

Depurazione delle acque reflue mediante elettro-bioreattore a membrana dinamica incapsulata

Mirko Messina¹

¹Affiliation not available

Abstract

¹La frequente domanda di risorsa idrica porta ad una necessità di depurare l'acqua con maggiore efficienza cercando di favorire il riutilizzo dell'acqua per uso agricolo o industriale. I sistemi convenzionali sono diventati obsoleti perché non riescono più a garantire il rispetto delle norme sulle concentrazioni di inquinanti per il riutilizzo della risorsa. Negli anni, la ricerca scientifica ha sviluppato un impianto di trattamento a membrana (MBR) in grado di ottenere un'efficacia di trattamento elevata grazie al processo di filtrazione su membrana, ma la diffusione è stata limitata a causa dei costi iniziali e di gestione dell'impianto e a causa del fenomeno del fouling, cioè lo sporcamento della membrana. Per risolvere questi problemi, sono state sperimentate membrane dinamiche autoformanti, cioè membrane composte da materiale di supporto in grado di utilizzare il fouling a favore per migliorare l'efficienza depurativa. Un altro vantaggio si ottiene con l'applicazione di processi elettrochimici che migliorano la mitigazione del fouling e le proprietà dell'effluente. In questa attività è stata osservata l'efficienza depurativa di un bioreattore a membrana dinamica autoformante incapsulata combinato con i processi elettrochimici (e-ESFDMBR) a scala pilota utilizzando un refluo reale.

INNOVAZIONI NEL TRATTAMENTO DELLE ACQUE RE- FLUE

Negli anni l'acqua è passata da essere considerata una risorsa inesauribile e di poco valore ad essere considerata "oro bianco", cioè una risorsa da tutelare in quanto sempre meno disponibile. L'uso civile, industriale ed agricolo hanno portato ad un consumo eccessivo dell'acqua avendo impatti significanti sull'ambiente. per garantire il rispetto di questa risorsa, sono state promulgate normative che puntano al riutilizzo dell'acqua reflua garantendo una ridotta concentrazione di inquinanti allo scarico. I classici impianti di trattamento a fanghi attivi (CAS) non riescono a rientrare in determinati parametri per il riuso della risorsa, quindi la ricerca scientifica si è concentrata sullo studio di un trattamento più efficace sviluppando un bioreattore a membrana (MBR).

Un impianto MBR utilizza sempre un processo biologico per abbattere la sostanza organica, inoltre viene utilizzato un processo fisico che si identifica nella filtrazione della miscela areata tramite delle membrane. Questo tipo di impianto, rispetto agli impianti classici, è caratterizzato da un SRT (Solid retention time) e HRT (Hydraulic retention time) indipendenti tra di loro perché l'HRT si concentra principalmente sulla filtrazione a membrana piuttosto che sulla decantazione per gravità. Inoltre viene mantenuto un rapporto F/M più basso rispetto ad un impianto tradizionale, che ne ha bisogno per far crescere bene la biomassa nel reattore ². Anche la concentrazione di MLSS ha un ruolo importante in un impianto MBR perché una concentrazione molto elevata può causare intasamenti della membrana, una bassa efficienza di aerazione e quindi un aumento del volume del bioreattore che si traduce in un aumento del costo di capitale iniziale ². Inoltre gli impianti MBR presentano vantaggi sia in termini di qualità dell'effluente sia in termini di ingombri planimetrici e volumetrici ³. Tuttavia, a fronte di questi vantaggi, un impianto MBR presenta anche degli svantaggi che ne limitano la diffusione a larga scala, ciò è legato al costo di realizzazione iniziale ed al costo di gestione; inoltre il fouling, che rappresenta lo sporco della membrana, è oggetto di

studio per trovare un modo efficace di controllo.

