

3.6. Separació per tecnologia de membranes

Els sistemes de membranes estan fonamentats en **processos fisicoquímics** que permeten separar part dels sòlids (en suspensió o dissolts) continguts a la fracció líquida dels purins o dels digerits líquids de dejeccions, en una o diverses etapes. Dels sistemes de separació per membrana se'n generen dues fraccions líquides amb diferents característiques: una fracció més diluïda que passa a través de la membrana (**permeat**) i conté menor càrrega de sòlids de mida més petita, principalment dissolts, i una fracció més concentrada que es reté a la membrana (**concentrat**) i conté una major càrrega de sòlids, tant dissolts com en suspensió. Els sistemes de filtració per membranes requereixen d'una etapa prèvia de separació mecànica sòlid-líquid, o bé de filtració per membrana amb una mida de pas superior, de les dejeccions o digerits a tractar.



3.6.1. Fonament científic-tècnic

Els sistemes de membranes habitualment estan configurats amb més d'una etapa de separació instal·lades de forma seqüencial. Cada etapa de separació per membrana permet fraccionar progressivament sòlids més petits i difícils de separar. Els tipus de membranes que actualment es poden trobar integrades en un sistema de tractament de dejeccions o digerits, de forma més habitual, són les membranes de microfiltració, ultrafiltració, nanofiltraació i osmosi (Figura 3.6.1). Són membranes que permeten filtrar els efluent líquids amb l'aplicació de més o menys pressió, i que tenen mides de pas de partícules i/o molècules que poden anar des de les 10 micres fins a dècimes de nanòmetre. Existeixen altres tipus de sistemes de membranes que són capaços de separar sòlids dissolts de mida extremadament petita i amb característiques químiques específiques. Aquest seria el cas dels sistemes d'electrodiàlisi, que integren membranes polars i són de gran utilitat per a eliminar salinitat d'efluents prèviament filtrats. L'electrodiàlisi s'utilitza poc per a tractar dejeccions o digerits degut a la necessitat d'aplicar un important potencial elèctric pel seu funcionament. També seria el cas dels contactors de membranes, que són sistemes que permeten separar un component gasós de l'efluent líquid. L'ús dels contactors de membranes per a tractar purins i digerits està enfocat a extreure al màxim el contingut de nitrogen amoniacal que aquests efluent contenen.



Les membranes de microfiltració i ultrafiltració són capaces de concentrar molècules i partícules amb mides per sobre d'entre 0,01-10 micres i 0,01-0,1 micres, respectivament (Figura 3.6.1). Aquesta grandària es correspon amb els sòlids en suspensió, partícules col·loïdals, microorganismes, macromolècules orgàniques (proteïnes, carbohidrats), i certs minerals (per exemple argiles). Les pressions a les que necessiten treballar els sistemes de membrana per a filtrar els efluents a aquesta mida de pas són de 0.1 a 5 bar. Les membranes de nanofiltració tenen propietats intermèdies, entre les d'ultrafiltració i les d'osmosi inversa, i permeten arribar a la separació d'ions divalents (molècules d'entre 1nm i 0,01 micres). En el cas de les membranes d'osmosi, el principi de separació canvia considerablement ja que les membranes són permeables majoritàriament a l'aigua però és necessari utilitzar una pressió osmòtica o mecànica de fins a 150 bar pel seu funcionament. Amb les membranes d'osmosi s'aconsegueixen separar compostos orgànics més petits com els tanins, àcids orgànics, polifenols, pesticides, fàrmacs, etc. (Kovacic et al. 2022) ja que les mides de pas són inferiors a 1 nm.

Considerant les característiques mencionades anteriorment, la configuració d'un sistema de filtració per membranes per a tractar dejeccions i/o digerits dependrà de diversos factors, com per exemple la qualitat del permeat a la que es vol arribar (apte per fertirrigació, abocar a llera, reutilització, etc.), el tipus i càrrega de sòlids que es volen separar de l'efluent a tractar (nutrients, patògens, fàrmacs, etc.), la viabilitat tecnològica, etc. Independentment de la configuració seleccionada però, tots els sistemes de membranes requereixen d'un protocol de neteja específic per a eliminar l'embrutiment de les membranes i allargar la vida útil de les mateixes. En el cas dels sistemes de membranes que tracten dejeccions ramaderes o digerits, les estratègies de neteja han de ser freqüents i eficients per minimitzar la pèrdua de producció de permeat causat pel ràpid l'embrutiment i formació d'incrustacions a les membranes. Les neteges de les membranes es realitzen mitjançant l'ús d'agents químics que se seleccionaran en funció de la naturalesa de l'embrutiment i del tipus de membrana emprat (àcids, bases, detergents, biocides, etc.) .

