

Universidad de La Laguna

Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología

Departamento de Ingeniería Química y Tecnología Farmacéutica

DISEÑO DE UN PROCESO DE DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UN MATADERO INDUSTRIAL

Grado en Ingeniería Química Industrial



Trabajo de fin de grado realizado por
Arianna Acosta Pérez

Bajo la supervisión del tutor:
Oliver Díaz López

JULIO 2024

Agradecimientos

Quiero expresar mis agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de este Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, agradezco a mi tutor Oliver Díaz López, por su orientación, dedicación y paciencia, y por lograr entender un poquito mi mente, que muchas veces, más de las que me gustaría, se dispersaba pensando en lo que venía después entrando en bucle. Estoy sinceramente agradecida por haber tenido la oportunidad de tenerlo como tutor, por su apoyo constante durante estos últimos meses y por siempre estar dispuesto a ayudar. Sin su ayuda, no habría podido superar esta etapa que finalmente concluye y que recordaré con cariño.

En segundo lugar, por supuesto a mi familia, a mi madre por su comprensión durante estos últimos meses de incertidumbre y a mi hermano por la confianza que todos estos años ha puesto en mí. Han sido un apoyo incondicional constante y que sin el cual me hubiera rendido mucho antes de empezar.

Por último, pero no menos importante a mis amigas, por escucharme, por ayudar a despejarme, por animarme y por alegrarse por mis logros.

Este trabajo no habría sido finalizado sin la ayuda y el apoyo de todas estas personas, a quienes les estaré eternamente agradecida.

Se cierra una etapa muy importante en mi vida.

TFG: **FINALIZADO.**

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. EL SECTOR CÁRNICO EN ESPAÑA Y EN CANARIAS	1
3. NORMATIVA SOBRE LAS AGUAS RESIDUALES	4
3.1. Normativa Europea	4
3.1.1. Directiva 2000/60/ce del parlamento europeo y del consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas... 4	
3.1.2. Directiva del consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Directiva 91/271/CEE.....	5
3.2. Normativa Nacional	7
3.2.1. Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas	7
3.3. Normativa Insular	7
3.3.1. Decreto 372/2023, de 18 de septiembre, por el que se aprueba definitivamente el plan hidrológico insular de la demarcación hidrográfica de Tenerife, tercer ciclo (2021-2027).....	7
4. DESCRIPCIÓN DE UNA INDUSTRIA CÁRNICA	9
5. PRODUCCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN MATADERO	11
5.1. Características del agua residual a tratar	13
5.2. El problema de la sangre.....	14
6. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA Y DE LA GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	15
7. INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE DEPURACIÓN	17
7.1. Parámetros a tener en cuenta en los procesos de depuración	17
7.1.1. Parámetros Físicos:	17
7.1.2. Parámetros Químicos:.....	18
7.1.3. Parámetros Biológicos:	18
7.2. Proceso de depuración biológica	18
7.2.1. Eliminación de materia carbonosa.....	18
7.2.2. Nitrificación	19
7.2.2.1. Nitritación.....	19
7.2.2.2. Nitratación.....	19
7.2.3. Desnitrificación	19
7.2.4. Eliminación de fósforo	20
8. OBJETIVOS DEL PROYECTO	20
9. ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UN MATADERO	20
9.1. Pretratamiento	21
9.1.1. Rejas	21
9.1.2. Tamices.....	22
9.2. Tratamiento secundario	24
9.2.1. Digestión aerobia	24
9.2.1.1. Lodos Activados.....	24
9.2.2. Reactores Secuenciales (SBR)	26

9.2.3.	Biorreactor de Membrana (MBR)	27
9.3.	Digestión anaerobia	29
9.3.1.	Tanque Agitado Continuo (CSTR).....	29
9.3.2.	Lagunas Anaerobias	30
9.3.3.	Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)	31
9.3.4.	Filtros Percoladores.....	33
10.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS.....	34
11.	DISEÑO PRELIMINAR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UN MATADERO.....	38
11.1.	Datos del agua de entrada	38
11.2.	Pretratamiento.....	40
11.3.	Diseño de tratamiento secundario para la eliminación de la materia carbonosa.	41
11.4.	Diseño del tratamiento secundario para la eliminación de nutrientes.....	54
11.5.	Tratamiento de lodos.....	62
12.	CONCLUSIONES.....	68
13.	CONCLUSIONS	68
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	70
	ANEXO I: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE SCHENECK	73
	ANEXO II: RESULTADOS PROCEDENTES DE LA SIMULACIÓN INICIAL	74
	ANEXO III: RESULTADOS CON SST < 10.000 MG/L	77
	ANEXO IV: OPTIMIZACIÓN DEL MBR – VARIANDO TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO	78
	ANEXO V: OPTIMIZACIÓN DEL MBR – VARIANDO CONSIGNA DE OXÍGENO DISUELTO	79
	ANEXO VI: SOLUCIÓN DEL PROCESO: ANAEROBIO + AEROBIO.....	80
	ANEXO VII: SOLUCIÓN DEL PROCESO: ANAEROBIO + AEROBIO + DIGESTOR.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución consumo cárnico en España en la última década (Gov. España, 2022)	2
Figura 2: Consumo sector cárnico España 2022 (Gov. España, 2022)	3
Figura 3: Evolución del consumo cárnico en Canarias Evolución del consumo cárnico en Canarias (Gov. España, 2022)	4
Figura 4: Diagrama de flujo sobre el procedimiento de sacrificio de un matadero cárnico (Canales & Vidal, 2024).....	10
Figura 5: Esquema sobre la generación de agua en mataderos cárnicos (Elaboración propia)	12
Figura 6: Rejas de barra de limpieza mecánica (Metcalf & Eddy)	21
Figura 7: Tamiz estático (Sainz, 2005)	23
Figura 8: Tamiz dinámico o rotativo (Sainz, 2005)	23
Figura 9: Proceso de fangos activos (Sainz, 2005).....	25
Figura 10: Proceso SBR (Sainz, 2005).....	26
Figura 11: Biorreactor de membrana interna o sumergida (López, 2012).....	28
Figura 12: Biorreactor de membrana externa o de flujo lateral (López, 2012)	28
Figura 13: Reactor de tanque agitado (Vázquez et al., 2017)	30
Figura 14: Lagunas anaerobias (Ortiz, 2014)	31
Figura 15: Reactor UASB (Ortiz, 2014).....	32
Figura 16: Filtros percoladores (Noyola et al., 2013)	33
Figura 17: Editor del influente (Biowin)	39
Figura 18: Composición fraccional de las aguas residuales (Biowin)	40
Figura 19: Tamiz tambor rotativo (Taga).....	41
Figura 20: Editor del MBR - Editor de Cassettes (Biowin)	43
Figura 21: Editor del MBR - Editor de consigna de OD (Biowin)	44
Figura 22: Editor del MBR - Editor del ratio (Biowin)	45
Figura 23: Diagrama representativos de las diferentes corrientes utilizados en la simulación (Elaboración propia).....	45
Figura 24: Editor del partidor de caudal (BioWin).....	47
Figura 25: Evolución de los sólidos suspendidos para distintos TRH (A, TRH= 2 h; B TRH= 5 h y C; TRH= 10h) (Elaboración propia).....	48
Figura 26: Evolución de los sólidos suspendidos en valores viables para diferentes TRH (Elaboración propia)	50
Figura 27: Variación del OD a lo largo de distintos TRS (A, TRH= 2 h; B TRH= 5 h y C; TRH= 10h) (Elaboración propia).....	51
Figura 28: Balance de precios en distintos TRH y OD (A, TRH= 2 h; B TRH= 5 h y C; TRH= 10h) (Elaboración propia).....	53
Figura 29: Evolución de las formas de nitrógeno para distintos TRH en horas (Elaboración propia)	55
Figura 30: Evolución del precio para distintos TRH (Elaboración propia).....	56
Figura 31: Variación de las formas de nitrógenos respecto al Oxígeno suministrado (Elaboración propia)	57
Figura 32: Variación del costo energético frente a un aumento de oxígeno en el reactor (Elaboración propia)	57
Figura 33: Diagrama representativo del proceso anaerobio y anóxico (Elaboración propia)	58