Per ovviare a questo problema, la ricerca scientifica ha sviluppato una membrana dinamica aut-
oformante formata da materiale di supporto caratterizzato da pori larghi che aiutano le particelle
di fango a depositarsi e a formare uno strato il quale funge da membrana per la filtrazione della
miscela areata ⁴. Le membrane dinamiche possono essere classificate in membrane pretrattate, ri-
coperte da un additivo che ne facilita la formazione del fouling, e membrane auto-formanti che
sfruttano il deposito di colloidali, EPS e SMP per trattare la miscela areata nel reattore biologico. Il
vantaggio principale della seconda sta nel fatto che risulta essere economica rispetto ad una mem-
brana tradizionale per il materiale di cui è composta, inoltre garantisce flussi di permeato maggiori
ed un controllo maggiore del fouling ⁴. Quindi la caratteristica principale di questo sistema è che la
membrana dinamica autoformante, supportata da materiali a basso costo come rete di materiale in-
erte, nylon, tessuti, ceramiche, che hanno dimensione dei pori in un intervallo compreso di 10-200
µm, è generata dalle sostanze presenti nella miscela liquida e funge da vera e propria membrana
selettiva in quanto ha una porosità nettamente inferiore alla membrana di supporto stessa ⁵.

Un altro miglioramento si ottiene implementando i processi elettrochimici ai processi biologici ed
alla filtrazione sviluppando un impianto MBR a processi bioelettrochimici (eMBR). I principali
processi elettrochimici che avvengono in un impianto eMBR sono elettro-coagulazione, elettro-
foresi ed elettroosmosi. L'elettro-coagulazione è un processo capace di destabilizzare le cariche
degli inquinanti attraverso un campo elettrico applicato, causando la dissoluzione dell'elettrodo ed
intrappolando gli inquinanti in blocchi che possono essere separati dal liquame ⁶. Gli ioni metallici
risultanti dalla dissoluzione dell'elettrodo agiscono da coagulanti che indeboliscono gli inquinanti
caricati e li inducono ad unirsi insieme ⁷. L'elettro-foresi riesce a controllare il movimento del-
le particelle sospese nel reattore, mentre l'elettro-osmosi controlla il movimento dell'acqua. Le
particelle presente nel reattore sono solitamente cariche negativamente, quindi l'applicazione del
campo elettrico, tramite elettroforesi, contrasta la deposizione di queste particelle sulla superficie

della membrana portandole verso l'anodo ⁸; lo stesso avviene per le particelle di acqua che sono cariche positivamente e sono soggette ai processi di elettro-osmosi, cioè vengono spinte verso il catodo, in questo modo riescono a migliorare il flusso e quindi la filtrazione. Inoltre l'elettro-osmosi rimuove l'acqua presente nella cellula microbica, aumentando la drenabilità dei fanghi e diminuendo la resistenza specifica della filtrazione ⁹.

ELETTRO-BIOREATTORE A MEMBRANA DINAMICA INCAPSULATA (e-ESFDMBR)

Setup sperimentale

L'attività svolta presso l'impianto di trattamento delle acque reflue di Battipaglia si è concentrata sull'osservazione di un impianto a scala pilota composto da un elettro-bioreattore a membrana dinamica autoformante incapsulata (e-ESFDMBR), alimentato con un refluo reale soggetto ai pretrattamenti di grigliatura, rotostacciatura e dissabbiatura. Esso è composto da un reattore biologico dal volume operativo di 100 L, ed utilizza una membrana dinamica auto-formante incapsulata circondata da 2 elettrodi cilindrici, alluminio per l'anodo e acciaio per il catodo. Gli elettrodi sono collegati, tramite dei cavi, ad un generatore di corrente continua (CC); la densità di corrente applicata al reattore è di 0,9 mA/cm², in linea con gli studi svolti da ¹⁰. Nel reattore è posta la membrana dinamica autoformante incapsulata che deve essere precedentemente assemblata. Essa è composta da un telaio centrale in plexiglass, viene posta una rete di plastica e un foglio di dacron, poi di nuovo quest'ultimo passaggio per poi chiudere il tutto con il telaio esterno e sigillare tutto con delle viti. Per l'aerazione, l'aria viene immessa con dei diffusori, in particolare un diffusore centrale posto sul fondo formato da un disco in pietra porosa e altri diffusori disposti radialmente al reattore usando gli elettrodi come supporto. Le tubazioni per il prelievo dell'influente, l'immissione

