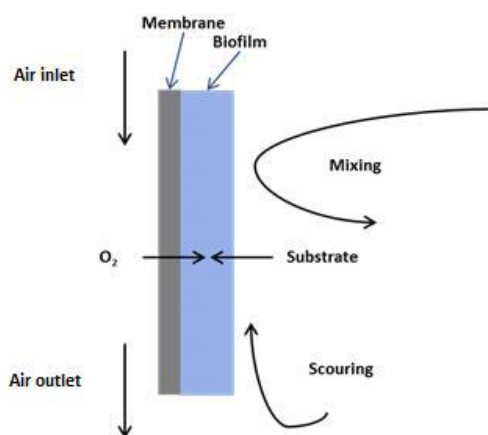


Figura 4.26: Principi di funzionamento di un sistema MABR (GE Power & Water, Water & Process Technologies)

Utilizzando la membrana per aerazione, non vi è più una separazione fisica tra la biomassa e l'effluente chiarificato. Risulta, pertanto, necessario inserire una fase successiva di separazione attraverso il modulo di membrana. Lo sviluppo del biofilm sulla superficie della membrana tende ad occludere i canali per

questo è richiesta una frequente pulizia della superficie della membrana stessa al fine di consentire il trasferimento di ossigeno. GE Power & Water ha sviluppato il sistema “ZeeLung* membrane aerated biofilm reactor (MABR) technology” per l’upgrade di impianti a fanghi attivi esistenti al fine di aumentarne la capacità di trattamento e consentire anche la rimozione dei composti ammoniacali. L’inserimento delle cassette ZeeLung nella miscela aerata aumenta la concentrazione della biomassa incrementando le performance del processo di trattamento biologico grazie alla presenza di biomassa adesa alla superficie della membrana stessa. L’ossigeno viene trasferito al biofilm per diffusione attraverso la membrana, riducendo l’energia necessaria per la distribuzione dell’ossigeno fino a quattro volte rispetto all’aerazione convenzionale.

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.

4.3.4 Trattamenti anaerobici MBR

L’esperienza maturata nel campo dei processi biologici aerobici e le ottime prestazioni raggiunte, hanno rappresentato fattori determinanti affinché, ancora più recentemente, l’utilizzo delle membrane si diffondesse anche per i processi biologici in ambiente anaerobico, favorendo l’avvio dell’utilizzo della configurazione anaerobica dei reattori MBR, nota con l’acronimo di AnMBR (Anaerobic Membrane Bio-Reactor). Tali sistemi sono apparsi, fin dal principio, molto promettenti, perché coniugano i vantaggi dei reattori MBR (elevata efficienza depurativa, minore ingombro volumetrico) e delle reazioni biologiche in ambiente anaerobico (basso dispendio energetico e limitata produzione di fango). Un aspetto delicato degli AnMBR che, al presente, ne limita la diffusione a larga scala, è rappresentato dal più rapido e ben più serio, rispetto agli MBR, sporcamento (*fouling*) delle membrane dovuto in massima parte al più elevato contenuto in solidi e alla maggiore eterogeneità degli influenti ai reattori anaerobici. Recenti studi, mirati a migliorare le caratteristiche del substrato influente e del bulk liquido dei reattori anaerobici, nonché a ottimizzare le prestazioni delle membrane e le condizioni operative del processo, hanno offerto indicazioni utili per limitare la formazione del *fouling*.

Nel seguito, è riportata una sintetica presentazione dei sistemi AnMBR, mettendone in evidenza: (i) le configurazioni impiantistiche; (ii) le tipologie dei materiali impiegati per la produzione delle membrane; (iii) le cause del *fouling* e i rimedi per contrastarne la formazione; (iv) le principali applicazioni in campo ingegneristico; (v) l’analisi dei relativi costi.

Caratteristiche degli AnMBR

I sistemi biologici AnMBR operano la degradazione della sostanza organica biodegradabile in assenza di ossigeno libero e utilizzano una membrana per separare la fase liquida da quella sospesa in regime di micro (MF) o ultrafiltrazione (UF). Per le loro peculiarità, di cui si dirà a breve, tali sistemi mostrano grandi potenzialità per essere impiegati con successo per il trattamento di flussi di materia organica di varia natura e origine, quali: (i) acque reflue urbane, industriali e zootecniche; (ii) percolati di discarica; (iii) fanghi della depurazione; (iv) scarti e sottoprodotti solidi della filiera dell'industria agro alimentare e ittico conserviera; (iv) FORSU.

Rispetto ai tradizionali MBR, gli AnMBR presentano tutti i vantaggi propri dei sistemi biologici anaerobici (quali le già richiamate minore produzione di fango di supero e disponibilità di biogas).

Nel confronto con altri sistemi anaerobici, gli AnMBR garantiscono un più rapido start-up (settimane in luogo di mesi), un netto ed efficace disaccoppiamento del tempo di detenzione idraulica (HRT) da quello di ritenzione della biomassa microbica (SRT) e un'elevata qualità dell'effluente depurato. Tali vantaggi sono conseguenti all'utilizzo delle membrane come mezzo di separazione, dal momento che esse rappresentano una barriera al passaggio della quasi totalità dei solidi sospesi presenti nel bulk del reattore biologico e in primo luogo della biomassa microbica che ha così modo di: (i) aumentare di numero rapidamente, nonostante i suoi bassi tassi di accrescimento; (ii) selezionarsi in base al criterio della maggiore efficacia e non a quello della sedimentabilità, come accade per i sistemi a ricircolo del fango; (iii) acclimatarsi a condizioni ambientali estreme, come l'elevata salinità dei liquami dell'industria di trasformazione dei prodotti ittici, e alla presenza di sostanze organiche di sintesi (farmaci, pesticidi, derivati dell'industria petrolifera, etc.), anche note come contaminanti emergenti, che sempre più di frequente e in quantità maggiori si rinvenivano nei liquami, mostrando per la loro rimozione un'elevata efficacia.

L'attuale scarsa diffusione dei sistemi AnMBR nel campo della depurazione delle acque e del trattamento di residui solidi organici, va attribuita, invece, alle problematiche non ancora del tutto risolte derivanti dallo sporcamiento (*fouling*) delle membrane.

Configurazioni impiantistiche

I sistemi AnMBR si presentano con le medesime configurazioni impiantistiche degli MBR, e pertanto si differenziano in base alla posizione delle membrane rispetto al reattore biologico: le membrane, infatti, possono essere esterne al reattore (*side-stream*), sommerse nel reattore (*submerged*) oppure sommerse ed esterne al reattore (*submerged side-stream*).

Nella configurazione *side-stream*, l'azione di una pompa permette il trasferimento del contenuto del reattore biologico alla sezione filtrante dove sono alloggiato le membrane. La pompa altresì comprime il fluido, conferendo ad esso una pressione adeguata all'attraversamento della membrana. La direzione del flusso, rispetto alla posizione della superficie filtrante, è tangenziale (*cross-flow*) e la velocità idrica è compresa tra 2 e 4 m/s allo scopo di promuovere un'efficace azione di rimozione dei depositi formati sulla superficie della membrana (*filtration cake*) e altresì evitare un aumento oltremisura delle spese energetiche necessarie all'esercizio dell'impianto. L'aliquota di fluido che non attraversa la membrana (retentato) viene reimpressa nel reattore biologico contribuendo, insieme all'azione di agitatori meccanici, a una miscelazione energica del suo contenuto al fine di prevenire la sedimentazione dei solidi e favorire il contatto substrato-microrganismi. Aspetto delicato della configurazione *side-stream* è la turbolenza generata dalla pompa che, se troppo elevata, promuove il rilascio dai fiocchi biologici di materiale extracellulare (EPS), che costituisce uno dei principali responsabili del *fouling* delle membrane ed inoltre riduce la dimensione dei fiocchi a particelle talmente minute da dar luogo sia all'ostruzione dei pori della membrana (*clogging*) che, a loro volta, al *fouling*. Al fine di limitare l'intensità degli sforzi di taglio agenti sui

fiocchi biologici, le pompe centrifughe sono da preferirsi a quelle rotative (Kim et al., 2001). La configurazione *side-stream* rispetto a quella *submerged* facilita tutte le operazioni di manutenzione a cui vanno soggette le membrane: dal loro lavaggio chimico che, avendo luogo in ambiente diverso dal reattore biologico, non comporta il fermo impianto, alla loro ispezione e sostituzione.

Nella configurazione *submerged*, le membrane sono immerse nel reattore biologico e l'azione di filtrazione è prodotta da una pressione negativa generata da una pompa a vuoto. Questa configurazione richiede costi energetici minori rispetto alla precedente (*side-stream*), dal momento che il fluido non è allontanato dal reattore per essere filtrato e la pressione idrostatica nella vasca biologica gioca a favore del processo di filtrazione. L'azione di contrasto alla formazione del *fouling* è esercitata dalle bolle di biogas che, prodotte da diffusori posti al fondo delle membrane e alimentati da una corrente di ricircolo di biogas, scorrono lungo la superficie (*scouring*) delle membrane. Le bolle contribuiscono altresì a mantenere in agitazione il contenuto del reattore, già adeguatamente miscelato da dispositivi meccanici all'uopo predisposti. Tale sistema di prevenzione del *fouling* è però meno efficace di quello previsto nella configurazione *side-stream* e, pertanto lo sporco delle membrane è più rapido. A questo svantaggio va aggiunto, anche, che le operazioni di pulizia e sostituzione delle membrane sono molto meno agevoli. La configurazione *submerged side-stream* supera i limiti di entrambe le modalità singole poc'anzi descritte, ma inevitabilmente ne annulla anche i vantaggi.

