

# ÍNDICE





---

<b>RESÚMENES</b> .....	i
<b>PREFACIO</b> .....	ix
<b>NOTACIÓN</b> .....	xiii
<b>CAPÍTULO I. OBJETIVO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO II. JUSTIFICACIÓN</b> .....	5
II.1. JUSTIFICACIÓN.....	7
II.2. BIBLIOGRAFÍA.....	10
<b>CAPÍTULO III. TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA</b> .....	11
III.1. INTRODUCCIÓN A LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA....	13
III.2. CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS.....	15
III.2.1. Mecanismo de separación.....	15
III.2.2. Morfología.....	16
III.2.3. Configuración.....	16
III.2.4. Naturaleza química.....	17
<i>III.2.4.1. Membranas orgánicas</i> .....	17
<i>III.2.4.2. Membranas inorgánicas</i> .....	19
III.3. PARÁMETROS DE OPERACIÓN CARACTERÍSTICOS EN TECNOLOGÍAS DE MEMBRANA.....	21
III.4. MEMBRANAS DE ULTRAFILTRACIÓN.....	22
III.5. ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS.....	23
III.5.1. Tipos y fenómenos de ensuciamiento.....	24
III.5.2. Modelización matemática del ensuciamiento de membranas.....	27
III.6. BIBLIOGRAFÍA.....	31
<b>CAPÍTULO IV. INDUSTRIA LÁCTEA. APLICACIÓN DE PROCESOS DE MEMBRANA</b> .....	35
IV.1. ANTECEDENTES.....	37
IV.2. EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE MEMBRANA.....	38
IV.3. PRODUCCIÓN Y CONSUMO DE PRODUCTOS LÁCTEOS....	43

IV.4. ORIGEN Y COMPOSICIÓN DEL SUERO LÁCTEO.....	46
IV.5. APROVECHAMIENTO INDUSTRIAL DEL SUERO LÁCTEO...	53
IV.6. TÉCNICAS INDUSTRIALES PARA UTILIZACIÓN DEL SUERO LÁCTEO.....	55
IV.6.1. Pretratamiento del suero lácteo.....	55
IV.6.2. Desmineralización del suero lácteo.....	56
IV.6.3. Producción de lactosa.....	56
IV.7. ULTRAFILTRACIÓN DEL SUERO LÁCTEO.....	59
IV.7.1. Ultrafiltración frente a los procesos tradicionales.....	59
IV.7.2. Proceso de ultrafiltración del suero lácteo.....	60
IV.7.2.1. <i>Ensuciamiento de la membrana</i> .....	64
IV.8. BIBLIOGRAFÍA.....	66
<b>CAPÍTULO V. LIMPIEZA DE MEMBRANAS.....</b>	<b>71</b>
V.1. INTRODUCCIÓN.....	73
V.2. MÉTODOS QUÍMICOS.....	74
V.2.1. Agentes químicos de limpieza.....	75
V.3. MÉTODOS FÍSICOS.....	79
V.3.1. Campos electromagnéticos.....	79
V.3.2. Ultrasonidos.....	80
V.4. ETAPAS EN EL PROCESO DE LIMPIEZA.....	82
V.5. CONDICIONES DE OPERACIÓN EN LA ETAPA DE LIMPIEZA.....	85
V.6. CRITERIOS DE EFICACIA.....	86
V.6.1. Criterios químicos.....	86
V.6.2. Criterios físicos.....	87
V.7. APLICACIONES EN LA INDUSTRIA LÁCTEA.....	88
V.8. BIBLIOGRAFÍA.....	90
<b>CAPÍTULO VI. METODOLOGÍA.....</b>	<b>93</b>
VI.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE LABORATORIO DE UF...	95
VI.2. MATERIALES.....	97
VI.2.1. Membranas utilizadas.....	97
VI.2.1.1. <i>Membranas de UF orgánicas UH030 y UP005</i> .....	98

---

VI.2.1.2. Membranas de UF cerámicas Inside Céram.....	98
VI.2.2. Disoluciones modelo.....	100
VI.2.3. Agentes de limpieza empleados.....	101
VI.2.3.1. Hidróxido de sodio (NaOH).....	101
VI.2.3.2. P3 Ultrasil 115.....	102
VI.3. DESCRIPCIÓN DE LAS EXPERIENCIAS.....	103
VI.3.1. Caracterización de las membranas.....	104
VI.3.2. Ensuciamiento de las membranas.....	106
VI.3.2.1. Etapa de ensuciamiento de las membranas.....	106
VI.3.2.2. Determinación del índice de rechazo de las membranas durante la etapa de ensuciamiento.....	106
VI.3.3. Limpieza de las membranas.....	108
VI.3.3.1. Primer aclarado con agua osmotizada.....	109
VI.3.3.2. Etapa de limpieza química.....	109
VI.3.3.3. Segundo aclarado con agua osmotizada.....	111
VI.3.4. Evaluación final de la eficacia de la etapa de limpieza.....	112
VI.3.5. Cuantificación de la cantidad de proteínas sobre la membrana.....	112
VI.3.5.1. Procedimiento de ensuciamiento y limpieza de las membranas.....	113
VI.3.5.2. Análisis mediante FTIR-ATR.....	113
VI.3.5.3. Análisis mediante extracción sólido-líquido.....	115
VI.4. MÉTODOS ANALÍTICOS.....	117
VI.4.1. Análisis de la composición del lactosuero Renylat 45.....	117
VI.4.1.1. Medida del pH y de la conductividad.....	118
VI.4.1.2. Determinación de la lactosa.....	118
VI.4.1.3. Determinación de proteínas.....	121
VI.4.1.4. Determinación de cenizas.....	122
VI.4.1.5. Espectrofotometría de IR Milco-Scan FT 6000.....	123