dell'effluente, il controlavaggio e l'aerazione sono composte da pead di colore bianco ed hanno diametro esterno 6 mm e diametro interno 4 mm. Per la circolazione dei liquidi, sono state utilizzate 3 pompe dosatrici a membrana. L'accensione delle pompe di controlavaggio ed effluente avviene tramite due temporizzatori caratterizzati da due fasi: lavoro e riposo. Nella fase di lavoro, si accende la pompa dell'effluente, mentre in quella di riposo risulta accesa quella del controlavaggio. La pompa dell'influente è controllata da un galleggiante che mantiene il livello, quando quest'ultimo scende, viene attivata la pompa per portare di nuovo il liquame a livello. Un altro temporizzatore regola l'accensione e spegnimento del generatore di corrente (5 min ON, 20 min OFF).

Risultati e discussione

L'osservazione è avvenuta per un periodo di 30 giorni. Per comprendere al meglio il funzionamento dell'impianto, bisogna osservare i parametri caratteristici di funzionamento.

Formazione della membrana dinamica

All'avvio dell'impianto, è importante capire il tempo necessario per la formazione della membrana dinamica autoformante con l'utilizzo di un materiale di supporto costituito da dacron con porosità di 30 micron. in questo caso, l'osservazione si basa sulla TMP (pressione di transmembrana) e sulla torbidità dell'effluente. Generalmente, la TMP risulta essere bassa quando la membrana inizia il suo ciclo operativo, mentre la torbidità presenta valori elevati. Questo è dovuto al fatto che inizialmente si ha solo la filtrazione per mezzo del materiale filtrante che costituisce la membrana (in questo caso, il Dacron), poi avviene la formazione del substrato causato dalla sedimentazione dei fiocchi di fango sul materiale di supporto. Sono stati registrati valori pressoché costanti della TMP di circa 3 kPa; Il primo giorno si ha un valore di 3,10 kPa per poi variare tra 2,50 e 4 KPa durante il resto del periodo di osservazione. Questi importanti risultati sono stati ottenuti grazie alla combinazione dei processi elettrochimici alle membrane dinamiche autoformanti incapsulate. Invece,

la torbidità subisce un forte decremento nel tempo grazie all'utilizzo dei processi elettrochimici, infatti si osserva una torbidità minore di 5 NTU già dal primo giorno per poi scendere sotto 1 NTU dopo qualche giorno di attività ed attestarsi intorno a 0,4 NTU durante tutto il periodo dell'attività sperimentale con valori minimi fino a 0,2 NTU.

Andamento dei solidi nella miscela areata

L'andamento del contenuto di solidi all'interno del reattore è importante per conoscere il funzionamento dell'impianto e le prestazioni ad esso connesse. I solidi analizzati sono stati i solidi sospesi totali (SST) e i solidi sospesi volatili (SSV). Si può notare che per i primi 13 giorni si ha un andamento abbastanza stabile degli SST che si aggira intorno a 10000-12000 mg/L per poi aumentare nella seconda parte del periodo fino a raggiungere valori vicini a 18000 mg/L. Questo andamento crescente è imputabile all'ossidazione dell'elettrodo di alluminio che rilascia ioni Al i quali si vanno ad aggregare con altre particelle per poi depositarsi. Questo fenomeno è confermato dall'osservazione dell'elettrodo di alluminio alla fine del periodo il quale si presenta del tutto degradato. l'andamento dei SSV inizialmente ha un lieve decremento da 7800 a 6250 mg/L per poi aumentare fino a 9000 mg/L, questo andamento è dovuto alla crescita dei batteri che sono più acclimatati nella seconda parte dell'osservazione. Infine si nota un rapporto SSV/SST che tende a diminuire dato dall'aggiunta degli ioni Al come SST che tende a far aumentare SST più velocemente rispetto a SSV.