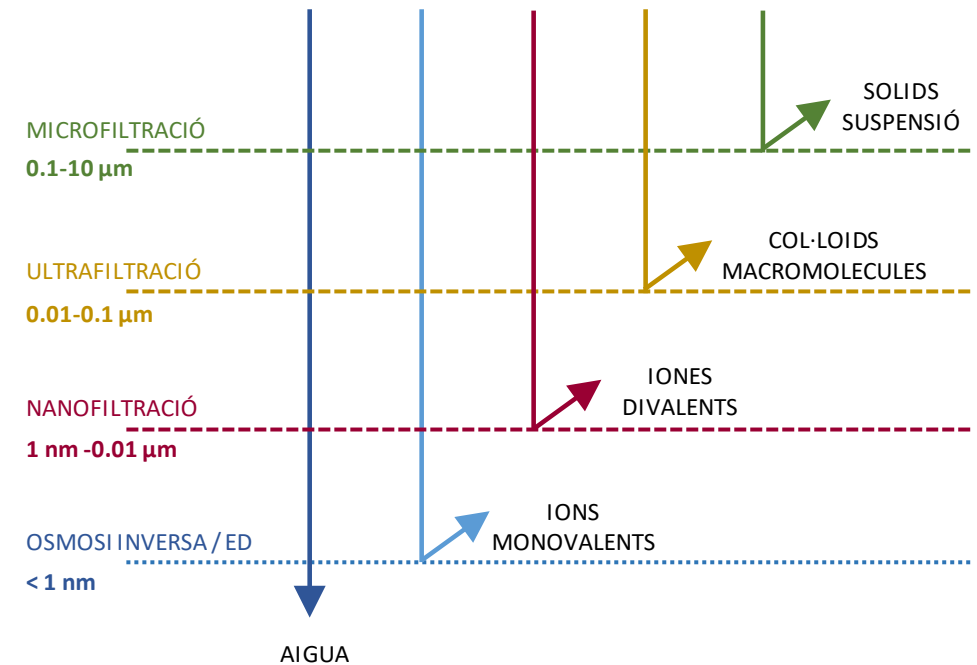


Figura 3.6.1. Tipus de separació per membranes segons la mida de porus

¹ Kovacic et al. (2022). Digestate Management and Processing Practices: A Review. Applied Sciences, 12, 9216.

² Shi, X., Tal, G., Hankins, N. P., & Gitis, V. (2014). Fouling and cleaning of ultrafiltration membranes: A review. Journal of Water Process Engineering, 1, 121-138.

Tant la configuració com les condicions d'operació dels sistemes de filtració varien en funció del tipus de membrana emprat. Els sistemes d'osmosi són els més complexos en termes de configuració de la instal·lació i les condicions d'operació. Com s'ha mencionat anteriorment, els sistemes d'osmosi poden operar amb pressió osmòtica o pressió mecànica. El sistema d'osmosi convencional és aquell que utilitza el gradient osmòtic com a principi de separació i requereix de l'ús d'una solució salina per a generar la pressió osmòtica necessària. En el sistema d'osmosi inversa, en canvi, s'utilitza una pressió mecànica per a realitzar el procés de filtració. En aquest segon cas, el sistema és més intensiu en termes energètics i escurça la vida útil de les membranes. Com a contrapartida, permet tractar fluxos d'efluents més elevats, evitant retorns salins i afavorint l'aprofitament de les salmorres, minimitza l'embrutiment de les membranes i disminueix la necessitat de fer un manteniment freqüent del sistema.

