

Índice:

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Contribución de la Tesis Doctoral.....	4
1.4. Estructura de la Tesis Doctoral	5
2. ANTECEDENTES	7
2.1. Tecnología de membranas	7
2.1.1. Breve reseña histórica	7
2.1.2. Membranas y procesos de membrana	8
2.1.3. Ventajas e inconvenientes de los procesos de membrana.....	10
2.2. Ultrafiltración.....	11
2.2.1. Breve descripción.....	12
2.2.2. Tipos de membranas y de módulos.....	12
2.2.3. Configuración típica: flujo tangencial.....	14
2.2.4. Ensuciamiento de membranas de ultrafiltración.....	14
2.2.5. Aplicaciones de la ultrafiltración.....	19
3. MODELOS DE ULTRAFILTRACIÓN DINÁMICOS	23
3.1. Modelos no empíricos	23
3.1.1. Modelo de aplicación de la teoría de la ultrafiltración transversal en el caso dinámico.....	24
3.1.2. Modelo de difusión inducido por cizalla aplicado en el caso de la ultrafiltración dinámica	25
3.1.3. Modelo dinámico de Song para la ultrafiltración tangencial.....	27
3.1.4. Modelo dinámico de Bhattacharjee y Bhattacharya para la ultrafiltración controlada por la presión osmótica o por la capa gel indistintamente	29
3.1.5. Modelo dinámico que combina el bloqueo de poros y la formación de capa gel	30
3.1.6. Ecuaciones auxiliares	32
3.2. Modelos semi-empíricos	35
3.2.1. Modelos de Hermia	35
3.2.2. Adaptación de los Modelos de Hermia para flujo tangencial.....	40
3.2.3. Cálculo teórico de los parámetros de los modelos de Hermia adaptados para flujo tangencial.....	42
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
4.1. Plan de trabajo.....	45
4.2. Revisión bibliográfica.....	46
4.3. Planta piloto de ultrafiltración.....	47

4.4. Membranas utilizadas en los experimentos	51
4.5. Productos químicos utilizados en los experimentos	53
4.6. Métodos de análisis y medida	55
4.6.1. Método para la determinación de la curva de evolución de la densidad de flujo de permeado con el tiempo	55
4.6.2. Determinación de la concentración de polietilenglicol (PEG).....	56
4.6.3. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	56
4.6.4. Medida de la conductividad	58
4.6.5. Medida del pH.....	58
4.6.6. Determinación de la densidad y viscosidad de las disoluciones de polietilenglicol (PEG)	58
4.7. Procedimiento experimental.....	59
4.7.1. Ensayos de caracterización de las membranas de ultrafiltración.....	59
4.7.2. Ensayos de ensuciamiento de las membranas de ultrafiltración.....	60
4.7.3. Protocolo de limpieza de las membranas de ultrafiltración.....	63
5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
5.1. Caracterización de las membranas de ultrafiltración.....	65
5.1.1. Determinación de la resistencia intrínseca de la membrana (R_m).....	68
5.1.2. Determinación de la concentración de PEG en el alimento y en el permeado	68
5.2. Datos de partida y cálculos previos.....	70
5.2.1. Densidad del PEG	70
5.2.2. Densidad y viscosidad del agua pura a 25°C	70
5.2.3. Radio equivalente del PEG en función de su peso molecular	71
5.2.4. Coeficiente de difusión del PEG en función de su peso molecular	71
5.2.5. Presión osmótica de una disolución de PEG en agua	71
5.2.6. Presión transmembranal.....	72
5.2.7. Equivalencia entre el caudal de alimentación y la velocidad tangencial dentro del módulo de membrana	73
5.3. Análisis del comportamiento de las membranas en la ultrafiltración de macromoléculas	74
5.3.1. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para la membrana Carbosep M2	74
5.3.2. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para la membrana Tami MSKT.....	80
5.3.3. Influencia de la PTM en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para la membrana Carbosep M2.....	86
5.3.4. Influencia de la PTM en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para la membrana Tami MSKT.....	91
5.3.5. Influencia de la concentración de soluto en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para la membrana Tami MSKT.....	95
5.3.6. Influencia de la temperatura en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para la membrana Tami MSKT.....	100
5.3.7. Índice de rechazo de la membrana al PEG	101

