

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Le tecnologie separative mediante membrana

**M. Pizzichini, C. Russo, E. Ferrero
E. Tuccimei**



Report RSE/2009/19



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Le tecnologie separative mediante membrana

*M. Pizzichini, C. Russo, E. Ferrero
E. Tuccimei*

LE TECNOLOGIE SEPARATIVE MEDIANTE MEMBRANA

M. Pizzichini, C. Russo, E. Ferrero (ENEA)

E. Tuccimei (Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura – CITERA – dell'Università di Roma La Sapienza)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

Brevi note sugli autori sono riportate a fine rapporto

INDICE

1 – Introduzione.....	pag. 4
2 – Il mercato delle membrane.....	6
2.1 – Il mercato italiano.....	9
3 – Descrizione della tecnologia	12
3.1 – Intasamento della membrana (fouling).....	17
4 – Le applicazioni ed il “case study” Enea.....	19
4.1 – Siero di latte/scotta.....	25
4.2 – Acque di vegetazione olearie.....	28
4.3 – Decotto di foglie di ulivo da potatura.....	31
4.4 – Reflui di cartiera.....	33
4.5 – Disinchiostrazione.....	35
5 – Costi d’impianto e della tecnologia delle membrane.....	36
6 – I consumi energetici.....	39
6.1 – Ricerca e sviluppo finalizzato all’efficienza energetica.....	44
7 – Potenzialità e barriere alla diffusione.....	46
Note sugli autori.....	49
Bibliografia.....	50
Allegato 1: Tabella delle applicazioni in campo industriale della tecnologia a membrane.....	52

1 – INTRODUZIONE

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato un Accordo di Programma per l'esecuzione di attività di Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale.

In particolare la scheda 5.4.3.1 ha per tema di ricerca la *“Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali”*.

Nell'ambito del primo Piano Operativo Annuale, è prevista una fase iniziale di attività di ricognizione delle tecnologie elettriche utilizzate nelle utenze industriali e delle tecnologie termiche potenzialmente sostituibili con tecnologie elettriche innovative.

L'attività di ricognizione, eseguita ad ampio spettro sulle tecnologie elettriche innovative lato uso finale, prevede l'analisi delle tecnologie riconducibili ai seguenti tre grandi raggruppamenti:

- tecnologie già ampiamente note ed applicate per le quali interessa diffondere le soluzioni innovative nei medesimi settori/comparti produttivi, ma la cui diffusione su larga scala richiede incisive modifiche di approccio sia tecnico, sia amministrativo/gestionale, sia a livello di governance aziendale;
- tecnologie già sufficientemente note, ma diffuse solo in nicchie di mercato e presso specifiche utenze, per le quali si vuole promuovere la diffusione nello stesso settore di utenze o si vuole promuovere l'applicazione in altri settori di utilizzo che risultino idonei e potenzialmente interessati;
- tecnologie che consentano risultati non altrimenti ottenibili.

Le tecnologie di concentrazione e/o separazione mediante l'utilizzo di membrane rientrano nelle tecnologie oggetto della ricognizione; esse si possono generalmente ricondurre alla seconda famiglia, nel caso di applicazioni in sostituzione di tecnologie tradizionali, in genere di tipo termico, oppure alla terza, nel caso in cui la tecnologia a membrana rappresenti una soluzione innovativa in grado di ottenere prodotti o di valorizzare scarti che le tecnologie tradizionali non riescono ad ottenere, per limiti fisico-chimici, tecnologici o di eccessivo impatto economico e/o ambientale.

I processi più diffusi sono quelli che utilizzano la pressione idraulica e le tecnologie di membrana e prendono il nome di Microfiltrazione (MF), Ultrafiltrazione (UF), Nanofiltrazione (NF) ed Osmosi Inversa (OI). Queste tecnologie si differenziano fra loro dalle specifiche della membrana impiegata e dalle condizioni di processo, come la pressione idraulica.

Pur non essendo considerabili come tecnologie innovative in senso stretto, in quanto sono esistenti già da tempo e la loro applicazione è già diffusa in alcuni Paesi (in particolare nel Nord America), la loro introduzione a livello industriale su larga scala in Italia, potrebbe contribuire ad un significativo passo in avanti verso un miglior utilizzo dell'energia, più di livello scientifico che come potenziale di risparmio complessivo.

L'efficienza della tecnologia può essere diretta, ove si ha una effettiva ed immediata riduzione dei consumi energetici (termici ed elettrici) nel confronto con le tecnologie tradizionali, o indiretta, ove hanno valenza caratteristiche di unicità ai fini produttivi o per qualità ambientali.

Inoltre, pur non essendo "elettrotecnologie" in senso stretto, necessitano principalmente di energia elettrica per il funzionamento degli ausiliari d'impianto (principalmente pompe, etc.), e, in specifici casi, eventualmente solo in piccola parte di energia termica/frigorifera.

Possono quindi lecitamente rientrare tra le tecnologie che consumano elettricità proponibili quale valida alternativa alle tecnologie termiche tradizionali (come, ed esempio, l'evaporazione termica che impiega combustibili fossili).

L'obiettivo del presente documento è fornire, oltre ad un'analisi degli aspetti tecnologici e gestionali della separazione mediante membrane ed ai riferimenti normativi essenziali, utili indicazioni su come rimuovere le barriere che la tecnologia sta incontrando nella diffusione sul territorio nazionale.

Verranno trattate principalmente le tecnologie a membrana utilizzate in alcuni settori produttivi (cartario), del comparto agro-alimentare (caseario, oleario, etc.), delle acque (dissalazione, etc.) e del trattamento dei reflui industriali più in generale, con l'acquisizione di quanto già esiste nel mercato e l'individuazione dei settori/comparti/processi a maggiore potenziale di penetrazione.

Particolare rilevanza viene data infine all'attività che l'ENEA sta svolgendo, che ha dato origine a recenti brevetti nazionali ed internazionali, alcuni dei quali richiedono ancora una dimostrazione su scala impiantistica reale.

2 – IL MERCATO DELLE MEMBRANE

Il trend del mercato delle membrane è riportato nel grafico di figura 1, relativamente a quello mondiale ed a quello USA. Si tratta del mercato complessivo dei processi a membrana che comprende le tecnologie pressure driven e quello relativo alle separazioni dei gas, che però hanno un mercato inferiore (quello delle gas separation).

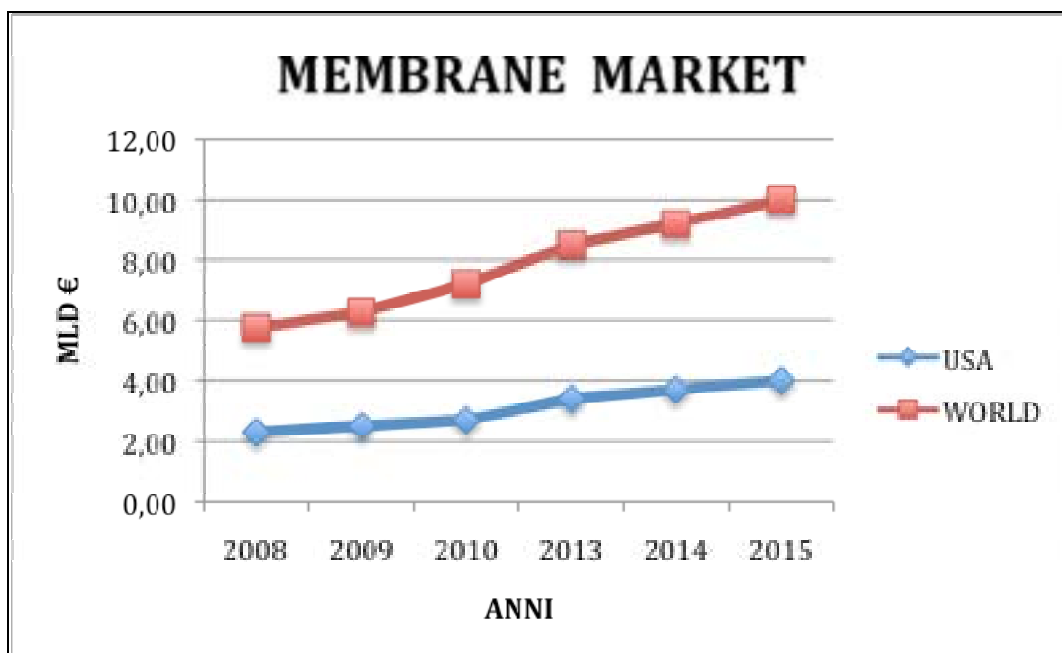


Figura 1. Trend di mercato mondiale e Usa

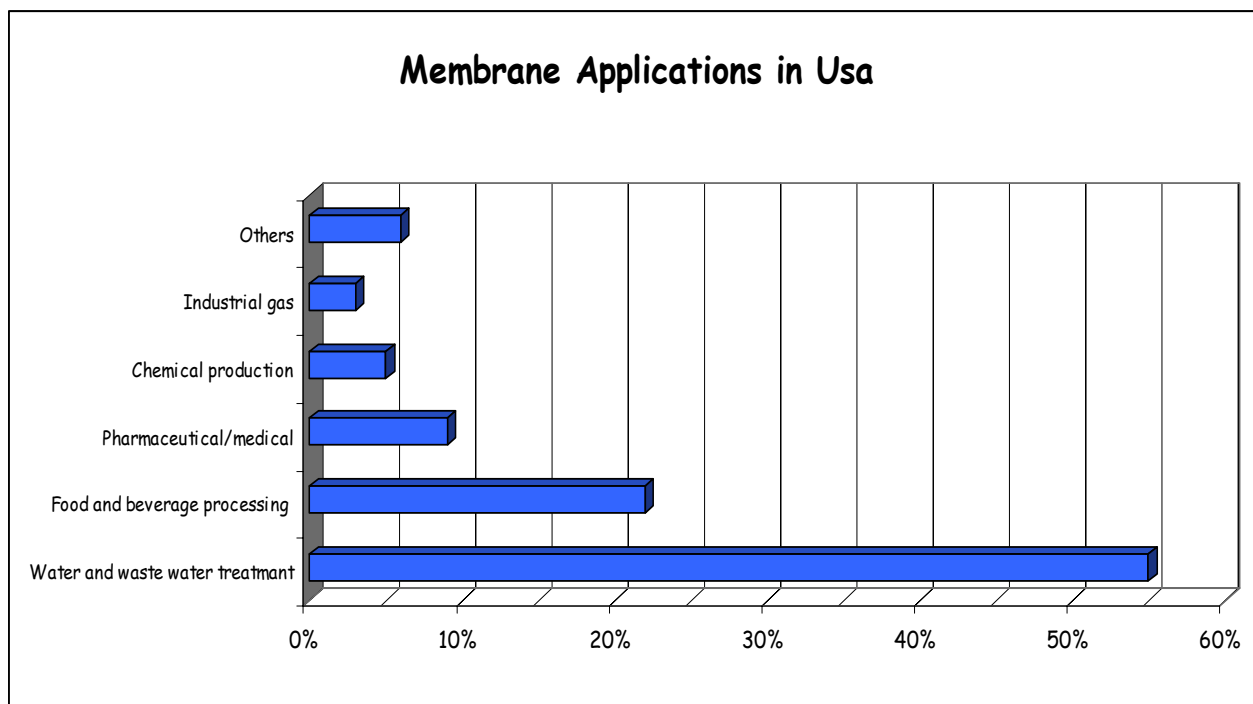


Figura 2. Principali applicazioni delle membrane in campo industriale in Usa

Soltanto quello dell'osmosi inversa è valutato in circa 2 miliardi di \$. Si consideri che il mercato degli impianti a membrana, cioè delle apparecchiature operative che impiegano le membrane, ha un fatturato mondiale di almeno 60-80 volte quello relativo al costo delle membrane stesse.

Poche altre tecnologie hanno avuto uno sviluppo così rapido di mercato, che si attesta intorno ad una crescita di fatturato annuo dell'ordine del 7,8%, per la sola vendita delle membrane.

Le tecnologie di membrana rientrano tra quelle tecnologie BAT (Best Available Technologies)¹ citate nella direttiva IPPC (Integrated Pollution Prevention and Control), direttiva 96/61/CE emanata dalla Comunità Europea, attraverso il lavoro dell' European IPPC Bureau, nel 1996 e successivamente abrogata nel 2008 dalla 2008/1/CE, il cui recepimento in Italia è avvenuto con l'emanazione del D. Lgs. n. 372 del 4 agosto 1999. In particolar modo su tali bref² riguardanti l'IPPC, le tecnologie a membrana vengono non solo trattate, ma anche descritte in alcune loro specifiche applicazioni e pertanto considerate come BAT o potenziali BAT per quegli impieghi inerenti ai settori a cui i bref si riferiscono³.

¹ Le BAT sono quelle tecnologie ritenute di alto livello, in termini di costi e vantaggi, per la protezione dell'ambiente dall'inquinamento, riducendo i consumi energetici e migliorando la produttività e/o la qualità della produzione. Il loro impiego è fondamentale per il rilascio delle autorizzazioni al funzionamento degli impianti industriali elencati nella direttiva sopra citata. (http://www.fire-italia.it/caricapagine.asp?target=normativa/IPPC_BAT/IPPC_BAT.asp)

² BREF (Best Reference) sono i documenti di riferimento alle BAT. (<http://www.epa.ie/downloads/advice/brefs/>)

³ Per citarne alcuni: 'Reference document on Best Available Techniques in Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector' (February 2003), 'Reference document on Best Available Techniques for Waste Treatments Industries' (August 2006), 'Reference document on Best Available Techniques for

Questo notevole sviluppo applicativo, a livello mondiale Italia esclusa, testimoniato dalla deposizione di migliaia di brevetti internazionali e da milioni di installazioni industriali in tutto il mondo, è stato accompagnato da un adeguato supporto tecnico scientifico svolto dalle università o dagli istituti di ricerca pubblici e privati⁴, per far conoscere i principi fondamentali che regolano i processi a membrana e le loro applicazioni principali. Almeno una decina di riviste scientifiche internazionali si occupano delle ricerche della scienza e alle tecnologie di membrana. Fra tutte si cita *Journal of Membrane Science* [1], *Journal of Separations Science*, etc.

Le membrane filtranti di ogni forma e composizione vengono commercializzate come impianti completi a membrana, ed anche come singola unità filtrante, generalmente indicato come modulo. Mentre un impianto completo a membrana ha un tempo di vita medio dell'ordine delle decine di anni, i moduli a membrana hanno tempi di funzionamento dell'ordine degli anni, quindi devono essere sostituiti nel tempo non solo per la loro perdita di efficienza ma anche perché vengono continuamente sviluppate nuove membrane più performanti ed anche più resistenti agli agenti chimici.

A livello internazionale si assiste ad una forte competizione fra le maggiori industrie produttrici per mettere sul mercato membrane nuove e sempre più performanti. Nella tabella 1 si riportano le principali aziende mondiali produttrici di membrane con marchio proprio.

the Textiles Industry' (July 2003), 'Reference Document on Best Available Techniques in the Slaughterhouses and Animal By-products Industries' (May 2005).