Tipologie di membrane

Le membrane impiegate negli AnMBR possono essere realizzate in materiale ceramico, metallico o plastico. Queste ultime possono essere a base di fluoruro di polivinilidene (PVDF), di gran lunga il più adoperato, di polietereossulfone (PES), polietilene (PE), polipropilene (PP) o polisulfone (PSF). Rispetto alle membrane ceramiche e metalliche, quelle plastiche sono più economiche ma anche meno performanti in termini di durabilità, permeabilità e resistenza alle alte temperature e soprattutto agli agenti chimici usati per il lavaggio. Le membrane ceramiche, alla pari di quelle metalliche, si caratterizzano per essere stabili sia chimicamente che termicamente nonché altamente resistenti alla corrosione e all'abrasione. Le membrane metalliche sono però più costose di quelle ceramiche, che, pertanto, appaiono le più idonee per la realizzazione degli AnMBR, dal momento che le temperature nei reattori anaerobici sono usualmente in regime mesofilo e talvolta termofilo, e il *fouling* delle membrane richiede, per essere rimosso, lavaggi energici e frequenti con agenti chimici e con tempi di esposizione lunghi.

Qualunque sia il materiale adoperato per la loro realizzazione, le membrane, adottando un criterio geometrico, si distinguono in: (i) piane; (ii) a fibre cave; (iii) tubolari. Le membrane piane sono ottimali per le operazioni di manutenzione perché più semplici da pulire e sostituire. Ciononostante, nella configurazione *submerged* degli AnMBR, le membrane a fibre cave sono preferite alle altre due tipologie perché, a parità di estensione di superficie filtrante, sono più compatte e quindi, occupando un minore volume di ingombro, permettono di contenere le dimensioni dei reattori anaerobici.

Formazione e controllo del fouling

Il termine *fouling* è adoperato per descrivere il fenomeno di sporco delle membrane a cui è associata la progressiva riduzione della loro permeabilità, e quindi il conseguente calo delle prestazioni e la necessità di eseguire operazioni di lavaggio, la cui frequenza incide sui costi di esercizio dell'impianto secondo una relazione di proporzionalità diretta e sulla durata della vita utile delle membrane secondo una proporzionalità inversa.

Il *fouling* è generato dalle interazioni tra il materiale costituente le membrane e i solidi presenti nel reattore biologico e pertanto maggiore è la concentrazione dei solidi e più rapidamente e in maniera più intensa si manifesta il *fouling*. Giacché nei processi anaerobici si preferisce operare a concentrazioni di solidi più

elevate rispetto ai processi in ambiente aerobico, al fine di massimizzare le cinetiche biologiche di crescita microbica e di degradazione del substrato, il *fouling* negli AnMBR è particolarmente critico e penalizzante per le loro prestazioni, al punto tale da rappresentare, come più volte detto, il principale ostacolo alla loro diffusione.

Secondo una classificazione tradizionale, il *fouling* può manifestarsi nella sua forma irreversibile o reversibile. Inoltre, sulla base del sistema di pulizia adottato per rimuoverlo, il *fouling* reversibile si distingue in removibile ed irremovibile. Il *fouling* reversibile removibile è rimosso con un processo fisico, controlavaggio o rilassamento della membrana, mentre quello reversibile irremovibile mediante un lavaggio chimico. Il *fouling* irreversibile è permanente e nessuna azione di pulizia è efficace; esso è conseguenza dell'ostruzione fisica dei pori interni della membrana, causata principalmente da solidi colloidali, materiale biologico o precipitati salini, mentre il *fouling* reversibile è conseguenza della deposizione di materiale organico ed inorganico sulla superficie esterna della membrana.

La natura del materiale responsabile del *fouling* ne permette un'ulteriore classificazione in biologico, organico e inorganico.

Il *fouling* biologico o *biofouling* è prodotto dal materiale biologico presente nel reattore: cellule vive e morte, nonché il materiale secreto dai microrganismi quali le sostanze polimeriche extracellulari (EPS) e i prodotti solubili microbici (SMP). Questo materiale di origine biologica tende ad accumularsi nei pori superficiali della membrana riducendone la sezione.

Il *fouling* organico è generato da macromolecole organiche (biopolimeri), mentre quello inorganico da precipitati salini (struvite, carbonato di calcio, etc.). Le tre forme di *fouling* appena descritte sono solite aver luogo simultaneamente, rendendo i depositi particolarmente difficili da rimuovere e le operazioni di pulizia delle membrane significativamente onerose. Il meccanismo di formazione del *fouling* è complesso e ancora oggi oggetto di dibattito in campo scientifico; un modello dai più condiviso fa corrispondere l'avvio del *fouling* a una riduzione improvvisa della dimensione dei pori delle membrane causato dal deposito al loro interno di materiale colloidale, a cui fa seguito la formazione progressiva sulla sezione più superficiale dei pori di uno strato (*cake layer*) di materiale eterogeneo composto da microrganismi, prodotti extracellulari, biomolecole e precipitati inorganici, con il successivo consolidamento di questo materiale per effetto dell'intensificarsi degli sforzi normali agenti su di esso in conseguenza dell'aumento della pressione di trans membrana (differenza tra le pressione di monte e di valle esercitate sulla superficie della membrana). La dinamica appena descritta trova un riscontro sperimentale nell'andamento temporale che assume la pressione di trans-membrana, riportato in Figura 4.17, ove si rileva l'alternanza di 3 fasi di sporcamento della membrana, con diversa e ben marcata, velocità di avanzamento.

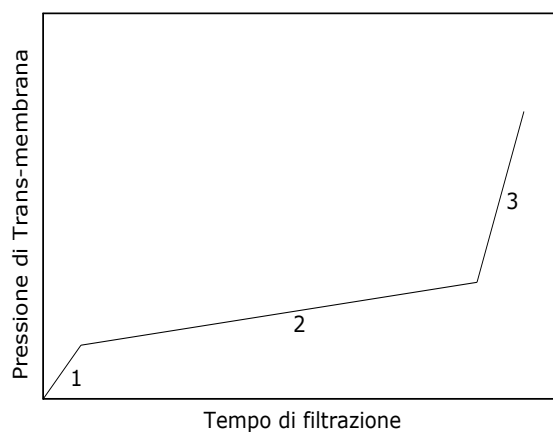


Figura 4.27: Evoluzione nel tempo della pressione di trans-membrana (Lin et al., 2013)

A parità di condizioni operative, come descritto nello studio pubblicato da Gao et al. (2011), negli AnMBR, rispetto agli MBR, lo spessore dello strato dei depositi di materiale responsabili del *fouling* è di gran lunga superiore, mediamente di 1 o 2 ordini di grandezza. Questa circostanza rende indispensabile la messa a punto di strategie efficaci di controllo della formazione del *fouling*. A tal riguardo sono stati sperimentati con successo diversi rimedi che agendo sulle caratteristiche fisico-chimiche dei solidi presenti nell'influenza e quelli prodotti dalle reazioni biologiche all'interno dei reattori, o modificando le proprietà fisiche delle membrane, o ancora perfezionando il loro sistema di pulizia, oppure ottimizzando le condizioni operative del sistema, sono risultati in grado di limitarne l'insorgenza e di mitigarne gli effetti.

A titolo di esempio, influenti che si caratterizzano per un'elevata concentrazione di solidi colloidali, valori estremi del pH e un alto contenuto salino potrebbero accorciare la vita utile delle membrane, dal momento che potrebbero occludere i pori, aggredirle chimicamente, oppure favorire la formazione in superficie di precipitati inorganici, ostici da rimuovere. Quelli appena descritti sono eventi facilmente evitabili se l'influenza subisse un adeguato pretrattamento, finalizzato a seconda dei casi, a rimuovere i colloidali mediante chiariflocculazione o filtrazione, a regolare il pH con l'aggiunta di acidi e/o basi forti, a ridurre il contenuto salino attraverso un processo di scambio ionico.

Oltre che sulle caratteristiche chimico-fisiche dell'influenza, nell'ottica di limitare la formazione del *fouling*, risulta vantaggioso intervenire anche su quelle del bulk interno al reattore, con l'aggiunta di sostanze adsorbenti, coagulanti e nanoparticelle. Tali prodotti svolgono la funzione di evitare che solidi colloidali, materiale extracellulare o ioni disciolti, precursori di precipitati, possano essere liberi di venire a contatto con la membrana, dove potrebbero dar luogo al fenomeno del *clogging*, particolarmente temuto in quanto ritenuto il principale responsabile della formazione del *fouling* irreversibile. Grazie alle sue eccellenti capacità adsorbenti e alla peculiarità di non interferire nello svolgimento del processo anaerobico di degradazione delle sostanze organiche, il carbone attivo in forma pulverulenta (PAC) è stato testato con successo come materiale ritardante la formazione del *fouling*. Le particelle di PAC, infatti, sono particolarmente efficaci nel catturare i colloidali e i soluti sia organici che inorganici, in quanto li inglobano nella loro struttura, che avendo dimensioni maggiori dei pori delle membrane, ne comporta il blocco per effetto di un'azione staccante (che previene il *clogging*). Il dosaggio del PAC deve essere oculatamente scelto, previa sperimentazione, al fine di evitare che lo stesso carbone attivo possa contribuire alla formazione del *fouling* per effetto di un sovradosaggio.