Les membranes poden estar fabricades de diferents materials que se seleccionen en funció de l'aplicació específica, de la naturalesa de l'efluent a tractar, i de les condicions d'operació (pressió principalment). La Taula 3.6.1 mostra les diferents característiques dels sistemes de membranes emprats per a tractar purins i digerits, tant d'aquells més convencionals com són la microfiltració, ultrafiltració, nanofiltració i osmosi inversa, com d'aquells més emergents (electrodialisi i contactors de membranes). Les membranes fabricades amb polímers sintètics són les més emprades pel tractament de dejeccions i digerits.

Taula 3.6.1. Classificació de les membranes comercials aplicades pel tractament de purins i digerits³

Tipus	Mida de pas [nm]	Permeabilitat [L m ⁻² h ⁻¹ bar ⁻¹]	Pressió [bar]	Material	Configuració	Separació de components
MF	100 – 10000	>1000	0.1 – 2.0	PS PVDE Al ₂ O ₃ Ceràmica	Plana, capil·lar	Partícules
UF	2 – 100	10 – 1000	0.1 – 5	PS PES PVDE Cel·lulosa recoberta Acetat de cel·lulosa	Tubular, fibra buida	Sòlids en suspensió, fòsfor particulat, nitrogen, DQO, 99% coliforms, altres macromolècules i ions multivalent en menor grau
NF	0.5 – 2	1.5 – 30	3 – 20			Partícules, macromolècules, ions multivalent, compostos orgànics de petita mida en menor grau
RO	90% rejecció de sal	0.05 – 1.5	5 – 120	TFC Acetat de cel·lulosa	Plana, espiral	Partícules, macromolècules, ions multivalent i monovalent, compostos orgànics de petita mida
FO	90% rejecció de sal	>7	0 (residual del flux)	TFC	Plana, espiral, fibra buida	Partícules, macromolècules, ions multivalent i monovalents, compostos orgànics de petita mida
MC	100 – 10000	n.d.	n.d.	PP PTFE PVDF	Plana, tubular, fibra buida	Ions monovalent i multivalent
ED	200 Da	n.d.	n.d.	Membranes aniòniques/catiòniques	Cel·la d'electrodialisi	Ions monovalent i multivalent

MF: Microfiltració, NF: Nanofiltració, PS: Poliestirè, PVDF: fluorur de polivinil, PES: Polièter sulfona, PP: Polipropilè, PTFE: Politetrafluoroetilè, RO: TFC: composite de pel·licula fina de poliamida, UF: Ultrafiltració

³Camilleri-Rumbau, M. S., Briceño, K., Fjerbæk Søtoft, L., Christensen, K. V., Roda-Serrat, M. C., Errico, M., Norddahl, B. (2021). Treatment of manure and digestate liquid fractions using membranes: opportunities and challenges. International journal of environmental research and public health, 18(6), 3107.

3.6.2. Implementació a la granja

La instal·lació d'un sistema de separació per membrana requereix una infraestructura que protegeixi els equips i proveeixi els elements bàsics pel seu correcte funcionament: electricitat (els sistemes de membranes en general són intensius energèticament), i aigua en condicions (per a la realització de les tasques habituals de neteja de les membranes). A la Taula 3.6.2 es detallen els elements bàsics per a instal·lar i posar en funcionament un sistema de filtració per membrana.

Els equips més emprats pel tractament de purins i digerits són els de microfiltració, ultrafiltració, nanofiltració i òsmosi inversa (Figura 3.6.2). Habitualment s'apliquen una, dues o tres etapes de separació seqüencials per a arribar a concentrar al màxim els nutrients continguts als purins i digerits, tot obtenint un corrent de permeat apte per a diferents usos locals sense requerir el seu transport a llargues distàncies.



Figura 3.6.2. Sistemes de separació per membranes de ultrafiltració (esquerra) i de òsmosi inversa (dreta).

Taula 3.6.2. Elements bàsics pel tractament de purins i digerits amb filtració per membrana

Infraestructures

- Sistema d'emmagatzematge de fracció líquida de purí o digerit per a homogeneïtzar l'entrada de l'efluent a filtrar ja que procedeix d'un sistema previ de separació sòlid-líquid.
- Infraestructura tancada proveïda d'una entrada d'aigua de xarxa, punt de desguàs i potència elèctrica. Aquests elements són necessaris pel funcionament dels equips i les neteges periòdiques de les membranes.
- Sistemes d'emmagatzematge de permeat i concentrat en cas que no s'utilitzin de manera immediata un cop generats.