⁴ Come indicato nel paragrafo 2.1 e nel capitolo 7, la situazione italiana, anche per questo specifico aspetto, risulta essere tuttavia ben differente.

Costruttore Marchio	Polimeriche	Ceramiche	Paese
DeSAL	X		USA
Osmonics	X		USA
Ionics Incorporated	X		USA
Matrix Membranes	X		USA
G.M. Zenon	X		USA
Millipore Corporate	X		USA
Koch (KMS) (X		USA
Toray Industrie	X		Giappone
Nitto Denco CORP.	X		Giappone
Torai	X		Giappone
Tojobo	X		Giappone
Athec		X	Germania
Mitsubishi Rayon Eng.	X		Giappone
Microdyn-Nadir	X		Germania
Haase Energietechnik AG	X		Germania
BEL Composit LTD	X		Germania
Tami		X	Francia
Pall	X		U.K.
Kurion	X	X	U.K.
PCI	X		UK

Tabella 1. Elenco produttori mondiali di membrane (dal sito <http://www.membrane-guide/english/index.htm>)

2.1 – IL MERCATO ITALIANO

Nel nostro paese solo in alcune università vengono tenuti corsi piuttosto generici sulla scienza delle membrane e sui i principi fondamentali che governano i processi separativi a membrana.

Purtroppo la piccola e media industria risente di queste carenze formative e viene informata molto spesso sulla tecnologia di membrana unicamente dagli operatori commerciali, che ovviamente hanno altri interessi rispetto all'istruzione.

A fronte di un ampio spettro applicativo e di elevato fatturato mondiale della tecnologia, mancano in Italia scuole di specializzazione o corsi universitari dedicati alla formazione di operatori del settore.

L'Enea si occupa di tecnologie di membrana da oltre 30 anni, ed ha sviluppato processi e brevetti specifici in questo campo, in particolare nelle applicazioni finalizzate al trattamento acque ed al

recupero della risorsa idrica. Il CNR ha istituito un centro specializzato di ricerche proprio nelle Tecnologie di Membrana, con sede all'Università di Cosenza.

L'Italia non produce membrane ma dispone di una significativa rappresentanza industriale, di società che producono impianti pilota e industriali. Sono ormai migliaia le aziende che impiegano queste tecnologie e sono almeno una trentina le industrie che commercializzano sistemi a membrana nei diversi campi applicativi.

Molte società che producono impianti a membrana sono facilmente reperibili sui più importanti motori di ricerca e dimostrano il crescente interesse applicativo di queste tecnologie, che ancora trovano difficoltà ad affermarsi, perché ancora poco conosciute e studiate.

Oggi anche nel nostro paese le tecnologie di membrana sono considerate con maggiore attenzione e mediamente valutate "tecniche pulite" di purificazione e concentrazione, con indubbi vantaggi economici in termini di consumi energetici, di semplificazione impiantistica (modularità della tecnologia) e di basso impatto ambientale (recupero di sostanze disperse, riduzione del carico inquinante).

Non disponiamo di dati affidabili sul mercato delle membrane in Italia, ma si dovrebbe più correttamente parlare del mercato di importazione, visto che tali prodotti non vengono prodotti nel nostro paese, ma acquistati all'estero.

Bioreattori a membrana per il trattamento di acque reflue sono particolarmente in uso su tutto il territorio nazionale, come pure impianti di potabilizzazione dell'acqua di mare, seppure di piccola taglia.

Per tutte le applicazioni delle tecnologie di membrana vengono ampiamente descritte le generalità del processo, le configurazioni impiantistiche, gli aspetti progettuali e gestionali (idraulici e biologici), le strategie di controllo del fouling che coinvolge il concetto di criticità e sostenibilità del flusso di permeato, cioè della produttività delle membrane.

Questi aspetti sono comunque comuni a tutte le applicazioni delle tecnologie di membrana e sono tanto più critici quanto più è complessa la composizione chimica delle matrici da trattare.

Determinante è il contributo che le tecnologie di membrana possono apportare nella gestione ottimale della risorsa idrica, attraverso i processi di depurazione delle acque di falda e di superficie ed anche al riutilizzo dei reflui trattati in agricoltura, con riferimento alla situazione normativa nazionale e internazionale ed al confronto con tecnologie tradizionali.

Esistono risultati a confronto ottenuti con impiego di diverse tecnologie a membrana (MF, UF, NF, OI) per il trattamento di acque reflue provenienti direttamente dai processi produttivi tessili o preventivamente trattate per mezzo di processi biologici a fanghi attivi⁵.

Valutazioni economiche sulla fattibilità dei processi in diversi contesti ambientali (rapporto costo/qualità dell'acqua prodotta) sono state effettuate ad esempio per l'utilizzo del processo di NF allo scopo di potabilizzare acque con basso carico inquinante (rimozione NO₃, fosfato, arsenico, pesticidi, etc.) o come pretrattamento di addolcimento delle acque industriali per la rimozione dei sali di calcio.

L'Enea ha sviluppato processi specifici nel trattamento degli effluenti dell'industria casearia, in particolare del siero di latte [2] [3], nonché brevetti per il trattamento delle acque reflue dell'industria olearia, le così dette acque di vegetazione, e per le industrie cartarie, dove il consumo idrico è molto importante e dove il recupero dell'acqua di processo ancora non è entrato nella pratica industriale.

Nell'industria alimentare le tecnologie di membrana consentono una serie di operazioni finalizzate alla sterilizzazione a freddo di alcune matrici come il latte, alla chiarifica di prodotti dell'industria enologica, come il mosto, il vino, l'aceto, oppure la concentrazione di puree di frutta o di altri prodotti orticoli come il pomodoro⁶.

Per la concentrazione di queste materie prime, le tecnologie di membrana sono particolarmente efficaci poiché evitano l'uso del calore, quindi consentono di qualificare i prodotti finiti, non danneggiati termicamente, e nello stesso tempo assicurano un forte risparmio di energia nei confronti dell'evaporazione.

Le tecnologie di membrane si sono affermate sul mercato perché sempre più competitive nei confronti delle tecniche convenzionali di separazione, di concentrazione, in termini di maggiore efficienza separativa, di modularità impiantistica, di ridotti consumi energetici e di sostenibilità ambientale. Il mercato mondiale in forte crescita da oltre 20 anni lascia prevedere anche nel nostro Paese una notevole espansione in ragione dei sempre più preoccupanti problemi ambientali e soprattutto per affrontare l'urgenza della gestione ottimale della risorsa idrica.

⁵ Brevetto ENEA n.RM98A000272 depositato dal titolo: "*Sistema di determinazione in linea del cromo solfato bibasico nel bottale di concia delle pelli*" (industria della concia e del cuoio).

Brevetto n. RM2005A000598 depositato nel 2005 dal titolo: *Depuratore-potabilizzatore per la rimozione dei contaminanti chimici dall'acqua e sua rimineralizzazione.*

⁶ Brevetto n. RM2007A000109 depositato nel 2007 dal titolo: *Procedimento per la produzione di estratti nutraceutici raffinati dai residui del carciofo e da altre piante del genere Cynara* a nome Massimo Pizzichini e Annalisa Romani (Univ. di Firenze) esteso a livello mondiale.

3 – DESCRIZIONE DELLA TECNOLOGIA

Le tecnologie separative mediante membrana (TSM), dette anche tecnologie di filtrazione tangenziale, si basano sull'impiego di filtri semipermeabili o ione-selettivi per mezzo dei quali è possibile ottenere la separazione dei soluti organici ed inorganici a livello molecolare e ionico e dei solventi in cui sono disciolti.

Al contrario della filtrazione tradizionale perpendicolare, le tecnologie di membrana operano in modo tangenziale facilitando la rimozione dei soluti dalla superficie di membrana.

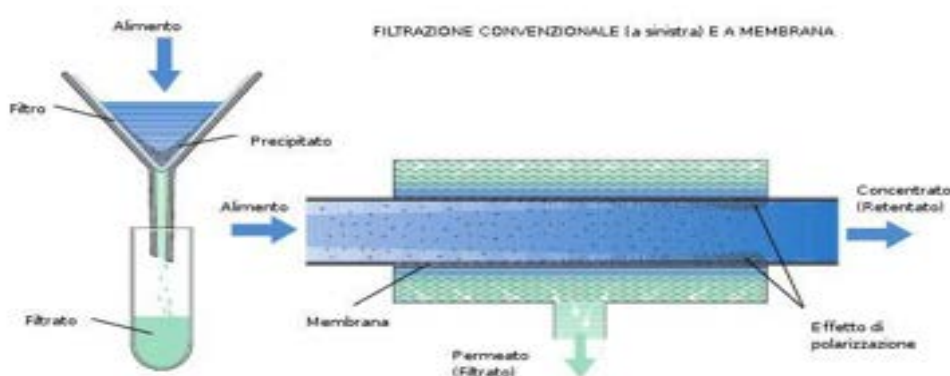


Figura 3. Sistema di filtrazione perpendicolare e tangenziale

Le separazioni avvengono per un processo fisico, di filtrazione selettiva attraverso un filtro speciale (membrana) in cui la "driving force" è rappresentata dalla pressione idraulica, o da un gradiente di concentrazione fra i due lati della membrana, oppure da una differenza di temperatura; pertanto non richiedono sostanze chimiche per operare le separazioni richieste.

Le tecnologie, differenziate fra loro dalle specifiche della membrana impiegata e dalle condizioni di processo (come la pressione idraulica), maggiormente diffuse prendono il nome di Microfiltrazione (MF), Ultrafiltrazione (UF), Nanofiltrazione (NF) ed Osmosi Inversa (OI) [2].

La MF trattiene soluti in sospensione, grassi o batteri con dimensioni corpuscolari dell'ordine del μm (10^{-6} m). L'UF trattiene macromolecole come le proteine ed i colloidi fino ad una dimensione molecolare dell'ordine di circa 1 kdalton (10^3 D⁷). La NF trattiene molecole organiche e inorganiche con peso molecolare superiore a 200 D, mentre, come è noto l'OI, trattiene le molecole

⁷ Il dalton è l'unità di misura del peso molecolare ed è pari a 1/12 della massa del C₁₂. Nel SI si ha: 1 g = 6,02213665168 10²⁰ D.

degli elettroliti, in particolare del sodio cloruro e lascia passare solo la molecola dell'acqua di peso molecolare 18 D.

In un processo separativo classico la filtrazione consente di recuperare l'effluente permeato e quello concentrato e non viene impiegato calore, quindi la filtrazione può avvenire anche a basse temperature in modo da non danneggiare molecole termolabili.

Le TSM utilizzano soltanto energia elettrica per il funzionamento di una pompa che deve garantire un flusso idraulico adeguato per consentire la filtrazione. Ogni singola tecnica separativa richiede condizioni idrodinamiche definite, per altro dipendenti dalle caratteristiche ingegneristiche del modulo di membrana.

Le condizioni fluido-dinamiche sono alla base del buon funzionamento e della ottimizzazione del processo separativo.

In MF ed UF il trasporto attraverso la membrana è principalmente regolata da fenomeni convettivi, mentre in NF e soprattutto in OI il trasporto è per lo più di tipo diffusivo. Le molecole filtrate si solubilizzano nella matrice della membrana (polimero) e diffondono sull'altro lato della membrana. Un esempio tipico è la diffusione della molecola dell'acqua, rispetto ai sali minerali, nelle membrane polimeriche di poliammide impiegate nell'OI.

Nella figura 4 è riportato uno schema di capacità selettiva delle diverse tecnologie di membrana.

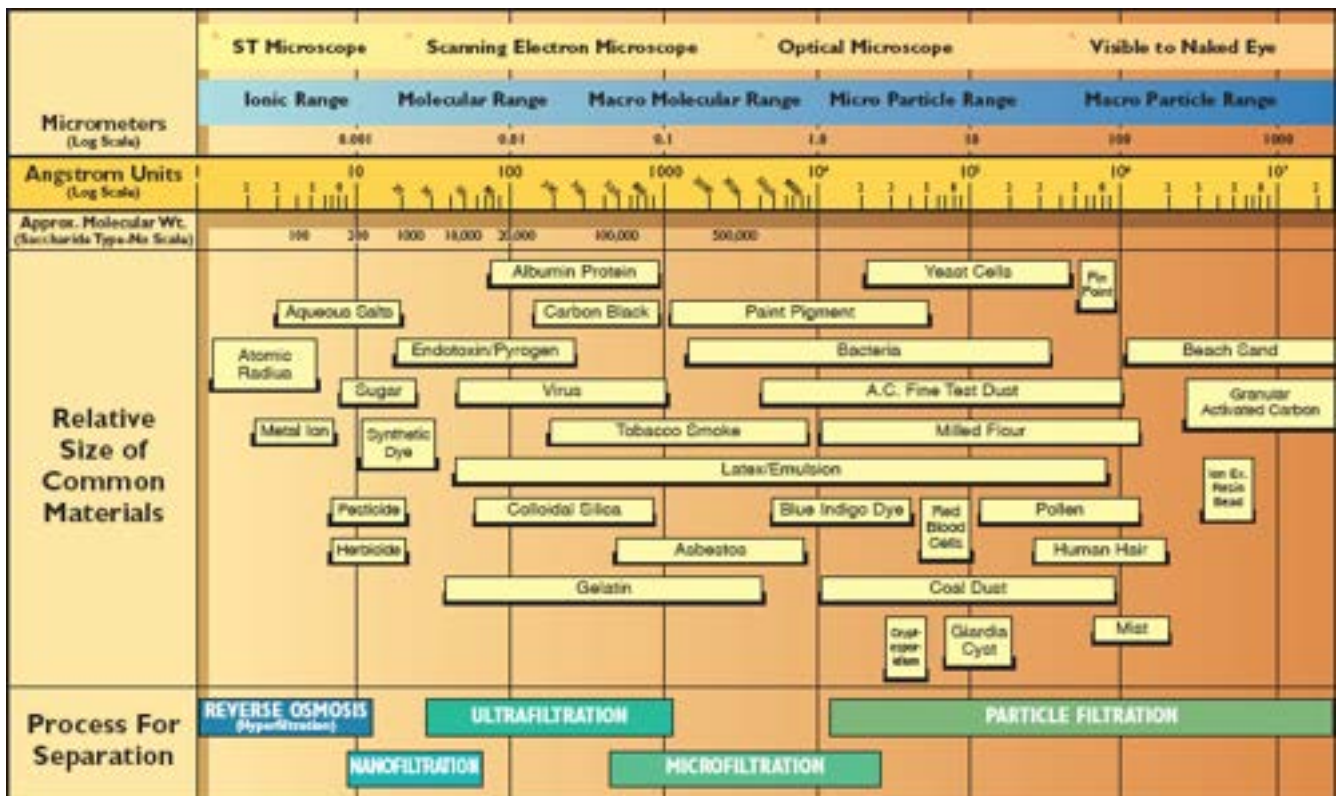


Figura 4. Capacità selettiva delle tecnologie di membrana

In figura 4 sono riportate come unità di misura delle dimensioni caratteristiche del cut off di membrane (dimensione dei pori) sia il micron, che indica la lunghezza, sia l'angstrom (Å, sottomultiplo del micron) che il dalton, che invece rappresenta un peso molecolare: non c'è una corrispondenza diretta tra le due misure, ma sono utilizzate entrambe per indicare e classificare la tipologia di sostanze filtrate mediante le membrane.