Coagulanti, quali il solfato di alluminio, il cloruro ferrico, il cloruro di polialluminio (PACl), il solfato poliferrico (PFS), il poliacrilammide (PAM) e il chitosano, quando aggiunti nel reattore biologico, contribuiscono ad aggregare il materiale colloidale e i soluti organici, favorendo la formazione di solidi di dimensioni maggiori dei pori della membrana, ottenendo, pertanto, il medesimo risultato descritto poc'anzi con riferimento al PAC. Efficace alternativa alla coagulazione chimica, peraltro più vantaggiosa economicamente in quanto non necessita dell'acquisto di reagenti e produce minori volumi di fango, è rappresentata dalla elettrocoagulazione, ottenuta investendo il bulk liquido contenuto nel reattore con flussi intermittenti di corrente elettrica continua (DC).

Negli ultimi anni le nanoparticelle sono state sperimentate con risultati più che confortanti per ridurre la formazione del *fouling* delle membrane, sulla superficie delle quali svolgono un'energica azione di contrasto alla formazione del *biofouling*.

Poiché il *fouling*, come poc'anzi detto, è prodotto dalle interazioni tra il materiale costituente la membrana e i solidi presenti nel reattore biologico, un altro possibile intervento è costituito dall'impiego di membrane di nuova concezione, quali quelle dinamiche oppure membrane tradizionali la cui superficie sia stata opportunamente trattata (una tecnica spesso utilizzata ricorre all'uso del plasma) allo scopo di

renderla idrofila, in modo da ostacolare la formazione di depositi solidi. Le membrane dinamiche sono formate da un materiale di supporto meccanicamente resistente, con porosità di gran lunga maggiore delle membrane per MF e UF, sulla cui superficie è presente uno strato composto da solidi fini di natura organica o inorganica, che in base alla loro distribuzione dimensionale sono in grado di regolare la porosità effettiva della membrana; il meccanismo di funzionamento è simile a quello con cui opera la filtrazione a spessore.

Tecniche innovative di pulizia della membrana con ultrasuoni ed enzimi sono risultate altresì efficaci non solo per la rimozione del *fouling* ma anche per prevenirne la formazione. Gli ultrasuoni però, se da un lato riescono con successo a controllare il *fouling*, dall'altro possono essere dannosi per l'attività dei microorganismi anaerobici; pertanto, l'impiego di questa tecnica di pulizia non ha trovato molti sostenitori, mentre la diffusione della pulizia enzimatica, nonostante la sua efficacia, è frenata dagli elevati costi dei reagenti.

Infine, il controllo del *fouling* può essere effettuato agendo sulle condizioni operative, in particolare regolando in maniera opportuna il flusso idrico della membrana e facendo variare l'intensità del gas *scouring* e della velocità idrica tangenziale, rispettivamente nella configurazione *submerged* and *side-stream* degli AnMBR.

Applicazioni dei sistemi

I vantaggi connessi all'impiego degli AnMBR, in confronto ad altri sistemi di trattamento, cominciano a favorirne la diffusione per la depurazione di reflui ad elevato tenore di substrati organici (liquami urbani, industriali e zootecnici, percolati di discarica e rifiuti solidi).

L'impiego degli AnMBR è particolarmente efficace per la depurazione di reflui provenienti da attività produttive, quali l'industria alimentare, di produzione della carta, tessile, conciaria, farmaceutica e petrolifera, che si caratterizzano per un elevato contenuto di sostanza organica, condizioni estreme di pH, temperatura e salinità, e la presenza di sostanze di sintesi chimica recalcitranti o tossiche per le attività biologica. In queste condizioni, molti dei sistemi tradizionali di depurazione, in ambiente sia aerobico che anaerobico, mostrerebbero prestazioni deludenti, mentre ricerche condotte ricorrendo agli AnMBR hanno evidenziato rendimenti di rimozione del COD superiori al 90%.

Per quanto riguarda le condizioni operative degli impianti AnMBR a servizio di insediamenti produttivi, i valori assegnati ai principali parametri, quali il flusso idrico, carico organico (OLR), il tempo di detenzione idraulica (HRT) e quello di ritenzione dei solidi (SRT), sono estremamente variabili essendo la casistica molto vasta. A titolo orientativo, il flusso idrico può variare dalle unità alle decine di L/(m h), l'OLR è compreso tra 5 e 15 kgCOD/(m³ d), rispettivamente per reflui di industrie alimentari e acque di raffineria, HRT varia dalla decine di ore fino ai 5 d, rispettivamente per acque di vegetazione e per reflui caseari. I valori di SRT sono prevalentemente compresi tra 30-60 d con punte anche superiori ai 100 d. Inoltre, tali valori, a parità di caratteristiche del refluo, variano notevolmente a seconda che i reattori operino in regime mesofilo oppure termofilo, in virtù dell'elevata sensibilità mostrata dall'attività dei batteri anaerobici al variare della temperatura alla quale è condotto il processo.

I reflui urbani, perché poco concentrati e contenenti sostanze azotate in forma ridotta, non esaltano le prestazioni degli AnMBR. Sebbene, nei diversi casi studiati e presenti nella recente letteratura tecnica, le percentuali di rimozione del COD e dei solidi sospesi totali (SST) siano risultate elevate (maggiori del 85% e del 90% rispettivamente), gli AnMBR sono molto scarsamente efficaci ai fini della rimozione dei composti azotati allo stato ridotto e del fosforo, in conseguenza dell'ambiente anaerobico del processo. Pertanto, se richiesto dalla normativa vigente, gli effluenti devono subire un ulteriore processo per la rimozione dei nutrienti, altrimenti possono essere scaricati in un corpo idrico ricettore, previa

disinfezione, o riutilizzati in agricoltura, dove la presenza di nutrienti rappresenta un elemento positivo. L'opportunità fornita dagli AnMBR di operare il processo biologico con SRT molto elevati li rende particolarmente idonei per rimuovere dalle acque reflue urbane i contaminanti emergenti, in particolare i farmaci, dal momento che i maggiori tempi di contatto microrganismi-contaminate ne favoriscono la degradazione e/o l'adsorbimento sulla biomassa microbica. In virtù della contenuta variabilità delle caratteristiche dei liquami urbani, i valori dei parametri operativi oscillano entro limiti ristretti: il flusso idrico varia dalle poche unità alle decine di L/(m h), pressappoco con valori simili a quelli che si riscontrano per acque reflue industriali; l'OLR è compreso nell'intervallo 0.8-2 kgCOD/(m³ d); lo HRT è di norma dell'ordine di 3-15 h, anche se possono verificarsi valori estremi di circa 50 h; lo SRT assume valori mediamente superiore ai 100 d.

Gli AnMBR hanno inoltre trovato applicazione, con risultati incoraggianti (rimozione del COD superiore al 90%), per il trattamento di flussi di materiali solidi organici, ad esempio la FORSU e gli scarti zootecnici, nonché percolati di discarica. I parametri operativi utilizzati per la FORSU in termini di OLR, HRT e SRT, variano rispettivamente negli intervalli 8-12 kgCOD/(m³ d), 1.5-11.8 d e 30-300 d, mentre, per il percolato da discarica, i valori di HRT e SRT non si discostano da quelli della FORSU, a differenza dei carichi organici applicati, che sono più contenuti e compresi tra 3 e 6 kgCOD/(m³ d).

Costo

Sebbene il costo delle membrane sia andato riducendosi progressivamente negli ultimi decenni, i costi capitali e quelli connessi alle operazioni di filtrazione e di prevenzione del *fouling* restano elevati, ostacolando una più ampia applicazione dei sistemi AnMBR. Circa lo 85-90% del consumo energetico totale per il funzionamento di un impianto AnMBR è utilizzato per il processo di filtrazione su membrana (Dvorak et al., 2016), essendo le due voci di costo principali costituite da: energia necessaria a garantire una pressione di trans-membrana idonea al passaggio del flusso idrico attraverso i pori della membrana; energia spesa per impedire la formazione del *fouling*, legata al sistema di *gas scouring* per la configurazione *submerged* e alla circolazione della portata tra il reattore biologico e il comparto di filtrazione nella configurazione *side-stream* (infatti, tale circolazione dà luogo a un flusso idrico tangenziale lungo la superficie delle membrane idoneo a prevenire l'insorgenza del *fouling*). Come è facile prevedere, i costi operativi degli AnMBR sono proporzionali alla concentrazione di solidi nel bulk liquido del reattore biologico, perché più elevato è il loro contenuto, più rapida è la formazione del *fouling* e di conseguenza più costose risultano le operazioni di manutenzione delle membrane. A titolo di esempio, si riportano alcuni dati contenuti in un lavoro pubblicato da Ferrer et al. (2015), nel quale è stato stimato un costo di 0.22 kWh/m³ per un AnMBR operante con una concentrazione di SST pari a 12 g/L senza recupero del biogas, mentre utilizzando il biogas prodotto il costo si riduce fino a 0.14 kWh/m³, con un vantaggio evidente. All'aumentare però della concentrazione di SST nel reattore, sebbene la produzione di biogas aumenti, la convenienza derivante dal suo riutilizzo non si è mostrata tale da mantenere basso e costante il costo per m³ trattato. Dalla consultazione della letteratura tecnica (Dvorak et al., 2016), i costi unitari di un impianto AnMBR sono risultati compresi tra 0.11 e 0.49 kWh/m³, ben al di sotto di quelli richiesti per gli impianti MBR, oscillanti mediamente tra 1 e 2 kWh/m³.

