

# ÍNDICE GENERAL

---



<b>ÍNDICE</b> .....	i
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xxiii
<b>ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS</b> .....	xxix
<b>RESÚMENES</b> .....	xxxv
<b>PREFACIO</b> .....	xliii
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
I.1. OBJETIVOS .....	3
I.2. MOTIVACIÓN.....	4
I.3. CONTRIBUCIÓN .....	5
I.4. TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS .....	6
I.4.1. Materiales de membrana. ....	6
I.4.2. Fundamentos teóricos de los procesos de membrana .....	8
I.4.3. Procesos de membrana .....	8
I.4.4. Aplicaciones de los procesos de membrana.....	10
I.4.5. Ensuciamiento .....	11
I.5. LA ÓSMOSIS INVERSA.....	11
I.6. LA ÓSMOSIS DIRECTA.....	14
I.6.1. Desarrollo histórico .....	15
I.6.2. Procesos de membrana conducidos por ósmosis (ODMP) .....	16
I.6.3. Aplicaciones .....	17
I.6.4. Ventajas e inconvenientes.....	18

I.6.5. Membranas de ósmosis directa.....	19
I.6.6. Configuraciones y módulos de ósmosis directa.....	20
I.6.7. Disoluciones de arrastre .....	23
I.6.8. Modelado de la ósmosis directa.....	24
I.7. DISOLUCIONES DE ALIMENTACIÓN Y ARRASTRE EMPLEADAS. ....	29
I.7.1. Estación depuradora de aguas residuales urbanas .....	29
I.7.2. Fangos de depuración.....	30
I.7.3. Tratamiento del fango .....	31
I.7.4. Escurrido de centrifuga.....	31
I.7.5. Salmuera procedente de fermentación de olivas de mesa .....	33
I.7.6. Agua residual de operaciones de salado de pieles de curtidos para su conservación.....	34
I.7.7. Salmuera de rechazo de proceso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa .....	35
I.7.8. Residuo de proceso de absorción de amoníaco con ácido sulfúrico .....	35
I.8. BIORREACTOR DE MEMBRANAS (MBR) Y BIORREACTOR OSMÓTICO DE MEMBRANAS (OSMBR).....	35
I.8.1. Biorreactor de membranas (MBR).....	35
I.8.2. Biorreactor osmótico de membranas (OsMBR).....	37
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>57</b>
II.1. DISOLUCIONES DE ARRASTRE EMPLEADAS .....	59
II.1.1. Disolución de arrastre simulada o sintética.....	59
II.1.2. Agua residual de la fermentación de la oliva.....	59
II.1.3. Agua residual de operaciones de salazón de pieles de curtidos para su conservación.....	60
II.1.4. Residuo de proceso de absorción de amoníaco con ácido sulfúrico .....	61

---

II.1.5. Salmuera de rechazo de proceso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa .....	62
II.2. DISOLUCIONES ALIMENTO EMPLEADAS.....	63
II.2.1. Agua residual de deshidratación por centrifugación (escurrido de centrífuga).....	63
II.2.2. Fango secundario.....	64
II.2.3. Agua residual sintética de alimentación al OsMBR .....	65
II.3. PLANTAS DE LABORATORIO UTILIZADAS .....	65
II.3.1. Planta de laboratorio de ósmosis directa.....	65
II.3.1.1. Módulo de membranas de tipo plano de ósmosis directa .....	68
II.3.1.2. Membranas de ósmosis directa .....	69
II.3.2. Biorreactor osmótico de membrana (OsMBR) .....	69
II.3.3. Planta de laboratorio con reactor biológico secuencial (SBR).....	72
II.4. Metodología de análisis y equipos analíticos .....	73
II.4.1. pH.....	73
II.4.2. Sólidos totales.....	73
II.4.3. Sólidos volátiles .....	74
II.4.4. Sólidos en suspensión.....	74
II.4.5. Demanda química de oxígeno (DQO) .....	74
II.4.6. Fósforo total .....	75
II.4.7. Nitrógeno amoniacal .....	75
II.4.8. Nitrógeno total .....	76
II.4.9. Determinación de iones.....	76
II.4.10. Microscopio de barrido electrónico (SEM).....	76
II.4.11. Microscopía FESEM y EDX .....	77
II.4.12. Microscopio de fuerza atómica (AFM) .....	78
II.4.13. Medidor de potencial Z .....	78
II.4.14. Separación de la fracción soluble del agua o fango .....	79
II.4.15. Reactivos para limpieza de la planta y de las membranas .....	79