Figura 34: Editor del volumen reactor anóxico (BioWin)	59
Figura 35: Modificar el biorreactor a anóxico (BioWin)	59
Figura 36: Evolución de las formas de nitrógeno al añadir un reactor anóxico (Elaboración propia)	60
Figura 37: Evolución del fósforo al añadir un reactor anóxico (Elaboración propia)	60
Figura 38: Variación de ratio en el reactor biológico (BioWin)	61
Figura 39: Variación de las formas de nitrógeno según el ratio (Elaboración propia) ...	62
Figura 40: Incorporación de temperatura del digestor (BioWin)	64
Figura 41: Editor de volumen y volumen libre del digestor (Biowin)	65
Figura 42: Tipos de caldera (BioWin)	66
Figura 43: Selección del uso del biogás generado (BioWin)	67
Figura 44: Diagrama representativo del proceso anaerobio, anóxico y anaerobio (Elaboración propia)	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variación del consumo de carnes frescas 2022 vs 2021 (Gov. España, 2022) ...	2
Tabla 2: Requisitos de los vertidos al medio máximos (Directiva 91/271/CEE, 1991)	6
Tabla 3: Reducciones mínimas de nutrientes antes de verter (Directiva 91/271/CEE, 1991)	7
Tabla 4: Concentración máxima para vertido en alcantarillado (Decreto 372/2023, 2023).	9
Tabla 5: Características generales de aguas residuales procedentes de mataderos (Bustillo-Lecompte et al., 2013).	14
Tabla 6: Consumo de agua y generación de agua residual (Canales & Vidal, 2024)	16
Tabla 7: Ventajas y desventajas de los pretratamientos tratamientos (Elaboración propia)	34
Tabla 8: Ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos (Elaboración propia) ..	35
Tabla 9: Ponderación de los criterios (Elaboración propia)	36
Tabla 10: Puntuación de pretratamiento (Elaboración propia)	36
Tabla 11: Puntuación de tratamiento secundario (Elaboración propia)	37
Tabla 12: Matriz de selección del pretratamiento (Elaboración propia)	37
Tabla 13: Matriz de selección de tratamiento biológico (Elaboración propia)	38
Tabla 14: Datos del influente (Cunha Apatie, 2015)	40
Tabla 15: Dimensiones del Cassette (Veolia)	42
Tabla 16: Propiedades de los módulos (Veolia)	42
Tabla 17: Cantidad típica de módulos (Veolia)	42
Tabla 18: Datos de operación y mantenimiento (O&M), ensayos de Beverwijk (Judd, 2011)	43
Tabla 19: Representación de los valores óptimos del biorreactor (Elaboración propia) 58	
Tabla 20: Valores de caracterización de equipos (Elaboración propia)	62
Tabla 21: Tiempos de residencia del reactor aeróbico y costo energético (Elaboración propia)	62
Tabla 22: Valores del efluente final (Elaboración propia)	62
Tabla 23: Composición promedia de biogás (Monteros et al., 2017).	63

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado presenta un diseño preliminar de un sistema de tratamiento de aguas residuales para un matadero cárnico, se enfoca en optimizar el rendimiento, cumplir con la normativa ambiental y reducir los costos energéticos. En primer lugar, se realiza un análisis las tecnologías disponibles para posteriormente seleccionar la más conveniente. El diseño se inicia con un pretratamiento de un rototamiz y un biorreactor de membranas (MBR), donde se determina que un tiempo de retención hidráulica (HRT) de 15 horas y un tiempo de retención de sólidos (SRT) de 6 días, cumple con la optimización del equipo. Por otro lado, se selecciona una concentración de oxígeno disuelto (DO) de 2 mg/L manteniendo una buena actividad microbiana y controlando el costo energético. Además, se incorpora un reactor anóxico previo al MBR para completar la desnitrificación, eliminando así los nutrientes y cumpliendo con la normativa requerida para el efluente final. Por último, se implementa una línea de tratamiento de lodos que incluye un digestor anaerobio que opera a 35°C para producir la mayor cantidad de biogás, el cual se utiliza en un sistema de cogeneración para generar energía eléctrica y térmica. Los lodos deshidratados se manejan de manera responsable con un contenido de agua reducido al 20%, cumpliendo con las regulaciones ambientales. El sistema incluye un análisis del consumo energético, estimando un consumo de 1,73 kW/m³ de consumo energético por volumen tratado.

ABSTRACT

This Final Degree project presents a preliminary design of a wastewater treatment system for a meat abattoir, focusing on optimising performance, complying with environmental regulations and reducing energy costs. Firstly, an analysis of the available technologies is carried out in order to select the most appropriate one. The design starts with a pre-treatment of a rototank and a membrane bioreactor (MBR), where it is found that a hydraulic retention time (HRT) of 15 hours and a solids retention time (SRT) of 6 days meet the optimisation of the plant. On the other hand, a dissolved oxygen (DO) concentration of 2 mg/L is selected to maintain good microbial activity and control energy costs. In addition, an anoxic reactor is installed upstream of the MBR to facilitate denitrification, thereby eliminating nutrients and complying with final effluent regulations. Finally, a sludge treatment line is implemented that includes an anaerobic digester operating at 35°C to produce as much biogas as possible, which is used in a cogeneration system to generate electrical and thermal energy. The dewatered sludge is treated responsibly, with a water content reduced to 20%, in compliance with environmental regulations. The system includes an energy consumption analysis, which estimates an energy consumption of 1.73 kW/m³ per volume treated.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para la vida en la Tierra y es necesaria para satisfacer las necesidades básicas humanas, como su consumo (el cual aumenta cada año más), la higiene, la agricultura y la industria [1]. El agua, una vez utilizada se contamina con una distintas de sustancias, como detergentes, productos químicos, desechos orgánicos y microorganismos patógenos. Esta contaminación convierte al agua en un residuo que no puede ser devuelto al medio ambiente ni reutilizado, por ello, la depuración del agua es necesaria, ya que reduce la carga contaminante antes de ser vertida, así se consigue proteger la salud pública, preservar los ecosistemas y asegurar que el recurso hídrico esté disponible para futuras generaciones.

En las últimas décadas, se ha extendido más el concepto de regeneración de aguas residuales, que trata en someter al agua residual a distintos procesos para conseguir una calidad determinada y que pueda ser o devuelto al medio o reutilizada, como por ejemplo para el riego, limpieza de calles o la recarga artificial de acuíferos [2]. Los procesos de depuración y regeneración deben garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales europeas, nacionales o según la provincia que corresponda, donde se establecen los estándares de calidad que necesita tener el agua antes de devolverlas al dominio público [3]. Se debe comentar que estos procesos no solo son aplicables al agua residual doméstica, también es aplicable al agua residual industrial. Las aguas industriales, según los procesos en los que intervenga el agua, pueden contener contaminantes como metales, aceites, productos químicos u otros tóxicos.

Una de las industrias que necesita de especial atención es la industria cárnica, debido a la alta carga contaminante que generan, por lo que es necesario la depuración de las aguas producidas, para poder cumplir con la normativa establecida [4]. La gestión de las aguas residuales en mataderos cárnicos puede ir desde el pretratamiento hasta el tratamiento terciario, teniendo en cuenta factores como, la ubicación de la industria, el destino final del agua tratada (efluente) y la aplicación de tecnologías de depuración [4].

2. EL SECTOR CÁRNICO EN ESPAÑA Y EN CANARIAS

El sector cárnico en España es una parte significativa de la economía del país, en 2022 contaba con aproximadamente 2.800 empresas, según la Asociación Nacional de Industrias de la Carne de España [5]. La industria cárnica se centra en actividades como mataderos, salas de despiece e industrias de productos elaborados, que está compuesto por pequeñas y medianas empresas, normalmente estas se encuentran ubicadas en zonas rurales, debido a los olores y ruidos procedentes de los animales [5].

España es uno de los principales productores y exportadores de carne a Europa, y tiene una larga experiencia en producción ganadera y cárnica. Algunos grupos han conseguido posicionarse como líderes a nivel europeo, un ejemplo es el grupo Vall Companys, que en el 2021 fue líder en el sector porcino, siendo los primeros en cuanto a su facturación, la cual fue de 3.000 millones de euros en España [6], y, ocupó el puesto 22 a nivel

Europeo [7]. Ese año España pasó al tercer mayor productor de carne de porcino, por detrás de China y Estados Unidos y, superando a Alemania por primera vez [5].

En la Tabla 1 se muestra el consumo de carne fresca en los últimos años en España. La categoría carne fresca incluye los siguientes tipos: carne de vacuno, carne pollo, carne de ovino/caprino, carne de cerdo, carne conejo, otras carnes frescas (avestruz, pavo, resto de carnes frescas no contempladas anteriormente como despojos ternera, de pollo, cordero, cerdo, y otras procedencias). Como se observa, el consumo de carne durante el año 2022 sufrió una disminución del 13,8% en la demanda de carne fresca en comparación al año anterior.