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.
- Corsino S.F.; Torregrossa M. (2016). Il progetto degli impianti MBR: configurazione dei reattori, componenti e particolari costruttivi. In: *BioMac 2016 “Bioreattori a membrane (MBR) e trattamenti avanzati per la depurazione delle acque”*. Ed. Caracol. ISBN 978-88-98546-58-9.
- 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, *Bioresour. Technol.* 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.
- Dvořák L, Gómez M, Dolina J, Černín A (2016). Anaerobic membrane bioreactors—a mini review with emphasis on industrial wastewater treatment: applications, limitations and perspectives, *Desalination and Water Treatment* 57:19062-19076.
- Ferrer J, Pretel R, Duran F, Gimenez JB, Robles A., Ruano MV, Serralta J, Ribes J, Seco A (2015) Design methodology for submerged anaerobic membrane bioreactors (AnMBR): A case study, *Sep. Purif. Technol.*141:378–386.
- Gao WJ, Lin HJ, Leung KT, Schraft H, Liao BQ (2011) .Structure of cake layer in a submerged anaerobic membrane bioreactor, *J. Membr. Sci.* 374:110–120.
- Judd S. (2011). *The MBR book – Principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Second edition. Elsevier Ltd, Oxford (UK).
- Kim JS, Lee CH, Chang IS (2001) Effect of pump shear on the performance of a crossflow membrane bioreactor. *Wat. Res.* 35: 2137–2144.
- Krzeminski, P., Leverette, L., Malamis, S., Katsou, E., 2017. Membrane bioreactors – A review on recent developments in energy reduction, fouling control, novel configurations, LCA and market prospects. *J. Membr. Sci.* 527, 207–227.
- 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.
- Lin H, Peng W, Zhang M, Chen J, Hong H, Zhang Y (2013). A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. *Desalination* 314: 169–188.
- 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.
- Ødegaard, H., (2006), Innovations in wastewater treatment: the moving bed biofilm process. *Water Sci. Technol.* 53, 17–33.
- 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.
- Sheng-bing, H.E., Gang, X.U.E., Hai-nan, K., 2006. Zeolite powder addition to improve the performance of submerged gravitation-filtration membrane bioreactor. *J. Environ. Sci.* 18, 242–247.
- 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.
- Wu, J., Chen, F., Huang, X., Geng, W., Wen, X., 2006. Using inorganic coagulants to control membrane fouling in a submerged membrane bioreactor. *Desalination* 197, 124–136.
- 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

Il presente paragrafo vuole offrire una panoramica sull'evoluzione delle pubblicazioni scientifiche in materia di processi MBR, distinte sia in base ai principali temi di interesse del settore, che per zona geografica, al fine di orientare la ricerca verso gli aspetti maggiormente dibattuti e rilevanti.

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

Come noto, da diversi anni a questa parte i sistemi MBR suscitano l'interesse di studiosi e gruppi di ricerca di tutto il mondo per le loro elevate efficienze di trattamento di reflui domestici e industriali e per la loro possibilità di incrementare i carichi organici da depurare, tuttavia richiedendo un modesto incremento della superficie da occupare. Ciò implica, indubbiamente, svariati vantaggi tra cui il poter trattare reflui caratterizzati da alte concentrazioni inquinanti e da contaminanti recalcitranti, viste le elevate concentrazioni di biomassa, e conseguentemente, gli elevati tempi di residenza cellulare (*Sludge Retention Time – SRT*) ai quali è possibile operare in un processo MBR (Judd and Judd, 2011).

Fatta tale premessa, l'evoluzione delle ricerche scientifiche sul tema MBR, ha visto concentrare maggiormente l'attenzione su quelli che sono considerati i principali "limiti" alla diffusione di questa tecnologia. Tra gli "svantaggi" i fenomeni di sporco (*fouling*) delle membrane, e l'acquisita conoscenza sulle disfunzioni di processo (quali il *foaming*), sembrano centralizzare, ancora oggi, l'attenzione del mondo scientifico e della ricerca. Per contro, gli aspetti economici, legati ai costi delle membrane, hanno manifestato negli ultimi anni una riduzione in termini di pubblicazioni scientifiche, per via della diffusione di prodotti ormai concorrenziali e di un numero maggiore di case produttrici di membrane.

D'altro canto, tra gli studi più recenti non direttamente legati ai già noti svantaggi della tecnologia, ma volti all'individuazione di nuovi contesti di applicazione e all'ottimizzazione di processo, connessi a tematiche quali l'efficienza energetica degli impianti di depurazione e all'emissione di gas serra (Green House Gases – GHGs), rimangono di elevato interesse scientifico gli studi orientati verso la modellizzazione del sistema e l'applicabilità in nuovi contesti e condizioni (MBR in condizioni anaerobiche, trattamento di contaminanti emergenti e xenobiotici).

Nel prosieguo del presente contributo, è stata posta l'attenzione su una dettagliata analisi del progresso della ricerca, aggiornata al mese di Giugno 2017, nel mondo e in Italia, estrapolando i dati dal database Scopus®.

Rispetto allo studio condotto per il numero precedente dell'Osservatorio MBR (anno 2016), al fine di intercettare il maggior numero di studi concernenti i bioreattori a membrana, la ricerca è stata sempre effettuata per mezzo del browser interno al database Scopus®, ricercando la combinazione di keywords "Membrane bioreactor wastewater – Membrane bio reactor wastewater – MBR wastewater", secondo la sequenza logica "(TITLE-ABS-KEY (*membrane AND bioreactor AND wastewater*) OR TITLE-ABS-KEY (*mbr AND wastewater*) OR TITLE-ABS-KEY (*membrane AND bio AND reactor AND wastewater*))". In tal modo la ricerca ha restituito un risultato di 4.625 pubblicazioni, suddivise principalmente tra articoli scientifici su rivista, articoli scientifici di conferenza indicizzati, review, capitoli su libro e articoli in stampa (Figura 5.1). In particolare, l'81,7% di tali lavori è rappresentato da articoli scientifici, confermando l'interesse dell'applicazione della tecnologia a svariati casi studio, spesso incentrati verso il trattamento di reflui industriali. L'11,5% costituisce l'aliquota di lavori presentati in occasioni di conferenze internazionali; il 4,7% rappresenta l'aliquota di review dedicate allo stato dell'arte della tecnologia che, seppur configurandosi tra le tecnologie avanzate di trattamento delle acque reflue, è da ritenersi

sufficientemente consolidata da non richiedere frequenti aggiornamenti circa la logica di funzionamento e di processo. Infine, le aliquote minoritarie (circa 1%) sono relative ai contributi su libro e agli articoli attualmente in fase di stampa.

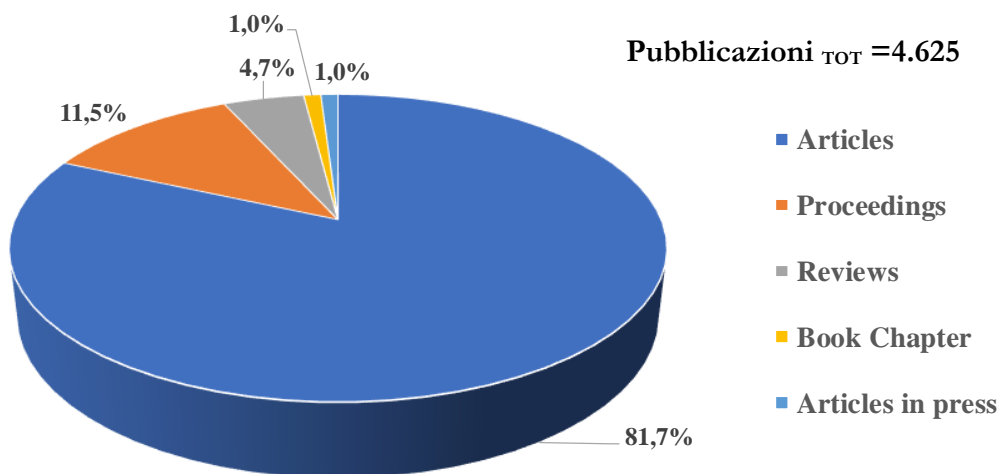


Figura 5.1: Suddivisione delle pubblicazioni sulla tecnologia MBR in articoli scientifici, articoli di conferenza e review (aggiornata al mese di Giugno 2017).

Per quanto riguarda la distribuzione geografica della produzione scientifica in materia di MBR su scala mondiale, il primato è sempre detenuto dalla Cina, seguita direttamente dagli Stati Uniti d’America (Figura 5.2). L’Italia occupa ad oggi l’ottavo posto dopo Cina, Stati Uniti, Spagna, Germania, Giappone, Korea del Sud e Regno Unito. Tuttavia, tale analisi non tiene conto delle dimensioni di ciascuno Stato e, di conseguenza, del numero di Università e centri di ricerca presenti. Il nostro Paese, dal 1990 ad oggi, ha esternato 224 pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali. Nel prosieguo dell’analisi sono riportati i dati relativi alla produzione scientifica italiana, confrontati con le relative produzioni di Cina e U.S.A. che, ad oggi, rappresentano i maggiori contribuenti scientifici. Inoltre, tutti i dati sono confrontati con la produzione scientifica mondiale sui sistemi MBR.

In particolare, ponendo a confronto i trend della produzione scientifica annuale di Cina, U.S.A. e Italia (Figura 5.3), è interessante notare come la Cina, sebbene abbia investito sulla ricerca per i sistemi MBR solamente a partire dal 1996, ha registrato un trend pressoché esponenziale fino al 2013, contribuendo in maniera considerevole alla produzione scientifica mondiale. Tuttavia, sebbene uno Stato come la Cina possa vantare il maggior numero di pubblicazioni annue, principalmente dovute al fattore di scala geografica, dal 2013 ha avuto un andamento decrescente della produzione scientifica, probabilmente legata a una “saturazione” del mercato e a una sempre minore domanda nel settore. Per quanto riguarda gli U.S.A., sin dal 1990 hanno registrato un trend esponenziale della ricerca sulla tecnologia MBR; tuttavia, dal 2006 hanno prodotto documentazione scientifica in maniera pressoché costante. Un trend simile a quello degli U.S.A., ma su un numero di pubblicazioni sensibilmente inferiore, è stato registrato per l’Italia.