II.4.16. Tiempo de Succión Capilar (TSC) .....	80
II.4.17. Medidor de ángulo de contacto .....	80
II.5. ENSAYOS DE ÓSMOSIS DIRECTA .....	82
II.5.1. Determinación de la presión osmótica de las disoluciones salinas.....	82
II.5.2. Conductividad .....	84
II.5.3. Calibración conductividad vs concentración de NaCl .....	84
II.5.4. Medida experimental de la densidad de flujo de permeado (Jw) ..	84
II.5.5. Medida experimental del flujo inverso de sales (Js).....	85
II.5.6. Cálculo del paso inverso específico de sales .....	85
II.5.7. Cálculo teórico de Jw (flux de agua) .....	85
II.5.8. Cálculo teórico de Js .....	86
II.5.9. Caracterización de las membranas vírgenes .....	86
II.5.10. Limpiezas (protocolos).....	86
II.5.11. Operación del biorreactor osmótico de membrana (OsMBR).....	87
II.5.12. Listado de los ensayos realizados .....	89
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>97</b>
III.1. CARACTERIZACIÓN MEMBRANAS DE ÓSMOSIS DIRECTA.....	99
III.1.1. Densidades de flujo de permeado y paso inverso de sales según la concentración de la disolución de arrastre para cada una de las 3 membranas ensayadas .....	100
III.1.2. Análisis por microscopía SEM y AFM de las membranas vírgenes.....	102
III.1.3. Rugosidad de las membranas .....	108
III.1.4. Ángulo de contacto de las membranas .....	109
III.2. ESTUDIO DE LA APLICACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES DE ALTA SALINIDAD COMO DISOLUCIÓN DE ARRASTRE EN LA CONCENTRACIÓN DEL ESCURRIDO DE CENTRÍFUGA .....	110

III.2.1. Comparación de ensayos utilizando la misma membrana, la misma disolución de arrastre y diferente disolución de alimento.....	111
III.2.1.1. Comparación entre los ensayos 1 y 3, realizados con la misma membrana (HTI-CTA-ES), SFPA como disolución de arrastre y agua desionizada y escurrido de centrifuga como disoluciones de alimento, respectivamente.....	111
III.2.1.2. Comparación entre los ensayos 2 y 4, realizados con la misma membrana (HTI-CTA-ES), SART como disolución de arrastre y agua desionizada y escurrido de centrifuga como disoluciones de alimento, respectivamente.....	114
III.2.1.3. Comparación entre los ensayos 6 y 7, realizados con la misma membrana (HTI-CTA-NW), SART como disolución de arrastre y agua desionizada y escurrido de centrifuga como disoluciones de alimento, respectivamente.....	116
III.2.2. Comparación de ensayos utilizando la misma membrana, la misma disolución de alimento y diferente disolución de arrastre .....	118
III.2.2.1. Comparación entre los ensayos 1 y 2, realizados con la misma membrana (HTI-CTA-ES), agua desionizada como disolución de alimento y SFPA y SART como disoluciones de arrastre, respectivamente .....	118
III.2.2.2. Comparación entre los ensayos 3 y 4, realizados con la misma membrana (HTI-CTA-ES), escurrido de centrifuga como disolución de alimento y SFPA y SART como disoluciones de arrastre, respectivamente .....	120
III.2.2.3. Comparación entre los ensayos 5 y 6, realizados con la misma membrana (HTI-CTA-NW), agua desionizada como disolución de alimento y SFPA y SART como disoluciones de arrastre, respectivamente .....	122
III.2.3. Comparación de ensayos utilizando las mismas disoluciones de alimento y de arrastre y diferente tipo de membrana.....	123
III.2.3.1. Comparación entre los ensayos 2 y 6, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (agua desionizada y SART respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente) .....	124

III.2.3.2. Comparación entre los ensayos 4 y 7, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (escurrido de centrífuga y SART respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente).....	125
III.2.3.3. Comparación entre los ensayos 1 y 5, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (agua desionizada y SFGPA respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente) .....	127
III.2.4. Comparativa densidad de flujo de permeado ( $J_w$ ) y paso inverso de sales ( $J_s$ ) teórico y experimental .....	128
III.3. APLICACIÓN DE LA ÓSMOSIS DIRECTA AL ESCURRIDO DE CENTRÍFUGA UTILIZANDO DISTINTAS DISOLUCIONES DE ARRASTRE EN ENSAYOS DE LARGA DURACIÓN. ....	130
III.3.1. Comparación de los ensayos DES1 y DES3 de larga duración realizados con la misma disolución de arrastre y alimento (salmuera y agua desionizada) pero diferente membrana (HTI CTA NW y AIM).....	132
III.3.2. Comparación de los ensayos DES2 y DES4 de larga duración realizados con la misma disolución de arrastre y alimento (salmuera y escurrido de centrífuga) pero diferente membrana (HTI CTA NW y AIM) .....	136
III.3.3. Comparación de los ensayos RSA1 y RSA5 de larga duración realizados con la misma disolución de arrastre y alimento (RSA y agua desionizada) pero diferente membrana (HTI CTA NW y AIM respectivamente).....	139
III.3.4. Comparación de los ensayos RSA2 y RSA4 de larga duración realizados con la misma disolución de arrastre y alimento (RSA y escurrido de centrífuga respectivamente) pero diferente membrana (HTI CTA NW y AIM respectivamente) .....	144
III.3.5. Comparación de los ensayos RSA6 y RSA7 de larga duración realizados con la misma membrana (AIM), disolución de arrastre (RSA) pero diferente disolución de alimento (escurrido de centrífuga y escurrido de centrífuga acidificada respectivamente).....	153
III.3.6. Comparación de los ensayos DES1 y RSA1 de larga duración realizados con la misma membrana (HTI CTA NW), misma	