In figura 5 è schematizzato il meccanismo di trasporto attraverso la membrana.

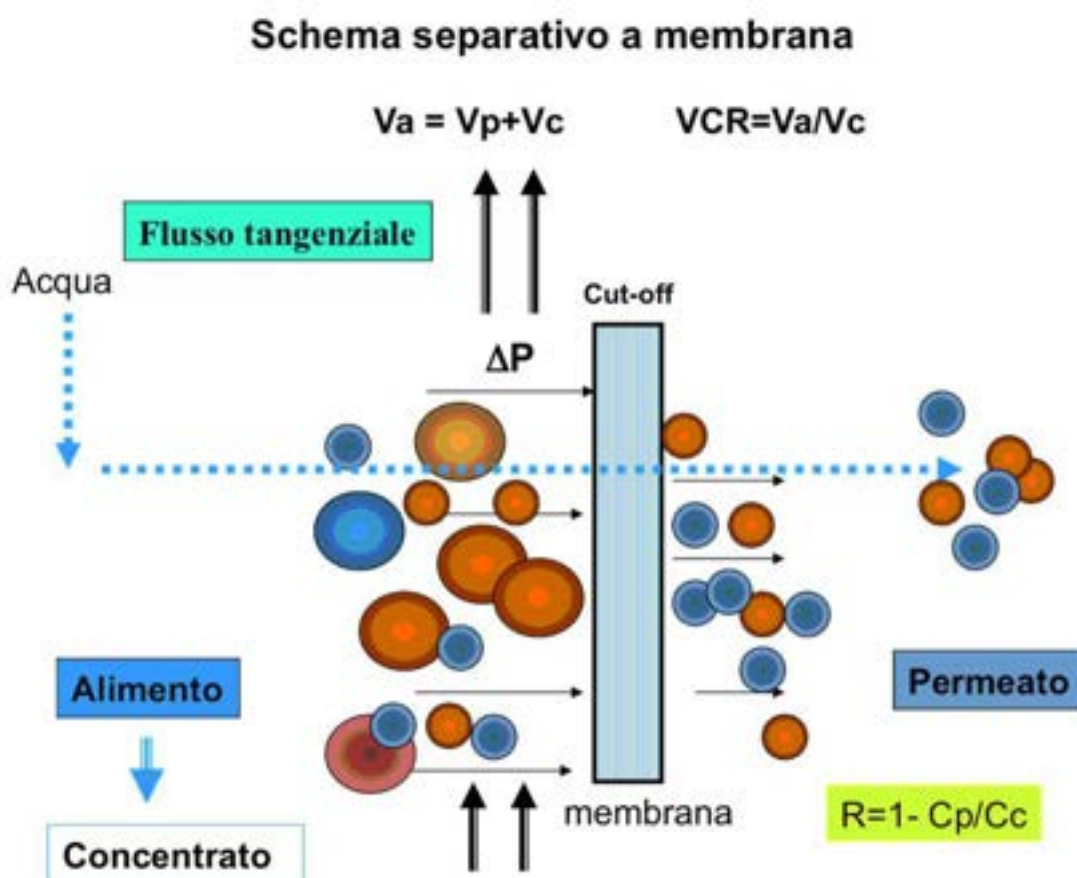


Figura 5. Schema idraulico che rappresenta la fluidodinamica di filtrazione di un soluto con diversa composizione di alimento (dimensione sferica delle molecole) in condizioni di flusso tangenziale.

Nella parte sinistra si indica il flusso dell'alimento che scorre tangenzialmente al filtro. Per semplicità si schematizza il passaggio delle molecole più piccole che avviene attraverso un gradiente pressorio. Mentre il permeato si raccoglie alla destra dello schema, il concentrato si separa nella parte sinistra in alto. La reiezione della membrana indica la sua capacità di discriminazione fra le molecole di diverso peso molecolare (grandezza delle sfere). Tale valore si esprime con

l'espressione riportata a destra in basso della figura 5, in cui C_p indica la concentrazione dei soluti nella corrente di permeato, e C_c quella degli stessi soluti nel concentrato.

Le membrane principalmente impiegate a livello industriale possono essere polimeriche o ceramiche. Le membrane ceramiche hanno in genere una geometria tubolare, così come quelle polimeriche ($\Phi_t > 2$ mm) che però possono anche essere a spirale avvolta.

Nelle figure che seguono, dalla 6 alla 10, sono riportate alcune immagini semplificate della conformazione di membrane tubolari ceramiche e polimeriche a spirale avvolta impiegate nei laboratori Enea-Casaccia.

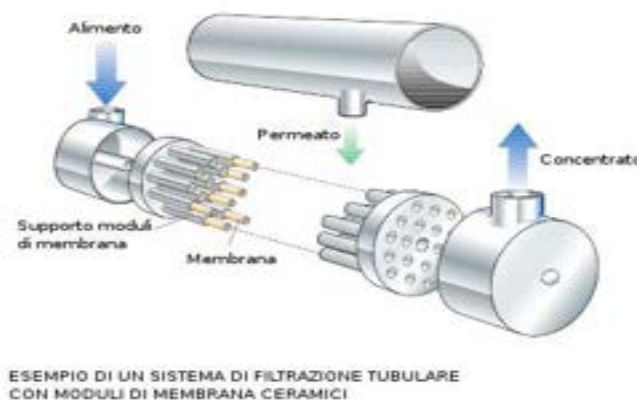


Figura 6. Conformazione di membrane tubolari ceramiche



Figura 7. Membrane tubolari ceramiche: moduli, membrana e strato selettivo



Figura 8. Sezione trasversale di membrane tubulari ceramiche

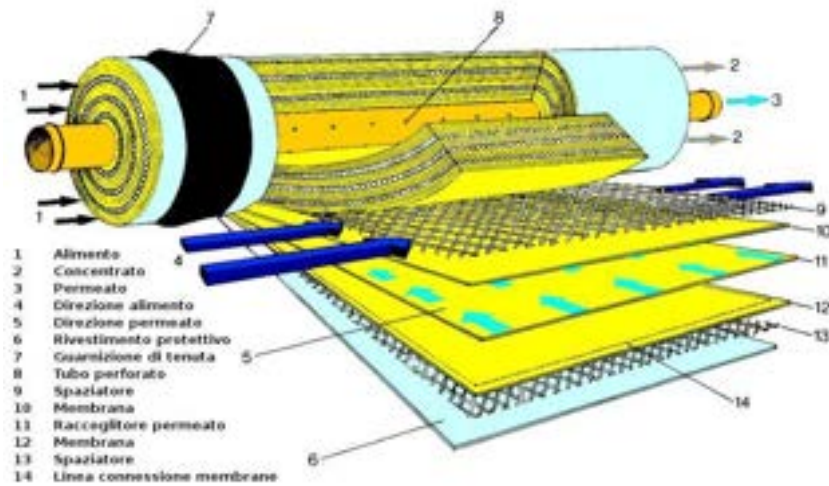


Figura 9. Conformazione di membrane polimeriche a spirale avvolta



Figura 10. Membrane polimeriche a spirale avvolta

Alcune caratteristiche preminenti delle singole tecniche separative sono riportate nella tabella 2.

	Microfiltrazione (MF)	Ultrafiltrazione (UF)	Nanofiltrazione (NF)	Osmosi Inversa (OI)
pressione di lavoro (bar)	idrostatica 1- 4	idrostatica 1- 10	idrostatica 20- 40	idrostatica 15- 60
meccanismo	filtrazione fisica	filtrazione, assorbimento	solubilità/diffusione	solubilità/diffusione
cut off	0.1-20 μm	1 - 100 kD	100 – 250 D	10 – 100 D 1 – 10 Å
tipo di membrana	polimerica o ceramica (simmetrica) (spessa 10-150 μm)	polimerica o ceramica (asimmetrica) (strato di separazione: 0.1-1 μm)	polimerica (asimmetrica) o composita (strato di separazione: 0.1-1 μm)	polimerica (asimmetrica) o composita (strato di separazione: 0.1-1 μm)
configurazione della membrana	spirale avvolta, fibre cave, tubolare, ceramica, inorganica	spirale avvolta, fibre cave, tubolari	spirale avvolta,tubolare	spirale avvolta,tubolare

Tabella 2. Schema riassuntivo caratteristiche tecniche delle diverse tecnologie a membrana

3.1 – INTASAMENTO DELLA MEMBRANA (FOULING)

Per intasamento della membrana s'intende la sua perdita di produttività, come risultato pratico di numerosi fattori, principalmente l'intasamento fisico dei pori e la concentrazione di polarizzazione. L'intasamento dei pori, con conseguente perdita di produttività di membrana, ha ricadute immediate e pesanti sui costi di trattamento e quindi sulla competitività della tecnica rispetto ad altri processi separativi (centrifugazione, evaporazione, sedimentazione, scambio ionico, etc.).

L'intasamento fisico della membrana è dovuto generalmente a deposito e accumulo di piccole particelle sulla superficie della membrana e/o alla cristallizzazione e precipitazione di parti di soluto sulla superficie della membrana e dentro i pori della membrana stessa.

Per ristabilire il flusso iniziale, le membrane si devono rigenerare con procedure di lavaggio che possono impiegare detergenti appositi e/o soluzioni acide o basiche.

Il fenomeno di intasamento dei pori della membrana, dipende principalmente dalla concentrazione di polarizzazione e dallo sporco fisico della membrana.

La concentrazione di polarizzazione è un fenomeno che deriva da una aumento della concentrazione di soluti nello strato prossimo alla superficie di membrana: ciò fa sì che il fluido retrodiffonda nella

massa (bulk) della soluzione, diminuendo il flusso di permeato e aumentando la resistenza dello strato limite. Ciò avviene nell'OI e parzialmente nella NF.

Il fenomeno è particolarmente evidente quando, operando con matrici gelificanti, sulla membrana attiva si forma una seconda membrana costituita da sostanze gelificate.

Il fenomeno di polarizzazione per concentrazione può essere minimizzato, ad esempio diminuendo la pressione di trasmembrana o aumentando la velocità di scorrimento del fluido e la turbolenza.

Va comunque detto che non sempre (soprattutto nel caso delle membrane polimeriche) il lavaggio delle membrane consente il ripristino dei valori di flusso originale.

Il lavaggio delle membrane costituisce un passaggio importante anche per il mantenimento della selettività del processo di filtrazione tangenziale. La scelta delle procedure di lavaggio dipende dalla configurazione dei moduli, dalla resistenza chimica e fisica della membrana e dalla natura del fouling [5].

4 – LE APPLICAZIONI E IL “CASE STUDY” ENEA

I processi separativi a membrana trovano un vasto campo applicativo a livello industriale, che vanno dal settore biomedico a quello alimentare, al trattamento dei reflui industriali ed alla generazione di acqua potabile a partire da quella di mare.

I sistemi separativi a membrana costituiscono un metodo molto efficace per il recupero e riutilizzo dell'acqua e di altre sostanze chimiche di interesse commerciale, come per altro dimostrano le applicazioni specifiche sviluppate dall'Enea.

Ogni riduzione nel volume degli effluenti industriali di ogni genere ed anche del loro carico inquinante (COD, Chemical Oxygen Demand⁸), particolarmente quando ciò viene associato al recupero e riuso dell'acqua o di altre sostanze, riduce sensibilmente l'impatto ambientale del processo considerato. Ormai è generalmente riconosciuto che le aziende che si fanno carico di minimizzare l'impatto ambientale, hanno un ritorno di mercato ed anche di immagine.

I sistemi a membrana sono particolarmente efficaci e dedicati proprio alla riduzione del carico inquinante, anche attraverso il recupero e la valorizzazione dei sottoprodotti e soprattutto al recupero e riutilizzo dell'acqua, come dimostrano le principali applicazioni della tecnologia a livello mondiale e americano (fig. 2).

Nella tabella 3 si riportano i maggiori vantaggi e svantaggi delle TSM.

Vantaggi	Svantaggi
Applicabili su largo range di processi	Essenziale la scelta del tipo di membrana
Processo fisico, poche parti in movimento	Generalmente media selettività
Semplice connessione e utilities	L'intasamento è un problema comune
Processo continuo o regolabile	La vita delle membrane è finita
Additivi chimici spesso non richiesti	Capitale investito elevato
Impianti modulari e compatti	Richiedono operatori specializzati
Facile scale up e integrazione con tecnologie e processi tradizionali	Non adatte per liquidi ad alta densità e fortemente intasanti
Le proprietà delle membrane possono essere variate	
Usate per singolo o multi-stage filtrante	
Qualità del permeato indipendente dal feed	
Consentono la standardizzazione di produzione	
Facile clearing e disinfezione in automatico	
Gestione automatica e remotizzata di processo	

Tabella 3. Vantaggi e svantaggi dei processi separativi a membrana

⁸ Il COD è la quantità di ossigeno richiesta per la completa ossidazione dei composti organici ed inorganici presenti in un campione di acqua: rappresenta quindi un indice che misura il grado di inquinamento dell'acqua da parte di sostanze ossidabili, principalmente organiche. Il suo valore è espresso in milligrammi di ossigeno per litro.

L'applicazione più diffusa delle tecnologie di membrana è la dissalazione dell'acqua di mare per la potabilizzazione.

Le prime applicazioni su scala industriale del processo di Osmosi Inversa applicato alla dissalazione dell'acqua di mare risalgono a metà degli anni '80, come appare dal grafico di figura 11, in cui si riportano a confronto le produzioni di acqua potabile nel bacino del Mediterraneo, fra i processi termici e quello ad osmosi inversa.

L'OI si è affiancata ai processi termici di evaporazione, in particolare a quelli multistadio (Multi Stage Flash) installati alla fine degli anni 60. I processi ad osmosi inversa anche se applicati 25 anni più tardi, hanno avuto un trend di crescita superiore a quelli termici. Attualmente nel 2008 con i processi di OI si producono oltre 900.000 m³/giorno di acqua potabile da quella marina.