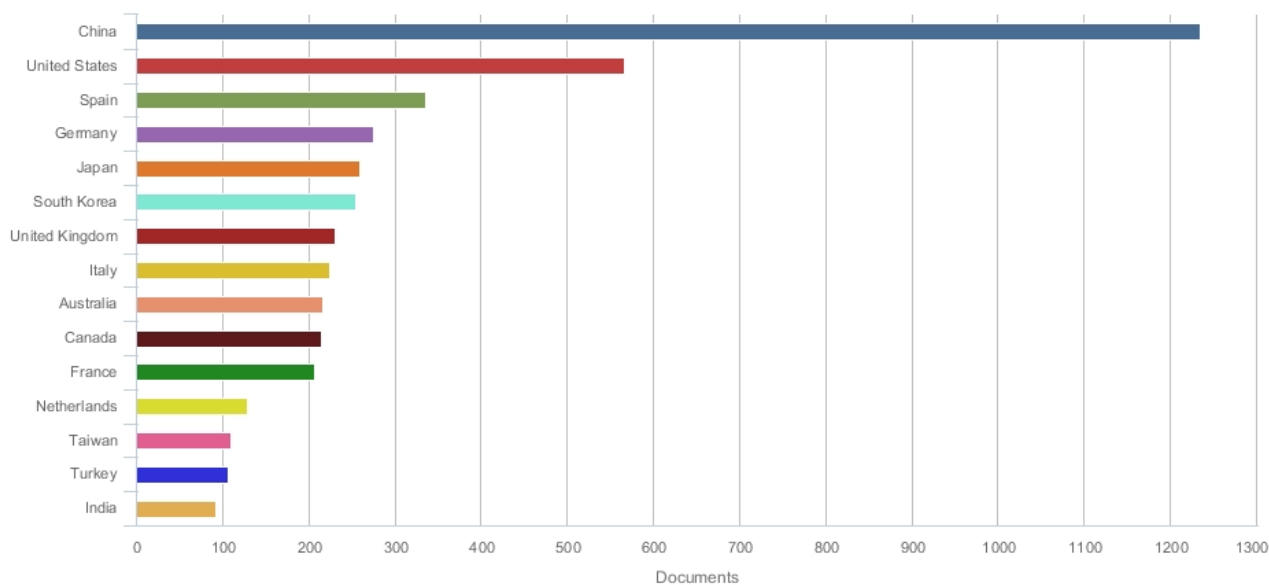


Figura 5.2: Ripartizione della produzione scientifica sulla tecnologia MBR per differente area geografica di pertinenza, aggiornata al mese di Giugno 2017 (Copyright © 2017 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V).

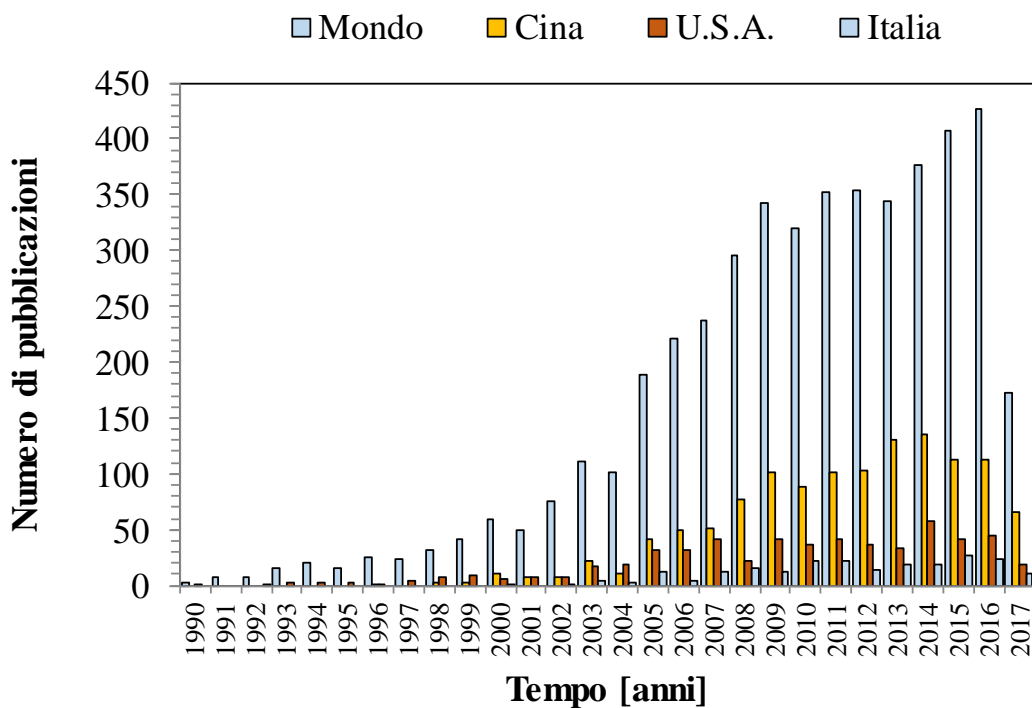


Figura 5.3: Trend annuale della produzione scientifica sulla tecnologia MBR nel mondo e in Cina, U.S.A. e Italia (periodo di riferimento 1990-2017).

Il grafico di Figura 5.3 mostra esclusivamente il numero di pubblicazioni annue per ciascuno Stato, non tenendo in considerazione la reale “dimensione accademica” e di ricerca di ciascun Paese.

La Figura 5.4 riporta il trend cumulato della produzione scientifica per singolo Stato e nel mondo e 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 a partire 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 incrementato il numero di pubblicazioni nel settore, contribuendo significativamente alla produzione scientifica in materia di bioreattori a membrana.

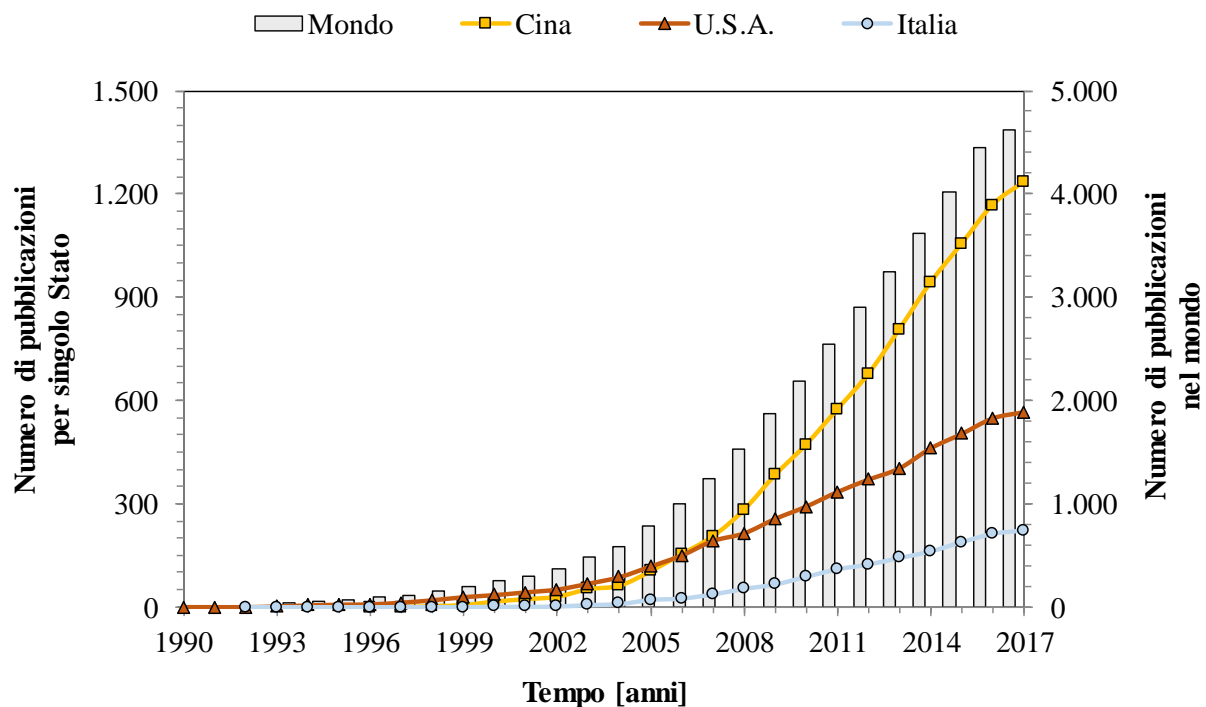


Figura 5.4: Trend cumulato della produzione scientifica sulla tecnologia MBR nel mondo e in Cina, U.S.A. e Italia (periodo di riferimento 1990-2017).