disolución de alimento (agua desionizada) y diferente disolución de arrastre (salmuera y RSA respectivamente).....	159
III.3.7. Comparación ensayos de larga duración utilizando la misma membrana (HTI CTA NW) y diferentes disoluciones de alimento y de arrastre (DES1, RSA1, DES2 y RSA2).....	161
III.3.8. Comparación ensayos de larga duración utilizando la misma membrana (AIM) y diferentes disoluciones de alimento y de arrastre (DES3, RSA5, DES4 y RSA6).....	162
III.4. BIORREACTOR OSMÓTICO DE MEMBRANA (OSMBR). .....	164
III.4.1. Ensayo previo (SSLM=14 g/L) .....	164
III.4.2. Ensayo previo (SSLM=5 g/L) .....	167
III.4.3. Ensayo de mayor duración (SSLM=5 g/L) .....	170
III.4.4. Comparación ensayos biorreactor osmótico de membranas .....	174
III.4.5. Comparación ensayos reactor biológico secuencial (SBR) y biorreactor osmótico de membranas (OsMBR).....	175
III.5. ENSAYOS DE CONCENTRACIÓN DE FANGO SECUNDARIO DE EDAR.....	175
III.5.1. Ensayo preconcentración nº1.....	176
III.5.2. Ensayo preconcentración nº2.....	177
III.5.3. Ensayo preconcentración nº3.....	179
III.5.4. Ensayo concentración final.....	180
III.5.5. Comparación ensayos de concentración de fango secundario .....	181
<b>CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES</b> .....	<b>189</b>
IV.1. CONCLUSIONES.....	191
IV.1.1. Caracterización membranas de ósmosis directa.....	191
IV.1.2. Caracterización disoluciones de alimento y de arrastre .....	191
IV.1.3. Estudio de la aplicación de aguas residuales industriales de alta salinidad como disolución de arrastre en la concentración del escurrido de centrífuga.....	193
IV.1.4. Biorreactor osmótico de membrana (OsMBR).....	194
IV.1.5. Ensayos de concentración de fango secundario de EDAR .....	195

IV.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....	195
IV.2.1. Operación del biorreactor osmótico de membranas en ensayos de mayor duración .....	195
IV.2.2. Diseño y construcción planta biorreactor osmótico de membranas (OsMBR) y de ósmosis directa para concentración de nutrientes en escurrido de centrifuga a escala piloto .....	196
IV.2.3. Investigación de nuevos residuos que puedan tratarse mediante ósmosis directa empleándose como disoluciones de arrastre.....	196
IV.2.4. Fabricación de membranas de ósmosis directa .....	196
<b>ANEXO I. CONTRIBUCIONES .....</b>	<b>199</b>
<b>ANEXO II. FICHA TÉCNICA MEMBRANAS .....</b>	<b>203</b>
<b>ANEXO III. PLANTILLA DE CÁLCULO .....</b>	<b>211</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---



## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

<b>Figura I-1.</b> Diagrama del fenómeno de ósmosis directa. ....	14
<b>Figura I-2.</b> Diferentes modos de funcionamiento de los procesos osmóticos. Adaptado de [14].....	16
<b>Figura I-3.</b> Sentido del flujo de agua frente a la presión ( $\Delta P$ ) aplicada según el modo de funcionamiento. Adaptado de fuente: [14].....	17
<b>Figura I-4.</b> Concentración por polarización externa e interna. Fuente: [29] .....	18
<b>Figura I-5.</b> Polarización por concentración interna. a) ICP concentrativa. b) ICP dilutiva. Fuente: [14].....	19
<b>Figura I-6.</b> Configuraciones a) Equicorriente (“co-current”) b) Contracorriente (“counter-current). Fuente: [31] .....	20
<b>Figura I-7.</b> Módulo de placas y marcos (fuente:[33]).....	21
<b>Figura I-8.</b> Módulo de arrollamiento en espiral (desglose). Fuente: [14] .....	22
<b>Figura I-9.</b> Módulos de membrana de tipo tubular .....	22
<b>Figura I-10.</b> Membrana de fibra hueca (corte transversal). Fuente: [34] .....	23
<b>Figura I-11.</b> Presión osmótica generada por diferentes disoluciones de arrastre (cloruro de sodio, cloruro de magnesio, sucrosa y maltosa). Fuente: [36].....	24
<b>Figura I-12.</b> Vista aérea de una Estación Depuradora de Aguas Residuales urbanas. Fuente: EPSAR (Generalitat Valenciana).....	29
<b>Figura I-13.</b> Diagrama estación depuradora de aguas residuales urbanas. Fuente: [40].....	30
<b>Figura I-14.</b> Esquema de una centrífuga. Fuente: [43].....	32
<b>Figura I-15.</b> Aceitunas en salmuera dentro de bidones. ....	33
<b>Figura I-16.</b> Comparación entre sistema convencional de fangos activos y un bioreactor de membranas o MBR. Arriba: proceso de fangos activos. Abajo: bioreactor de membranas. Fuente:2 [53].....	36
<b>Figura I-17.</b> Diagrama de proceso de un biorreactor osmótico de membranas (OsMBR). En este caso con reconcentración de la disolución de arrastre mediante ósmosis inversa. Fuente: [53]....	38
<b>Figura I-18.</b> Evolución del número de artículos publicados sobre biorreactores osmóticos de membrana. ....	40

## CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.

<b>Figura II-1.</b> Diagrama planta piloto de ósmosis directa .....	67
<b>Figura II-2.</b> Planta de ósmosis directa a escala de laboratorio.....	67
<b>Figura II-3.</b> Software “Kern BalanceConnection SCD-4.0” .....	68
<b>Figura II-4.</b> Módulo plano de ósmosis directa modelo CF042-FO de Sterlitech. a) vista general. b) mitad inferior.....	68
<b>Figura II-5.</b> Fotografía biorreactor osmótico de membrana (OsMBR).....	70
<b>Figura II-6.</b> Diagrama biorreactor osmótico de membrana (OsMBR) .....	71
<b>Figura II-7.</b> Reactor biológico secuencial por lotes utilizado en la siembra del biorreactor osmótico (OsMBR).....	72
<b>Figura II-8.</b> Microscopio de Barrido Electrónico (SEM) .....	76
<b>Figura II-9.</b> FESEM y EDX.....	77
<b>Figura II-10.</b> Paneles de control del FESEM.....	77
<b>Figura II-11.</b> Microscopio de fuerza atómica.....	78
<b>Figura II-12.</b> Definición del ángulo de contacto ( $\theta_c$ ). Fuente: [12] .....	80
<b>Figura II-13.</b> Ángulos de contacto y mojabilidad. A la izquierda se representa una superficie hidrofílica mientras que a la derecha se representa una superficie hidrofóbica. Fuente: [13].....	81
<b>Figura II-14.</b> Medidor de ángulo de contacto “Dataphysics OCA20” de Dataphysics Instruments GmbH. ....	81
<b>Figura II-15.</b> Presión osmótica del cloruro sódico según C. Tan [16] .....	82

## CAPÍTULO III. RESULTADOS.

<b>Figura III-1.</b> Correlación conductividad en función de la concentración de cloruro sódico. ....	99
<b>Figura III-2.</b> Densidad de flujo de permeado ( $J_w$ ) en función de la concentración de la disolución de arrastre (NaCl) para cada una de las tres membranas estudiadas. $Q=30$ L/h ( $v=9.37$ cm/s).....	100
<b>Figura III-3.</b> Paso inverso de sales ( $J_s$ ) en función de la concentración de la disolución de arrastre (NaCl) para cada una de las tres membranas estudiadas. $Q=30$ L/h ( $v=9.37$ cm/s). ....	101
<b>Figura III-4.</b> Micrografías SEM de la membrana “HTI CTA NW” virgen. a) cara activa (50 aumentos) b) cara soporte (150 aumentos) c) corte transversal (100 aumentos). ....	102
<b>Figura III-5.</b> Micrografías AFM de la cara activa de la membrana HTI CTA NW virgen. a) Resolución 20x20 micras b) Resolución 5x5 micras....	103

<b>Figura III-6.</b> Micrografías SEM de la membrana “HTI CTA ES” virgen. a) cara activa (200 aumentos) b) cara soporte (200 aumentos) c) sección transversal (750 aumentos).....	104
<b>Figura III-7.</b> Micrografías AFM de la cara activa de la membrana HTI CTA ES virgen. a) Resolución 20x20 micras b) Resolución 5x5 micras.....	105
<b>Figura III-8.</b> Micrografía FESEM de una membrana “Aquaporin Inside” virgen. a) cara activa (20K aumentos) b) cara soporte (5.07K aumentos) c) sección transversal (2.03K aumentos).....	106
<b>Figura III-9.</b> Micrografías AFM de la membrana Aquaporin Inside virgen. a) cara activa y resolución 20x20 b) cara activa y resolución 5x5 c) cara soporte y resolución 20x20 d) cara soporte y resolución 5x5 micras .....	107
<b>Figura III-10.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 1 y 3, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de arrastre (SFPA) y diferente disolución de alimento (agua desionizada y escurrido centrífuga, respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s).....	111
<b>Figura III-11.</b> Micrografías SEM de la cara activa de la membrana tipo “HTI CTA ES” utilizada en los ensayos 1 y 3. Disolución de alimento: agua desionizada y escurrido centrífuga respectivamente. Disolución de arrastre: SFPA ultrafiltrada.....	112
<b>Figura III-12.</b> Micrografía SEM de la cara soporte de la membrana tipo “HTI CTA ES” utilizada en el ensayo 1 y 3 (disolución alimento: escurrido de centrífuga, disolución arrastre: SFPA ultrafiltrada). Aumentos: 150x.....	113
<b>Figura III-13.</b> Evolución de las conductividades de la disolución de arrastre y de alimento con el tiempo para los ensayos 1 y 3, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de arrastre (SFPA) y diferente disolución de alimento (agua desionizada y escurrido centrífuga, respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	113
<b>Figura III-14.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 2 y 4, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de arrastre (SART) y diferente disolución de alimento (agua desionizada y escurrido de centrífuga respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s).....	114
<b>Figura III-15.</b> Evolución de las conductividades de la disolución de arrastre y de alimento con el tiempo para los ensayos 2 y 4, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de	