Equips

- Sistema de pre-tractament per a separar la fracció sòlida del purí o digerit prèviament a l'entrada al sistema de membranes (equip de separació mecànica, de coagulació-floculació, decantació, etc.).
- Bombes d'impulsió per a alimentar el sistema de membranes amb la fracció líquida i per a alimentar cada equip de separació addicional amb el concentrat generat a l'etapa anterior.

Elements de control

- Cabalímetres per a monitoritzar els volums d'efluent tractats, tant a l'entrada com a la sortida de cada equip de membranes.
- Comptador de consum elèctric per a conèixer el cost de funcionament de cada equip de membranes en termes energètics.
- Manòmetres per a monitoritzar les pressions d'operació a cada equip de membrana.

Additius i altres materials

- Agents químics de neteja de membranes per a realitzar tasques de manteniment i eliminar l'embrutiment d'aquestes.
- Agents precipitants. Productes coagulants i floculants necessaris en cas que el sistema de membranes requereixi d'una etapa prèvia de pre-tractament.

3.6.3. Eficiència del tractament

L'eficiència d'un sistema de filtració per membranes es mesura per la distribució de nutrients entre el permeat i el concentrat. Per conèixer aquesta relació cal quantificar els cabals de purins d'entrada, així com el del concentrat i permeat de sortida, i conèixer el contingut de nutrients en aquests tres efluents. Aplicant el sistema d'equacions de la Taula 3.6.3 basat en els balanços de la massa, és possible determinar l'eficiència del sistema entesa com la quantitat de nitrogen que resta al concentrat. Aquest mètode de càlcul també es sol aplicar als sòlids totals.

Taula 3.6.3. Mètode i exemple del càlcul de l'eficiència de tractament d'un equip de membranes

Balanç de masses entre els efluents de permeat i concentrat	Eficiència de tractament
$Q_M = Q_{PR} + Q_{CN}$ $Q_{PR} \times C_{CN} = Q_{PR} \times C_{PR} + Q_{CN} \times C_{CN}$	$\eta = Q_{CN} \times C_{CN} / Q_M \times C_M$
Llegenda Q_M : Cabal d'entrada a l'equip de membranes Q_{PR} : Cabal de sortida de permeat Q_{CN} : Cabal de sortida de concentrat	C_{PR} : Contingut de nutrients/sòlids al permeat C_{CN} : Contingut de nutrients/sòlids al concentrat C_M : Contingut de nutrients/sòlids a la FL de purí η : Eficiència del sistema

Exemple pràctic del càlcul dels balanços i rendiments d'un equip de membranes durant un any d'operació

Informació que disposa el ramader mitjançant el seguiment i les mesures fetes al seu sistema de separació, cabals de fracció líquida de purí tractats i concentrat obtinguts:

$Q_M = 3.500 \text{ m}^3/\text{any}$ i $Q_{CN} = 1.050 \text{ m}^3/\text{any}$ (equivalents a 3.605 t/any i $1.081,5 \text{ t/any}$ tenint en compte una densitat mitja de la FL de purí i el concentrat de $1,030 \text{ t/m}^3$)

Exemple de composició del purí tractat i del concentrat obtingut d'un equip de microfiltració:

Composició	FL Purí	Concentrat
Matèria seca (%)	4,95	6,60
Matèria orgànica (%)	70,7	60,3
Nitrogen total (kg/ m³,t)	4,63	3,12
Fòsfor (kg/ m³,t)	0,98	1,06
Potassi (kg/ m³,t)	2,29	2,11

El rendiments dels equips de filtració per membrana, tant en termes de nutrients com de sòlids, depenen de diversos factors de la mateixa manera que ho fan els sistemes de separació (secció 3.1). Per tant, les característiques del purí d'entrada, l'equip de separació emprat prèviament o el tipus de membrana instal·lat a l'equip de filtració són alguns dels factors rellevants que influeixen en la distribució de nutrients i sòlids entre els efluents de concentrat i permeat obtinguts dels equips de membranes. A la Taula 3.6.4 es presenten alguns rangs de referència dels rendiments de separació de diferents components en funció del tipus de membrana.