L'analisi fin qui condotta ha tenuto solamente conto del numero di pubblicazioni scientifiche relative ai bioreattori a membrana, nella loro accezione più generale possibile. Tuttavia, si è ritenuto opportuno estendere il ragionamento ai temi di ricerca (topic) maggiormente dibattuti in materia di MBR. A tal proposito, la Figura 5.5 riporta il numero di pubblicazioni scientifiche esterne a livello mondiale (Figura 5.5 a) e da Cina, U.S.A. e Italia (Figura 5.5 b) limitatamente a degli specifici topic che al giorno d'oggi ricoprono un ruolo di maggior rilievo e interesse per la comunità scientifica internazionale. Pertanto, da un simile ragionamento, è automaticamente determinabile l'incidenza della produzione scientifica italiana rispetto alla produzione scientifica mondiale, per ciascun topic di ricerca, come rapporto tra il numero di pubblicazioni esterne dall'Italia e le pubblicazioni esterne su scala mondiale (Figura 5.5 a).

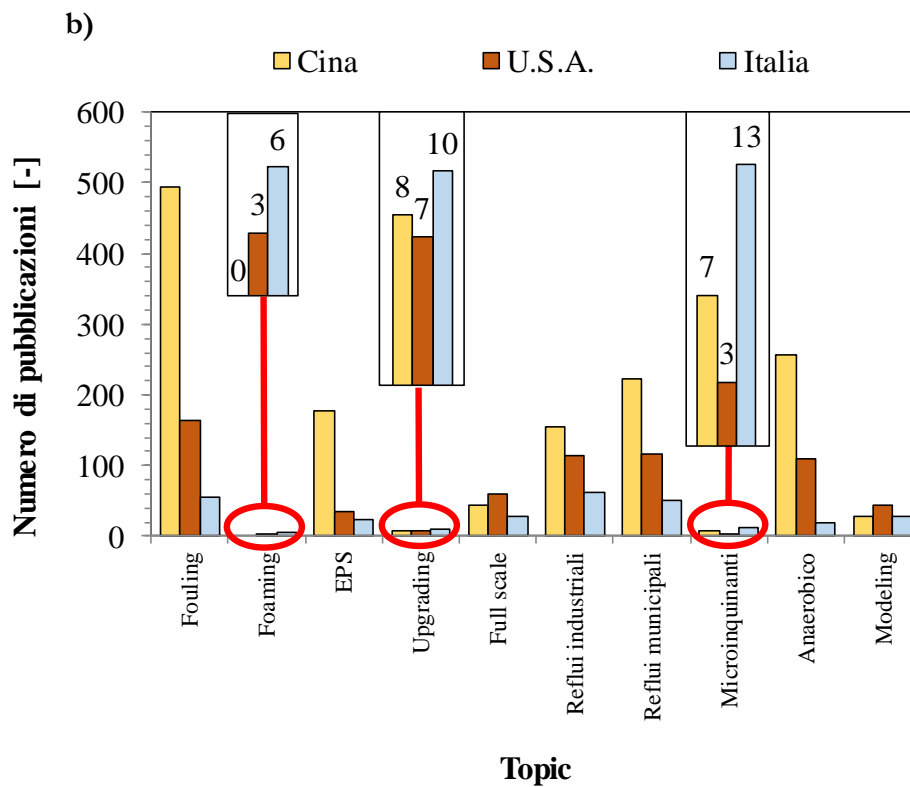
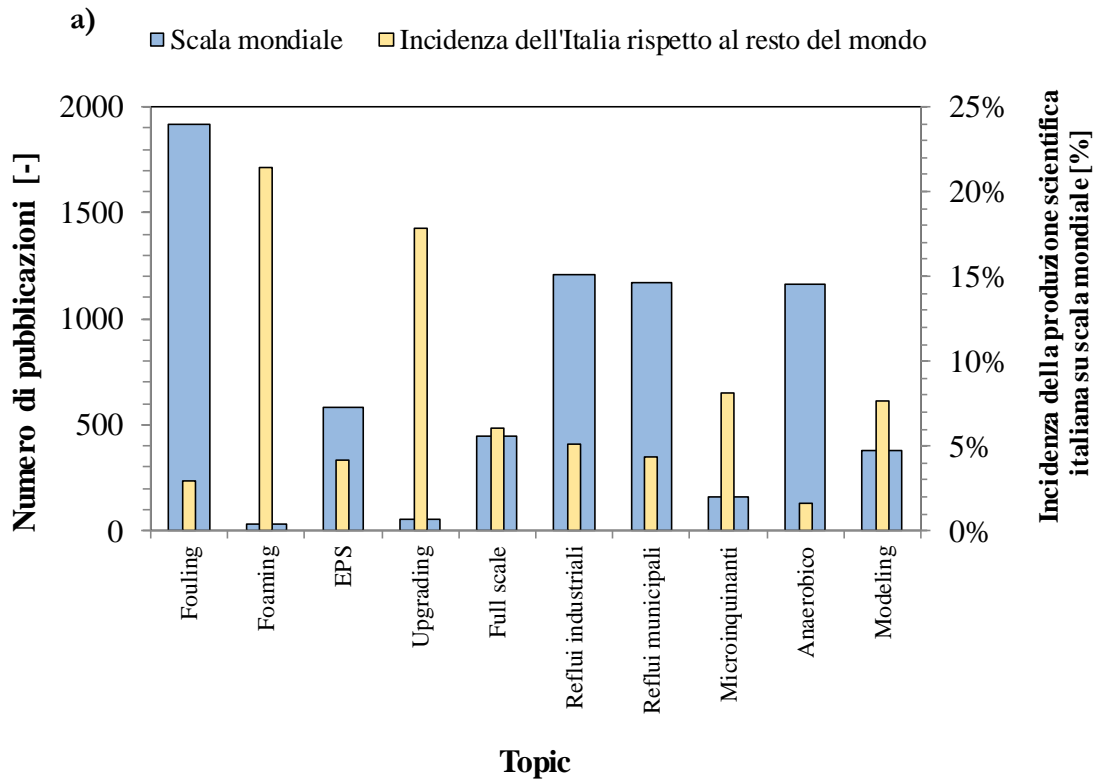


Figura 5.5: Distribuzione della produzione scientifica per topic di riferimento, di Cina, U.S.A. e Italia, e incidenza della produzione scientifica italiana rispetto alla produzione scientifica mondiale (aggiornato al mese di Giugno 2017).

In particolare, l'analisi è stata eseguita sui seguenti topic scientifici:

1. **fouling** della membrana (problemi associati allo sporcamento della membrana);

2. **foaming** in impianti MBR (problemi associati allo schiumeggiamento e alla gestione degli impianti MBR);
 3. sostanze polimeriche extracellulari (**EPS**), quali principali fattori scatenanti il fouling della membrana;
 4. applicazione della tecnologia MBR per **upgrading** di impianti pre-esistenti;
 5. applicazione della tecnologia MBR in impianti **full-scale**;
 6. utilizzo della tecnologia MBR per il trattamento di **reflui industriali**;
 7. utilizzo della tecnologia MBR per il trattamento di **reflui municipali**;
 8. utilizzo della tecnologia MBR per la rimozione di **microinquinanti** e **contaminanti emergenti**;
 9. applicazione della tecnologia MBR per il trattamento **anaerobico** delle acque reflue;
 10. studio dei sistemi MBR mediante approccio **modellistico** (applicazione dei modelli ASM per studi previsionali e per la determinazione di nuovi criteri di progetto).
1. Per quanto concerne il **fouling** l'analisi dei dati in Figura 5.5 a), evidenzia che esso costituisce la principale problematica affrontata per i sistemi MBR, e comprende lo studio degli effetti e dei meccanismi di deposito di biomassa sulla superficie e all'interno dei pori della membrana (Di Bella et al., 2006; Judd and Judd, 2011). Il fenomeno del *fouling*, che comporta la riduzione del flusso di permeato, a parità di pressione transmembrana (TMP) applicata, risulta abbastanza complesso e dipendente da svariate cause quali le caratteristiche della membrana (materiale, idrofobicità, porosità), le caratteristiche della biomassa (concentrazione di solidi sospesi, concentrazione di EPS, dimensione dei fiocchi, idrofobicità) e le condizioni operative (temperatura e ossigeno disciolto, intensità dell'aerazione, tempo di residenza cellulare, flusso critico). Come è possibile osservare in Figura 5.5b, il maggior contributo scientifico per questo topic, è dato dalla Cina con circa 500 pubblicazioni, seguita dagli U.S.A. con 164 pubblicazioni, mentre l'Italia, ad oggi, conta 56 pubblicazioni. Una tematica come quella del *fouling* ha ricadute dirette sui costi gestionali della tecnologia e, pertanto, sulla sua stessa diffusione nel mercato della depurazione delle acque reflue. Pertanto, studiare e ricercare tecniche costruttive e impiantistiche volte alla minimizzazione del *fouling* è di grande interesse per le case produttrici di membrane che, al giorno d'oggi, risiedono prevalentemente in Cina e Stati Uniti d' America.
 2. Il **foaming** è una tematica concernente la produzione di schiume, prevalentemente di natura biologica, nei trattamenti biologici di depurazione delle acque reflue. Come il **fouling**, anche il **foaming** può essere dovuto a molteplici cause quali le condizioni operative, la presenza di microorganismi filamentosi, la elevata concentrazione di EPS (Di Bella and Torregrossa, 2013). Inoltre il **foaming** può presentare delle cause interconnesse con il **fouling**, e ciò rende i due fenomeni strettamente correlati e, talvolta, inscindibili tra loro (Campo et al., 2017; Cosenza et al., 2013). Sebbene il **foaming** sia un problema chiaramente associabile a problemi gestionali degli impianti di depurazione, ad oggi, su scala mondiale è possibile reperire solamente 28 pubblicazioni. Di queste, 6 sono di origine italiana, seguite da 3 pubblicazioni U.S.A. e nessuna pubblicazione dalla Cina (Figura 5.5 b). Ciò posiziona l'Italia al primo posto per la ricerca sul **foaming** in impianti MBR, con un'incidenza su scala mondiale, del 21%.
 3. Le **EPS** rappresentano, da diversi anni a questa parte, un argomento ampiamente dibattuto nella comunità scientifica internazionale. Esse sono principalmente costituite da proteine e

polisaccaridi e, ad oggi, sono ritenute quali causa principale per lo sporcamento delle membrane. Pertanto le **EPS** presentano dirette correlazioni con il **fouling** e anche con il **foaming** (Cosenza et al., 2013; Di Bella et al., 2011; Di Bella and Torregrossa, 2013). Ne deriva che, da uno studio approfondito delle **EPS** può crescere il livello della conoscenza sulla limitazione del **fouling** delle membrane e, pertanto, il *ranking* in termini di produzione scientifica relativa al topic **EPS**, segue quello relativo al **fouling**, analizzato in precedenza.