Efficienza di rimozione dei contaminanti

L'osservazione relativa all'efficacia di trattamento sui contaminanti presenti nell'acqua reflua è stata fatta su COD, azoto ammoniacale (NH_4^+) e fosfati (PO_4^{3-}).

Le concentrazioni di COD nell'influente, proveniente da acqua reflua urbana, si è attestato inizialmente intorno ai 400 mg/L per poi scendere dal quindicesimo giorno in poi ed attestarsi intorno ai 130 mg/L, quindi si ha una concentrazione media all'influente di $234,13 \pm 128,98$ mg/L con valore

massimo di 416 mg/L e valore minimo di 109 mg/L. Questo abbassamento è dovuto alle condizioni climatiche che si sono susseguite in quei giorni; infatti la rete di raccolta urbana è di tipo mista e le piogge abbondanti di quel periodo hanno diluito il refluo. Si può notare che l'efficacia del trattamento, proveniente dai processi di elettro-ossidazione generati dall'applicazione dei processi elettrochimici, è elevata ¹¹; infatti si ha un abbattimento della concentrazione di COD del $98,03 \pm 1,10\%$ con una concentrazione media pari a $5,31 \pm 4,98$ mg/L, valore massimo di 17,40 mg/L e valore minimo di 2,44 mg/L.

Azoto ammoniacale e fosfati sono sostanze nutritive presenti nell'acqua che contribuiscono al normale proseguo dell'ecosistema, ma se presenti in grosse quantità, possono danneggiare l'ecosistema portando a fenomeni di eutrofizzazione, cioè l'eccessiva crescita delle alghe le quali vanno ad impoverire l'acqua di ossigeno portando alla morte della fauna ittica. L'azoto nei liquami può apparire in varie forme: ione nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-) ed ammonio (NH_4^+). I responsabili della scomposizione dell'azoto ammoniacale sono i processi di nitrificazione e denitrificazione. L'azoto ammoniacale NH_4^+ viene convertito in NO_3^- da batteri aerobici in presenza di ossigeno, invece viene convertito in NO_2^- in assenza di ossigeno. La reazione di riduzione che avviene vicino al catodo comporta un consumo di ossigeno e quindi si generano condizioni anossiche favorevoli al processo di denitrificazione ¹¹. Quindi l'intermittenza del campo elettrico provoca l'alternanza di condizioni aerobiche e anossiche che migliorano la rimozione di NH_4^+ in percentuale media di $99,45 \pm 1,97\%$. Le concentrazioni di NH_4^+ nell'influenza risultano essere in media $38,78 \pm 11,65$ mg/L con valore massimo pari a 59,10 mg/L e valore minimo 19,80 mg/L, mentre le concentrazioni nell'effluente sono pari in media a $0,47 \pm 0,75$ mg/L con un massimo di 2,25 mg/L e un minimo di 0,02 mg/L.

La rimozione dei fosfati PO_4^- è possibile grazie alle reazioni che coinvolgono l'elettrodo in alluminio. La prima reazione combina gli ioni alluminio rilasciati dall'elettrodo con lo ione idrossido rilasciato dalla riduzione del catodo ¹¹ La seconda reazione genera composti dei AlPO_4 che pos-

sono essere trattenuti dalla membrana ¹¹. Grazie a questi processi, la rimozione di PO_4^- è pari al $100\pm 0\%$; le concentrazioni di PO_4^- nell'influente risultano pari in media a $5,07\pm 0,66$ mg/L con un valore massimo di 6,13 mg/L e un valore minimo di 3,94 mg/L, mentre l'effluente ha una concentrazione di PO_4^- pari a 0 mg/L.

