

# ÍNDICE

<b>I. DESALACIÓN DE AGUAS SALOBRES POR NANOFILTRACIÓN</b>	<b>1</b>
1. Aguas salobres naturales	3
1.1. Contenido iónico	5
1.2. Otros constituyentes de las aguas salobres	8
2. Desalación	8
2.1. Importancia de la desalación en la actualidad	9
2.2. Técnicas de desalación	10
3. Fundamentos de las operaciones de separación con membranas	13
3.1. Parámetros que definen el rendimiento de la membrana	13
3.2. Fenómeno osmótico	14
3.3. Polarización de la concentración	15
3.4. Ensuciamiento	16
4. Nanofiltración	19
4.1. Características de las membranas	19
4.1.1. Carga superficial de la membrana	20
4.2. Mecanismos de separación	21
4.2.1. Efecto de exclusión estérica	21
4.2.2. Efecto de exclusión electrostática	21
4.2.3. Efecto de exclusión dieléctrica	23
5. Bibliografía	25
<b>II. MODELADO DE PROCESOS DE NANOFILTRACIÓN</b>	<b>29</b>
1. Modelización de la polarización de la concentración	32
2. Modelos de transporte	35
2.1. Modelos fenomenológicos basados en termodinámica irreversible	35
2.1.1. Modelo de Spiegler-Kedem	35
2.2. Modelos mecánicos basados en la ecuación de Nernst-Planck.	36
2.2.1. Modelo de carga fija	37
2.2.2. Modelo de carga espacial	38
2.2.3. Modelo DSPM (Donnan Steric-Partitioning Pore Model)	38
2.2.4. Modelos con efectos dieléctricos	39
3. Modelado del reparto iónico entre la disolución y la membrana	41
4. Parámetros de los modelos de nanofiltración	42
4.1. Radio de poro ( $r_p$ )	42
4.2. Espesor efectivo ( $\Delta x/A_k$ )	43

4.3. Constante dieléctrica en el poro ( $\epsilon_p$ )	43
4.4. Densidad de carga de la membrana ( $X_d$ )	44
5. Aspectos a desarrollar en el modelado de procesos de nanofiltración	45
6. Descripción del modelo de nanofiltración utilizado	45
6.1. Modelización de la polarización de la concentración	45
6.2. Transporte del disolvente a través de la membrana	46
6.3. Transporte iónico a través de la membrana	47
6.4. Descripción del equilibrio de reparto	48
7. Bibliografía	50
<b>III. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>55</b>
<b>IV. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>59</b>
1. Planta piloto experimental	61
1.1. Módulo de membrana	64
2. Membrana utilizada	66
3. Modo normal de operación	66
3.1. Seguimiento del proceso	68
4. Ensayos previos para la determinación de condiciones de operación	69
4.1. Determinación del volumen total de la planta piloto	69
4.2. Selección de la velocidad de flujo óptima	70
5. Puesta en marcha y mantenimiento de la planta	74
6. Métodos analíticos	75
6.1. Conductividad	75
6.2. pH	76
6.3. Concentración de iones	76
6.4. Concentración de hidratos de carbono	78
6.5. Concentración de ácido húmico	78
7. Reactivos utilizados	79
8. Programa de cálculo	80
9. Bibliografía	81
<b>V. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES PERMEOSELECTIVAS DE LA MEMBRANA</b>	<b>83</b>
1. Introducción	85
2. Metodología	86
2.1. Ensayos de permeabilidad al agua	86

2.2. Ensayos con disoluciones monosalinas	86
2.3. Ensayos con mezclas de tres iones	87
2.4. Ensayos con mezclas de cuatro iones	88
2.5. Ensayos con iones en baja concentración	89
3. Discusión de resultados	90
3.1. Ensayos de permeabilidad al agua	90
3.2. Ensayos con disoluciones monosalinas	92
3.2.1. Influencia del tipo de sal en el rechazo iónico	92
3.2.2. Influencia de la concentración en el rechazo iónico	96
3.2.3. Influencia de la presión en el rechazo iónico	97
3.2.4. Influencia del tipo de sal, la concentración y la presión en la densidad de flujo de permeado	98
3.3. Ensayos con mezclas de tres iones	101
3.3.1. Influencia de la adición de un coion en el rechazo iónico	101
3.3.2. Influencia de la composición de la alimentación en el rechazo iónico	107
3.3.3. Influencia de la concentración de la alimentación en el rechazo iónico	113
3.3.4. Influencia de la presión en el rechazo iónico	115
3.3.5. Influencia de la composición, concentración y presión en la densidad de flujo de permeado	118
3.4. Ensayos con mezclas de cuatro iones	119
3.4.1. Influencia de la adición de un coion en el rechazo iónico	119
3.4.2. Influencia de la composición de la alimentación en el rechazo iónico	122
3.4.3. Influencia de la concentración en el rechazo iónico	123
3.4.4. Influencia de la presión en el rechazo iónico	125
3.4.5. Influencia de la composición, concentración total y presión en la densidad de flujo de permeado	126
3.5. Ensayos con iones en baja concentración	127
3.5.1. Influencia de la presencia del ion minoritario en la densidad de flujo de permeado	127
3.5.2. Influencia de la presencia del ion minoritario en el rechazo iónico	129
4. Conclusiones	131
5. Bibliografía	133