	2022	2021	% Variación 2022 vs 2021
Carne fresca total	1.276.212,11	1.480.540,16	-14%
Carne vacuno	177.344,10	219.762,24	-19%
Carne pollo	486.112,93	558.147,30	-13%
Carne conejo	30.059,24	37.226,08	-19%
Carne ovino/caprino	42.076,99	51.673,46	-19%
Carne cerdo	398.189,15	446.307,21	-11%
Carne despojos	29.302,63	35.080,50	-16%
Otras carnes fresca	113.127,08	132.343,37	-15%

Tabla 1: Variación del consumo de carnes frescas 2022 vs 2021 (Gob. España, 2022)

A nivel individual, cada persona consumió alrededor de 27,59 kilos de carne fresca anualmente, representando una disminución respecto al año 2021 como al 2019 [8].

En la Figura 1, se muestra la evolución del consumo de cárnico en España. Los resultados muestran una tendencia a la baja de consumo lo que está directamente relacionado con el gasto per cápita, a lo largo de años anteriores.

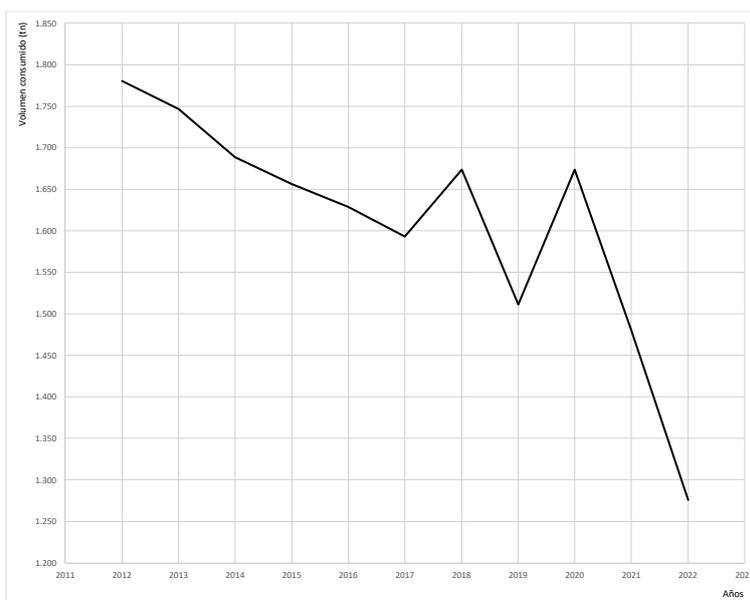


Figura 1: Evolución consumo cárnico en España en la última década (Gob. España, 2022)

Esto puede estar influenciado por factores económicos o por el impacto que tuvo la COVID en la sociedad. Sin embargo, es necesario análisis socio-económicos adicionales para evaluar el posible origen de esta tendencia.

A continuación, se muestra el consumo de carne en España en el 2022, según los distintos tipos de carne, dentro del sector de carne fresca, lideriza la carne de pollo, seguida por la carne de cerdo como la segunda opción más adquirida y la carne de vacuno ocupa la tercera posición según el volumen de compras que se realizaron en ese año [8].

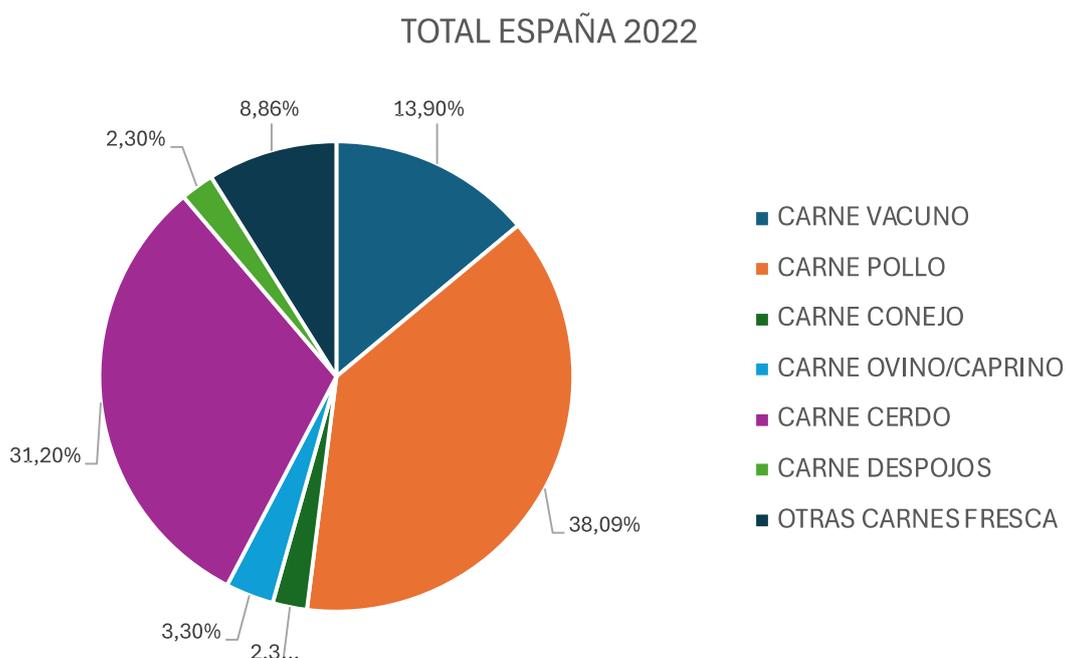


Figura 2: Consumo sector cárnico España 2022 (Gov. España, 2022)

El sector cárnico en Canarias está compuesto sobre todo por pequeñas ganaderas familiares. En términos de exportación, Canarias tiene un alcance limitado en comparación con otras regiones de España debido a las condiciones geográficas, además de la limitación de espacio y recursos. Sin embargo, el sector cárnico es una parte importante de la economía de las provincias. La cría de ganado se concentra principalmente en Gran Canaria, La Palma y Tenerife. La carne de caprino, así como la de pollo y cerdo son las más comunes que se pueden encontrar en las islas. Algunas empresas nacidas en Canarias que han logrado expandirse internacionalmente han sido, Montemar que en 2022 el grupo Vall Company la compró (Grupo Sada) y Montesano, que actualmente el 80% de esta también pertenece al grupo Sada, formada en Tenerife desde hace más de 50 años [9]

La Figura 3 muestra el volumen de carne consumida en Canarias en los últimos años, según el informe del consumo alimentario en España del 2022 [8]. En Canarias, también se puede ver la involución del sector cárnico a lo largo de la última década. A continuación, se puede ver como lideriza el mismo sector cárnico (carne de pollo) que a nivel nacional.

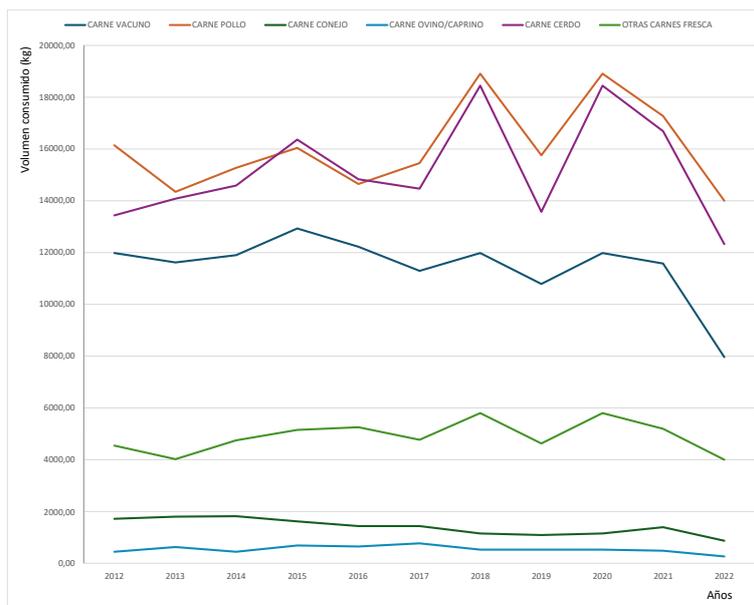


Figura 3: Evolución del consumo cárnico en Canarias Evolución del consumo cárnico en Canarias (Gov. España, 2022)

Dado el gran impacto del sector, es necesario estudiar métodos para tratar las aguas industriales con el fin de reducir su impacto ambiental.