Resultats

Rendiment volumètric de l'equip: $\eta = \frac{1050 \text{ m}^3/\text{any}}{3500 \text{ m}^3/\text{any}} \times 100 = 30 \%$

Rendiment màssic de l'equip: $\eta = \frac{1081,5 \text{ t/any}}{3605 \text{ t/any}} \times 100 = 30 \%$

Rendiment màssic del nitrogen (N), fòsfor (P) i potassi (K), entesa com la proporció de N, P i K que es distribueix al concentrat, d'acord amb la fórmula: $\eta = \frac{Q_{CN} \times C_{CN}}{Q_M \times C_M}$

Element	Fórmula	η (%)
Nitrogen	$\frac{1.050 \text{ m}^3/\text{any} \times 3,12 \text{ kg/t}}{3.500 \text{ m}^3/\text{any} \times 4,63 \text{ kg/m}^3}$	20,2
Fòsfor	$\frac{1.050 \text{ m}^3/\text{any} \times 1,06 \text{ kg/t}}{3.500 \text{ m}^3/\text{any} \times 0,98 \text{ kg/m}^3}$	32,4
Potassi	$\frac{1.050 \text{ m}^3/\text{any} \times 2,11 \text{ kg/t}}{3.500 \text{ m}^3/\text{any} \times 2,29 \text{ kg/m}^3}$	27,6

En resum, aquest sistema de filtració distribueix al concentrat més del 20% del nitrogen, del 32% del fòsfor i un 27,6% de potassi.

Taula 3.6.4. Rendiments de separació de diferents components en funció del tipus de membrana

Campos, E., Illa, J., Magrí, A., Palatsi, J., Solé, F., & Flotats, X. (2004). *Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. Generalitat de Catalunya–Departamento de medio ambiente–Agencia de residuos de Catalunya. España-Lleida, 31.*

Paràmetre	Osmosi inversa	Nanofiltració	Ultrafiltració	Microfiltració
Cabal	80 – 85 %	75 – 80 %	70 – 80 %	65 – 70 %
ST		55 %	47 %	40 %
SV		80 %	68 %	50 %
SST	100 %	100 %	100 %	95 – 100 %
SSV	100 %	100 %	100 %	95 – 100 %
STS			19 %	
DQO _t			84 %	
DQO _s			51 %	
NTK			18 %	
N-NH ₄ ⁺			13 %	
CE	85 – 90 %		5 %	

Nota: ST: sòlids totals, SV: sòlids volàtils, SST: sòlids en suspensió totals, SSV: sòlids en suspensió volàtils, STS: sòlids dissolts totals, DQOt: demanda química d'oxigen total, DQOs: DQO soluble, NTK: Nitrogen total, N-NH4+: Nitrogen amoniacal, CE: conductivitat elèctrica.



3.6.4. Ús agronòmic dels productes

Tal com s'ha comentat prèviament, els productes obtinguts durant el tractament de la fracció líquida de purí i digerit mitjançant sistemes de membranes són:

- Un producte líquid concentrat en nitrogen, fòsfor i matèria orgànica.
- Un producte líquid diluït denominat permeat caracteritzat per alt contingut en aigua i una concentració més moderada de nutrients.

Les característiques dels productes obtinguts dependran en gran mesura de la composició de l'efluent líquid de partida (digerit o purí) i del tipus de sistema de membranes aplicat durant el tractament (ús individual o cascada). La Taula 3.6.5 mostra les característiques de los productes obtinguts durant el tractament de purí i digerit mitjançant tecnologies de membranes.

Els productes obtinguts durant el tractament del purí o digerit mitjançant sistemes de membranes poden ser utilitzats directament en agricultura a causa del seu alt valor agronòmic. En el cas del producte concentrat el seu elevat contingut en nutrients és interessant per ser aplicat com a fertilitzant orgànic, mentre que el permeat pot ser utilitzat per fertirrigació en camps de cultiu més propers al punt de generació. Encara que l'ús directe del concentrat de RO com a fertilitzant és l'opció més freqüent, l'aplicació de tecnologies de post-tractament com ara stripping d'amoni pot ser considerada com una alternativa per recuperar altres productes amb valor agronòmic com el sulfat amònic¹. D'altra banda, l'alta qualitat del permeat obtingut després de l'aplicació de la tecnologia d'osmosi inversa (absència de sòlids en suspensió, col·loïdes, bacteris i virus) evidencia el potencial d'aquest producte per ser reutilitzat a la pròpia instal·lació industrial com a aigua recuperada, reduint així el consum d'aigua dolça.