4. I sistemi **MBR** sono ad oggi ritenuti come un valido processo per l'**upgrading** di impianti pre-esistenti, vista la loro elevata capacità depurativa (possibilità di operare con elevate concentrazioni di biomassa anche pari a 10-15 g/L, possibilità di ottenere elevati standard di qualità allo scarico) e vista la possibilità di incrementare la potenzialità di un impianto di depurazione, impegnando il minore ingombro in pianta possibile, rispetto a una filiera di trattamento di tipo convenzionale. Come noto, infatti, i sistemi **MBR**, aboliscono l'unità di sedimentazione finale. Pertanto, tali sistemi, sono molto idonei laddove sussistano problemi di spazio per poter ampliare un sistema di trattamento delle acque reflue. L'Italia, che notoriamente non è un Paese che possa vantare di ampi spazi territoriali, di fatto si pone al primo posto per quel che concerne le pubblicazioni inerenti l'**upgrading** di impianti pre-esistenti, rispetto a Cina e U.S.A, con un'incidenza su scala mondiale del 18%.
5. Sebbene la maggior parte degli studi sui sistemi **MBR** sia eseguita a scala di laboratorio, lo studio su scala reale (**full-scale**) si presenta come imprescindibile step prima di poter realizzare impianti in piena scala. A tal proposito, gli U.S.A. sono primi per pubblicazioni scientifiche (60), seguiti da Cina (45) e Italia (27).
6. Poiché la tecnologia **MBR** associa un sistema di trattamento biologico a un sistema di separazione fisica di filtrazione su membrana, essa si configura come una tecnologia robusta e adatta al trattamento di **reflui industriali** di natura recalcitrante (Campo et al., 2016; Di Bella et al., 2015). A tal proposito, la Cina conta 154 pubblicazioni scientifiche, seguita da U.S.A. (115) e Italia (62).
7. Come discusso al punto 4, i sistemi **MBR** sono tra le tecnologie elettive per l'**upgrading** di impianti di depurazione pre-esistenti. Pertanto, in parallelo agli studi più innovativi relativi al trattamento dei reflui di origine industriale, la ricerca sul trattamento di **reflui municipali** con sistemi MBR, ricopre ancor oggi un ruolo di rilievo nella ricerca del settore.
8. Tema innovativo e ampiamente dibattuto al giorno d'oggi in letteratura, è la rimozione dei **microinquinanti** (contaminanti molto tossici anche se presenti a basse concentrazioni) e dei contaminanti emergenti o xenobiotici, dalle acque reflue (Alvarino et al., 2014; Herzog et al., 2014). I sistemi **MBR** sono soliti operare ad elevati tempi di ritenzione cellulare (**SRT**) e ciò favorisce il trattamento e la rimozione dei contaminanti più difficilmente biodegradabili e recalcitranti. Come è possibile osservare in Figura 5.5 b), l'Italia supera Cina e U.S.A. per numero di pubblicazioni scientifiche (13) sul tema dei **microinquinanti**, registrando un'incidenza dell'8% su scala mondiale. Ciò può essere strettamente correlabile alle normative vigenti in ciascuno Stato che impongono limiti allo scarico e standard di qualità differenti in funzione della regione geografica di appartenenza.

9. Un topic di crescente interesse in materia di depurazione delle acque reflue, è il trattamento **anaerobico** dei reflui mediante sistemi **MBR**. L'Italia si è affacciata di recente a tale tematica, registrando ad oggi 19 pubblicazioni sul tema, nettamente inferiori alla Cina (247) e agli U.S.A. (109).
10. Da circa trent'anni l'applicazione di **modelli** di rimozione delle sostanze organiche e dei nutrienti ai processi di depurazione delle acque reflue costituisce uno strumento di rilevante importanza per studi previsionali e per l'elaborazione di nuovi criteri di progetto. Esaminando la Figura 5.5 b), è possibile notare come per Cina, U.S.A. e Italia vi sia, ad oggi, un numero confrontabile di pubblicazioni scientifiche pari rispettivamente a 28, 45 e 29. Per tale topic di ricerca, l'Italia ha un'incidenza dell'8% su scala mondiale.

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 “*EUROMBR*”. 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/>

Progetto “*EUROMBR*” European network for innovative microbioreactor applications in bioprocess development. Finanziato dalla Comunità Europea nell'ambito di FP7-PEOPLE - Specific programme "People" implementing the Seventh Framework Programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities (2007 to 2013). Il progetto ha avuto inizio l'1 novembre 2013 e si concluderà il 31 ottobre 2017. L'obiettivo principale del progetto è quello di creare un network europeo di specialisti nell'ambito delle applicazioni della tecnologia a membrana (MBR). Gli specialisti saranno formati da leader del settore e con attrezzature e metodologie di ultima generazione. Il progetto, coordinato dalla Technical University of Denmark (DTU) coinvolge i seguenti partner: University College London (United Kingdom), Technische Universitat Graz (Austria), Univerza V Ljubljani (Slovenia), Technische Universitat Braunschweig (Germany), Oulun Yliopisto (Finland), Università degli studi Magna Grecia di Catanzaro (Italy), Micronit Microfluidics BV (Netherlands), Microfluidic Chipshop (Germany), IX-Factory GMBH (Germany), Nanomaterials Y Polimeros SL (Spain), CERCELL APS. Dettagli sul progetto possono essere reperiti al seguente sito web: http://cordis.europa.eu/project/rcn/110096_en.html

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.

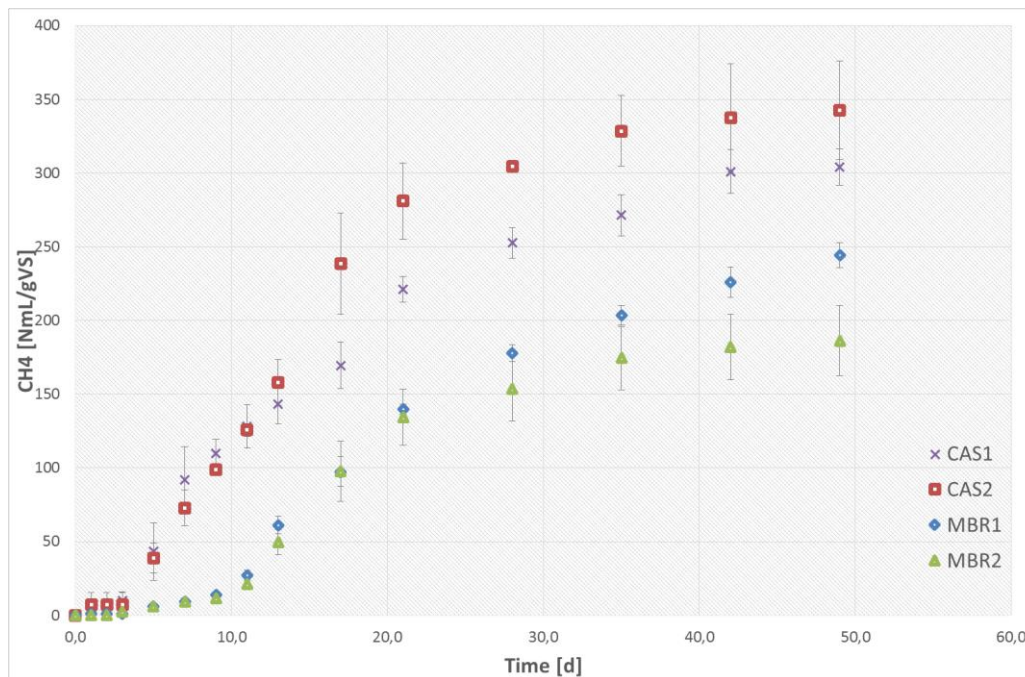


Figura 5.7: Produzioni cumulative specifiche di metano da fanghi CAS e MBR

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.