3. NORMATIVA SOBRE LAS AGUAS RESIDUALES

Debido a que el agua es un bien limitado, se debe regular la contaminación que esta puede soportar. Las aguas residuales tienen un alto contaminante orgánico, por tanto, se establece una serie de normativas con el fin de solucionar los efectos negativos que pueda provocar este residuo al medio.

3.1. Normativa Europea

- 3.1.1. Directiva 2000/60/ce del parlamento europeo y del consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

La Directiva Marco del Agua establece unas normas para la protección de las aguas superficiales, continentales, de transición, costeras y subterráneas.

Sus principales objetivos son prevenir el deterioro de las zonas con agua y proteger y mejorar los ecosistemas acuáticos, promover un uso sostenible del agua, garantizar la calidad del agua subterránea, así como, evitar nuevas contaminaciones y controlar las inundaciones y sequía [10].

Cada país miembro debe realizar unos estudios en cada demarcación hidrográfica o en la parte de una demarcación hidrográfica internacional dentro de su territorio. Estos incluyen:

- a) Un análisis de las características de la demarcación hidrográfica.
- b) Un estudio sobre el impacto de la actividad humana en el estado de las aguas superficiales y subterráneas.
- c) Un análisis económico del uso del agua.

Estos análisis deben cumplir con las especificaciones técnicas detalladas en los anexos II y III de la Directiva.

También se establecen estrategias para combatir la contaminación del agua y reducir vertidos, emisiones y pérdidas de sustancias peligrosas prioritarias, según una evaluación de los riesgos realizada de conformidad con el Reglamento (CEE) nº793/93 del Consejo, la Directiva 91/414/CEE del Consejo y la Directiva 98/8/CE del Parlamento europeo y del Consejo, o una evaluación específica basada en los riesgos, según la metodología del Reglamento (CEE) nº793/93, centrada únicamente en la ecotoxicidad acuática y en la toxicidad humana a través del medio acuático [10].

3.1.2. Directiva del consejo, de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Directiva 91/271/CEE.

La Directiva sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas tiene como objetivo principal regular la recogida, el tratamiento y vertido de las aguas residuales urbanas, y, el tratamiento y vertido de las aguas residuales industriales [11].

Las aguas residuales industriales que entren en las instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas necesitarán un tratamiento previo que deben cumplir con los parámetros establecidos en la normativa previa y/o una autorización específica por parte de la autoridad competente o el organismo correspondiente [11].

A continuación, se muestran los valores máximos procedente de las estaciones depuradoras para los vertidos hacia el medio:

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método de medida de referencia
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅ a 20 °C) sin nitrificación (2).	25 mg/l O ₂	70-90 % 40 de conformidad con el apartado 3 del artículo 5 R.D.L. (3).	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Determinación antes y después de cinco días de incubación a 20 °C ± 1 °C, en completa oscuridad. Aplicación de un inhibidor de la nitrificación.
Demanda química de oxígeno (DQO).	125 mg/l O ₂	75	Muestra homogeneizada, sin filtrar ni decantar. Dicromato potásico.
Sólidos en suspensión totales (SST).	35 mg/l (4) 35 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 60 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	90 (4) 90 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (más de 10.000 h-e) (3). 70 de conformidad con el apartado 3 del art. 5 R.D.L. (de 2.000 a 10.000 h-e) (3).	Filtración de una muestra representativa a través de una membrana de filtración de 0,45 micras. Secado a 105 °C y pesaje. Centrifugación de una muestra representativa (durante cinco minutos como mínimo, con una aceleración media de 2.800 a 3.200 g), secado a 105 °C y pesaje.

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(2) Este parámetro puede sustituirse por otro: carbono orgánico total (COT) o demanda total de oxígeno (DTO), si puede establecerse una correlación entre DBO 5 y el parámetro sustituto.

(3) Se refiere a los supuestos en regiones consideradas de alta montaña contemplada en el apartado 3 del artículo 5 del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre.

(4) Este requisito es optativo.

Los análisis de vertidos procedentes de sistemas de depuración por lagunaje se llevarán a cabo sobre muestras filtradas; no obstante, la concentración de sólidos totales en suspensión en las muestras de aguas sin filtrar no deberá superar los 150 mg/l.

Tabla 2: Requisitos de los vertidos al medio máximos (Directiva 91/271/CEE, 1991)

Por otro lado, se debe tener en cuenta, también, el contenido en nutrientes, a continuación, se muestra la tabla de reducción mínima de estos realizadas en zonas sensibles. Según la situación local, se podrá aplicar uno o los dos parámetros. Se aplicarán el valor de concentración o el porcentaje de reducción.

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción (1)	Método da medida de referencia
Fósforo total.	2 mg/l P (de 10.000 a 100.000 h-e). 1 mg/l P (más de 100.000 h-e).	80	Espectrofotometría de absorción molecular.
Nitrógeno total (2).	15 mg/l N (de 10.000 a 100.000 h-e). 10 mg/l N (más de 100.000 h-e) (3).	70-80	Espectrofotometría de absorción molecular.

(1) Reducción relacionada con la carga del caudal de entrada.

(2) Nitrógeno total equivale a la suma del nitrógeno Kjeldahl total (N orgánico + NH), nitrógeno en forma de nitrato (NO) y nitrógeno en forma de nitrito (NO).

(3) Alternativamente el promedio diario no deberá superar los 20 mg/l N. Este requisito se refiere a una temperatura del agua de 12 °C o más durante el funcionamiento del reactor biológico de la instalación de tratamiento de aguas residuales. En sustitución del requisito relativo a la temperatura, se podrá aplicar una limitación del tiempo de funcionamiento que tenga en cuenta las condiciones climáticas regionales. Se aplicará esta alternativa en caso de que pueda demostrarse que se cumple el apartado A).1 del anexo III.

Tabla 3: Reducciones mínimas de nutrientes antes de verter (Directiva 91/271/CEE, 1991)

En esta directiva, se establecen los distintos sectores industriales que pueden adoptar esta directiva:

- a) Industrialización de la leche
- b) Productos elaborados del sector hortofrutícola
- c) Elaboración y embotellado de bebidas sin alcohol
- d) Industrialización de la patata
- e) Industria cárnica
- f) Industria cervecera
- g) Producción de alcohol y de bebidas alcohólicas
- h) Fabricación de piensos a partir de productos vegetales
- i) Fabricación de gelatina y de cola a partir de cueros, pieles y huesos
- j) Almacenes de malta
- k) Industrialización del pescado

3.2. Normativa Nacional

- 3.2.1. Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas

Este Real Decreto-ley tiene por objeto la transposición al ordenamiento interno la Directiva 91/271/CEE anteriormente explicada. [12]

3.3. Normativa Insular

- 3.3.1. Decreto 372/2023, de 18 de septiembre, por el que se aprueba definitivamente el plan hidrológico insular de la demarcación hidrográfica de Tenerife, tercer ciclo (2021-2027).

Establece las medidas a tomar para la gestión de los recursos hídricos en la isla de Tenerife, para garantizar su disponibilidad y calidad del agua y proteger el medio ambiente [13].

Entre sus objetivos se encuentra conseguir el buen estado y adecuada protección del dominio público hidráulico y de las aguas superficiales, subterráneas, así como de las zonas protegidas; satisfacer las demandas de agua con adecuados niveles de garantía; contribuir a paliar los efectos de las sequías e inundaciones; articular el equilibrio y armonización del desarrollo insular y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando los usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales [13].

El papel de los Ayuntamientos en la gestión municipal del agua se rige por el cumplimiento de las normativas establecidas en el Real Decreto- Ley 11/1995, que regula el tratamiento de las aguas residuales urbanas. Para facilitar su implementación, los Ayuntamientos pueden solicitar la colaboración técnica del Consejo Insular de Aguas y establecer convenios con el CIATF, promoviendo soluciones conjuntas entre varios municipios y el CIATF [13].