arrastre (SART) y diferente disolución de alimento (agua desionizada y escurrido de centrífuga respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	115
<b>Figura III-16.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 6 y 7, realizados con la misma membrana (HTI CTA NW), la misma disolución de arrastre (SART) y diferente disolución de alimento (agua desionizada y escurrido de centrífuga respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	116
<b>Figura III-17.</b> Evolución de las conductividades de la disolución de arrastre y de alimento con el tiempo para los ensayos 6 y 7, realizados con la misma membrana (HTI CTA NW), la misma disolución de arrastre (SART) y diferente disolución de alimento (agua desionizada y escurrido de centrífuga respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	117
<b>Figura III-18.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 1 y 2, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de alimento (agua desionizada) y diferente disolución de arrastre (SFPA y SART respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	118
<b>Figura III-19.</b> Evolución de las conductividades de la disolución de arrastre y de alimento con el tiempo para los ensayos 1 y 2, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de alimento (agua desionizada) y diferente disolución de arrastre (SFPA y SART, respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	119
<b>Figura III-20.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 3 y 4, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de alimento (escurrido centrífuga) y diferente disolución de arrastre (SFPA y SART respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	120
<b>Figura III-21.</b> Micrografía FESEM de la cara activa de una membrana en la que se observan precipitados sobre la misma.....	121
<b>Figura III-22.</b> Evolución de las conductividades de la disolución de arrastre y de alimento con el tiempo para los ensayos 3 y 4, realizados con la misma membrana (HTI CTA ES), la misma disolución de alimento (escurrido centrífuga) y diferente disolución de arrastre (SFPA y SART, respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....	121
<b>Figura III-23.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 5 y 6, realizados con la misma membrana	



(HTI CTA NW), la misma disolución de alimento (agua desionizada) y diferente disolución de arrastre (SFPA y SART respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....122

**Figura III-24.** Evolución de las conductividades de la disolución de arrastre y de alimento con el tiempo para los ensayos 5 y 6, realizados con la misma membrana (HTI CTA NW), la misma disolución de alimento (agua desionizada) y diferente disolución de arrastre (SFPA y SART, respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....123

**Figura III-25.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 2 y 6, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (agua desionizada y SART respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....124

**Figura III-26.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de alimento y de arrastre con el tiempo para los ensayos 2 y 6, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (agua desionizada y SART respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....124

**Figura III-27.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 4 y 7, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (escurrido centrífuga y SART respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....125

**Figura III-28.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de alimento y arrastre con el tiempo para los ensayos 4 y 7, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (escurrido centrífuga y SART respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....126

**Figura III-29.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para los ensayos 1 y 5, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (agua desionizada y SFPA respectivamente) y diferente membrana (HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente). Q=65 L/h (v=20 cm/s). .....127

**Figura III-30.** Evolución de la conductividad de las disoluciones de alimento y de arrastre con el tiempo para los ensayos 1 y 5, realizados con la misma disolución de alimento y arrastre (agua desionizada y SFPA respectivamente) y diferente membrana

(HTI CTA ES y HTI CTA NW respectivamente). Q=65 L/h (20 cm/s). .....	128
<b>Figura III-31.</b> Evolución densidad de flujo de permeado (Jw) a lo largo del tiempo. Membranas: “HTI CTA NW” y “AIM”. Disolución alimento: agua desionizada. Disolución arrastre: salmuera. Q=30 L/h (v=9.37cm/s). .....	132
<b>Figura III-32.</b> Evolución conductividades disoluciones de alimento y de arrastre a lo largo del tiempo. Membranas: “HTI CTA NW” y “AIM”. Disolución alimento: agua desionizada. Disolución arrastre: salmuera. Q=30 L/h (v=9.37cm/s).....	133
<b>Figura III-33.</b> Comparación entre los pasos específicos de sales (PIES) de los ensayos DES1 (membrana “HTI CTA NW”) y DES3 (membrana “AIM”) para varios cationes. Disolución de alimento: agua osmotizada. Disolución de arrastre: salmuera. ....	135
<b>Figura III-34.</b> Comparación entre los pasos específicos de sales (PIES) de los ensayos DES1 (membrana “HTI CTA NW”) y DES3 (membrana “AIM”) para varios aniones. Disolución de alimento: agua osmotizada. Disolución de arrastre: salmuera. ....	135
<b>Figura III-35.</b> Evolución densidad de flujo de permeado (Jw) a lo largo del tiempo. Membranas: “HTI CTA NW” y “AIM”. Disolución alimento: escurrido centrífuga. Disolución arrastre: salmuera. Q=30 L/h (v=9.37cm/s). .....	136
<b>Figura III-36.</b> Evolución conductividades disoluciones de alimento y de arrastre a lo largo del tiempo. Membranas: “HTI CTA NW” y “AIM”. Disolución alimento: escurrido centrífuga. Disolución arrastre: salmuera. Q=30 L/h (v=9.37cm/s).....	137
<b>Figura III-37.</b> Evolución densidad de flujo de permeado (Jw) a lo largo del tiempo. Membranas: HTI CTA NW (RSA1) y AIM (RSA5). Disolución alimento: agua desionizada. Disolución arrastre: RSA. Q=30 L/h (v=9.37cm/s). .....	140
<b>Figura III-38.</b> Evolución de la conductividad de las disoluciones de arrastre y alimento a lo largo del tiempo. Membranas: HTI CTA NW (RSA1) y AIM (RSA5). Disolución alimento: agua desionizada. Disolución arrastre: RSA. Q=30 L/h (v=9.37cm/s).....	140
<b>Figura III-39.</b> Paso inverso específico de sales (PIES) para cationes para los ensayos RSA1 y RSA5. Membranas: HTI CTA NW y AIM respectivamente. ....	143