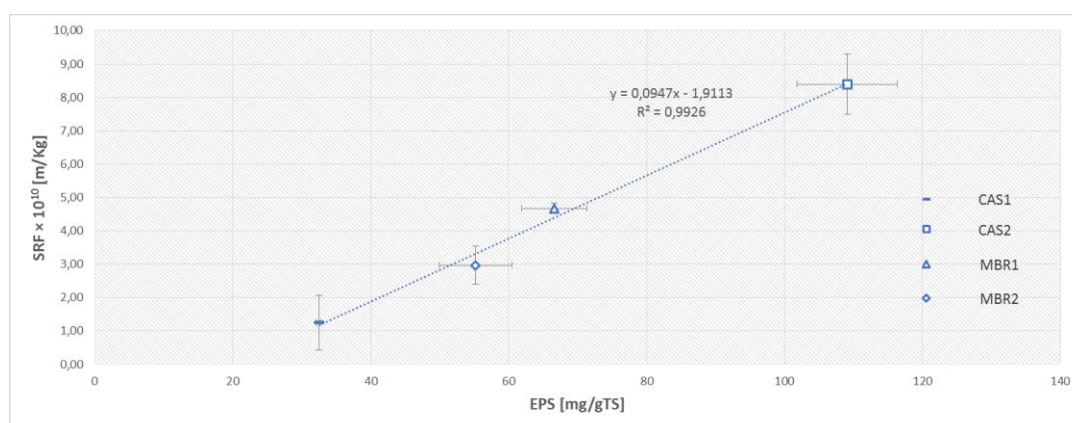


Figura 5.8: Correlazione EPS-SRF relativa al fango fresco

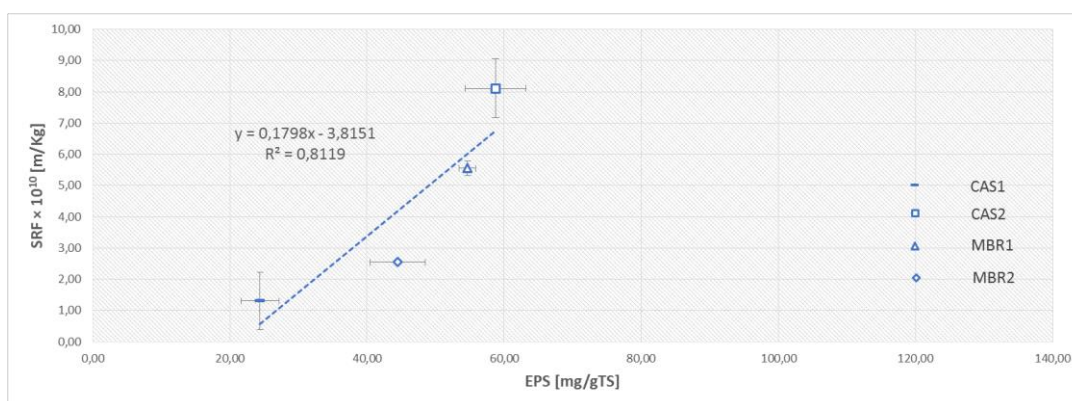


Figura 5.9: Correlazione EPS-SRF relativa al fango digerito

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

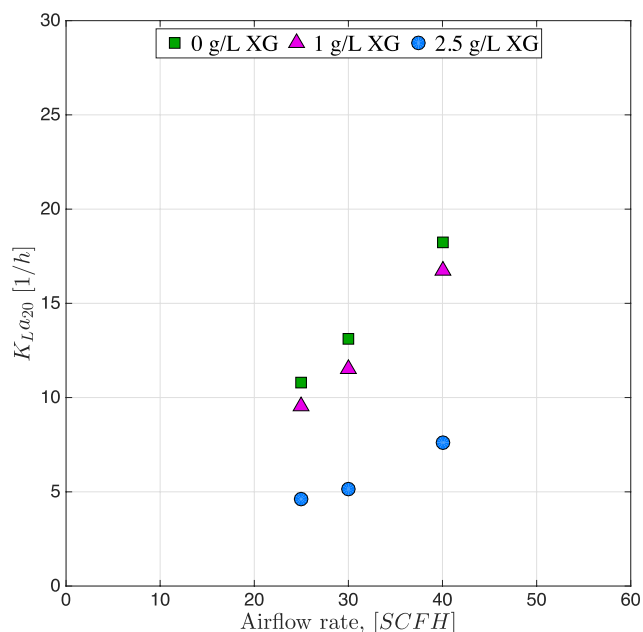


Figura 5.11: Valori di K_{La} nelle diverse condizioni operative

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.

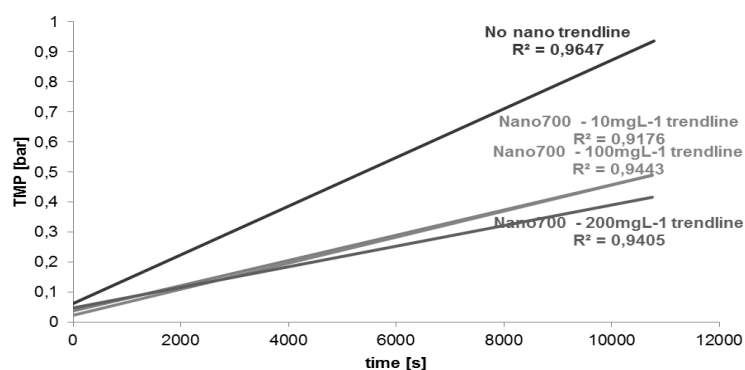


Figura 5.12: Effetto indotto sulla *TMP* dalla presenza sulle membrane di nanoparticelle

Bibliografia

- Alvarino, T., Suarez, S., Lema, J.M., Omil, F., 2014. Understanding the removal mechanisms of PPCPs and the influence of main technological parameters in anaerobic UASB and aerobic CAS reactors. *J. Hazard. Mater.* 278, 506–513. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.06.031
- Belgiorno V., Borea L., Naddeo V., Scannapieco D. (2014). *Ricerca e Innovazione per il Controllo del Fouling*. Atti del Corso BIOMAC 2014, 87-101, Edzioni Aster.
- Campo, R., Capodici, M., Di Bella, G., Torregrossa, M., 2017. The role of EPS in the foaming and fouling for a MBR operated in intermittent aeration conditions. *Biochem. Eng. J.* 118. doi:10.1016/j.bej.2016.11.012
- Campo, R., Di Prima, N., Gabriella Giustra, M., Freni, G., Di Bella, G., 2016. Performance of a moving bed-membrane bioreactor treating saline wastewater contaminated by hydrocarbons from washing of oil tankers. *Desalin. Water Treat.* 57. doi:10.1080/19443994.2016.1153907
- Ciancia V., Ambrosino M., Pirozzi F., Detwiler R., Mohraz A., Rosso D. (2015). *Effects of mixed liquor viscosity on alpha factors*. Submitted.
- Cosenza, A., Di Bella, G., Mannina, G., Torregrossa, M., 2013. The role of EPS in fouling and foaming phenomena for a membrane bioreactor. *Bioresour. Technol.* 147, 184–192.
- Di Bella, G., Di Prima, N., Di Trapani, D., Freni, G., Giustra, M.G., Torregrossa, M., Viviani, G., 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. doi:10.1016/j.jhazmat.2015.08.021
- Di Bella, G., Durante, F., Torregrossa, M., Viviani, G., 2006. The role of fouling mechanisms in a submerged membrane bioreactor during the start-up. *Desalination* 200, 722–724.
- Di Bella, G., Torregrossa, M., 2013. Foaming in membrane bioreactors: Identification of the causes. *J. Environ. Manage.* 128, 453–461. doi:10.1016/j.jenvman.2013.05.036
- Di Bella, G., Torregrossa, M., Viviani, G., 2011. The role of EPS concentration in MBR foaming: Analysis of a submerged pilot plant. *Bioresour. Technol.* 102, 1628–1635.
- 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.
- Herzog, B., Lemmer, H., Huber, B., Horn, H., Müller, E., 2014. Xenobiotic benzotriazoles-biodegradation under meso- and oligotrophic conditions as well as denitrifying, sulfate-reducing, and anaerobic conditions. *Env. Sci. Pollut. Res.* 21, 2795–2804. doi:10.1007/s11356-013-2199-3
- 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.
- Judd, S., Judd, C., 2011. *The MBR Book (second edition): principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment*, Order A Journal On The Theory Of Ordered Sets And Its Applications. doi:10.1016/B978-0-08-096682-3.10007-1
- 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., Fabbriano 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

5th IWA Regional Conference on Membrane Technology (IWA-RMTC2016), 22 -24 August 2016 Kunming City, China

9th International Membrane Science and Technology Conference (IMSTEC) - 5 - 8 December 2016, Adelaide, Australia.

International Conference on Membrane in drinking and industrial water production 6–8 February 2017, Leeuwarden, The Netherlands

3rd International Conference on Desalination using Membrane Technology, 2-5 April 2017, Las Palmas, Gran Canaria, Spain

Engineering with Membranes, EWM2017, Singapore (Singapore), 26-24 aprile 2017, Singapore

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.

BioMAc 2016: *BioMAc 2016 Bioreattori a Membrane (MBR) per la depurazione delle Acque* – Università di Palermo, Palermo 27-28 ottobre 2016.

Third European Workshop on Membrane reactors: Membrane Reactors for Process Intensification
Villafranca di Verona, Italy, March 9-10, 2017

Frontiers International Conference on Wastewater Treatment, 21-24 May 2017, Palermo, Italy

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

Judd S. “Industrial MBRs – membrane bioreactors for industrial wastewater treatment”. Published October 2014 by Judd and Judd Ltd, UK ISBN 978-0-9575578-1-9

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.

Viviani G., Torregrossa M. e Mannina G. (Eds.) “BioMAc 2016: i bioreattori a membrane (MBR) per la depurazione delle acque reflue”. Ed. Caracol, Palermo 2016. ISBN: 978-88-98546-58-9

Collivignarelli C., Romano R., Vaccari M. (Eds.) “La gestione degli impianti di depurazione MBR”. Maggioli Editore, Dicembre 2016, ISBN 8891619631.

Rodrigo Valladares Linares, Zhenyu Li, Menachem Elimelech, Gary Amy, Hans Vrouwenvelder (Eds.) “Recent Developments in Forward Osmosis Processes”. IWA Publishing, May 2017, ISBN 9781780408118.