En caso de ausencia de una ordenanza o reglamento municipal aprobado por el Ayuntamiento correspondiente, se establecen las siguientes limitaciones al vertido de agua residual a la red de alcantarillado público. [13]

Estas limitaciones incluyen la prohibición absoluta de los siguientes vertidos a la red de alcantarillado, independientemente de las concentraciones límites definidas para el agua residual:

- Todo aquello que pudiera causar alguno de los siguientes efectos: Formación de mezclas inflamables o explosivas. Efectos corrosivos sobre los materiales y equipos de las instalaciones, cualquier vertido que pueda causar obstrucciones en las tuberías, vertidos que puedan crear ambientes tóxicos o dificulte el acceso al personal autorizado, vertidos que impidan conseguir los valores deseados en las plantas de tratamiento [13].
- Vertidos industriales de líquidos concentrados desechables, que deben ser tratados en plantas específicas o centralizadas, así como los vertidos que podrían solidificarse en la red de alcantarillado o planta depuradora debido a cambios de temperatura. Vertidos discontinuos procedentes de limpieza de tanques de almacenamiento de combustibles, reactivos o materias primas. Se prohíbe el vertido de agua que no cumpla con las limitaciones establecidas en la Ordenanza Municipal o, en su defecto, en la Ordenanza Básica supletoria establecida por el CIATF, Vertido de agua de mar [13].
- Queda prohibido el uso de agua para diluir otros vertidos, salvo en situaciones de emergencia o peligro [13].

Se aplicarán restricciones a los vertidos cuyas concentraciones superen los límites establecidos en la siguiente tabla de concentraciones máximas admisibles, estas limitaciones pueden ser revisadas periódicamente para incorporar mejores técnicas disponibles y ajustarse a las restricciones [13].

Parámetro	Unidades	Concentración máxima admisible
DBO₅	mg/L	1.000
DQO	mg/L	1.600
Temperatura	°C	45
Sólidos en suspensión	mg/L	1.200
Aceites y/o grasas	mg/L	500
Aceites minerales	mg/L	50

Tabla 4: Concentración máxima para vertido en alcantarillado (Decreto 372/2023, 2023).

4. DESCRIPCIÓN DE UNA INDUSTRIA CÁRNICA

La industria cárnica usa grandes volúmenes de agua para mantener la limpieza de las instalaciones, por lo que aumentará también las cantidades de agua a tratar.

Por otro lado, los desechos en los mataderos varían, si se descuida la limpieza aumentará la carga orgánica. Siempre se buscará optimizar el uso del agua para mantener la higiene exigida y reducir costos [14].

A continuación, se puede ver un diagrama de flujo donde se muestran todos los procesos llevados a cabo en un matadero cárnico. Se observan tres zonas distintas: el proceso de sacrificio, el despiece (que se realiza de forma diferente según las características de los animales) y la elaboración de productos cárnicos.

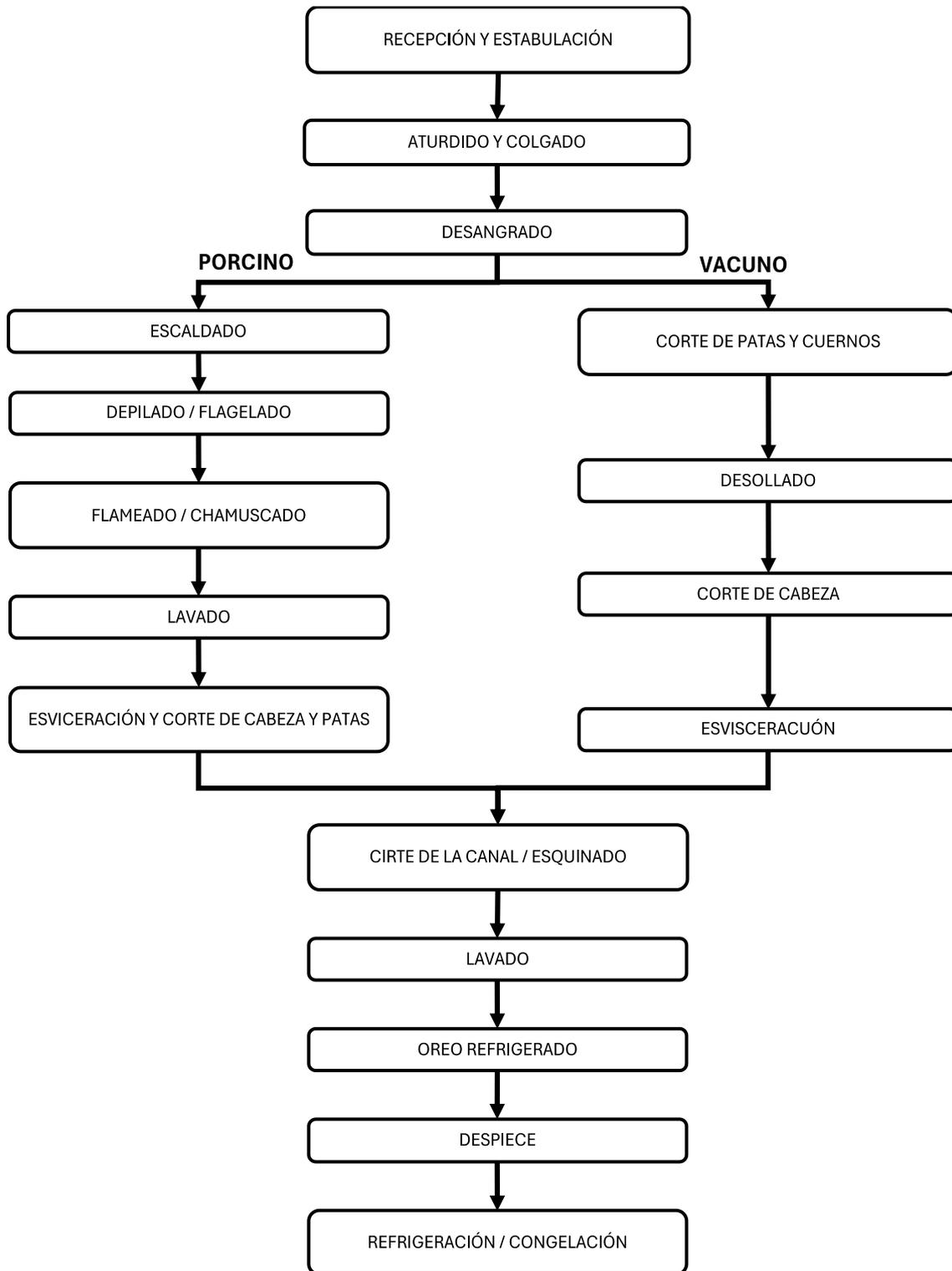


Figura 4: Diagrama de flujo sobre el procedimiento de sacrificio de un matadero cárnico (Canales & Vidal, 2024).

Por lo general, las salas de despiece están junto al matadero para facilitar la continuación de la producción.

A continuación, se describen los procedimientos vistos en el diagrama anterior:

- **Recepción y estabulación:** Los animales se llevan a los corrales a la espera del sacrificio en el matadero [14].

- **Aturdido y colgado:** Normalmente se aturden mediante una pistola. A continuación, se realiza el lavado exterior y se cuelgan en ganchos para continuar con el proceso, generando vertidos de aguas residuales [14].
- **Desangrado:** Recogida de la sangre en recipientes para su venta o tratamiento posterior. Procesos específicos para porcino y vacuno:
 - **Porcino:** Las piezas se escaldan en agua hirviendo para eliminar impurezas de la piel. Se lleva a cabo el flagelado para limpiar las piezas y separar impurezas. Luego se procede al chamuscado para eliminar el resto de los pelos. Finalmente se realiza un lavado y, por último, extracción de las vísceras y corte de cabeza y patas [14].
 - **Vacuno:** Se realiza el corte de las patas, cuernos y piel, vendiendo esta última como subproducto. Por último, se realiza el corte de la cabeza y la extracción de las vísceras [14].
- **Corte de las canales, lavado y oreo:** Los animales son cortados longitudinalmente en partes iguales, se lavan y pasan a cámaras de aireación para que se terminen de secar [14].
- **Despiece y congelación:** A continuación, a las salas de despiece, donde se dividen en partes más pequeñas y se pueda conservar mediante refrigeración y/o congelación [14].

Todo este proceso, desde el transporte al matadero, el sacrificio, la obtención de canales y su despiece, está regulado por el *“Real Decreto 1021/2022, de 13 de diciembre, por el que se regulan determinados requisitos en materia de higiene de la producción y comercialización de los productos alimenticios en establecimientos de comercio al por menor”* [14].

La higiene es lo más importante en todas las etapas del proceso, por lo que la limpieza y la desinfección de equipos se considera la operación más importante, para garantizar las condiciones higiénico-sanitarias adecuadas.

5. PRODUCCIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES EN UN MATADERO

El proceso de producción de aguas residuales de una industria cárnica cuenta con varias etapas, y al igual que el proceso de producción, va desde la recepción de los animales hasta el lavado de las canales, por otro lado, también se generan residuos en el envasado, la limpieza de las instalaciones y la limpieza de los equipos.

