



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER EN INGENIERÍA QUÍMICA

Diseño de un tratamiento para la
reutilización de efluentes secundarios
mediante procesos de membrana
($Q_{\text{producido}}=1920\text{m}^3/\text{d}$)

AUTOR: CARLOS DOMINGO TORNER

TUTORAS: M. AMPARO BES PIÁ Y BEATRIZ ELENA CUARTAS URIBE

Curso Académico: 2019-20

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFM

- Memoria
- Anexos de la memoria
- Planos
- Presupuesto

ÍNDICE DE ABREVIATURAS:

TFM: Trabajo de Fin de Máster

UF: Ultrafiltración

NF: Nanofiltración

UE: Unión Europea

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

RD: Real Decreto

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales

EDARU: Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas

EDARI: Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas

DQO: Demanda Química de Oxígeno

PTM: Presión Transmembranal

PES: Polietersulfona

SST: Sólidos en suspensión totales

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. OBJETIVOS	1
2. JUSTIFICACIÓN	3
3. ANTECEDENTES.....	5
4. LEGISLACIÓN.....	9
4.1. Normativa europea sobre reutilización de aguas	9
4.2. Normativa nacional	10
4.3. Normativa de la Comunitat Valenciana	11
4.4. Comparativa de criterios de calidad a nivel estatal (España), europeo y las recomendaciones de la USEPA	12
4.5. Calidad de agua requerida en diferentes procesos industriales	13
5. LÍNEA DE AGUAS DE LA EDAR	17
5.1. Pretratamiento	17
5.2. Tratamiento primario	17
5.3. Tratamiento secundario	18
5.4. Tratamiento terciario	18
6. PROCESOS DE MEMBRANA	21
7. PROCESOS DE ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVO.....	31
8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL, MATERIALES Y MÉTODOS ANALÍTICOS.....	35
8.1. Adsorción con carbón activo. Ensayos Jar-test	35
8.2. Ensayos de ultrafiltración	36
8.3. Ensayos de nanofiltración	38
8.4. Materiales y métodos analíticos	41
9. RESULTADOS EXPERIMENTALES	49
9.1. Caracterización del efluente secundario.....	49
9.2. Ensayos de adsorción con carbón activo.....	50
9.3. Ensayos de ultrafiltración	56
9.4. Ensayo de nanofiltración.....	59
9.5. Conclusiones de la parte experimental.....	63
10. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE MEMBRANAS	65

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ($Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$)

10.1.	Diseño de la etapa de NF.....	65
10.2.	Diseño de los tanques de mezcla y depósitos.....	68
10.3.	Cálculo del volumen de reactivos para la etapa de limpieza.....	71
10.4.	Selección de elementos de la planta.....	73
10.5.	Cálculos complementarios: gestión del concentrado.....	79
11.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DISEÑADA.....	83
12.	ESTUDIO ECONÓMICO.....	85
12.1.	Energía.....	85
12.2.	Personal.....	87
12.3.	Productos químicos.....	87
12.4.	Mantenimiento.....	88
12.5.	Resumen de los gastos por partida.....	88
13.	CONCLUSIONES.....	91
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	93
15.	ANEXO.....	99
15.1.	Fichas de seguridad.....	99
15.2.	Informe del diseño con la aplicación informática WAVE.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de la línea de aguas de una EDAR modelo. Fuente: Elaboración propia.....	19
Figura 2.	Esquema de funcionamiento de un proceso de membrana.....	21
Figura 3.	Representación esquemática de los rechazos de los procesos de membrana gobernados por la presión.[38].....	25
Figura 4.	Módulo de membranas plano. [41].....	27
Figura 5.	Módulo de membrana tubular. [42].....	27
Figura 6.	Módulo de membrana de fibra hueca. [42].....	28
Figura 7.	Módulo de membrana de arrollamiento en espiral.[43].....	28
Figura 8.	Equipo de Jar-Test de la marca VELD Científica modelo JLT 6.....	35

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ($Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$)

Figura 9. Módulo de membranas Millipore de 300 mL.....	36
Figura 10. Esquema del montaje del módulo de UF de Millipore.....	37
Figura 11. Balanza electrónica de la marca Kern	38
Figura 12. Esquema de la planta piloto de NF utilizada en los ensayos.....	39
Figura 13. Espectrofotómetro DR6000 de HACH	42
Figura 14. Reactivos A, B y C (azul) para el método micro BCA	44
Figura 15. Cubetas del kit de reactivos de DQO de la marca Merck.....	45
Figura 16. Termorreactor TR 300 de Merck.....	46
Figura 17. Fotómetro NOVA 30 de Merck.....	46
Figura 18. Medidor de pH GLP 21+ de Crison	47
Figura 19. Conductímetro GLP 31+ de Crison	47
Figura 20. Turbidímetro de Dinko	48
Figura 21. Rendimiento de eliminación de la DQO con la concentración de C001 para t=1 h y t= 2 h	51
Figura 22. Rendimiento de eliminación de proteínas con la concentración de C001 para t=1h y t=2h	52
Figura 23. Rendimiento de eliminación de carbohidratos con la concentración de C001 para t=1h y t=2h	52
Figura 24. Rendimiento de eliminación de la DQO con la concentración de C002 para t=1 h y t= 2 h	54
Figura 25. Rendimiento de eliminación de proteínas con la concentración de C002 para t=1h y t=2h	55
Figura 26. Rendimiento de eliminación de carbohidratos con la concentración de C002 para t=1h y t=2h	55
Figura 27. Evolución de la densidad de flujo de permeado para la membrana 5 kDa UF (3,7 bar y 200 rpm).....	57
Figura 28. Evolución de la densidad de flujo de permeado para la membrana 100 kDa UF (3,7 bar y 200 rpm).....	57
Figura 29. Permeabilidad hidráulica inicial de la membrana NF270 por duplicado.	60
Figura 30. Variación de J_p con FRV para NF270 (8 bar y $300 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$).	61
Figura 31. Permeabilidad hidráulica final de la membrana NF270	61
Figura 32. Esquema planta NF diseñada	65
Figura 33. Resumen del contenido iónico del agua de alimento en WAVE	67
Figura 34. Válvula BV5095 de la casa VOLT.....	73
Figura 35. Válvula BV5089 de VOLT	73