Taula 3.6.5. Característiques dels productes obtinguts durant el tractament de purí i digerit mitjançant tecnologies convencionals de membranes.
Centre Tecnològic BETA. Universitat de Vic – Universitat Central de Catalunya (Dades no publicades).
Vega, E., Paredes, L., Marks, E.A., Singla, B., Castaño-Sánchez, O., Casas, C., Vilaplana, R., Mora, M., Ponsá, S., Llenas, L. (2022). Application of Vibrating Reverse Osmosis Technology for Nutrient Recovery from Pig Slurry in a Circular Economy Model. *Membranes*, 12(9), 848.
Bolzonella, D., Fatone, F., Gottardo, M., Frison, N. (2018). Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full-scale applications. *Journal of Environmental Management*, 216, 111-119.

Efluent	Tecnologies	Producte concentrat				Producte diluït o permeat			
		Sòlids Totals (%)	Sòlids Volàtils (%)	Nitrogen Total (g N/kg)	Fòsfor Total (g P/kg)	Sòlids Totals (%)	Sòlids Volàtils (%)	Nitrogen Total (g N/kg)	Fòsfor Total (mg/kg)
FL Purí porcí	Microfiltració	6,6	4,0	3,1	1,1	4,2	3,3	5,3	0,95
FL Purí porcí	Osmosi inversa	6,9	3,7	8,0	1,9	<0,1	< 0,1	0,46	< 0,5
Digerit de purí porcí	Ultrafiltració + Osmosi inversa	2,5	1,2	5,3	0,26	<0,1	< 0,1	0,08	< 10
Digerit de purí porcí	Osmosi inversa	4,8	3,4	12,7	0,83	<0,1	< 0,1	1,6	< 0,5
Digerit de fems	Ultrafiltració + Osmosi inversa	3,6	1,5	4,8	0,36	<0,1	< 0,1	<0,1	< 10

¹Fangueiro, D., Snauwaert, E., Provolo, G., Hidalgo, D., Adani, F., Kabbe, C., Bonmatí, A., Brandsma, J. (2017). Mini-Paper–Available Technologies for Nutrients Recovery from Animal Manure and Digestates. EIP AGRI Focus Group on Nutrient Recycling

3.6.5. Control emissions

Els sistemes de membranes en sí no generen emissions quantitativament importants ja que operen sota pressió i a temperatures ambientals. En alguns casos el pH de l'efluent a tractar necessita ser controlat per tal d'afavorir la separació de certs components; aquest seria el cas de la basificació dels purins i digerits per a separar el nitrogen amoniacal en un sistema de contactors de membranes. També seria el cas de l'acidificació dels efluents amb alt contingut en metalls per tal d'afavorir la seva presència als permeats de membrana.



3.6.6. Costos d'inversió i operació

La separació per membranes és una de les darreres tecnologies consolidades pel tractament de les dejeccions ramaderes i els digerits. La seva recent aplicació per aquesta tipologia d'efluents fa que no es disposi d'un anàlisi detallat de costos per a aquest sistema de tractament. La implementació de la tecnologia per membranes tindrà un cost associat principalment a la inversió inicial dels mòduls de membranes, consum elèctric d'aquest i als agents químics utilitzats en el procés de neteja de membranes. Aquest cost inicial pot anar entre 150.000 i 250.000 €. El cost total¹ de la modalitat per cascada dels processos de membranes que inclogui la prèvia separació s'estima en un sistema a escala real entre 4 i 12 € m³.

¹ Campos, E., Illa, J., Magrí, A., Palatsi, J., Solé, F., & Flotats, X. (2004). Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas. Generalitat de Catalunya–Departamento de medio ambiente–Agencia de residuos de Catalunya. España-Lleida, 31.