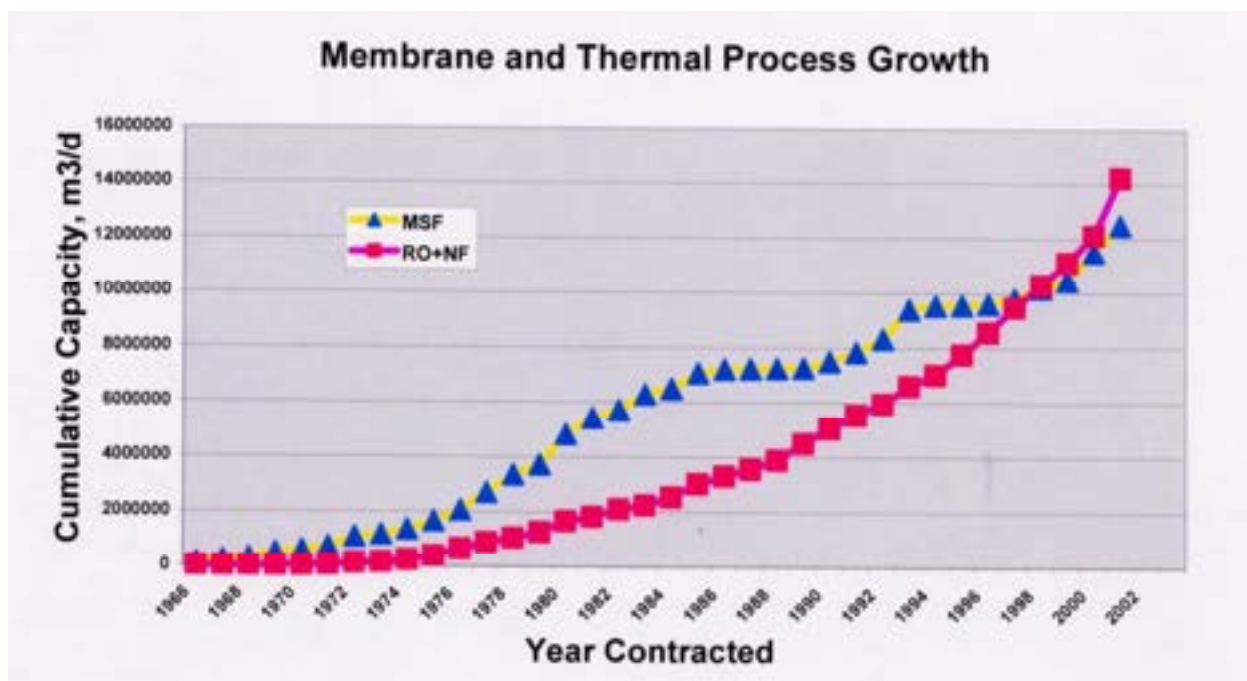


Figura 11. Capacità produttiva per impianti di dissalazione diversi (evaporativi e a membrana)

La tecnica dell'OI ha ormai raggiunto e superato a livello mondiale quella tradizionale termica di evaporazione-distillazione per una serie di ragioni, fra cui il minore consumo energetico.

Gli impianti di potabilizzazione dell'acqua di mare sono quelli che raggiungono le più elevate dimensioni produttive e sono ormai largamente diffusi in tutto il mondo, come si evince dal grafico di figura 11.

Lo schema di questi impianti di potabilizzazione è visibile in figura 12 in cui si distinguono tre sezioni di processo:

- di trattamento chimico-fisico sull'acqua in ingresso: generalmente l'acqua di mare viene prelevata da un pozzo sulla terra ferma per avere una matrice priva di sabbia e mitili;
- di osmosi inversa vera e propria, con turbina di recupero energetico;
- di rimineralizzazione e sanificazione dell'acqua potabile prodotta, con minerali del tipo alcaline. Tale sezione di processo viene spesso accoppiata a sistemi con lampada UV per l'eliminazione dell'eventuale carica batterica.

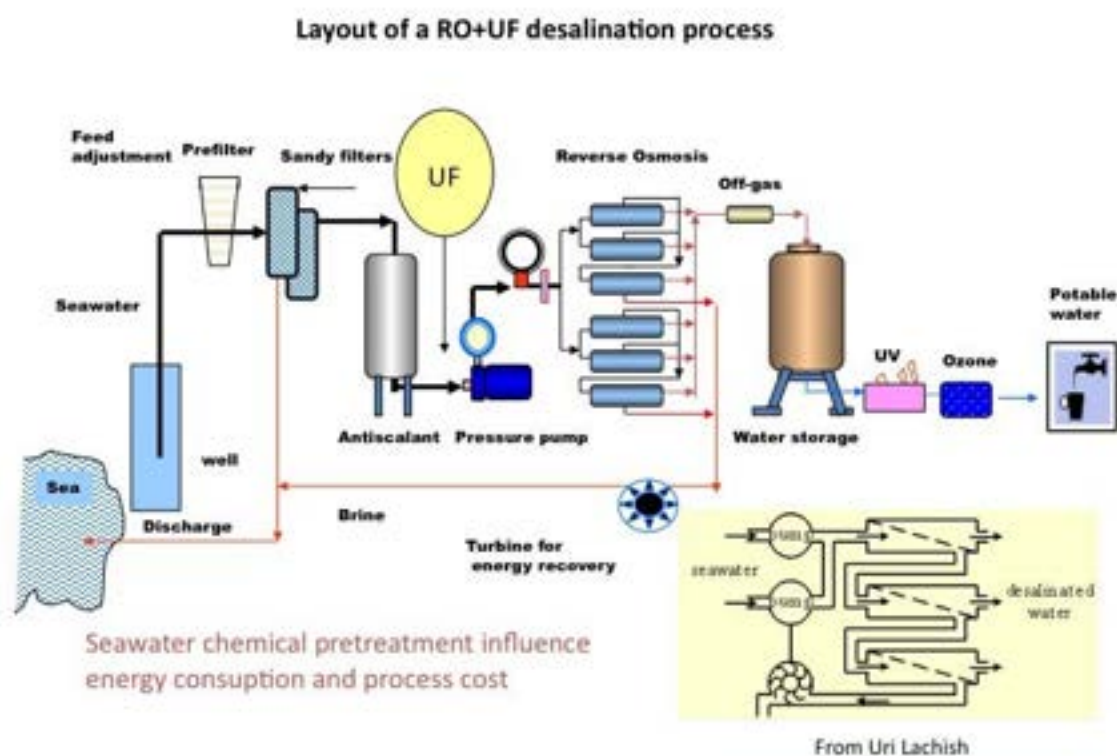


Figura 12. Schema di un impianto industriale di potabilizzazione dell'acqua di mare ad OI

Nella figura 12 è anche indicata la possibilità di utilizzare il processo di UF in sostituzione parziale del pretrattamento chimico dell'acqua di mare. L'impiego dell'UF comporta un costo impiantistico maggiore, ma consente un minor consumo di reattivi chimici acidi e disincrostanti (antiscalant) contaminando molto di meno le acque del mare con tali reattivi.

L'OI e la NF sono impiegate per addolcire le acque, potabilizzare le acque salmastre, trattare gli effluenti industriali per scopi depurativi e di recupero della risorsa idrica.

In campo biomedico le tecnologie di membrana si utilizzano soprattutto nell'emodialisi, in cui sostituiscono alcune funzioni fisiologiche del rene, quindi per purificare il sangue, ed anche nella plasmaferesi, per rimuovere molecole proteiche responsabili di particolari patologie di natura immunologica.

Si applicano diffusamente nell'industria agro-alimentare per la concentrazione o chiarifica dei succhi di frutta, di chiarifica del mosto, vino, birra, aceto, di bonifica microbica di matrici naturali come il latte o di frazionamenti chimici dei costituenti del siero di latte, etc.

In tabella 4 sono riportati i principali comparti produttivi che impiegano tecnologie di membrana e nell'ultima colonna vi è una stima Enea sulla percentuale di impiego delle membrane nei rispettivi settori .

SETTORE PRODUTTIVO	OPERAZIONE	TECNICA di MEMBRANA	PERCENTO %
Chimica fine	Chiarifica e purificazione	UF-NF	7
Alimentare	Chiarifica succhi	MF	6
Lattiero-caseario	Trattamento siero	UF-OI	9
	Bonifica latte	MF	2
Bevande	Acque minerali	MF-UF	8
	Bibite	NF-OI	8
Enologia	Chiarifica mosti e vino	MF-UF	5
	Concentrazione alcool	OI	5
Ind. Metalmeccanica	Trattamento bagni galvanici	OI	6
	Separazione emulsioni	MF-UF	5
Ind. Automobilistica	Bagni di verniciatura	UF	9
Ind. Farmaceutica	Downing strem process	MF-UF	8
Dissalazione-potabilizzazione.	Rimozione sodio cloruro	OI	6
Potabilizzatori casa	Addolcimento acqua	OI	6
Depurazione	Trattamento waste civili	Membrane bioreactor	5
Altre varie	Concentrazione, chiarifica	MF-UF-NF-OI	5

Tabella 4. Applicazioni specifiche della tecnologia a membrane in campo industriale

Si rimanda in allegato 1 una tabella maggiormente dettagliata, da cui la precedente è stata estratta.

Presso i laboratori del centro ricerche ENEA-Casaccia, nell'ambito delle attività programmatiche del Dipartimento BAS, sono stati studiati e messi a punto diversi processi di filtrazione a membrana con l'obiettivo di volta in volta di trattare/depurare reflui, recuperare acqua purificata e/o sostanze ad alto valore aggiunto.

Le problematiche sono state studiate seguendo una visione sostenibile d'insieme, cercando sempre di accoppiare il trattamento depurativo a quello di recupero e riutilizzo e di ricavare risorse da reflui e scarti.

In Enea le prove sperimentali sono state realizzate con impianti pilota operanti in condizione batch, raccogliendo la frazione permeata e con un ricircolo continuo della frazione concentrata nel serbatoio di alimentazione.

A livello industriale, invece, gli impianti sono progettati per raccogliere continuamente sia la frazione permeato che quella concentrato.

Lo schema di un classico impianto pilota operante in condizioni batch è riportato in figura 13.



Figura 13. Schema di impianto pilota batch

In figura 14 è riportata la fotografia di alcuni degli impianti pilota di filtrazione a membrana presenti presso i laboratori dell'Enea-Casaccia.



Figura 14. Impianti pilota a membrana ENEA

Lo studio di un processo di filtrazione con impianti pilota comporta l'individuazione della membrana (conformazione, materiale, taglio molecolare) necessaria per realizzare le separazioni desiderate e l'ottimizzazione dei vari parametri di processo, al fine di aumentare la produttività e ridurre lo sporco di membrana. In particolare sono controllati parametri quali la portata di alimentazione e la velocità di scorrimento sulla superficie di membrana, la pressione di transmembrana o di esercizio, la temperatura, il rapporto volumetrico di concentrazione.



Figura 15. Impianto pilota di microfiltrazione ceramico per la bonifica microbica del siero di latte.

In figura 15 è riportata la fotografia di un impianto pilota di MF che monta membrane ceramiche. L'Enea ha sviluppato processi specifici nel trattamento degli effluenti dell'industria casearia, in particolare del siero di latte; inoltre ha sviluppato brevetti per il trattamento delle acque reflue dell'industria olearia, le così dette acque di vegetazione e dei reflui di industrie cartarie.

4.1 – SIERO DI LATTE/SCOTTA

Il siero di latte è la frazione rimanente dal processo di caseificazione. Il siero di latte può essere utilizzato per la produzione di ricotta e in questo caso la frazione liquida rimanente è la scotta.

In figura 16 una immagine del siero di latte.



Figura 16. Immagine del siero che è stato trasformato in ricotta per riscaldamento.

Sia il siero che la scotta rappresentano un problema ambientale per lo smaltimento, a causa dell'elevato carico inquinante legato ad un COD di circa 60.000 ppm di O₂ e alla difficile degradazione del lattosio.

A volte il siero di latte è impiegato per la formulazione di mangimi, più spesso deve essere smaltito. Soltanto negli ultimi anni si è iniziato ad utilizzare il siero di latte per la produzione di polveri di siero o di siero proteine e lattosio. Le sieroproteine sono infatti la componente proteica più nobile del latte per il loro alto grado di assimilazione e le spiccate proprietà biologiche.

In Enea è stato studiato un processo di frazionamento del siero di latte e/o della scotta in tutte le loro componenti: sieroproteine e peptidi, lattosio, sali minerali ed acqua.

Il processo si basa sull'impiego in successione di tecnologie di membrana con diverse capacità selettive.

Lo schema generale di processo è riportato in figura 17.

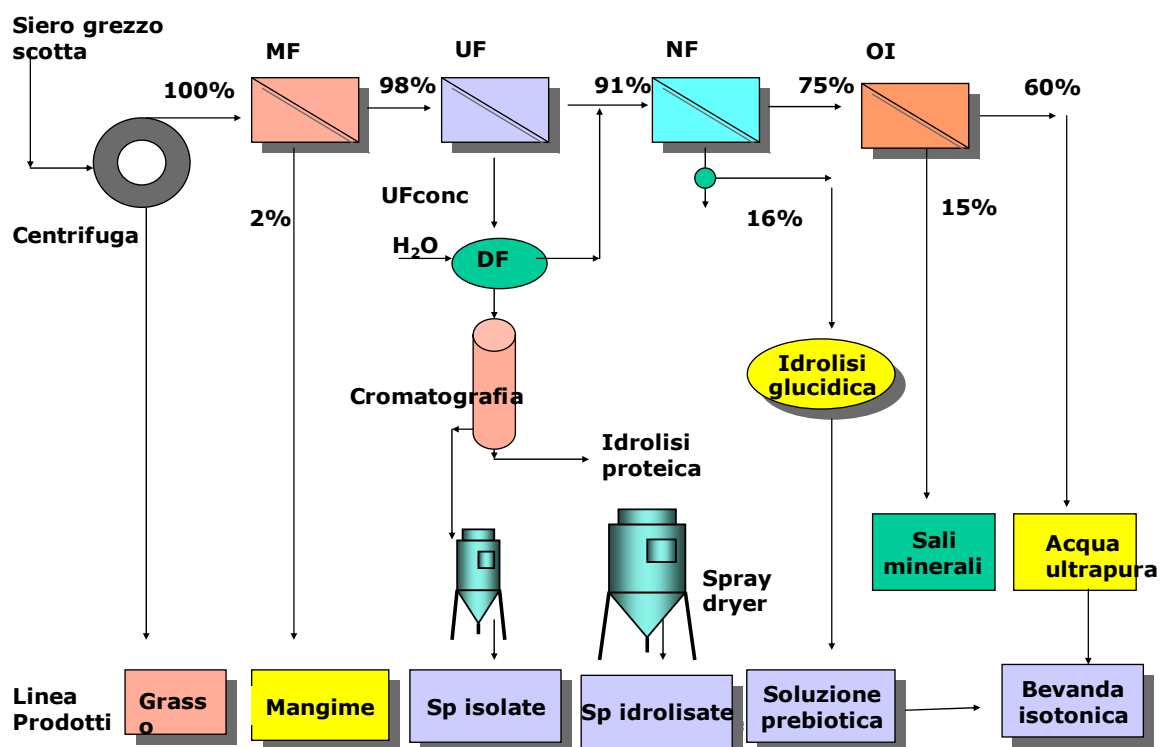


Figura 17. Schema di processo del frazionamento del siero di latte e/o della scotta

Dopo la scrematura, il siero di latte e/o la scotta sono trattati in MF con membrane ceramiche con taglio molecolare di 1,4-0,8 micron per trattenere nella frazione concentrata batteri e residui di grasso.

Il permeato di MF è trattato in UF con membrane polimeriche a spirale avvolta con taglio molecolare compreso tra 20 e 5 kD con lo scopo di separare la componente proteica. Il permeato di UF è trattato in NF con membrane polimeriche a spirale avvolta di circa 200 D per recuperare il lattosio. Il permeato di NF è infine concentrato in OI con membrane polimeriche a spirale avvolta ottenendo un concentrato salino ed un'acqua purificata di origine animale (latte).