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de
membrana ($Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$)

Figura 36. Válvula reductora de presión PR4305 de VOLT.....	74
Figura 37. Bomba centrífuga SE1.80.80.15.4.50D.B de Grundfos.....	74
Figura 38. Bomba dosificadora de la casa comercial Denios	75
Figura 39. Agitador vertical de la casa comercial Traxco	75
Figura 40. Sensor de pH de la casa comercial PCE	76
Figura 41. Sensor de nivel LS-10-7479388 de WIKA.....	76
Figura 42. Conductímetro PCE-SM11 de la casa comercial PCE.....	76
Figura 43. Manómetro WIKA para presiones de hasta 10 bar	77
Figura 44. Caudalímetro electrónico SI500 de IFM	77
Figura 45. Sensor de temperatura WTR 280 de la marca PCE	78
Figura 46. Filtro Dim-Spun014 de la casa comercial DimWater Engineering.....	78
Figura 47. Carcasa de filtros de cartucho del grupo Dimasa	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de calidad en España para reutilización de aguas depuradas en procesos industriales. [17]	11
Tabla 2. Parámetros de calidad del agua exigidos en España y por la USEPA para su reutilización. [18][19][20][21].....	12
Tabla 3. Parámetros requeridos del agua utilizada en diversos procesos industriales.	14
Tabla 4. Clasificación de procesos de membrana según la fuerza impulsora	23
Tabla 5. Características de los procesos de membrana gobernados por la presión.[38]	24
Tabla 6. Diferencias entre fisisorción y quimisorción [45]	32
Tabla 7. Concentraciones y masa de carbón activo empleada. Del C001 y C002.	36
Tabla 8. Diluciones para elaboración de recta de calibrado de antrona.....	43
Tabla 9. Caracterización del efluente secundario para ensayos de adsorción y UF	49
Tabla 10. Caracterización del efluente secundario para ensayos de NF.....	49
Tabla 11. Caracterización del agua tras ensayo adsorción al cabo de una hora (GAC C001)	50
Tabla 12. Caracterización del agua tras un ensayo adsorción al cabo de 2 horas (GAC C001)	50
Tabla 13. Caracterización del agua tras ensayo Jar-Test al cabo de una hora (GAC C002).....	53

Diseño de un tratamiento para la reutilización de efluentes secundarios mediante procesos de membrana ($Q_{\text{producido}} = 1920 \text{ m}^3/\text{d}$)

Tabla 14. Caracterización del agua tras un ensayo Jar-Test al cabo de 2 horas (GAC C002)	53
Tabla 15. Caracterización del permeado para la membrana de 100 kDa	58
Tabla 16. Caracterización del permeado para la membrana orgánica de 5 kDa	59
Tabla 17. Caracterización del permeado de la membrana NF270	62
Tabla 18. Tabla resumen de rendimientos de eliminación de las diferentes técnicas ensayadas.....	62
Tabla 19. Parámetros de la membrana NF270-400/34i	66
Tabla 20. Resultados de la simulación en WAVE. Membrana NF270-400/34i.....	68
Tabla 21. Volumen nominal de los tanques de almacenamiento y resumen de sus características	72
Tabla 22. Límites de vertido según la Directiva 91/271/CEE.....	79
Tabla 23. Consumo energético anual de la instalación diseñada	85
Tabla 24. Resumen de la tarifa "Plan 3.0" de Iberdrola para consumos superiores a 15 kW.....	86
Tabla 25. Coste de personal asociado a la operación de la instalación diseñada	87
Tabla 26. Coste de reactivos de la instalación diseñada	88
Tabla 27. Costes asociados al mantenimiento de la instalación diseñada.....	88
Tabla 28. Resumen estudio económico	89

ÍNDICE DE PLANOS

1. Diagrama de flujo de la instalación.....5

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	Presupuesto parcial	1
1.1.	Presupuesto de mano de obra	1
1.2.	Presupuesto equipos, reactivos e instrumentación	1
2.	Presupuesto de inversión de la instalación diseñada.....	5
3.	Presupuesto de ejecución material	7
4.	Presupuesto de ejecución por contrata	8
5.	Presupuesto base de licitación	9

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A 1.	Presupuesto mano de obra	1
Tabla A 2.	Presupuesto de equipos	2
Tabla A 3.	Presupuesto de reactivos	3
Tabla A 4.	Presupuesto de instrumentación	4
Tabla A 5.	Presupuesto de inversión - Mano de obra	5
Tabla A 6.	Presupuesto de inversión - Equipos y elementos de la instalación	5
Tabla A 7.	Presupuesto de ejecución material	7
Tabla A 8.	Presupuesto de ejecución por contrata	8
Tabla A 9.	Presupuesto base de licitación	9