Andamento dei precursori del fouling

I precursori del fouling, ovvero EPS (sostanze polimeriche extracellulari) ed SMP (prodotti microbici solubili) sono molto importanti per il processo di formazione della membrana dinamica. La caratteristica predominante di queste sostanze, che vengono prodotte dai batteri, è la viscosità, che consente l'adesione al supporto costituito dalla membrana in dacron. Pertanto, in questo caso la loro azione risulta positiva, perché consentono la formazione dello strato dinamico, andando a ridurre il diametro dei pori del materiale di supporto, e permettendo quindi di aumentarne la capacità di filtrazione del sistema, processo del tutto differente dagli MBR tradizionali in cui, la formazione del fouling è uno svantaggio, in quanto le membrane sono caratterizzate da una porosità molto inferiore rispetto a quelle utilizzate come supporto alle membrane dinamiche. L'ostruzione dei pori, causata dal fouling, riduce la capacità filtrante della membrana e ne comporta frequenti pulizie, fino a giungere alla sostituzione della membrana stessa, quando il fouling irreversibile si presenta in quantità elevate. Mentre per quanto riguarda le membrane innovative i precursori del fouling fungono da supporto per la formazione iniziale dello strato di gel sulla membrana.

Si osserva come nei primi giorni si ha un decremento della concentrazione per EPSp e un mantenimento stabile per SMPp, questo fenomeno probabilmente è dovuto al processo di formazione della membrana che tende ad assorbire queste particelle per formare lo strato di torta. Il risultato che si ottiene è una concentrazione media di EPSp pari a $2,78\pm 1,22$ mg/g_{biomassa} con un massimo di 4,94 mg/g_{biomassa} e un minimo di 1,10 mg/g_{biomassa}, mentre la concentrazione di SMPp in media è di $1,66\pm 0,44$ mg/g_{biomassa} con un massimo di 2,46 mg/g_{biomassa} e un minimo di 1,09 mg/g_{biomassa}.

Si nota, come nel caso precedente, un decremento iniziale imputabile alla formazione della membrana dinamica. La concentrazione di EPS_c in media è di $0,81 \pm 0,39$ si nota, come nel caso precedente, un decremento iniziale imputabile alla formazione della membrana dinamica. La concentrazione di EPS_c in media è di $0,81 \pm 0,39$ mg/g_{biomassa} con un massimo di 1,40 mg/g_{biomassa} e un minimo di 0,11 mg/g_{biomassa}, mentre la concentrazione di SMP_c risulta essere pari in media a $1,25 \pm 1,83$ mg/g_{biomassa} con un massimo di 1,60 mg/g_{biomassa} e un minimo di 0,83 mg/g_{biomassa} con un massimo di 1,40 mg/g_{biomassa} e un minimo di 0,11 mg/g_{biomassa}, mentre la concentrazione di SMP_c risulta essere pari in media a $1,25 \pm 1,83$ mg/g_{biomassa} con un massimo di 1,60 mg/g_{biomassa} e un minimo di 0,83 mg/g_{biomassa}.

Parametri fisici

I parametri fisici che sono stati misurati in questa osservazione sono pH, ossigeno disciolto e temperatura. Questi parametri hanno un ruolo attivo nel funzionamento del processo. Un pH elevato può ostacolare l'attività dei batteri, un range adeguato è tra 5 e 9. Invece, temperature elevate accelerano il processo di digestione batterica. La presenza di ossigeno è importante allo scopo di avere delle buone condizioni aerobiche nel reattore per rallentare la formazione del fouling. Ovviamente questi valori hanno avuto una variabilità elevata dettata dal fatto che il refluo era di tipo reale e quindi sentiva anche della diluizione che eventuali acque meteoriche. Si può osservare che il pH medio del refluo influente è di 7,97, mentre la miscela areata e l'effluente presentano valori inferiori di 7.81 e 7.50 rispettivamente. La temperatura rimane la stessa per effluente e miscela areata, mentre la temperatura dell'influente risulta in media più alta, probabilmente ciò è dovuto dal fatto che il refluo è pescato dall'unità del dissabbiatore il quale è esposto ai raggi solari e quindi si riscalda maggiormente.