In figura 18 è riportato il cromatogramma ottenuto in hplc⁹ relativo alla determinazione del contenuto proteico nelle frazioni separate in UF: le concentrazioni sono espresse indirettamente, attraverso la tensione utilizzata durante la tecnica di cromatografia in funzione del tempo.

⁹ La cromatografia hplc (High Pressure Liquid Chromatography = cromatografia ad alta pressione) è una tecnica separativa che si basa sul fatto che i vari componenti di una miscela tendono a ripartirsi in modo diverso tra due fasi, in funzione della loro affinità con ciascuna di esse. In tal modo è possibile risalire alle concentrazioni delle sostanze presenti nella miscela.

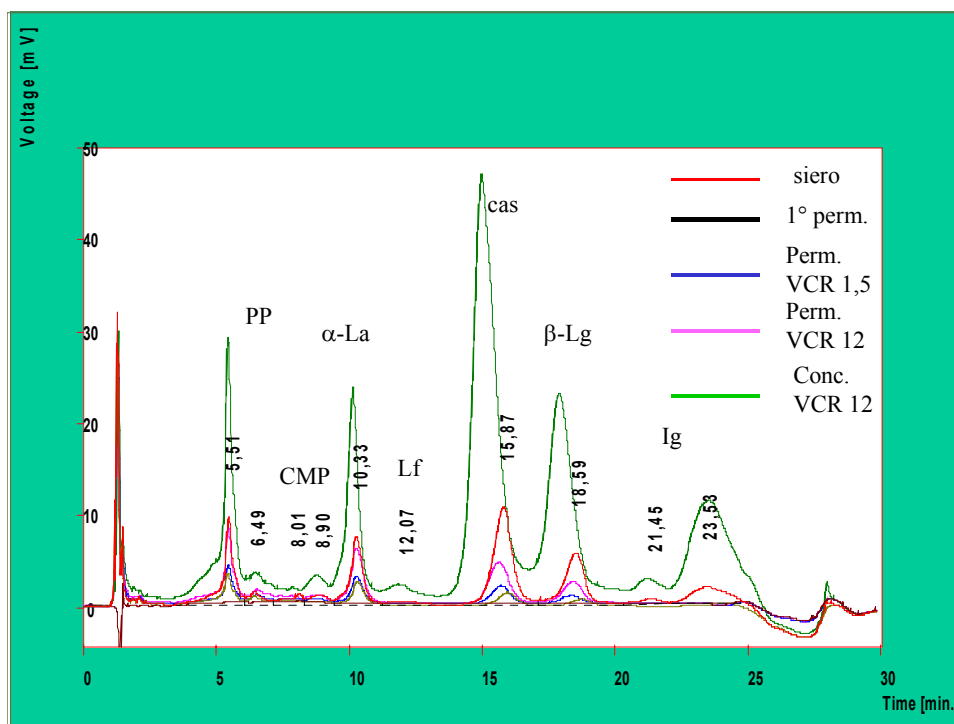


Figura 18. Cromatogramma hplc del contenuto proteico del siero di latte

La parte scremata ed il concentrato di MF possono essere impiegati nella mangimistica.

Il concentrato di UF, dopo un processo di evaporazione, può essere essiccato con atomizzatore a spruzzo per produrre una polvere sieroproteica.

Il concentrato di NF, dopo processo di evaporazione, può essere essiccato in cristallizzatori per la produzione di cristalli di lattosio o può essere impiegato tal quale nell'industria alimentare.

Il concentrato di OI, dopo un'ulteriore concentrazione, può essere impiegato nelle acque di salamoia.

Il permeato di OI è un'acqua ultrapura di origine animale con un rapporto Na/K inferiore di 1, da impiegarsi come base per la formulazione di bevande o comunque da riutilizzare nel ciclo produttivo o in agricoltura.

Attualmente si stanno conducendo sperimentazioni per provare a separare ed isolare con le tecnologie di membrana le sieroproteine con diversi pesi molecolari ed in particolare le immunoglobuline, lattoferrina e lattoperossidasi con pesi molecolari maggiori della BSA, b-lattoglobulina e l'a-lattalbumina con pesi molecolari più bassi.

Altra linea di attività riguarda l'idrolisi enzimatica in un reattore enzimatico a membrana del concentrato proteico di UF per la produzione di peptidi bioattivi e del concentrato glucidico di NF per la produzione di monosaccaridi (glucosio e galattosio) con un maggior potere dolcificante del lattosio e galatto-oligosaccaridi con spiccate proprietà prebiotiche [5] [6] [7].

In figura 19 sono riportate le curve di produzione nel tempo di galattosio e glucosio dall'idrolisi del lattosio.

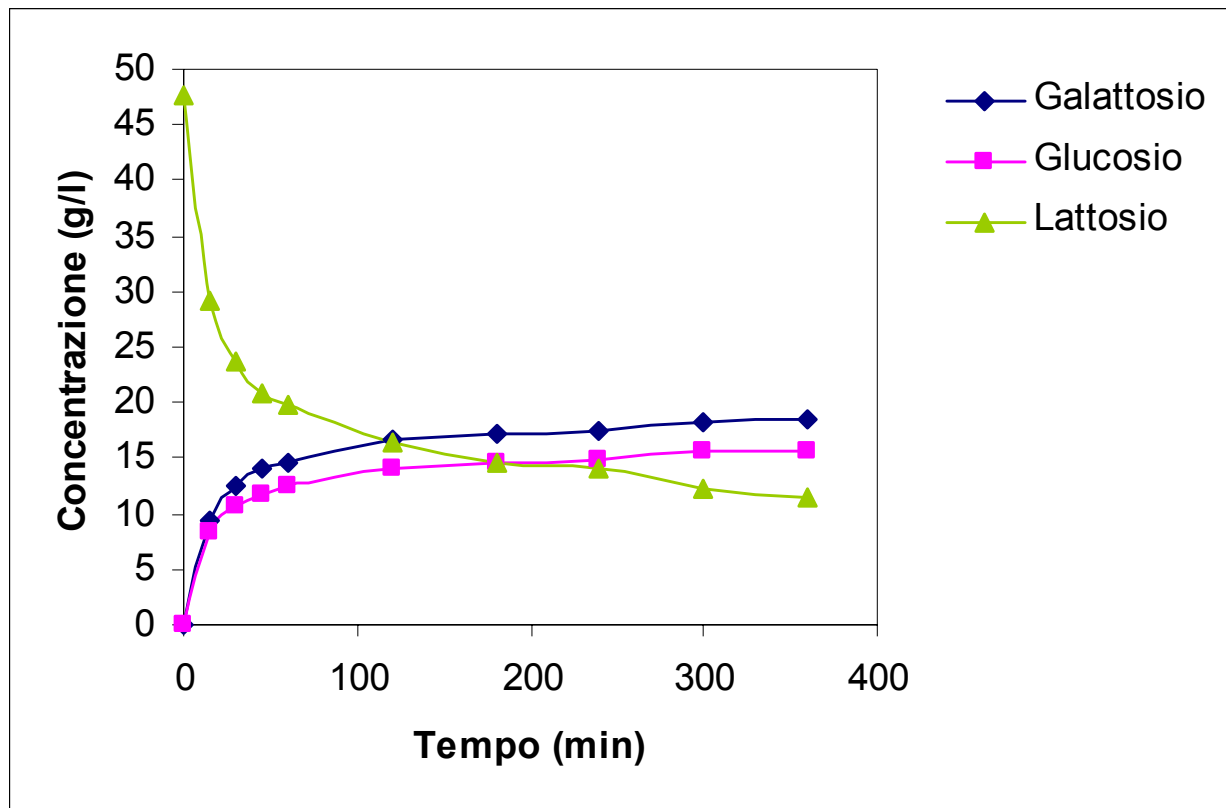


Figura 19. Cromatogramma hplc dell'idrolisi del lattosio nel concentrato di NF

4.2 – ACQUE DI VEGETAZIONE OLEARIE

Le acque di vegetazione (AV) sono i reflui originatisi dal processo di molitura delle olive in frantoi operanti a tre fasi, ossia con la produzione di olio, sanse ed AV.

Lo smaltimento delle AV è uno dei maggiori problemi dell'agro-industria. Le AV hanno un COD di circa 100.000 ppm di O₂, pH acido ed un elevato contenuto in polifenoli (molecole antiossidanti con spiccate proprietà biologiche), molecole fitotossiche e batteriostatiche.

Tali caratteristiche rendono particolarmente difficoltoso lo spargimento delle AV sui terreni agricoli con rischi di desertificazione ed inquinamento di falde acquifere.

Le ricerche finora condotte sulle AV si sono basate su una logica di esclusiva depurazione puntando all'ossidazione dei polifenoli con processi chimico-fisici o tecniche di fermentazione aerobica o anaerobica.

L'Enea ha sviluppato un processo di trattamento, incentrato sul frazionamento delle AV con tecnologie di membrane, al fine di recuperare e riutilizzare separatamente la componente polifenolica, il resto della sostanza organica e l'acqua¹⁰.

In figura 20 si riporta una fotografia della parte finale del processo di molitura delle olive con la produzione di olio ed AV.



Figura 20. Processo di trattamento delle AV con tecnologie di membrana

Le AV sono centrifugate per rimuovere i solidi sospesi ed idrolizzate con enzimi pectolinici e cellulastici per rompere i legami tra sostanza organica e polifenoli ed aumentare così la concentrazione dei polifenoli liberi in soluzione.

Le AV pretrattate sono poi microfiltrate con membrane ceramiche tubolari al fine di rimuovere nella frazione concentrato residui di sostanze sospese ed olio.

¹⁰ Brevetto depositato il 16-06-2004 n. RM2004A000292 a nome Pizzichini, Russo, dal titolo: *Procedimento di Recupero Integrale di Componenti Chimiche delle Acque di Vegetazione con Tecnologie di Membrana*.

Brevetto n. RM2004A000293 depositato nel maggio 2004 insieme a Verdiana s.r.l. dal titolo: *Recupero integrale delle componenti chimiche presenti nelle acque di vegetazione delle olive*. Brevetto esteso a livello internazionale nel 2005 con n. WO2005/123603A1.

Presentazione di un brevetto dal titolo: *Produzione di estratti nutraceutici raffinati da foglie di olea europea, con tecnologie di membrana*, in corso di registrazione (2009) presso lo studio Barzano-Zanardo Roma a nome di M. Pizzichini, C. Russo, M. Vitagliano, D. Pizzichini, A. Romani (Univ. di Firenze).

Il permeato di MF è trattato in UF per frazionare macromolecole come proteine, colloidali, aggregati molecolari nel concentrato.

Il permeato di UF è nanofiltrato recuperando nella frazione concentrato di NF i polifenoli con peso molecolare superiore a 200-300 D.

Il permeato di NF è concentrato in OI ottenendo nel concentrato di OI una frazione ricca di polifenoli a basso peso molecolare (< 200-300 D). Il permeato di OI è un'acqua ultrapura di origine vegetale da utilizzarsi come base per l'industria del beverage o da riutilizzarsi nel ciclo produttivo o in agricoltura.

Nella figura 21 sono riportati i campioni prelevati dalle frazioni separate nei successivi processi a membrana.



Figura 21. Frazioni separate in MF, UF, NF ed OI a partire dalle AV olearie

Le frazioni concentrate separate in centrifuga, in MF ed UF, contenenti la sostanza organica delle AV priva o impoverita del contenuto polifenolico, possono essere impiegate per la produzione di biogas in processi di fermentazione anaerobica. A tal riguardo è stato sperimentato, in collaborazione con l'Enea, un impianto definito digestore anaerobico, nel quale alle tecniche di MF, UF, NF e OI sviluppate dall'Enea stessa, si abbina la produzione di energia e calore mediante combustione del biogas prodotto dalla fermentazione del concentrato sopra citato. In tale caso oltre

al vantaggio di ottenere come prodotto finale delle sostanze con proprietà fertilizzanti ed acqua demineralizzata, si ha anche produzione di energia sufficiente ad autoalimentare l'intero sistema e in alcuni casi immettibile in rete o comunque diversamente utilizzabile, in quanto maggiore di quella effettivamente necessaria al normale funzionamento dell'intero impianto. Questo specifico impianto rappresenta un innovativo impiego del concentrato ottenuto dal trattamento delle AV, che può anche essere utilizzato nell'industria alimentare, cosmetica, etc, e rappresenta una ottimale soluzione al problema dei costi, nonché consumi energetici.

L'impiego del digestore anaerobico consente inoltre di raggiungere l'obiettivo di scarico zero, poiché le acque di lavaggio chimico delle membrane possono essere inviate allo stesso digestore, previa neutralizzazione con acido.

I concentrati di NF e di OI, contenenti le componenti polifenoliche, possono essere impiegati come integratori nell'industria alimentare o nel settore nutraceutico, in forma liquida tal quale, surgelata o in polvere dopo essiccazione con atomizzatore a spruzzo.

Le ricerche in corso attualmente in Enea puntano ad ottimizzare il processo di pretrattamento per facilitare le successive operazioni di filtrazione con tecnologie di membrane e alla raffinazione dei concentrati di NF e di OI.

I concentrati di NF e di OI, costituiti principalmente da una soluzione di polifenoli, glucidi e sali minerali, possono essere trattati con tecniche di cromatografia liquida per isolare e purificare la componente polifenolica.

4.3 – DECOTTO DI FOGLIE DI ULIVO DA POTATURA

L'uso degli scarti e dei residui derivanti dalla filiera agronomico-industriale relativa alla produzione dell'olio d'oliva, dei carciofi, del broccolo, etc. potrebbe consentire una riduzione dell'impatto ambientale della filiera produttiva, e la riduzione degli oneri di manodopera e di smaltimento di biomasse.

Sebbene lo stato attuale della tecnologia sia orientato essenzialmente verso una loro conversione in energia, raramente si considera che tali biomasse, materiali ad alto impatto e ad elevato costo di smaltimento, potrebbero essere considerate nuove materie prime, a basso costo, per la produzione di bio-prodotti ad elevato valore aggiunto per l'industria agro-alimentare, fitoterapica e cosmetica.

L'Enea ha studiato un nuovo processo per valorizzare e riutilizzare i grandi quantitativi di biomassa vegetale, ricavandone prodotti ad alto valore aggiunto per l'industria alimentare e farmaceutica, con un processo che rispetta l'ambiente e l'ecosistema.

Il nuovo processo si basa sull'impiego delle tecnologie di membrane per frazionare decotti in base acquosa degli scarti dell'agro-industria. In particolare, questa nota riporta lo studio realizzato sulle foglie di potatura degli ulivi.

I composti principali identificati nelle foglie di ulivo sono i secoiridoidi riscontrati anche nell'olio e nei prodotti di scarto (AV e sanse), l'idrossitirosolo, vari acidi fenolici, fenilpropanoidi quali il verbascoside e suoi derivati e composti flavonoidici, principalmente glicosidi di luteolina ed apigenina, ma anche di quercetina e crisoeriolo.

In virtù di tale composizione chimica, estratti di foglie d'ulivo sono da tempo utilizzati per ottenere un'azione antiipertensiva, colesterolitica e ipoglicemizzante.

Negli ultimi decenni, abbiamo assistito ad una ripresa d'interesse, da parte del mondo scientifico, nei confronti degli usi alternativi/complementari dei prodotti della pianta di ulivo, in particolare al possibile uso terapeutico dei preparati erboristici ricavati dalle foglie d'ulivo.