- Figura III-40.** Paso inverso específico de sales (PIES) para aniones para los ensayos RSA1 y RSA5. Membranas: HTI CTA NW y AIM respectivamente. ....143
- Figura III-41.** Evolución densidad de flujo de permeado ( $J_w$ ) a lo largo del tiempo. Membranas: HTI CTA NW (RSA2) y AIM (RSA4). Disolución alimento: escurrido de centrifuga. Disolución arrastre: RSA.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ....144
- Figura III-42.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de arrastre y de alimento a lo largo del tiempo. Membranas: HTI CTA NW (RSA2) y AIM (RSA4). Disolución alimento: escurrido centrifuga. Disolución arrastre: RSA.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ...145
- Figura III-43.** Imagen FESEM de la cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrifuga).....149
- Figura III-44.** Imagen FESEM en la que se muestra la primera área en particular analizada (rectángulo blanco) mediante EDX. Cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrifuga).....150
- Figura III-45.** Espectro EDX del área seleccionada en la Figura III-44. Cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrifuga).....151
- Figura III-46.** Imagen FESEM en la que se muestra la segunda área en particular analizada (rectángulo blanco) mediante EDX. Cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrifuga).....151
- Figura III-47.** Espectro EDX del área seleccionada en la Figura III-46. Cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrifuga).....152
- Figura III-48.** Imagen FESEM en la que se muestra la tercera área en particular analizada (punto blanco) mediante EDX. Cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrifuga).....152

<b>Figura III-49.</b> Espectro EDX del área seleccionada en la Figura III-48. Cara activa de la membrana tipo “Aquaporin Inside” utilizada en el ensayo RSA6 (membrana: “AIM”, disolución de arrastre: RSA, disolución de alimento: escurrido de centrífuga).....	153
<b>Figura III-50.</b> Evolución de las densidades de flujo de permeado (Jw) a lo largo del tiempo para los ensayos RSA6 y RSA7. Membrana: AIM. Disoluciones de alimento: escurrido centrífuga y escurrido centrífuga acidificado (pH 7.3) respectivamente. Disolución arrastre: RSA. Q=30 L/h.....	154
<b>Figura III-51.</b> Evolución conductividades disoluciones de alimento y de arrastre a lo largo del tiempo para los ensayos RSA6 y RSA7. Membrana: Aquaporin Inside. Disolución alimento: escurrido centrífuga acidificado (pH 7.3). Disolución arrastre: RSA. Q=30 L/h. ....	155
<b>Figura III-52.</b> Evolución densidad de flujo de permeado (Jw) a lo largo del tiempo de los ensayos DES1 y RSA1. Membrana HTI CTA NW. Disolución de alimento: agua desionizada. Disoluciones de alimento: salmuera vs sulfato amónico (DES1 y RSA1 respectivamente). Q=30 L/h. ....	160
<b>Figura III-53.</b> Evolución conductividades de alimento y de arrastre a lo largo del tiempo de los ensayos DES1 y RSA1. Membrana HTI CTA NW. Disolución de alimento: agua desionizada. Disoluciones de alimento: salmuera vs sulfato amónico (DES1 y RSA1 respectivamente). Q=30 L/h. ....	160
<b>Figura III-54.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado para los cuatro ensayos comparados (DES1, DES2, RSA1 y RSA2). Membrana: “HTI CTA NW”. Q=30 L/h.....	162
<b>Figura III-55.</b> Evolución de la densidad de flujo de permeado para los cuatro ensayos comparados (DES3, DES4, RSA5 y RSA6). Membrana: “AIM”. Q=30 L/h.....	163
<b>Figura III-56.</b> Evolución temporal de la densidad de flujo de permeado (Jw) y de la conductividad de la disolución de alimento. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 14 g/L. Carga másica: 0.06 gDQO/gSS-d.....	165
<b>Figura III-57.</b> Evolución temporal de la densidad de flujo de permeado (Jw) y de la conductividad de la disolución de arrastre. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 14 g/L. Carga másica: 0.06 gDQO/gSS-d.....	166