VI.4.1.6. <i>Cromatografía iónica</i> .....	124
VI.4.2. Otras técnicas de análisis.....	126
VI.4.2.1. <i>Medida del tamaño de partícula</i> .....	127
VI.4.2.2. <i>Medida del potencial Z</i> .....	128
VI.4.2.3. <i>Análisis microscópico: microscopio de fuerza atómica</i> .....	129
VI.4.2.4. <i>Medida del ángulo de contacto</i> .....	130
VI.5. BIBLIOGRAFÍA.....	131
<b>CAPÍTULO VII. RESULTADOS. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEMBRANAS Y DISOLUCIONES MODELO</b> .....	<b>133</b>
VII.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MEMBRANAS.....	135
VII.1.1. Permeabilidad de la membrana.....	135
VII.1.2. Resistencia intrínseca de la membrana.....	139
VII.1.3. Análisis superficial de las membranas orgánicas.....	139
VII.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS DISOLUCIONES MODELO.....	141
VII.2.1. Concentración, composición, pH y conductividad.....	142
VII.2.2. Tamaño de partícula y potencial Z.....	143
VII.3. BIBLIOGRAFÍA.....	147
<b>CAPÍTULO VIII. RESULTADOS. ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS ORGÁNICAS</b> .....	<b>151</b>
VIII.1. ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS.....	153
VIII.1.1. Densidad de flujo de permeado.....	154
VIII.1.2. Ajuste de los datos experimentales al modelo de Hermia.....	158
VIII.1.3. Cálculo de resistencias.....	161
VIII.1.4. Coeficientes de rechazo.....	164
VIII.1.5. Ángulo de contacto de las membranas tras ser ensuciadas y limpiadas.....	165
VIII.2. CUANTIFICACIÓN DE PROTEÍNAS SOBRE LA MEMBRANA.....	166
VIII.3. BIBLIOGRAFÍA.....	172

---

<b>CAPÍTULO IX. RESULTADOS. EFICACIA DE LOS PROCESOS DE LIMPIEZA DE LAS MEMBRANAS ORGÁNICAS. INFLUENCIA DE LOS US.....</b>	<b>177</b>
IX.1. EFECTO DE LOS US SOBRE LA EHL.....	179
IX.1.1. Aplicación de los US a la disolución química de limpieza.....	180
IX.1.1.1. <i>Ensuciamiento con BSA y limpieza con NaOH.....</i>	180
IX.1.1.2. <i>Ensuciamiento con BSA y limpieza con P3 Ultrasil 115.....</i>	185
IX.1.1.3. <i>Ensuciamiento con BSA/CaCl<sub>2</sub> y limpieza con P3 Ultrasil 115.....</i>	187
IX.1.1.4. <i>Ensuciamiento con Renylat 45 y limpieza con P3 Ultrasil 115.....</i>	189
IX.1.1.5. <i>Ensuciamiento con Renylat 45/CaCl<sub>2</sub> y limpieza con NaOH.....</i>	190
IX.1.2. Aplicación de US sumergiendo el módulo de membranas en el baño de US.....	192
IX.2. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN DEL AGENTE DE LIMPIEZA SOBRE LA EHL.....	196
IX.2.1. Empleo de NaOH.....	196
IX.2.2. Empleo de P3 Ultrasil 115.....	200
IX.3. BIBLIOGRAFÍA.....	208
<b>CAPÍTULO X. RESULTADOS. ENSAYOS CON MEMBRANAS INORGÁNICAS.....</b>	<b>211</b>
X.1. ENSUCIAMIENTO DE LAS MEMBRANAS.....	213
X.1.1. Densidad de flujo de permeado.....	213
X.1.2. Cálculo de resistencias.....	217
X.2. EFECTO DE LOS US SOBRE LA EHL.....	219
X.2.1. Aplicación de US a la disolución química.....	220
X.2.2. Aplicación de US sumergiendo el módulo de membranas en el baño de US.....	222
X.3. COMPARACIÓN ENTRE LAS MEMBRANAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS.....	225
X.3.1. Ensuciamiento de las cuatro membranas.....	225

X.3.2. Eficacia de los procesos de limpieza de las cuatro membranas.....	228
X.4. BIBLIOGRAFÍA.....	233
<b>CAPÍTULO XI. ESTIMACIÓN DE COSTES DE LA ETAPA DE LIMPIEZA.....</b>	<b>235</b>
XI.1. ESTIMACIÓN DE COSTES.....	237
XI.2. BIBLIOGRAFÍA.....	243
<b>CAPÍTULO XII. CONCLUSIONES.....</b>	<b>247</b>
<b>ANEXO I. CONTRIBUCIONES.....</b>	<b>255</b>