Lo schema generale del processo sperimentato in Enea è riportato in figura 22.

Le foglie di ulivo e parte dei rametti vengono immerse in acqua osmotizzata e decotte a circa 80°C. In tutti i cicli di estrazione dei principi attivi dalle foglie viene impiegata l'acqua che deriva dal permeato di osmosi inversa, eliminando il consumo idrico di processo.

Il peso della biomassa verde (foglie più rametti) varia fra il 20 e il 30% rispetto all'acqua demineralizzata.

Per una estrazione quantitativa dei principi attivi occorrono almeno due fasi di estrazione a caldo.

Il decotto prefiltrato con prefiltro da 50-100 micron è trattato in MF/UF con membrane ceramiche tubulari o polimeriche a spirale avvolta ed il permeato di MF/UF è concentrato in OI.

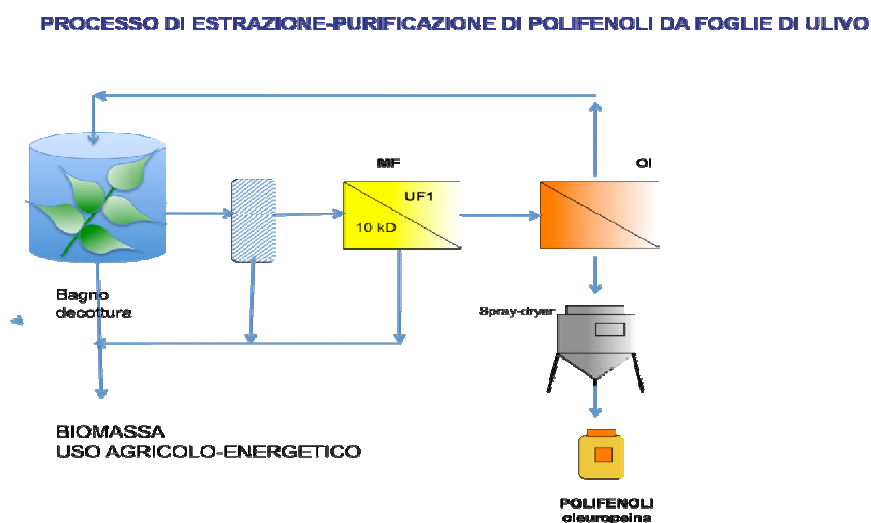


Figura 22. Schema generale del processo di trattamento delle foglie di ulivo da potatura

In figura 23 è riportata la fotografia di campioni delle frazioni separate nelle diverse fasi a membrana.



Figura 23. Frazioni separate in MF ed OI dal decotto di foglie di ulivo di potatura

4.4 – REFLUI DI CARTIERA

L'industria cartaria, nonostante la razionalizzazione del ciclo idrico nel processo produttivo, è tra i comparti industriali a maggior consumo di acqua. La qualità del prodotto finito, sia che si utilizzi come materia prima macero o cellulosa vergine, è strettamente dipendente dalle caratteristiche dell'acqua impiegata.

Per questo motivo generalmente le cartiere impiegano acqua prelevata da pozzi o addirittura acqua potabile.

Una cartiera di medie dimensioni ha un consumo giornaliero d'acqua dell'ordine delle migliaia di metri cubi, riutilizzando solo una minima percentuale nello stesso ciclo produttivo (6-10%).

Dal punto di vista chimico, i reflui contengono varie sostanze di carica e collanti impiegate per riempire gli spazi tra le fibre di cellulosa e per dare impermeabilità ai liquidi e agli inchiostri, disinchiostranti, sbiancanti: carbonati di bario, calcio, magnesio, ossidi, silicati, solfati di bario e calcio, resini, amidi, caseine, cere, tensioattivi, metalli pesanti, etc.

I reflui, generati dopo i processi di trattamento della cellulosa, sono depurati con processi fisico-chimici e biologici in depuratori a fanghi attivi e scaricati.

L'Enea ha condotto uno studio con la Cartiera Lucchese (Lucart) al fine di mettere a punto un processo depurativo per il riutilizzo dell'acqua nello stesso ciclo produttivo¹¹.

¹¹ Brevetto n. RM 2003A000603 depositato da Pizzichini, Russo, Di Meo nel dicembre 2003 insieme a Cartiera Lucchese (Lucart) dal titolo: *Procedimento di purificazione dei reflui di cartiera per il recupero e riutilizzo in produzione dell'acqua raffinata*.

In figura 24 è riportato lo schema produttivo della Cartiera Lucchese e il punto di applicazione delle tecnologie di membrana al processo [8]. In particolare le tecnologie di membrana si introdurrebbero al processo produttivo dopo la fase di flottazione.

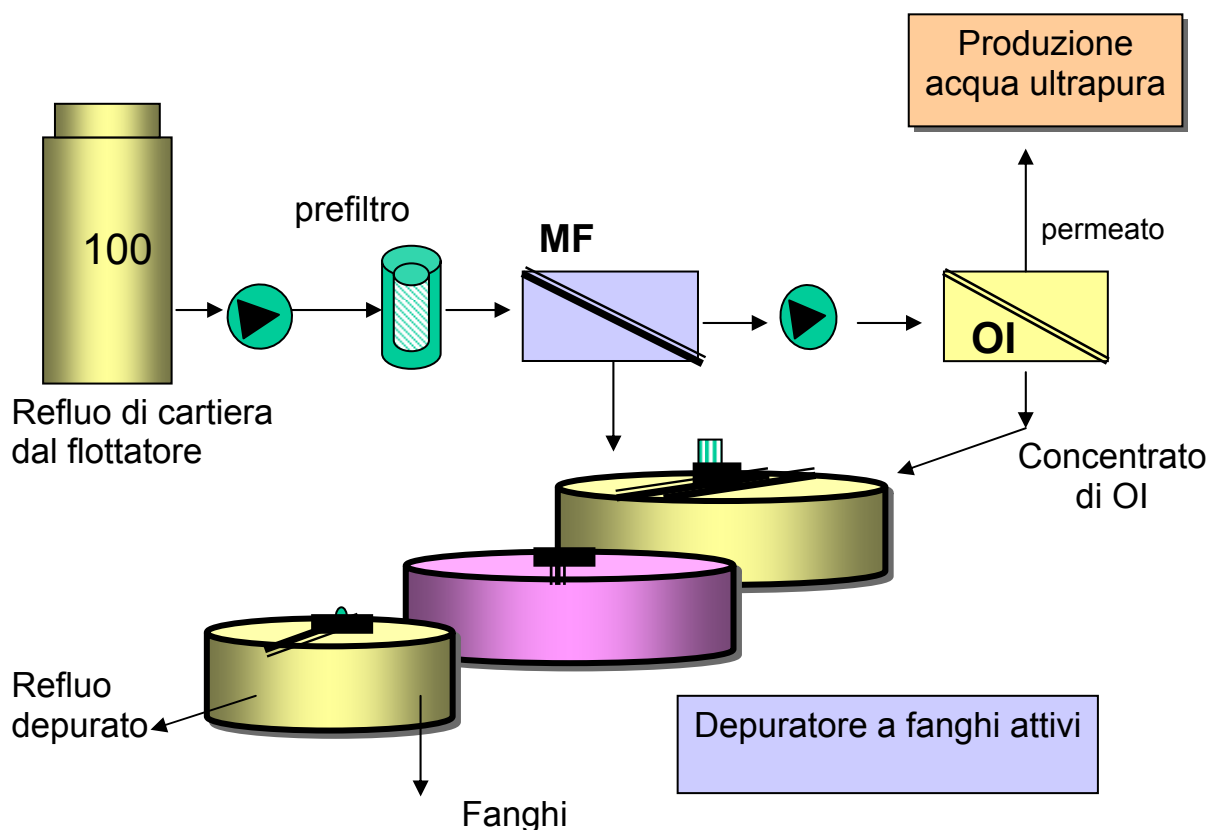


Figura 24. Schema produttivo della Cartiera Lucchese ed applicazione delle tecnologie di membrana per il trattamento dei reflui ed il recupero dell'acqua.

Il refluo di cartiera, con COD variabile tra 600 e 1.300 ppm di O_2 a seconda della presenza del processo di disinchiostrazione, è stato microfiltrato/ultrafiltrato con membrane ceramiche tubolari o polimeriche a spirale avvolta ed il permeato di MF è stato concentrato in OI con membrane polimeriche a spirale avvolta.

I concentrati di MF e di OI sono destinati al processo depurativo a fanghi attivi, mentre il permeato di OI (circa l'80% dei reflui iniziali), con una conducibilità elettrica di circa $50 \mu S/cm$ e con un COD inferiore a 50 ppm di O_2 , è riutilizzato nel ciclo produttivo [9] [10].

4.5 – DISINCHIOSTRAZIONE

La stampa della carta avviene generalmente con inchiostri off-set solubili in solventi. Soltanto recentemente si sta sviluppando la stampa con inchiostri flessografici solubili in acqua con notevoli vantaggi dal punto di vista ambientale e sociale.

Il processo di disinchiostrazione basato sulla flottazione non è però in grado di rimuovere gli inchiostri flessografici, per cui le cartiere da macero non accettano quantità di macero stampato con inchiostri flessografici superiori al 10%.

Lo scopo della ricerca realizzata in Enea è stato quello di sviluppare un nuovo processo di trattamento della carta da macero caratterizzata dalla presenza sia di inchiostri flessografici che off-set basato sull'impiego di tecnologie di membrane accoppiate al tradizionale processo di flottazione¹².

In particolare sono state realizzate prove sperimentali su soluzioni di inchiostro flessografico, su reflui simulati utilizzando residui di fogli di giornali stampati con inchiostri flessografici e su reflui reali di cartiera. Il processo separativo è basato sull'impiego di una prima filtrazione con membrane ceramiche tubolari di MF ed una seconda con membrane polimeriche a spirale avvolta di OI.

La MF tende a trattenere le particelle microdisperse di inchiostro flessografico, seppur permeano alcune componenti dell'inchiostro. La MF abbatte il COD di partenza di circa il 60-70%.

L'OI concentra il permeato di MF generando un permeato purificato con COD inferiore a 20 ppm di O₂ ed una conducibilità di 10-20 μ S/cm.

I concentrati di MF e di OI sono destinati al depuratore, mentre l'acqua prodotta dall'OI può essere riutilizzata nel ciclo produttivo [11] [12].

¹² Brevetto n. BO2005A000689 depositato nel 2005 dal titolo: *Processo di disinchiostrazione di carta da macero di stampati flessografici con tecnologie a membrana*.

5 – COSTI D’IMPIANTO E DELLA TECNOLOGIA DELLE MEMBRANE

Mentre le stime dei costi di processo seguono modelli di valutazione già collaudati in settori diversi da quello considerato, ad esempio nel settore metalmeccanico, le valutazioni dei benefici ottenibili dai processi a membrana presentano una serie di considerazioni di natura commerciale non facilmente definibili.

I costi degli impianti a membrana e della loro gestione, generalmente vengono confrontati con quelli di tecnologie tradizionali.

I costi totali derivano dalla somma dei costi di trattamento, da quelli relativi alla depurazione degli effluenti, dal consumo idrico e dal costo di stoccaggio dei prodotti finiti. Lo schema della tabella 5 che segue è di tipo generale, quindi valido per ogni processo a membrana considerato.

Voci di costo		sigla
Costi di investimento	Impianto a membrane	I
	Infrastrutture tecniche*	II
	Annuali di (I +II) ammortamento N anni, r% tasso interesse	III
Costi di esercizio	Operativi annuali (300gg/a) manutenzione, ricambi, reattivi	IV
	Manodopera	IV
	Energia (elettrica, termica)	IV
	Spese generali	IV
	Costi totali di trattamento annuali (III+IV)	V
Costi aggiuntivi pre/post trattamento (fluidi di processo, smaltimento reflui, ecc.)	Depurazione	VI
	Acqua	VII
	Stoccaggio, ricircoli	VIII
Costi totali	(V+VI+VII+VIII)	IX

* rete elettrica, idrica, celle frigorifere, vapore, etc.

Tabella 5. Costi di processo

E’ necessario sottolineare che la prima voce della tabella 5, costo degli impianti, dipende da molti fattori e da molte componenti costruttive. In modo schematico possiamo riassumere i costi di un impianto a membrana nelle voci principali riportate in tabella 6.

Voci di costo	Incidenza (%)
Pompe	30
Housing	10
Moduli a membrana	20
Piping, valvole, carpenteria	20
Sistemi di regolazione e controllo	15
Altro	5

Tabella 6. Costi dei componenti di un impianto a membrana

Il costo di sostituzione delle membrane incide più precisamente fra il 15 e 20% di quello dell'impianto. Questo range dipende dal tipo di membrana, in particolare variano sensibilmente fra polimeriche e ceramiche. Le polimeriche hanno un costo collegato al tipo di polimero, alla conformazione geometrica (piana, cava, spiralata, tubolare), al tipo di housing, etc. In modo indicativo il costo medio di una membrana polimerica varia fra i 3,6 €/m² e 82 €/m². Il costo di quelle ceramiche è mediamente 10 volte superiore a quelle polimeriche.

I costi di gestione degli impianti a membrana sono caratterizzati dalle voci riportate in tabella 7.

Voci di costo	Incidenza (%)
Moduli a membrana	35-50%
Lavaggi	12-35%
Energia	15-20%
Manodopera	15-18%*

Tabella 7. Costi operativi degli impianti a membrana

L'introduzione di software di gestione automatico degli impianti riduce fino al 50% il costo della manodopera, ma aumenta leggermente quello d'investimento [13].

Nella tabella 8 sottostante sono messe a confronto le voci di costo relative ad un processo a membrana ed un processo tradizionale.

Processo tradizionale	Processo con membrane
costi fornitura acqua	ridotti costi fornitura acqua
costo energia	ridotto costo energia
costo fornitura chimica	nuovo costo fornitura chimica
costo materia prima (grezza)	ridotto costo materia prima (grezza) (includendo recupero/ricircolo)
costi di smaltimento degli effluenti liquidi	ridotti costi di smaltimento degli effluenti liquidi
costi di smaltimento dei rifiuti solidi	ridotti costi di smaltimento dei rifiuti solidi
costo manodopera	costo manodopera
costo di trasporto (per esempio per le materie grezze, rifiuti da eliminare)	ridotti costi di trasporto
	costo capitale impianto
	costo sostituzione membrane
	costo accessori ausiliari, per esempio serbatoi
	valore del prodotto separato

Tabella 8. Schema di confronto tra costi di processo tradizionale e a membrana

6 – I CONSUMI ENERGETICI

La valutazione dei consumi energetici attribuibili alla tecnologia di separazione mediante membrane è un punto importante nell'analisi dei costi di processo, nonché rappresenta un parametro di confronto allorché si effettuano paragoni con tecnologie tradizionali utilizzate nel corrispondente ambito: ciò consente una opportuna valutazione, in termini tecnico-economici, ai fini della scelta di una tipologia di impianto piuttosto che di un'altra. Pur essendo i consumi un punto focale nella scelta o meno di questa tecnologia, essa non è esente dall'influenza che altri fattori potrebbero avere sui ritorni economici che l'impiego di tale tecnologia può avere, come per esempio la percentuale di ricavo, difficilmente quantizzabile, dovuta allo smaltimento illegale degli effluenti industriali.