- Figura III-58.** Evolución temporal de las densidades de flujo de permeado experimentales y teóricas. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 14 g/L. Carga másica: 0.06 gDQO/gSS-d. ....167
- Figura III-59.** Evolución temporal de la densidad de flujo de permeado (Jw) y de la conductividad de la disolución de alimento. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 5 g/L. Carga másica: 0.12 gDQO/gSS-d.....168
- Figura III-60.** Evolución temporal de la densidad de flujo de permeado (Jw) y de la conductividad de la disolución de arrastre. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 5 g/L. Carga másica: 0.12 gDQO/gSS-d.....168
- Figura III-61.** Evolución temporal de las densidades de flujo de permeado experimentales y teóricas. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 5 g/L. Carga másica: 0.12 gDQO/gSS-d.....169
- Figura III-62.** Evolución temporal de la densidad de flujo de permeado (Jw) y de la conductividad de la disolución de alimento. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 5 g/L. Carga másica: 0.12 gDQO/gSS-d.....170
- Figura III-63.** Micrografía FESEM de la cara activa de la membrana tipo “HTI CTA NW” utilizada en los ensayos del biorreactor osmótico de membranas. a) vista general a pocos aumentos. b) ampliación en donde se observa claramente la suciedad depositada.....171
- Figura III-64.** Micrografía FESEM de la cara soporte de la membrana tipo “HTI CTA NW” utilizada en el biorreactor osmótico de membranas. Aumentos: 92 x.....172
- Figura III-65.** Evolución temporal de la densidad de flujo de permeado (Jw) y de la conductividad de la disolución de arrastre. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 5 g/L. Carga másica: 0.12 gDQO/gSS-d.....172
- Figura III-66.** Evolución temporal de las densidades de flujo de permeado experimentales y teóricas. Ensayo con biorreactor osmótico de membrana (OsMBR). Concentración SSLM: 5 g/L. Carga másica: 0.12 gDQO/gSS-d.....173
- Figura III-67.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo. Ensayo de preconcentración nº1. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART. Q=30 L/h (v=9.37 cm/s). .....176

- Figura III-68.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de arrastre y de alimento con el tiempo. Ensayo de preconcentración nº1. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 177
- Figura III-69.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo. Ensayo de preconcentración nº2. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 178
- Figura III-70.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de arrastre y de alimento con el tiempo. Ensayo de preconcentración nº2. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 178
- Figura III-71.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo. Ensayo de preconcentración nº3. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 179
- Figura III-72.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de arrastre y de alimento con el tiempo. Ensayo de preconcentración nº3. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 180
- Figura III-73.** Evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo. Ensayo de concentración final. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 180
- Figura III-74.** Evolución de las conductividades de las disoluciones de arrastre con el tiempo. Ensayo de concentración final. Membrana: HTI CTA ES. Disolución de alimento: fango secundario EDAR. Disolución de arrastre: sintética imitando SART.  $Q=30$  L/h ( $v=9.37$  cm/s). ..... 181

# ÍNDICE DE TABLAS

---





**CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.**

<b>Tabla I-1.</b> Desarrollo histórico de los materiales para membranas. Fuente: [3].....	7
<b>Tabla I-2.</b> Evolución histórica de los modelos teóricos de los procesos de membrana. Fuente: [3] .....	8
<b>Tabla I-3.</b> Clasificación de los procesos de membrana. Fuente: [3].....	9
<b>Tabla I-4.</b> Clasificación de los procesos de membrana según tamaño de poro de la membrana y presión aplicada. Fuente: adaptado de [3].....	10
<b>Tabla I-5.</b> Hitos históricos en el desarrollo de la ósmosis directa y la ósmosis de presión retardada (Fuentes: [13][14][15]).....	15
<b>Tabla I-6.</b> Composición típica de escurrido de centrífuga. Fuente: [20]......	32
<b>Tabla I-7.</b> Comparativa ensayos con biorreactor osmótico de membranas disponibles en la bibliografía. ....	41

**CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.**

<b>Tabla II-1.</b> Características de la salmuera resultante de la fermentación de la oliva de mesa .....	60
<b>Tabla II-2.</b> Caracterización del agua residual de operaciones de salazón de pieles de curtidos para su conservación. ....	61
<b>Tabla II-3.</b> Caracterización del residuo de proceso de absorción de amoníaco con ácido sulfúrico (sin ajustar pH). ....	62
<b>Tabla II-4.</b> Caracterización del residuo de proceso de absorción de amoníaco con ácido sulfúrico (con el pH ajustado). ....	62
<b>Tabla II-5.</b> Caracterización salmuera de rechazo de proceso de desalación de agua de mar por ósmosis inversa.....	63
<b>Tabla II-6.</b> Características del agua residual de la deshidratación de biomasa digerida mediante centrifugación. ....	64
<b>Tabla II-7.</b> Caracterización fango secundario.....	65
<b>Tabla II-8.</b> Coeficientes osmóticos para corrección de la presión osmótica para el caso concreto del cloruro sódico (m es la molalidad).....	83
<b>Tabla II-9.</b> Listado de ensayos de corta duración. Disoluciones de arrastre: SART y SFPA. Disoluciones de alimento: agua desionizada y escurrido de centrífuga. ....	90
<b>Tabla II-10.</b> Ensayos de larga duración realizados con residuo de sulfato amónico (RSAx) como disolución de arrastre. ....	91