El principal problema ambiental en la generación de aguas residuales de este tipo de industrias son los altos niveles de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y sales [14]. A continuación, se presenta la Figura 5, en la que se puede ver dónde y que tipos de agua se producen en esta industria.

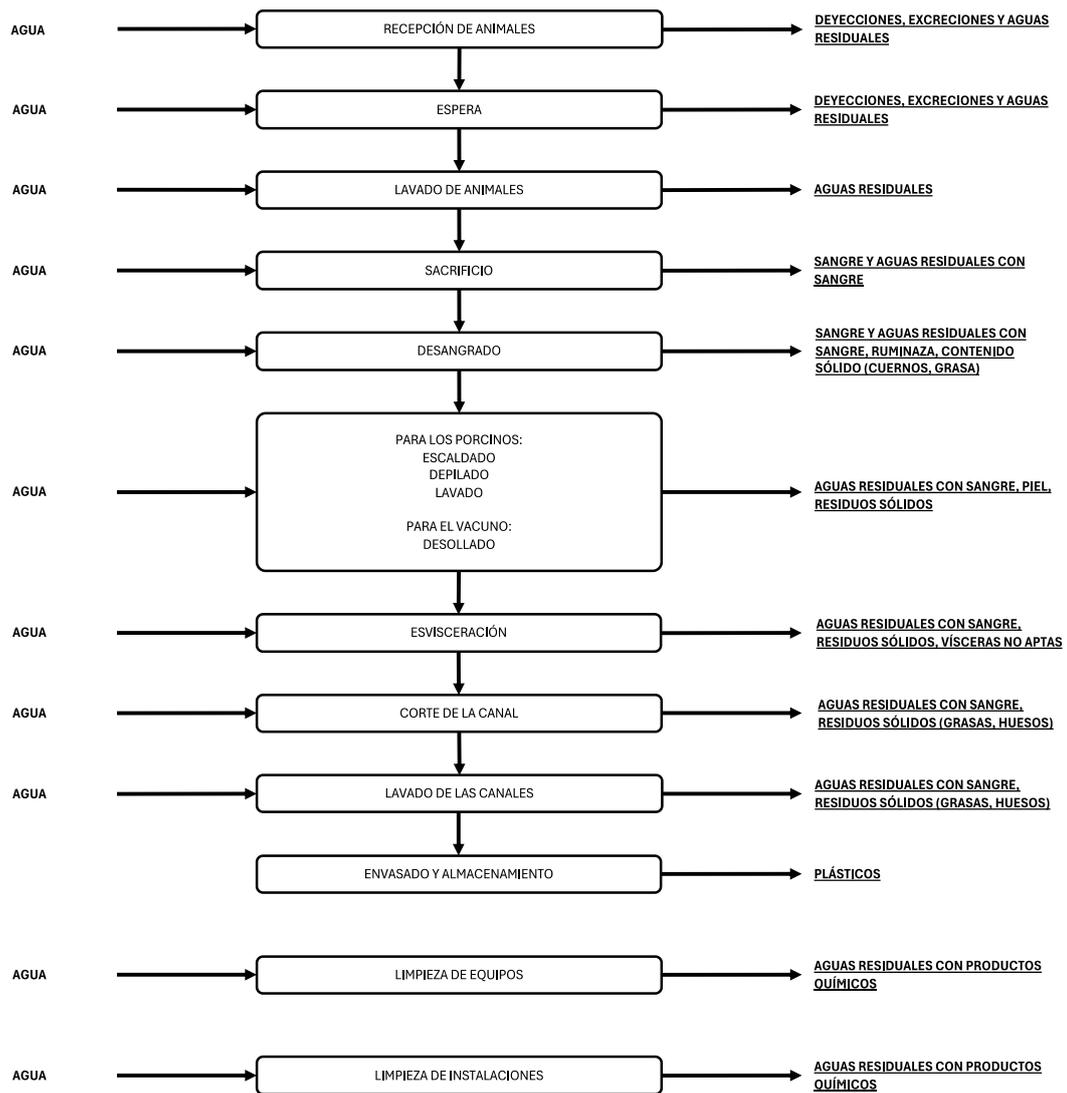


Figura 5: Esquema sobre la generación de agua en mataderos cárnicos (Elaboración propia)

Como se ha comentado anteriormente, la producción de agua varía según el tipo de carne y de los diferentes procesos. A continuación, se comenta las principales fuentes donde se generan la mayor cantidad de las aguas residuales:

- **Recepción y espera:** Vertidos que incluyen deyecciones y orines de los animales, conocidos como purines, junto con el resto del estiércol extraído durante la limpieza de las instalaciones.
- **Lavado:** Lavado con agua al animal vivo, para eliminar impurezas que tengan en la piel. Aporta volumen al efluente final, su carga contaminante es baja.
- **Sacrificio y desangrado:** Vertidos de sangre, lo que produce una elevada carga orgánica y nitrogenada. La sangre contribuye con una DQO total de 275.000 mg/L, y aproximadamente un 15% - 20% de la sangre puede acabar en los vertidos finales, representando una carga de 1 a 2 kg de DBO₅ por cada 1,000 kg de peso vivo. En esta etapa es importante conocer la cantidad de sangre que se recupera, para así poder interpretar como serán las características del agua en el vertido final [14].

- **Escaldado:** Aguas residuales con alta carga orgánica, debido a que se arrastran residuos orgánicos como pelos, sangre y grasa superficial. Generando aproximadamente por animal vivo, una carga de 0,25 kg de DBO₅/t durante el escaldado y 0,4 kg de DBO₅/t durante el pelado [14].
- **Evisceración y corte de canales:** Vertidos con alta cantidad de sólidos en suspensión, como las vísceras y contenidos digestivos.
- **Lavado de Canales:** Residuos con elevada carga orgánica y productos desinfectantes. También aporta un volumen al efluente final, pero su carga contaminante es baja.
- **Refrigeración:** Existen instalaciones que utilizan sistemas de descongelación y refrigeración con agua que generan volúmenes que pueden alcanzar hasta el 25% del consumo total de la instalación.
- **Limpieza de Equipos, instalaciones y vehículos:** Durante la limpieza de equipos, instalaciones y vehículos, se generan vertidos con elevada carga orgánica, que incluye restos de sangre, pelos, estiércol, detergentes y desinfectantes.

5.1. Características del agua residual a tratar

Las aguas residuales procedentes de una industria cárnica son consideradas una de las más problemáticas, ya que se caracterizan por una alta carga contaminante [15].

Como ya se ha comentado anteriormente, la característica principal de todas las aguas residuales de mataderos es, la alta carga orgánica, debido a la cantidad de sangre generada durante toda la etapa de sacrificio. Otra característica de estas aguas es el alto contenido en sólidos suspendidos, por los restos de carne, piel, huesos, pelos y otros desechos. Además del contenido en grasas, que pueden formar una capa superficial en el agua y causar problemas de obstrucción. Por último, suelen tener altas concentraciones de nitrógeno y fósforo, que pueden venir de los restos de sangre y tejido animal y, de productos químicos utilizados en la limpieza de las instalaciones [16]

Las características de las aguas residuales generadas dependen de diferentes factores como el tipo de animal sacrificado, el grado de procesamiento de los productos que se van obteniendo, la limpieza y uso de agua, y la tecnología implantada en el matadero para la mejora de la contaminación de agua.

En España existen aproximadamente 650 mataderos autorizados, incluyendo mataderos cárnicos y avícolas, así como mataderos móviles [17].

En la siguiente tabla se puede conocer las características típicas de las aguas residuales de un matadero de carnes.

Parámetro	Unidades	Rango
COT	mg/L	70-1.200
DBO ₅	mg/L	150-4.635
DQO	mg/L	500-15.900
TN	mg/L	50-841
SST	mg/L	270-6.400
pH		4,9-8,1
PT	mg/L	25-200
Orto-PO ₄	mg/L	20-100
Orto-P ₂ O ₅	mg/L	10-80
K	mg/L	0,01-100

Tabla 5: Características generales de aguas residuales procedentes de mataderos (Bustillo-Lecompte et al., 2013).

Unas características de las aguas biodegradables es que tienen una relación de DBO_u/DQO igual o aproximadamente 0,9, otra característica práctica es que si la relación entre DBO₅/DQO es menor a 0,5 se considera no biodegradable [18], con lo que hay que poner solución para poder usar un tratamiento biológico. Las aguas residuales generadas en mataderos suelen mostrar una relación que oscila entre 0,3 y 0,5 de la relación DBO₅/DQO [18]. En situaciones en las que el agua residual contiene cantidades significativas de sangre, se requiere un proceso previo de hidrólisis, debido a la alta cantidad de proteínas, lo que el proceso de biodegradación se ralentiza.