Le singole tecniche di filtrazione (MF, UF, NF, OI) vengono integrate singolarmente o in sequenza a seconda della necessità, in un processo più ampio: i consumi energetici complessivi dell'intero processo di filtrazione saranno dati dalla somma dei singoli consumi relativi alla corrispondente tecnica, essendo questi riconducibili essenzialmente a consumi elettrici dei pompaggi e eventualmente termici (caldo/freddo con scambiatori), necessari per garantire le condizioni di pressione/temperatura previste per l'ottimale funzionamento delle membrane.

Considerando le tecniche di filtrazione singolarmente, come unico processo, l'energia totale richiesta nella *micro/ultra/nanofiltrazione* è data dalla somma delle singole energie necessarie ad ogni fase del singolo processo:

$$E = E_t + E_p + E_q$$

dove i singoli termini rappresentano:

E_t : l'energia scambiata per riscaldare o raffreddare il sistema, che viene trascurata in quanto contributo minimo rispetto agli altri.

E_p : l'energia necessaria per l'alimentazione e dipendente dalla pressione di alimentazione e dalla portata secondo la relazione

$$E_p = P \cdot Q_a$$

E_q : l'energia necessaria per il ricircolo e dipendente dal salto di pressione tra monte e valle delle membrane nonché dalla portata di ricircolo secondo

$$E_q = \Delta P \cdot Q_r$$

Si ricordi che la portata di flusso in ingresso alle membrane deve essere pari alla somma delle portate di ricircolo e di permeato:

$$Q_a = Q_r + Q_p$$

In genere in un impianto sperimentale le percentuali si aggirano intorno a 70% di portata di ricircolo e 30% di permeato, e in alcuni casi si arriva anche a 90% contro il 10% di prodotto. E' chiaro come in questo secondo caso i costi in termini energetici siano decisamente più elevati. In un impianto industriale invece le percentuali cambiano anche grazie al fatto che il flusso che nel primo impianto andava in ricircolo, in questo va in ingresso ad una seconda membrana: garantendo le necessarie pressioni si dimensioneranno opportunamente i vari componenti dell'impianto, in special modo le pompe.

Per riferire invece il consumo energetico alla produzione di permeato si ricorre all'espressione seguente [4]:

$$E = \frac{0,0273 \times \left(\frac{1}{\eta_p}\right) P Q_r}{J_m S}$$

dove:

E = consumo energetico per m³ di permeato prodotto (kWh/m³);

η_p = efficienza della pompa (supposta 0,7);

P = pressione di esercizio (bar);

Q_r = portata di ricircolo del processo di UF (m³/h);

J_m = flusso di permeato medio, calcolato come: $J_m = J_f + 0,33 (J_i - J_f)$ (m³/m² h = m/h);

J_f = flusso finale di permeato;

J_i = flusso iniziale di permeato;

S = superficie efficace della membrana (m²): questo valore viene fornito in genere dal produttore. Per fare un esempio le membrane polimeriche avvolte hanno una superficie di 8 m² mentre le ceramiche 0,35 m².

Se si applica l'espressione sopra descritta per il calcolo del consumo energetico utilizzando dati sperimentali si ottengono risultati maggiorati rispetto a quanto riportato in bibliografia; utilizzando invece la seguente espressione semplificata si ottengono valori in accordo con esso:

$$E = \frac{E_{mem}}{\eta_{sist} \cdot J_m}$$

dove E_{mem} = l'energia efficace sulla superficie di membrana ottenuta a partire dall'energia di alimentazione e tenendo conto di tutte le perdite di carico che si hanno. E' stimabile a 50 W/m^2 ;

η_{sist} = efficienza (o rendimento) del sistema escluso il motore elettrico di azionamento della pompa (0,4-0,6);

J_m = flusso di permeato ($\text{l/m}^2\text{h}$).

Se vogliamo calcolare l'energia elettrica utilizzata:

$$EE = \frac{E}{\eta_m}$$

In cui E è l'energia poc'anzi calcolata espressa in kWh/m^3 e η_m il rendimento del motore che alimenta il tutto. Se poi si vuole quantificare l'energia primaria:

$$EP = EE \cdot 0,187 \frac{tep}{MWh}^{13}$$

Per fare un esempio numerico, si supponga di avere un flusso di permeato di $40 \text{ l/(m}^2 \text{ h)}$ e un sistema con efficienza del 50 %: essendo $E_{mem} = 50 \text{ W/m}^2$ si trova che

$$E = \frac{50}{0,5 \cdot 40} = 2,5 \frac{kWh}{m^3}$$

da cui trovo l'energia elettrica consumata supponendo un'efficienza del motore elettrico dell' 88%:

$$EE = \frac{2,5}{0,88} = 2,84 \frac{kWh}{m^3}$$

infine l'energia primaria è data da:

$$EP = 2,84 \frac{kWh}{m^3} \cdot 0,187 \frac{tep}{MWh} = 0,531 \cdot 10^{-3} \frac{tep}{m^3} \text{ di permeato.}$$

Questa valutazione non è propriamente adatta al caso del digestore anaerobico citato in precedenza (vedi paragrafo 4.2), nel quale oltre ad avere diverse componenti d'impianto di cui tener conto, si ha produzione di energia utile al funzionamento dell'impianto stesso: ciò diminuirebbe, se non annullerebbe, il valore di energia primaria necessaria.

¹³ Come da delibera EEN 3/08 dell'AEEG in merito all'aggiornamento del fattore di conversione dei kWh in tep ai fini dei titoli di efficienza energetica (TEE) o certificati bianchi (CB).

Nel caso di *osmosi inversa* invece l'energia totale del processo è data dalle componenti appena discusse e da un contributo aggiuntivo dovuto all'energia necessaria per vincere la pressione di osmosi, E_{Ap} , che rappresenta in questo specifico trattamento un termine dominante nella valutazione dei consumi energetici. Questo si traduce in energia utilizzata dalle pompe che dovranno essere presenti a monte del sistema di osmosi così da garantire la necessaria pressione in ingresso alle membrane. Basti pensare che la pressione di alimentazione a cui lavorano le membrane polimeriche si aggira intorno ai 4 bar, quelle ceramiche poco meno. La pressione di osmosi (che per la dissalazione dell'acqua del Mar Mediterraneo è pari a 29 bar [14] [15]) è valutata mediante l'espressione di Van't Hoff

$$\pi = \frac{c_j RT}{M}$$

in cui R è la costante universale dei gas, T la temperatura assoluta (K), M il peso molecolare del soluto e c_j la sua concentrazione.

In un impianto ad osmosi inversa per la dissalazione dell'acqua di mare, applicazione peraltro maggiormente diffusa, si hanno diverse fasi di trattamento, ad ognuna delle quali corrisponde uno specifico consumo di energia. La somma dei singoli termini fornisce il consumo energetico totale di un siffatto impianto. Nello specifico si ha:

$$E = E_{WS} + E_{TP} + E_{HPP} + E_{PR} + E_{AUX} - E_T$$

Dove le singole componenti rappresentano:

E_{WS} : energia necessaria per l'approvvigionamento dell'acqua

E_{TP} : energia corrispondente alla pompa di trasferimento

E_{HPP} : energia consumata dalla pompa di alta pressione tipicamente utilizzata nell'osmosi inversa

E_{PR} : energia consumata dalla pompa di pretrattamento

E_{AUX} : energia corrispondente agli apparati ausiliari

E_T : energia recuperata in turbina

Inoltre è presente anche una turbina che consente un parziale recupero di energia (di cui R è la percentuale di recupero) in quanto in uscita dal sistema di membrane il concentrato si trova ad essere a pressione e temperatura elevate: questa componente va evidentemente a sottrarsi alle altre e quindi a diminuire il consumo totale.

Scendendo in dettaglio, l'energia associata alle pompe si può calcolare con la seguente espressione:

$$E_p = 0,02724 \frac{P_f}{R \cdot \eta_p \cdot \eta_m} \left(\frac{kWh}{m^3} \right)$$

dove il coefficiente moltiplicativo tiene conto dei fattori di conversione. Gli altri termini sono:

η_p : efficienza delle pompe

η_m : efficienza del motore

P_f : pressione in uscita dalla pompa

Mentre per la turbina si ha una espressione analoga:

$$E_T = 0,02724 \frac{P_c \cdot (1-R) \cdot \eta_t}{R \cdot \eta_m} \left(\frac{kWh}{m^3} \right)$$

con

η_t : efficienza della turbina

P_c : pressione del concentrato

Dalla tabella seguente, riferita ad un impianto industriale di trattamento del siero di latte, è possibile avere una indicazione qualitativa sui valori di pressione di esercizio, flusso medio di permeato e i relativi consumi energetici.

Processo	Pressione (bar)	Flusso medio di permeato (l/m ² h)	kWh	Costo (€cent/m ³) kWh=11 €cent
MF	1-2	40	2	27,5
UF	3-5	30	2-3	36,3
NF	15	45	3-4	46,2
OI	30	37	5-6	79,2
OI	40	42	7-7,5	110

Tabella 9. Costi e consumi energetici di un impianto industriale di trattamento del siero del latte

6.1 – RICERCA E SVILUPPO FINALIZZATI ALL'EFFICIENZA ENERGETICA

Come più volte detto i processi a membrana impiegano energia elettrica per alimentare le pompe di alimentazione e, per certe tipologie di impianti, anche di ricircolazione delle soluzioni da trattare. L'altra quota energetica riguarda la fase di refrigerazione degli impianti, che incide per circa 1/20 del consumo energetico primario.

Una nuova pompa denominata Triplex a Flusso Continuo, presenta caratteristiche tecniche innovative che sono di particolare interesse per le applicazioni di OI. Tale pompa, brevettata¹⁴ per applicazioni differenti, può essere usata con vantaggi in sostituzione di pompe a girante (es. centrifughe) e di pompe a pistone anche della stessa categoria (Triplex in commercio), grazie ad un rendimento energetico elevato, al funzionamento volumetrico e perché non richiede l'impiego di smorzatori nelle sezioni di entrata ed uscita della pompa.

L'impiego di questa pompa Triplex in un processo di OI delle acque di vegetazione olearie può portare ad un recupero energetico effettuato dal concentrato (acqua salata in uscita) con un rendimento anche superiore al 80%, realizzato mediante un motore idraulico che è parte integrante della struttura meccanica della pompa stessa e che consente inoltre una regolazione del rapporto permeato (acqua dolce prodotta)/concentrato.

Questa soluzione tecnica consente un costo ridotto del sistema pompa-motore idraulico ed un costo ridotto di esercizio, dato l'elevato rendimento in fase di pompaggio e l'efficacia del sistema di recupero.

In un impianto di OI in configurazione classica, utilizzante cioè una pompa a girante, si può ottenere un recupero energetico percentuale con l'introduzione di una turbina a valle delle membrane. L'efficacia di questo recupero è però penalizzata sia dal fatto che l'energia recuperata non è utilizzabile direttamente dalla pompa (come nel caso del motore idraulico della nuova Triplex), sia dal rendimento non ottimale della pompa stessa, perché in questo caso dovrà garantire pressioni elevate.

Attualmente, nei grandi impianti di dissalazione dell'acqua di mare, una parte dell'energia che la pompa scarica sul fluido è recuperata con la turbina idraulica operante sul retentato, cioè sulla salamoia che viene rigettata in mare. Nei piccoli impianti di OI (taglia inferiore a 500 l/h di permeato prodotto) tale energia non è recuperabile, quindi i consumi energetici di processo si attestano sui 5-6 kWh/m³, anziché sui 2,0-2,5 kWh/m³ dei grandi impianti.

¹⁴ Brevetto n RM2008A000397 depositato a nome dell'ing. Maurizio Arabia.

Il motore idraulico della pompa Triplex consentirebbe di recuperare l'energia della salamoia, come contropressione nella pompa stessa, riducendo in modo significativo (anche fino al 60%) il consumo elettrico dei processi a membrana; questa pompa è applicabile, in linea teorica, per tutte le tecniche a membrana, non solo per l'OI.

Rispetto alle tradizionali pompe a girante, la nuova Triplex consente pressioni molto elevate, anche superiori a 1000 bar.

Inoltre la portata della pompa è poco sensibile alle variazioni della prevalenza: si riduce di pochi punti % all'aumentare della prevalenza stessa; viceversa, le normali pompe a girante, a causa dell'intasamento delle membrane durante il funzionamento a regime dell'intero impianto a cui la pompa è connessa, sono soggette ad un aumento di carico e quindi di prevalenza e ad una conseguente diminuzione di portata.

Nella figura 25 è mostrata una immagine della nuova pompa Triplex.



Figura 25. La nuova pompa Triplex a flusso continuo (1 m³/h, 30 Bar, motore da 1.1 kW)

Si rammenta inoltre che ai fini della riduzione dei consumi energetici complessivi, in termini di energia primaria, dell'applicazione delle membrane al trattamento delle AV, è possibile valorizzare energeticamente il concentrato di MF e UF, come descritto nel cap. 4.2, attraverso il digestore anaerobico, con il quale è possibile ottenere biogas da utilizzare per la produzione, in cogenerazione, dell'energia elettrica necessaria per il funzionamento degli ausiliari d'impianto.

7 – POTENZIALITA' E BARRIERE ALLA DIFFUSIONE

Seppur la tecnologia delle membrane sia consolidata e nota da tempo ormai, e per questo motivo l'interesse nei settori della ricerca è andato scemando nel corso degli anni (basti ricordare come in Italia solo l'Enea e il Cnr di Cosenza siano gli unici centri in cui sia presente un'attività svolta in tale direzione), trova ancora notevoli difficoltà nella diffusione su larga scala a livello nazionale, nonostante l'applicabilità e replicabilità possibile in un ampio range di settori e il loro inserimento tra le tecnologie BAT, come citato nel cap. 2, che peraltro dovrebbe rappresentare un incentivo al loro impiego e valorizzazione.

Dal testo si possono evincere le difficoltà appena citate, schematizzate come segue.

- Barriere di qualificazione e formative: nonostante le membrane siano una tecnologia ormai nota da anni, rispetto ad altre tecnologie esse non vengono trattate se non in maniera sommaria negli ambiti di formazione tecnico-scientifica, universitaria e non. Ne consegue una carenza di competenze in materia e quindi scarsa informazione/diffusione e basso livello di domanda. Tale carenza di informazione si ripercuote in un atteggiamento pregiudizievole nei confronti di prodotti innovativi immessi sul mercato, anche se a costi competitivi (per esempio il latte microfiltrato).
- Barriere commerciali: senza competenze in materia ci si deve necessariamente rivolgere ai venditori di impianti, i quali perseguendo leciti obiettivi aziendali, spesso forniscono soluzioni impiantistiche ottimizzate più alle esigenze aziendali che a quelle richieste dalla particolare applicazione. Inoltre ad aggravare questa situazione c'è anche il fatto che i produttori mondiali di membrane si trovano tutti all'estero, dislocati tra Usa, nord Europa (Danimarca) e Asia orientale (Giappone) e ciò rende spesso necessaria la presenza di intermediari, che in genere forniscono impianti "chiavi in mano".
- Barriere tecnologiche: non esistono barriere tecnologiche in quanto le membrane sono una tecnologia "matura"; tuttavia sono una tecnologia molto critica, in quanto per poter funzionare necessitano della messa a punto di tutti i parametri di processo (idrodinamici, ecc.). Ciò richiede competenze specifiche e di conseguenza una formazione adeguata.