<b>Tabla II-11.</b> Ensayos de larga duración realizados con salmuera de desalación por ósmosis inversa (DESx).....	92
<b>Tabla II-12.</b> Ensayos de larga duración de concentración de fango secundario utilizando una disolución simulada que imita el agua residual del proceso de salado de pieles no curtidas (SART). .....	93
<b>Tabla II-13.</b> Ensayos de media y larga duración realizados con el biorreactor osmótico de membranas, utilizando como disolución de arrastre agua simulada que imita el agua residual del proceso de salado de pieles no curtidas (SART). .....	94

### **CAPÍTULO III. RESULTADOS.**

<b>Tabla III-1.</b> Rugosidades de las caras activas de las membranas de ósmosis directa ensayadas. ....	108
<b>Tabla III-2.</b> Rugosidades de las caras soporte de las membranas de ósmosis directa ensayadas. ....	109
<b>Tabla III-3.</b> Ángulo de contacto de las diferentes membranas de ósmosis directa ensayada.....	109
<b>Tabla III-4.</b> Listado ensayos realizados con SFPA y SART como disolución de arrastre. ....	110
<b>Tabla III-5.</b> Comparación densidad de flujo de permeado y paso inverso de sales teóricos frente a los experimentales. ....	129
<b>Tabla III-6.</b> Ensayos realizados con salmuera de desalación por ósmosis inversa (DESx). ....	131
<b>Tabla III-7.</b> Ensayos realizados con residuo de sulfato amónico (RSAx). .....	131
<b>Tabla III-8.</b> Composición iónica disoluciones ensayos DES1 y DES3. Membranas “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: agua desionizada. Disolución de arrastre: salmuera. ....	134
<b>Tabla III-9.</b> Composición iónica disoluciones de arrastre ensayos DES2 y DES4. Membranas “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: escurrido de centrífuga. Disolución de arrastre: salmuera .....	138
<b>Tabla III-10.</b> Composición iónica disoluciones de alimento de los ensayos DES2 y DES4. Membrana “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: escurrido centrífuga. Disolución de arrastre: salmuera.....	139

<b>Tabla III-11.</b> Composición iónica disoluciones de arrastre de los ensayos RSA1 y RSA5. Membrana “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: agua desionizada. Disolución de arrastre: RSA. ....	141
<b>Tabla III-12.</b> Composición iónica disoluciones de alimento de los ensayos RSA1 y RSA5. Membrana “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: agua desionizada. Disolución de arrastre: RSA. ....	142
<b>Tabla III-13.</b> Ensayo RSA2. Analítica disolución de alimento (escurrido de centrífuga).....	146
<b>Tabla III-14.</b> Composición iónica disoluciones de arrastre de los ensayos RSA2 y RSA4. Membrana “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: escurrido centrífuga. Disolución de arrastre: RSA. ....	147
<b>Tabla III-15.</b> Composición iónica disoluciones de alimento de los ensayos RSA2 y RSA4. Membrana “HTI CTA NW” y “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: escurrido centrífuga. Disolución de arrastre: RSA. ....	148
<b>Tabla III-16.</b> Balance de materia para el fósforo y el nitrógeno en la disolución de alimento (escurrido de centrífuga) de los ensayos RSA2 y RSA4 al inicio y al final del ensayo. ....	149
<b>Tabla III-17.</b> Composición iónica disoluciones de arrastre ensayos RSA6 y RSA7 (acidificado). Membrana “AIM” respectivamente. Disolución de alimento: escurrido de centrífuga. Disolución de arrastre: RSA. ....	156
<b>Tabla III-18.</b> Composición iónica disoluciones de alimento de los ensayos RSA6 y RSA7 (acidificado). Membrana “AIM”. Disolución de alimento: escurrido centrífuga. Disolución de arrastre: RSA.....	157
<b>Tabla III-19.</b> Ensayos RSA6 y RSA7. Analítica disolución de alimento (escurrido de centrífuga) .....	158
<b>Tabla III-20.</b> Balance de materia para nitrógeno y fósforo ensayos RSA6 y RSA7 .....	159
<b>Tabla III-21.</b> Comparación ensayos de concentración. Densidades de flujo de permeado inicial y finales y duración del ensayo. ....	182
<b>Tabla III-22.</b> Comparación ensayos de concentración. Conductividades de las disoluciones de arrastre y alimento inicial y finales.....	182
<b>Tabla III-23.</b> Sólidos totales ensayos de concentración de fango secundario EDAR .....	183

<b>Tabla III-24.</b> Relaciones de concentración de sólidos totales y de volúmenes de los ensayos de concentración de fango secundario de EDAR.....	184
---	-----