5.4. Aplicación de modelos dinámicos de ultrafiltración no empíricos	107
5.4.1. Modelo de aplicación de la teoría de la ultrafiltración transversal en el caso dinámico.....	107
5.4.2. Modelo de difusión inducido por cizalla aplicado en el caso de la ultrafiltración dinámica	111
5.4.3. Modelo dinámico de Song para la ultrafiltración tangencial.....	116
5.4.4. Modelo dinámico de Bhattacharjee y Bhattacharya para la ultrafiltración controlada por la presión osmótica o por la capa gel indistintamente	121
5.4.5. Modelo dinámico que combina el bloqueo de poros y la formación de capa gel	125
5.4.6. Conclusiones de la aplicación teórica de los modelos dinámicos de ultrafiltración no empíricos	130
5.4.7. Modelo de difusión inducido por cizalla aplicado en el caso de la ultrafiltración dinámica con estimación empírica de la concentración en la capa gel.....	131
5.4.8. Modelo dinámico de Song para la ultrafiltración tangencial con estimación empírica de la concentración en la capa gel.....	137
5.4.9. Conclusiones de la aplicación de los modelos dinámicos de ultrafiltración no empíricos cuando la concentración en la capa gel se estima de forma empírica	141
5.5. Aplicación de modelos dinámicos de ultrafiltración semi-empíricos.....	142
5.5.1. Resultados de la aplicación de los Modelos de Hermia.....	142
5.5.2. Resultados de la aplicación de los Modelos de Hermia adaptados para flujo tangencial.....	154
5.5.3. Resultados de la aplicación de los Modelos de Hermia adaptados para flujo tangencial calculando teóricamente sus parámetros.....	166
5.5.4. Análisis de los parámetros de los modelos	174
6. CONCLUSIONES.....	181
NOTACIÓN.....	185
REFERENCIAS.....	191
RESÚMENES.....	203

Índice de figuras:

Figura 1.	Esquema básico de un proceso de separación con membranas	9
Figura 2.	Niveles de separación en los procesos de membrana gobernados por la presión	10
Figura 3.	Representación esquemática de los procesos de polarización por concentración y formación de capa gel	16
Figura 4.	Representación esquemática de las tres etapas de descenso de la densidad de flujo de permeado con el tiempo	17
Figura 5.	Aplicación de la tecnología de membranas en la industria láctea	20
Figura 6.	Procesado del suero lácteo.....	21
Figura 7.	Mecanismos de ensuciamiento considerados por los modelos: a) modelo de bloqueo completo de poros; b) modelo de bloqueo intermedio de poros; c) modelo de bloqueo estándar de poros y d) modelo de formación de torta.....	36
Figura 8.	Fotografía de la planta piloto de ultrafiltración utilizada en los ensayos.....	47
Figura 9.	Esquema de la planta piloto de ultrafiltración utilizada en los ensayos.....	48
Figura 10.	Fotografía de las membranas de ultrafiltración utilizadas en los ensayos	52
Figura 11.	Densidad de flujo de permeado al agua desionizada en función de la presión transmembranal para la membrana Carbosep M2	66
Figura 12.	Densidad de flujo de permeado al agua desionizada en función de la presión transmebranal para la membrana Tami MSKT	66
Figura 13.	Curva de calibrado de índice de refracción frente a concentración de polietilenglicol.....	69
Figura 14.	Curva de calibrado de la DQO frente a la concentración de polietilenglicol.....	70
Figura 15.	Relación entre el caudal de alimentación y la velocidad tangencial	73
Figura 16.	Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.1 MPa para la membrana Carbosep M2.	75