- Barriere normative/legislative: attualmente non esistono vincoli normativi che riguardano le membrane in sé per sé, in quanto rappresentano un processo fisico che non va a modificare le proprietà del fluido da trattare: sono igienicamente sicure perché non rilasciano sostanze indesiderate nei fluidi trattati. Tuttavia in passato questi vincoli hanno pesato enormemente sulla diffusione delle tecnologie di membrana. La legislazione presente, a livello internazionale ed in particolare nazionale, spesso detta precise disposizioni sui fluidi da trattare, che a volte possono essere particolarmente pericolosi a causa di alte concentrazioni di sostanze tossiche, e sullo smaltimento degli effluenti prodotti a valle del trattamento, rappresentando questo un limite pratico ed economico molto spesso determinante nella scelta o meno della tecnologia. Per fare un esempio, il latte microfiltrato fino a poco tempo fa¹⁵ non poteva essere commercializzato in quanto precise norme imponevano che esso fosse pastorizzato solo per via termica e non “meccanica”, nonostante in questo caso il latte mantenga le sue proprietà nutritive, a differenza di quanto accade nella pastorizzazione classica. Tuttavia, le normative vigenti non valorizzano a pieno il processo di microfiltrazione, in quanto, pur consentendolo, prevedono comunque la presenza di un trattamento termico abbinato.
- Barriere economiche: dal confronto tra tecnologie tradizionali e a membrana (tabella 7) emerge come nel loro complesso le tecnologie a membrana presentano vantaggi sia in termini di costi che ambientali. E’ pur tuttavia da considerare che le membrane, nel trattamento di reflui (AV, siero di latte, waste dei comparti produttivi, etc) andrebbero confrontate con le tecnologie di smaltimento previste dalla normativa, alle quali tuttavia si ovvia spesso con lo smaltimento illegale (a basso/nullo costo). In questo caso la tecnologia è percepita come un “costo aggiuntivo“ ed è quindi facilmente intuibile come sia preferito lo smaltimento illegale piuttosto che il trattamento con sistemi a membrana, anche se spesso a pagarne le spese è l’ambiente circostante.

Altro elemento che contrasta la diffusione di questa tecnologia è rappresentato dal fatto che l’addebito alle industrie dei costi dell’acqua non sempre corrisponde all’effettivo quantitativo consumato: questo fa sì che ci sia scarso interesse a riutilizzare le acque e quindi all’adozione di tecnologie adatte a tale scopo, come gli impianti a membrana.

¹⁵ A seguito di vicende giudiziarie che coinvolsero aziende produttrici di latte, si è resa possibile la commercializzazione del latte microfiltrato mediante l’emanazione dei seguenti decreti:

- **Decreto 17 giugno 2002**: Trattamento di microfiltrazione nel processo di produzione del latte alimentare;

- **Decreto 27 giugno 2002**: Etichettatura del latte fresco;

- **Decreto 20 agosto 2002**: Rettifica al Decreto Ministeriale 27 giugno 2002 relativo alla etichettatura del latte fresco.

- Barriere gestionali: l'introduzione di impianti a membrana in sistemi industriali consolidati spesso richiedono una riorganizzazione del processo produttivo, nonché lo stanziamento di capitali dedicati: procedure interne possono allungare i tempi di riorganizzazione se non bloccare l'intero progetto, anche a causa di eventuali altre priorità, che magari prospettano un ritorno economico più immediato e consistente, sulle quali investire gli stessi capitali.
- Barriere finanziarie: un ostacolo alla diffusione della tecnologia a membrana è rappresentato anche dall'assenza, sia a livello nazionale che locale, di incentivi di finanziamento o sgravi fiscali da parte delle autorità, che, nel momento in cui un'azienda stabilisce il proprio piano di investimento, costituirebbero un elemento determinante in tale direzione.

NOTE sugli AUTORI

Massimo Pizzichini è responsabile di ricerca presso l'ENEA (senior scientist). E' uno dei maggiori esperti nazionali nel campo delle tecnologie separative mediante membrane. Dal 1997 è iscritto nell'albo nazionale dei Valutatori Scientifici del Ministero dell'Università e Ricerca (MUR) e del Ministero dello Sviluppo Economico (MSE). Ha curato gli aspetti scientifici del presente studio, predisponendone i contenuti e contribuendo alla definizione dell'impostazione.

Claudio Russo è ricercatore junior; opera presso il laboratorio di tecnologie separative mediante membrane del CR Casaccia dell'ENEA. Ha contribuito alla predisposizione dei contenuti ed alla supervisione scientifica dello studio.

Ennio Ferrero è responsabile scientifico del tema di ricerca "*Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali*" nell'ambito dell'Accordo di Programma tra il Ministero dello Sviluppo Economico e l'ENEA; ha collaborato all'impostazione dello studio ed ha curato l'inquadramento dello stesso nell'ambito delle attività relative al citato tema di ricerca.

Esmeralda Tuccimei collabora con il Centro Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Architettura CITERA dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza"; ha redatto il presente documento curando gli approfondimenti legati all'identificazione delle barriere alla diffusione della tecnologia anche con il contributo degli operatori del settore.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C., Russo, UTS Biotec, “*A new membrane process for the selective fractionation and total recovery of polyphenols, water and organic substances from vegetation waters (VW)*”, *Journal of Membrane Science*, 288, 2007, pag. 239-246.
- [2] M. Pizzichini, Spadoni, C., Russo, P., Tasselli, “*Tecnologie di Processo per il recupero e la valorizzazione delle componenti del siero di latte*”, Pubblicazione ENEA ISBN:88-8286-138-4 Ed. Primaprint (VT) 2007.
- [3] M. Pizzichini, A., Iasonna, M., Rosi, F. Ruscio (1997) “*Innovazione tecnologica nell'industria lattiero casearia*”, *Energia Ambiente Innovazione*, Ed. ENEA 1: 43-57.
- [4] M. Cheryan “*Ultrafiltration Handbook*”, Chapter 8, Membrane Properties; Technomic Publishing Comp. Inc. (1986).
- [5] M., Pizzichini, R., Montani, C., Russo, ENEA Casaccia-Divisione Biotecnologie e Agricoltura, “*Il siero di latte: rifiuto o materia prima per prodotti alimentari, cosmetici e farmaceutici?*”, Rapporto tecnico ENEA RT/INN/2001/5.
- [6] M., Pizzichini, C., Russo, ENEA, UTS Biotecnologie, Protezione della salute e degli ecosistemi, “*Prodotti ad alto valore biologico dal siero di caseificazione*”, *AGRIculture*, n° 3, 05-08/2003, pag. 15-19.
- [7] M. Pizzichini, G. Z., F.J. Comendator and all (1995) “*Recupero di sieroproteine e acqua depurata dalla scotta ovina con tecnologie di membrana*”, *Scienza Lattiero Casearia* 46, pag. 361-379.
- [8] M., Pizzichini, C. Russo, E. Ballista, C. Di Meo, ENEA, UTS Biotecnologie, Protezione della salute e degli ecosistemi, C. Martella, Cartiera Lucchese, “*Depurazione dei reflui della Cartiera Lucchese con processi a membrana*”, *Industria della Carta*, anno 42, n. 7, ottobre 2004, pag. 70-81.
- [9] M., Pizzichini, C. Russo, ENEA, UTS Biotecnologie, Protezione della salute e degli ecosistemi, “*Il riutilizzo delle acque di scarico di cartiera*”, Report ENEA, *Energia, Ambiente e Innovazione*, 4/2004, anno 50, 07-08/2004, pag. 83-85.
- [10] M., Pizzichini, C. Russo, E. Ballista, UTS Biotec, “*Depurazione dei reflui di cartiera con processi a membrana*”, *Acqua&Aria*, n.1, gennaio 2005, pag. 52-55.
- [11] P. Di Franco, M. Pizzichini, M. Rizzello, C. Russo, ENEA C.R. Casaccia, “*Nuove tecnologie a membrana nei processi di disinchiostrazione della carta da macero*”, Studio ENEA 05-10 2004, ISBN 88-8286-117-1, pag. 35-90.

- [12] M. Pizzichini, C. Russo, C. Di Meo, UTS Biotec, *“Purification of pulp and paper wastewater, with membrane technology, for water reuse in a closet loop”*, Desalination, 178, 2005, pag. 351-359.
- [13] Anonimus, *“Cost-effective Membranes Technologies for Minimising Wastes and Effluents”*, Guide by Environmental Technology best Practice Programme (WS Atkins Consultants Ltd. 1997).
- [14] M. Pizzichini, C. Russo, ENEA Casaccia-Divisione Biotecnologie ed Agricoltura, *“Confronto fra le tecnologie dissalative dell’acqua di mare”*, Acqua & Aria N°4 Aprile 2002.
- [15] M. Pizzichini, C. Russo, ENEA, UTS Biotecnologie, Protezione della salute e degli ecosistemi, *“Energie rinnovabili e processi a membrana per la dissalazione dell’acqua”*, Report ENEA, Energia, Ambiente e Innovazione, 5/2002, anno 48, 09-10/2002, pag. 41-54.

ALLEGATO 1

TABELLA DELLE APPLICAZIONI IN CAMPO INDUSTRIALE DELLA TECNOLOGIA A MEMBRANE

Settore industriale- merceologico	Applicazione	OI	NF	UF	MF	
Aeroportuale	Recupero liquido antigelo		X			
	Riduzione COD acque di scarico	X				
	Recupero acqua antincendio	X		X		
Alimentare	Concentrazione bianco d'uovo	X				
	Purificazione bianco d'uovo		X			
	Concentrazione gelatina			X		
	Trattamento acque da lavorazione olive (AV)				X	
	Trattamento di amido di patata	X				
	Chiarificazione di aceto di vino				X	
	Acque di lavaggio resine zuccherine	X				
	Decolorazione salamoia da ortaggi			X		
	Riutilizzo di acqua lavaggio bottiglie	X				
	Riduzione COD di condense	X				
	Riduzione COD di acque lavaggio ortaggi			X		
	Riduzione COD di acqua lavaggio lattine	X				
Automobilistico	Recupero vernice cataforetica			X		
	Recupero solvente vernice cataforetica	X				
Bevande (birra)	Dealcolizzazione	X				
Bevande (caffè)	Concentrazione di estratto di caffè	X	X			
Bevande (succhi)	Decolorazione succo di mela			X		
	Concentrazione succo di mela	X				
	Concentrazione succo d'arancio	X				
	Concentrazione succo di pomodoro	X				
	Concentrazione sciroppo d'acero	X				
	Bevande (vino)	Concentrazione mosto	X			
		Rimozione acido acetico	X			
Dealcolizzazione		X				
Trattamento acque reflue					X	
Chiarificazione prima dell'imbottigliamento					X	
Biotecnologico	Concentrazione e purificazione penicillina		X			
	Dissalazione antibiotici		X			
	Concentrazione e purificazione eparina		X			
	Trattamento reflui	X				
Cartario	Trattamento acque madri solfito		X			
	Riciclo acque Kork		X			
	Produzione MDF, trattamento refluo secondario, scarico O	X				
	Produzione MDF, trattamento WWTP, scarico O	X				
Chimico	Riduzione COD acque bianche		X			
	Concentrazione acido acetico	X				
	Concentrazione di acido clavulanico		X			
	Rimozione Na ₂ PO ₄ per produzione amido		X			
	Tratt. acqua di scarico da esametileneformammide	X				
	Concentrazione acido nitrico	X				
	Purificazione optical brighteners			X		
	Purificazione alcoli a basso peso molecolare		X			
Concentrazione alcool isobutilico	X					
Chimico-Plastiche	Recupero catalizzatore (Fe) per produzione PVC		X			
Coloranti	Dissalazione coloranti		X	X		

Accordo di Programma MSE-ENEA:
Tecnologie separative mediante membrane

	Trattamento coloranti in sospensione			X	
Conciario	Riutilizzo acque di scarico	X	X		
	Concentrazione tannino		X	X	
Depurativo	Riduzione COD in trattamento terziario	X	X	X	X
	Rimozione fluoruri	X			
Discariche	Trattamento percolato	X		X	
Elettronico	Acqua ultrapura	X		X	
	Purificazione soluzioni di processo	X			
Energia	Trattamento condensato	X			
Farmaceutico	Acqua USP23	X			
	Acqua per dialisi	X			
	Pretrattamento distillazione per WFI	X			
	Polishing acqua ultra pura - rimozione pirogeni			X	
	Concentrazione di mezzi di contrasto per raggi X		X		
	Purificazione di Destrano			X	
	Purificazione e concentrazione intermedi		X		
	Dissalazione antibiotici		X		
Fotografico	Riduzione COD acque di scarico		X		
	Purificazione acque stampa per riutilizzo		X		
Galvanico	Recupero metalli pesanti	X	X		
Lattiero-caseario	Recupero salamoie				X
	Trattamento siero	X	X	X	X
	Standardizzazione latte			X	
	Concentrazione latte	X	X		
	Rimozione COD da condense	X			
Minerario	Recupero rame da acqua di scarico		X		
	Recupero uranio da acqua di scarico		X		
	Recupero zinco da acque di scarico		X		
	Purificazione di soluzioni acide per riutilizzo		X		
Potabilizzazione	Trattamento terziario per riutilizzo		X		
	Decolorazione			X	X
	Addolcimento acque di pozzo e di mare		X		
	Rimozione nitrati	X			
	Debatterizzazione			X	X
Petrolchimico	Concentrazione glicoli	X	X		
	Trattamento acque di scarico da lavorazione gas			X	
Trattamento superfici	Trattamento reflui sgrassaggio			X	
	Rottura e concentrazione emulsioni oleose			X	
	Separazione Al da soluzione H3PO4		X		
	Concentrazione soluzione H2SO4	X			
	Recupero vernice cataforetica			X	
	Recupero vernice anaforetica			X	
	Purificazione liquidi penetranti			X	
	Trattamento acque di lavaggio per riutilizzo			X	
Tessile	Recupero acqua di lavaggio da tintura lana	X			
	Decolorazione bagni tintura		X	X	X
	Recupero acqua da trattamento secondario	X	X		
	Riduzione COD e colore acqua di scarico		X		
	Riduzione COD acqua di lavaggio lana greggia			X	
	Recupero lanolina e sericina			X	
Zucchero	Chiarificazione sugo greggio da barbabietola o canna			X	X
	Recupero acque da circuito di raffreddamento	X	X		
	Purificazione glucosio da "corn wet milling"		X		
	Decolorazione soluzioni zuccherine			X	
	Concentrazione soluzioni zuccherine	X	X		
	Separazione mono-disaccaridi		X		
	Trattamento rigeneranti da decolorazione con resine		X		