CONCLUSIONE

In questa osservazione di 30 giorni sono state valutate le prestazioni dell'impianto e-ESFDMBR in scala pilota. Questo tipo di impianto combina l'applicazione dei processi elettrochimici con i processi biologici tramite l'uso di un innovativa membrana dinamica autoformante "incapsulata", brevettata dal gruppo di ricerca del laboratorio SEED. L'applicazione di un campo elettrico ha innescato meccanismi elettrochimici all'interno del reattore come l'elettro-coagulazione, l'elettroforesi e l'elettro-osmosi che hanno permesso non solo una riduzione del processo di sporcamento della membrana, ma anche un aumento dell'efficienza di rimozione dei contaminanti a seguito all'ossidazione dell'anodo che rilascia ioni metallici in grado di generare idrossidi metallici nel reattore biologico reagendo con gli ortofosfati e garantendone la rimozione. Le percentuali di rimozione di COD, NH₄-N e PO₄-P ottenute si sono mostrate rispettivamente pari a 98,03±1,10%, 99,45±1,97% e 100%. La torbidità presentata dall'effluente è stata subito al di sotto delle 5 NTU, per poi raggiungere valori al di sotto dell'unità e mantenersi in media su valori di 0,66±0,60 NTU con valori minimi fino a 0,2 NTU. Anche le concentrazioni dei precursori del fouling si sono mostrate essere minori rispetto ai risultati ottenuti da studi precedenti, ciò influisce positivamente sulla mitigazione del fouling. Quindi si può dire che la combinazione di queste tecnologiche applicate all'interno dello stesso reattore si è dimostrata essere un'innovazione nel trattamento delle acque reflue. Inoltre l'utilizzo della membrana dinamica autoformante incapsulata ha permesso di ridurre il costo da fronteggiare rispetto a quella convenzionale e di rallentare la formazione del fouling, dall'altro lato l'applicazione del campo elettrico intermittente ha dato vita a processi elettrochimici che con l'alternanza di condizioni aerobiche e anossiche hanno favorito la rimozione dei contaminanti. Si può concludere dicendo che questa tecnologia è un'ottima innovazione da portare avanti nei prossimi studi per poterla applicare in scala reale Resta da analizzare approfonditamente la fattibilità tecnica ed economica che non è stata valutata in questa osservazione.¹²

References

- 1.Synthesis of super hydrophilic cellulose-alpha zirconium phosphate ion exchange membrane via surface coating for the removal of heavy metals from wastewater Y Ibrahim, E Abdulkarem, V Naddeo, F Banat, SW Hasan *Science of the Total Environment* **690**, 167-180.
- 2.Radjenović, J., Matošić, M., Mijatović, I., Petrović, M. & Barceló, D. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. in *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste* 37–101 (Springer Berlin Heidelberg, 2008). doi:10.1007/6985093.
- 3.Yang, W., Cicek, N. & Ilg, J. State-of-the-art of membrane bioreactors: Worldwide research and commercial applications in North America. *Journal of Membrane Science* **270**, 201–211 (2006).
- 4.Mohan, S. M. & Nagalakshmi, S. A review on aerobic self-forming dynamic membrane bioreactor: Formation performance, fouling and cleaning. *Journal of Water Process Engineering* **37**, 101541 (2020).
- 5.Salerno, C., Vergine, P., Berardi, G. & Pollice, A. Influence of air scouring on the performance of a Self Forming Dynamic Membrane BioReactor (SFD MBR) for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology* **223**, 301–306 (2017).
- 6.Tahreen, A., Jami, M. S. & Ali, F. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering* **37**, 101440 (2020).
- 7.Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *desalination* **404**, (2017).