Figura 17. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.2 MPa para la membrana Carbosep M2	76
Figura 18. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.3 MPa para la membrana Carbosep M2	78
Figura 19. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.4 MPa para la membrana Carbosep M2	79
Figura 20. Influencia de la velocidad tangencial en la densidad de flujo de permeado estacionaria para la membrana Carbosep M2.....	80
Figura 21. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.2 MPa y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK.....	81
Figura 22. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.5 MPa y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK.....	82
Figura 23. Influencia de la velocidad tangencial en la densidad de flujo de permeado estacionaria para una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK.....	83
Figura 24. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.2 MPa y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSTK.....	84
Figura 25. Influencia de la velocidad tangencial en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una presión transmembranal de 0.5 MPa y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSTK.....	85
Figura 26. Influencia de la velocidad tangencial en la densidad de flujo de permeado estacionaria para una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSTK.....	86
Figura 27. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s para la membrana Carbosep M2	87

Figura 28. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 2 m/s para la membrana Carbosep M2	89
Figura 29. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 3 m/s para la membrana Carbosep M2	90
Figura 30. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK.....	92
Figura 31. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK.....	93
Figura 32. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSTK.....	93
Figura 33. Influencia de la presión transmembranal en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSTK.....	94
Figura 34. Influencia de la concentración de soluto en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s y una presión transmembranal de 0.2 MPa para la membrana Tami MSTK.....	95
Figura 35. Influencia de la concentración de soluto en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s y una presión transmembranal de 0.5 MPa para la membrana Tami MSTK.....	96
Figura 36. Influencia de la concentración de soluto en la densidad de flujo de permeado estacionaria para una velocidad tangencial de 1 m/s para la membrana Tami MSTK.....	97
Figura 37. Influencia de la concentración de soluto en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 3 m/s y una presión transmembranal de 0.2 MPa para la membrana Tami MSTK.....	98

Figura 38. Influencia de la concentración de soluto en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una velocidad tangencial de 3 m/s y una presión transmembranal de 0.5 MPa para la membrana Tami MSTK.....	99
Figura 39. Influencia de la concentración de soluto en la densidad de flujo de permeado estacionaria para una velocidad tangencial de 3 m/s para la membrana Tami MSTK.....	100
Figura 40. Influencia de la temperatura en la variación de la densidad de flujo de permeado con el tiempo para una concentración de soluto de 5 g/L, una velocidad tangencial de 1 m/s y una presión transmembranal de 0.5 MPa para la membrana Tami MSTK	101
Figura 41. Influencia de la presión transmembranal en la variación del rechazo con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK	102
Figura 42. Influencia de la presión transmembranal en la variación del rechazo con el tiempo para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK	103
Figura 43. Influencia de la velocidad tangencial y de la presión transmembranal en el rechazo en estado estacionario para una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSTK	104
Figura 44. Influencia de la velocidad tangencial en la variación del rechazo con el tiempo para una presión transmembranal de 0.3 MPa y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSTK	105
Figura 45. Influencia de la concentración de soluto en la variación del rechazo con el tiempo para una velocidad tangencial de 1 m/s y una presión transmembranal de 0.5 MPa para la membrana Tami MSTK.....	106
Figura 46. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.1 para una velocidad tangencial de 1m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	108
Figura 47. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.1 para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	109

Figura 48. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.1 para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	110
Figura 49. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	112
Figura 50. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	113
Figura 51. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	115
Figura 52. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.3 para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	117
Figura 53. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.3 para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	118
Figura 54. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.3 para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	119
Figura 55. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.4 para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	122
Figura 56. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.4 para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	123

Figura 57. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.4 para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	124
Figura 58. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.5 para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	126
Figura 59. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.5 para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	127
Figura 60. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.5 para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	128
Figura 61. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	132
Figura 62. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	133
Figura 63. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSKT.....	134
Figura 64. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSKT.....	135