5.2. El problema de la sangre

Como ya se sabe, el contaminante principal de las aguas residuales producidas en mataderos es la sangre. Su concentración dependerá de que tan bueno sea el sistema de recuperación de sangre del matadero.

La sangre presenta un alto grado contaminante debido a su alta concentración de materia orgánica (DQO entre 160.000 y 300.000 mg/L) y nitrógeno (Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT) entre 21.000 y 25.000 mg/L) [18].

A veces, no se consigue la totalidad del desangrado del animal en la etapa correspondiente en el proceso de sacrificio, lo que produce un exceso de vertido de sangre a lo largo del proceso.

El sistema de recogida de sangre más indicado en cada caso dependerá del destino que se le vaya a dar a la sangre recuperada. Si esta se va a usar para consumo humano, se necesitará una mayor calidad higiénica que, si se va a usar para la obtención de harinas u otros productos que no necesitan tanta calidad [14].

Se debe tener en cuenta que la crisis alimentaria asociada a la encefalopatía espongiiforme bovina (EEB, coloquialmente conocida como la enfermedad de 'las vacas locas') "prohíbe para la alimentación de animales de producción, el uso de proteínas animales elaboradas... siempre que reúnan las condiciones de producción, distribución, comercialización, almacenamiento y utilización fijadas por normativa comunitaria" [19]

Además, las instalaciones deben tener sistemas que permitan la recogida total de la sangre dentro de la zona de desangrado, para así reducir la caída de sangre en otras partes de la instalación y disminuir las concentraciones de sangre en el agua residual, también así, se reduce la contaminación por nitrógeno y otras sustancias contaminantes. Por tanto, cualquier técnica que elimine el vertido de sangre ayuda a una mejora ambiental, también es importante que, cuanto más higiénica sea la recogida de la sangre mayor será su posibilidad de venta [14].

La cantidad total de sangre por animal puede suponer entre un 4-4,5% del total del peso del animal, y de este volumen, el 20-25% permanece en el animal tras un desangrado tradicional [14]. Si se consigue minimizar la cantidad de sangre que pueda incorporarse al agua residual, puede suponer un reducción drástica de contaminación.

Según el BREF europeo, se pueden recoger hasta 16 l/cabeza de vacuno y 3,5 l/cabeza de porcino.

La DQO aproximada que se evita aportar en el agua residual al recoger estas cantidades de sangre son:

- Para vacuno (considerando un peso vivo del animal de 450 kg aprox.); 24 kg DQO/t de canal
- Para porcino (considerando un peso vivo del animal de 100 kg aprox.); 19 kg DQO/t de canal.

6. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE AGUA Y DE LA GENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Debido al gran volumen de agua utilizada en los mataderos, la gestión del agua necesita de especial atención, la solución es la implementación de nuevas tecnologías que reduzcan tanto el consumo de agua, como, la generación de residuos.

Los procesos en un matadero demandan grandes cantidades de agua, desde el transporte de los animales hacia a las instalaciones, hasta el procesamiento de la carne. Por ello se generan cantidades de agua residual que tienen que ser tratadas antes de enviarlas al colector, llegando a los mínimos requeridos según la normativa municipal establecida [14].

Para abordar esto se cuenta con una variedad de técnicas y tecnologías disponibles que ayudan a disminuir el consumo de agua y así conseguir minimizar el vertido del agua residual. Por ejemplo, una de las técnicas usadas para la reducción del consumo de agua en mataderos es la recuperación de agua de refrigeración. La recuperación y reutilización de agua empleada en este proceso puede ser reutilizada en la misma operación si se realizan las tareas de acondicionamiento necesarias. En otras operaciones, la reutilización puede no ser válida por tener unas características físicas, químicas o biológicas que no cumplen los criterios de calidad del agua para los usos a los que se destine. [14]

El documento sobre las Mejores Técnicas Disponibles para mataderos cárnicos propone diferentes métodos para reducir el consumo de agua. La siguiente tabla muestra un resumen sobre las técnicas más efectivas para mejorar este aspecto ambiental. Estas técnicas estudian los problemas relacionados con el consumo de agua y la generación de aguas residuales. Las técnicas se encuentran numeradas de forma análoga al documento mencionado, en él se detalla cómo llevar a cabo cada una de ellas.

N.º	TÉCNICA
3	Minimización del riesgo de vertido accidental de sangre mediante acondicionamiento de los tanques de almacenamiento
4	Eliminación de las tomas de agua innecesarias de la línea de sacrificio
5	Minimización del agua utilizada para el transporte de intestinos
8	Recuperación de agua de refrigeración
10	Planificación adecuada de la producción de elaborados picados o emulsionados para minimizar las limpiezas de los equipos
11	Evitar la incorporación de sólidos (orgánicos) a las aguas residuales
12	Evitar el uso de refrigerantes halogenados
13	Adecuada gestión del consumo de agua
14	Control y registro de los consumos de agua y agentes de limpieza consumidos en las limpiezas
15	Instalación de electroválvulas comandadas por detectores de presencia en las duchas de línea
16	Instalación de sistemas de lavado de manos y delantales con corte automático del agua
17	Minimización del consumo de agua en las limpiezas
18	Sistema centralizado de cierre de los puntos de agua
19	Utilización de sistemas avanzados de limpieza de superficies
20	Utilización de sistemas avanzados de limpieza de utensilios y pequeños equipos
21	Utilización sistemas de agua a presión con dispositivos de cierre y chorro regulable ara la limpieza de vehículos y zonas de recepción y espera
22	Disponer de un sistema apropiado de tratamiento de aguas residuales
23	Instalar superficies de trabajo, suelos y paredes fácilmente lavables
25	Red separativa y segregación del vertido de aguas pluviales
26	Segregación y pretratamiento de las aguas de limpieza de camiones y establos
27	Selección de detergentes que generen un menor impacto ambiental
39	Optimización del consumo de agua en la etapa de depilado/flagelado
40	Optimización del desangrado y recogida de la sangre
41	Escaldado por duchas o escaldado por condensación de vapor
42	Minimización del consumo de agua durante la estabulación de los animales
43	Sustitución del transporte hidráulico de subproductos por sistemas mecánicos o neumáticos o bandejas
44	Evitar y/o minimizar el enjuague de las canales, utilizando técnicas limpias de evisceración
45	Eliminación en seco de sal previo al lavado de pernils

Tabla 6: Consumo de agua y generación de agua residual (Canales & Vidal, 2024)

En cuanto al tratamiento de aguas residuales, existen variedad de tecnologías y tratamientos disponibles, que pueden adaptarse a las necesidades específicas de las aguas residuales de los mataderos.

El uso de sistemas de filtración, coagulación-floculación y tecnologías de separación físico-químico, ayudan a eliminar sólidos suspendidos y compuestos químicos, por otro lado, el tratamiento biológico, los tratamientos anaerobios y aerobios, son utilizados para la eliminación de contaminantes orgánicos, reduciendo así la carga contaminante del efluente.

7. INTRODUCCIÓN A LOS PROCESOS DE DEPURACIÓN

Según sean las características de las aguas residuales se utilizarán distintos procesos para depurar esta agua. Los más comunes son, en primer lugar, una separación de sólidos, seguido de un proceso para la eliminación de nutrientes mediante un tratamiento biológico aerobio [14].

La elección de las tecnologías más adecuadas dependerá del tamaño de la instalación, el tipo de matadero o sala de despiece, el volumen de producción, el lugar a verter y la normativa local de aguas residuales. Por lo que es necesario conocer las características de las aguas residuales del matadero para así implantar las tecnologías que mejor se adapte a la instalación y a esas características [14].

La combinación de los tratamientos y tecnologías a utilizar dependerá de cómo sea la composición del agua residual. Por la presencia de aceites y grasas, DBO₅, DQO, Coliformes totales y sólidos suspendidos.

7.1. Parámetros a tener en cuenta en los procesos de depuración

Las aguas residuales, están formadas por una mezcla de compuestos orgánicos e inorgánicos y distintos de microorganismos. Debido a su composición compleja se recurre a la utilización de parámetros físicos, químicos o biológicos que permiten cuantificar la carga contaminante del agua residual.