- 8.Wei, V., Oleszkiewicz, J. A. & Elektorowicz, M. Nutrient removal in an electrically enhanced membrane bioreactor. *Water Science and Technology* **60**, 3159–3163 (2009).
- 9.Ibeid, S., Elektorowicz, M. & Oleszkiewicz, J. A. Novel electrokinetic approach reduces membrane fouling. *Water Research* **47**, 6358–6366 (2013).
- 10.Control of quorum sensing signals and emerging contaminants in electrochemical membrane bioreactors.. *Bioresource Technology* **269**, (2018).
- 11.Borea L., B. V., Naddeo V. Application of electrochemical processes to membrane bioreactors for improving nutrient removal and fouling control.. *Environ Sci Pollut Res* (2017) doi:10.1007/s11356-016-7786-7.
- 12.Prado, M. *et al.*. Removal of emerging contaminant and fouling control in membrane bioreactors by combined ozonation and sonolysis. *International Biodeterioration & Biodegradation* **119**, 577–586 (2017).
- 13.Borea, L. *et al.*. Wastewater treatment by membrane ultrafiltration enhanced with ultrasound: Effect of membrane flux and ultrasonic frequency. *Ultrasonics* **83**, 42–47 (2018).
- 14.Naddeo, V., Landi, M., Scannapieco, D. & Belgiorno, V. Sonochemical degradation of twenty-three emerging contaminants in urban wastewater. *Desalination and Water Treatment* **51**, 6601–6608 (2013).
- 15.Babu, D. S., Srivastava, V., Nidheesh, P. V. & Kumar, M. S. Detoxification of water and wastewater by advanced oxidation processes. *Science of The Total Environment* **696**, 133961 (2019).
- 16.ElNaker, N. A., Elektorowicz, M., Naddeo, V., Hasan, S. W. & Yousef, A. F. Assessment of Microbial Community Structure and Function in Serially Passaged Wastewater Electro-Bioreactor Sludge: An Approach to Enhance Sludge Settleability. *Scientific Reports* **8**, (2018).
- 17.Borea, L. *et al.*. Microbial fuel cell technology as a downstream process of a membrane biore-

actor for sludge reduction. *Chemical Engineering Journal* **326**, 222–230 (2017).

18.Naddeo, V., Belgiorno, V., Borea, L., Secondes, M. F. N. & Ballesteros, F. Control of fouling formation in membrane ultrafiltration by ultrasound irradiation. *Environmental Technology* **36**, 1299–1307 (2014).

19.Corpuz, M. V. A. *et al.*. Wastewater treatment and fouling control in an electro algae-activated sludge membrane bioreactor. *Science of The Total Environment* **786**, 147475 (2021).

20.Pollice, A. & Vergine, P. Self-forming dynamic membrane bioreactors (SFD MBR) for wastewater treatment: Principles and applications. in *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* 235–258 (Elsevier, 2020). doi:10.1016/b978-0-12-819854-4.00010-1.

21.Ali, A. A. A., Naddeo, V., Hasan, S. W. & Yousef, A. F. Correlation between bacterial community structure and performance efficiency of a full-scale wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering* **37**, 101472 (2020).

Figure Captions

Figure 1. Impianto di trattamento delle acque reflue (unsplash)

Figure 2. MBR fouling (Eflo.com)

Figure 3. Processi elettro-chimici (Frontiersin.org)

Figure 4. Setup sperimentale e-ESFDMBR

Figures



Figure 1: Impianto di trattamento delle acque reflue (unsplash)



Figure 2: MBR fouling (Eflo.com)

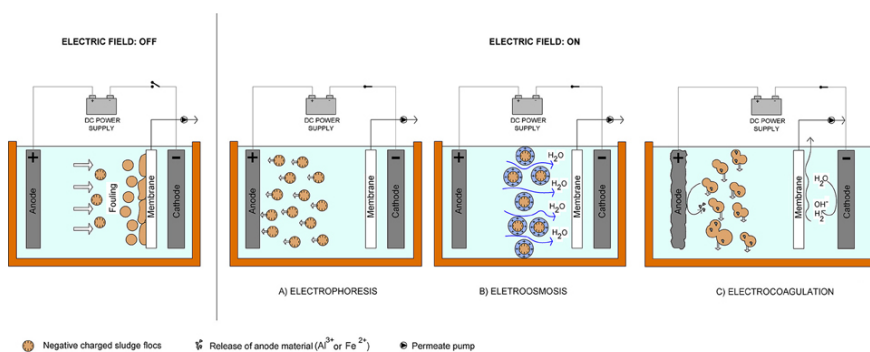


Figure 3: Processi elettro-chimici (Frontiersin.org)



Figure 4: Setup sperimentale e-ESFDMBR