Figura 65. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSKT.....	136
Figura 66. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.2 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSKT.....	137
Figura 67. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.3 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	138
Figura 68. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.3 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Tami MSKT.....	139
Figura 69. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del modelo que se describe en el apartado 3.1.3 cuando la concentración de la capa gel se estima de forma empírica para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 15 g/L para la membrana Tami MSKT.....	140
Figura 70. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo completo de poros para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	143
Figura 71. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo completo de poros para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	143
Figura 72. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo completo de poros para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	144

Figura 73. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo intermedio de poros para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	145
Figura 74. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo intermedio de poros para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	146
Figura 75. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo intermedio de poros para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	146
Figura 76. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo estándar de poros para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	148
Figura 77. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo estándar de poros para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	148
Figura 78. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo estándar de poros para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5g/L para la membrana Carbosep M2.....	149
Figura 79. Ajuste empírico del Modelo de formación de torta para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	150
Figura 80. Ajuste empírico del Modelo de formación de torta para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	151
Figura 81. Ajuste empírico del Modelo de formación de torta para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	151
Figura 82. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo completo de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	155
Figura 83. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo completo de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	156

Figura 84. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo completo de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	156
Figura 85. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo intermedio de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	157
Figura 86. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo intermedio de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	158
Figura 87. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo intermedio de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	159
Figura 88. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo estándar de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	160
Figura 89. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo estándar de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	161
Figura 90. Ajuste empírico del Modelo de bloqueo estándar de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	162
Figura 91. Ajuste empírico del Modelo de formación de capa gel adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	163
Figura 92. Ajuste empírico del Modelo de formación de capa gel adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	164
Figura 93. Ajuste empírico del Modelo de formación de capa gel adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	164
Figura 94. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del Modelo de bloqueo completo de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	168

Figura 95. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del Modelo de bloqueo completo de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	169
Figura 96. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del Modelo de bloqueo completo de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	170
Figura 97. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del Modelo de bloqueo intermedio de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 1 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	171
Figura 98. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del Modelo de bloqueo intermedio de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 2 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	172
Figura 99. Comparación entre los datos experimentales y las predicciones del Modelo de bloqueo intermedio de poros adaptado para flujo tangencial para una velocidad tangencial de 3 m/s y una concentración de 5 g/L para la membrana Carbosep M2	173

Índice de tablas:

Tabla 1. Clasificación de los procesos de membrana	8
Tabla 2. Especificaciones técnicas de las membranas.....	53
Tabla 3. Características del PEG utilizado en los ensayos	53
Tabla 4. Características del NaOH utilizado en la preparación de las disoluciones de limpieza	54
Tabla 5. Características del NaClO utilizado en la preparación de las disoluciones de limpieza	54
Tabla 6. Condiciones experimentales utilizadas en los ensayos de ultrafiltración con las membranas Carbosep M2	61
Tabla 7. Condiciones experimentales utilizadas en los ensayos de ultrafiltración a temperatura constante con las membranas Tami MSKT	62
Tabla 8. Error cuadrático medio de los ajustes de los Modelos de Hermia a los datos experimentales obtenidos con la membrana Carbosep M2.....	152
Tabla 9. Parámetros resultantes de la aplicación de los Modelos de Hermia en el caso de la membrana Carbosep M2.	175
Tabla 10. Parámetros resultantes de la aplicación de los Modelos de Hermia adaptados para flujo tangencial en el caso de la membrana Carbosep M2.....	176
Tabla 11. Comparación entre las densidades de flujo de permeado iniciales obtenidas experimentalmente con la membrana Carbosep M2 y las resultantes de la aplicación de los Modelos de Hermia.....	177
Tabla 12. Comparación entre las densidades de flujo de permeado iniciales obtenidas experimentalmente con la membrana Carbosep M2 y las resultantes de la aplicación de los Modelos de Hermia adaptados para flujo tangencial.	178
Tabla 13. Comparación entre las densidades de flujo de permeado estacionarias obtenidas experimentalmente con la membrana Carbosep M2 y las resultantes de la aplicación de los Modelos de Hermia adaptados para flujo tangencial.	179