<b>VI. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO</b>	<b>139</b>
1. Introducción	141
2. Metodología	142
2.1. Estudio de la influencia individual de cada parámetro en los resultados del modelo	142
2.2. Determinación del orden de importancia de los parámetros los resultados del modelo	143
3. Discusión de resultados	144
3.1. Influencia individual de cada parámetro en la densidad de flujo de permeado	144
3.1.1. Radio de poro	144
3.1.2. Espesor efectivo	145
3.1.3. Parámetros de carga y constante dieléctrica	146
3.2. Influencia individual de cada parámetro en el rechazo	147
3.2.1. Radio de poro	147
3.2.2. Espesor efectivo	149
3.2.3. Parámetros de carga	149
3.2.4. Constante dieléctrica	152
3.3. Importancia de los distintos parámetros en las variables de salida del modelo	153
4. Conclusiones	156
5. Bibliografía	157
<b>VII. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE FORMA INDIVIDUAL</b>	<b>159</b>
1. Introducción	161
2. Metodología	164
2.1. Determinación del radio de poro	164
2.2. Determinación del espesor efectivo de la membrana	165
2.3. Determinación de la constante dieléctrica de poro	165
2.3.1. Determinación del punto isoeléctrico de la membrana	165
2.3.2. Selección de los resultados experimentales y ajuste	166
2.4. Determinación de los parámetros de carga de la membrana	166
2.5. Validación de los parámetros del modelo	166
3. Discusión de resultados	167
3.1. Obtención del radio de poro	167
3.2. Obtención del espesor efectivo	169
3.3. Obtención de la constante dieléctrica	170

3.4. Obtención de los parámetros de carga	172
3.5. Validación de los parámetros obtenidos	173
4. Conclusiones	175
5. Bibliografía	176

**VIII. OBTENCIÓN SIMULTÁNEA DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO.  
BÚSQUEDA DE LA MEJOR COMBINACIÓN DE EXPERIMENTOS  
MEDIANTE RESULTADOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN.**

	<b>179</b>
1. Introducción	181
2. Metodología	183
2.1. Definición del grupo de control	185
2.2. Definición de los grupos de caracterización	186
2.3. Definición del rango de parámetros	188
2.4. Obtención del mejor grupo de caracterización	189
2.5. Obtención de los parámetros del modelo	190
2.6. Validación de los parámetros obtenidos	190
3. Discusión de resultados	190
3.1. Evaluación de los grupos de caracterización	190
3.2. Selección de las mejores combinaciones de experimentos para la determinación de parámetros	193
3.3. Determinación de los parámetros del modelo	196
3.4. Validación de los parámetros del modelo	197
4. Conclusiones	202
5. Bibliografía	204

**IX. VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO. COMPARACIÓN  
ENTRE LAS DOS ESTRATEGIAS DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS.**

	<b>207</b>
1. Introducción	209
2. Metodología	209
2.1. Simulación de ensayos con alimentaciones de distinta complejidad	209
3. Discusión de resultados	210
3.1. Cálculo de los ensayos con sales simples	210
3.2. Cálculo de los ensayos con mezclas de tres iones	215
3.3. Cálculo de los ensayos con mezclas de cuatro iones	219
4. Conclusiones	220

<b>X. ESTUDIO DEL EFECTO DEL ENSUCIAMIENTO ORGÁNICO EN LAS PROPIEDADES DE LA MEMBRANA</b>	<b>223</b>
1. Introducción	225
2. Metodología experimental	226
2.1. Caracterización de la membrana	227
2.2. Ensayos de ensuciamiento	227
2.3. Aclarado	228
3. Discusión de resultados	229
3.1. Evolución del rendimiento de la membrana durante los ensayos de ensuciamiento	229
3.1.1. Densidad de flujo de permeado	229
3.1.2. Rechazo iónico	231
3.2. Variación de la composición de la alimentación	235
3.3. Caracterización de los recortes de membrana antes y después de cada ensayo de ensuciamiento	238
3.3.1. Permeabilidad al agua	240
3.3.2. Ensayos con mezcla multiiónica	241
3.4. Influencia del ensuciamiento orgánico en los valores de los parámetros del modelo DSPM con efectos dieléctricos	242
4. Conclusiones	244
5. Bibliografía	245
<b>XI. CONCLUSIONES</b>	<b>249</b>
<b>XII. ANEXO: RESULTADOS COMPLEMENTARIOS DEL CAPÍTULO V</b>	<b>255</b>