7.1.1. Parámetros Físicos:

- **Temperatura:** La temperatura del agua residual, generalmente mayor que la del agua de abastecimiento, afecta las reacciones químicas, las velocidades de reacción y la vida acuática [20].
- **pH:** Este parámetro, crucial para la calidad del agua residual, debe mantenerse en un rango específico (5,5-9,5) para favorecer los procesos biológicos de tratamiento [20].
- **Turbidez:** Propiedad óptica que afecta la transmisión de la luz a través de la suspensión, influenciada por diversos materiales en suspensión [20].
- **Color:** Originado por sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución, proporcionando información cualitativa sobre la condición del agua residual [20].
- **Olor:** Producido por gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica, siendo un indicador del estado del agua [20].
- **Conductividad:** Expresión numérica de la capacidad del agua para transportar corriente eléctrica, dependiendo de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas [20].

7.1.2. Parámetros Químicos:

- **DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno):** Mide la cantidad de oxígeno requerido para la degradación biológica de la materia orgánica en cinco días. Evaluación clave para la eficiencia del tratamiento [20].
- **DQO (Demanda Química de Oxígeno):** Cuantifica la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación química de la materia orgánica. Ayuda a entender la carga total de contaminantes [20].
- **Aceites y Grasas** Sustancias poco solubles que pueden dificultar los tratamientos contiguos, generando capas en la superficie del agua [20].
- **Sólidos totales (ST):** Es la masa del residuo que queda tras un proceso de evaporación y secado a 104°C. Una parte de estos sólidos está disuelta (sólidos disueltos totales, SDT) mientras que otra se encuentra en suspensión [21].
- **Sólidos en suspensión totales (SST):** Incluye la materia sedimentable, así como los sólidos que debido a su pequeño tamaño o a la existencia de fuerzas electrostáticas no sedimentan. Se determinan mediante filtración del agua [21].
- **Cloruros, Nitrógeno y Fósforo:** Elementos esenciales cuya descarga debe controlarse para prevenir problemas ambientales [20].

7.1.3. Parámetros Biológicos:

- **Organismos Vivos:** Bacterias, hongos, algas, protozoos, entre otros, que reflejan la actividad biológica del agua [20].
- **Indicadores Bacterianos (Coliformes Totales y Fecales):** Ofrecen información sanitaria sobre la calidad del agua y su idoneidad para diversos usos [20].

7.2. Proceso de depuración biológica

7.2.1. Eliminación de materia carbonosa

Este proceso se realiza mediante sistemas aerobios o anaerobios, dependiendo de las condiciones específicas y la disponibilidad de oxígeno. Los principales procesos para la eliminación de la materia orgánica carbonosa son: el proceso de fangos activados, las lagunas aireadas, el reactor de flujo discontinuo secuencial, y el proceso de digestión aerobia.

El proceso de depuración biológica es necesario para la eliminación de materia carbonosa, que descompone los compuestos orgánicos biodegradables en productos más simples como dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) mediante bacterias heterótrofas

Dentro del reactor, la materia orgánica biodegradable se descompone mediante la actividad de las bacterias heterótrofas. Estas bacterias utilizan la materia orgánica como fuente de carbono y energía. Los componentes orgánicos biodegradables se transforman en organismos heterótrofos ordinarios (OHO), que forman parte de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el reactor. La fracción no biodegradable de los componentes orgánicos se transforma en residuo, que también se incorpora a los SSV del reactor.

La eficiencia de este proceso depende del tiempo de retención de sólidos (TRS) y del tiempo de retención hidráulico (TRH). El TRS es el tiempo en el que los microorganismos tardan en descomponer la materia orgánica del agua residual y el HRT es el tiempo durante el cual las aguas residuales se mantienen en el reactor. El TRS es un parámetro que se controla mediante la purga de lodos del reactor. Un TRS adecuado permite que la materia orgánica tenga el suficiente tiempo para ser degradada por las bacterias.

La aireación es necesaria para mantener una buena actividad microbiana que proporciona el oxígeno necesario para que las bacterias heterótrofas descompongan la materia orgánica en condiciones aerobias, produciendo biomasa y eliminando los compuestos carbonosos.

7.2.2. Nitrificación

La nitrificación es un proceso biológico que se aplica en el tratamiento de aguas residuales, donde el amoníaco (NH_3) o el ion amonio (NH_4^+) se transforma en nitrato (NO_3^-) bajo condiciones aeróbicas mediante bacterias. [22]

Se realiza en dos etapas consecutivas: la nitritación y la nitratación.

7.2.2.1. Nitritación

Las bacterias involucradas en este proceso son las Nitrosomonas y Nitrospira que son las responsables en oxidar el amoníaco a nitrito (NO_2^-).

La ecuación química:



7.2.2.2. Nitratación

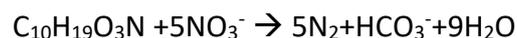
Aquí las bacterias involucradas son las Nitrobacter y Nitrospira que son las encargadas de oxidar el nitrito (NO_2^-) a nitrato (NO_3^-).

La ecuación química:



7.2.3. Desnitrificación

Para cumplir con la normativa sobre los límites de nutrientes, requieren la eliminación del nitrógeno total (TN), por ello es necesario un proceso de desnitrificación para reducir el nitrato (NO_3^-) generado durante la nitrificación a nitrógeno gaseoso (N_2) como producto final [22], según la siguiente ecuación:



En esta ecuación el $\text{C}_{10}\text{H}_{19}\text{O}_3\text{N}$ representa las aguas residuales con materia orgánica disuelta.

Los microorganismos facultativos, que normalmente degradan la materia orgánica bajo condiciones aeróbicas, tienen la capacidad de transformar los nitratos a nitrógeno gas.

La desnitrificación requiere una fuente adecuada de carbono para que las bacterias heterótrofas, que en este proceso son las *Pseudomonas* y *Clostridium*, que pueden ser suministrada por las aguas residuales iniciales [22].

7.2.4. Eliminación de fósforo

El segundo paso para cumplir con la eliminación de nutrientes es la eliminación del fósforo. Esto es necesario para evitar la eutrofización del aguas donde va a ser vertida, es decir, para evitar el crecimiento excesivo de organismos ricos en fósforo y nitrógeno, que pueden crear algas tóxicas y disminuir la calidad del agua, haciéndola inhabitable y generando un problema medioambiental grave.

El fósforo está presente en diferentes formas, como ortofosfato (PO_4^{-3}), polifosfato (P_2O_7), y varias formas orgánicas. [20] Las acinetobacter que son un tipo de bacterias responsables en este proceso, acumulan el fósforo para el mantenimiento celular, el transporte de energía y la síntesis celular. Cuando una zona aerobia sigue a una anaeróbica, estos microorganismos almacenan una mayor cantidad de fósforo, una parte destinada al uso inmediato y la otra, para acumularlo para su uso posterior [20].

El fango que tiene un exceso de fósforo se purga o se evacua. La liberación del fósforo se realiza en condiciones anóxicas.

8. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo analizar diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales procedentes de mataderos y proponer un prediseño general para este tipo de industrias.

Para alcanzar ese objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- a) Analizar las diferentes tecnologías disponibles para el tratamiento de las aguas residuales de mataderos, considerando la eficacia de cada una de ellas según la guía de mejores técnicas disponibles
- b) Diseño preliminar de diferentes tipos de tratamiento y evaluar su eficiencia en la eliminación de contaminantes utilizando el software BioWin.
- c) Seleccionar la opción de tratamiento más adecuada y sostenible para las aguas residuales del matadero, basándose en los resultados obtenidos mediante la simulación, el análisis de tecnologías disponibles y los resultados de los diferentes parámetros que se desean conseguir.

9. ANÁLISIS DE TECNOLOGÍAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UN MATADERO.

El tratamiento de aguas residuales es necesario para poder controlar el impacto ambiental que pueden provocar los residuos líquidos al verterlos en las redes públicas. El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen el fin de eliminar los contaminantes presentes en el influente. El objetivo de una EDAR es poder producir agua limpia o reutilizable y un residuo sólido

(fango). Por otro lado, en el caso del matadero es poder disminuir los valores perjudiciales para poder verter el influente al colector que conecta con la EDAR, y allí puedan terminar el proceso de depuración. Como ya se ha mencionado anteriormente, las aguas residuales industriales provenientes de la industria cárnica se caracterizan porque su principal contaminante es materia orgánica no fácilmente biodegradable, por tanto, estos residuos tienen que sufrir unos tratamientos específicos para conseguir los resultados que se quiere obtener.

En este caso, se optará por analizar un pretratamiento para reducir los sólidos y un tratamiento secundario, que permita cumplir los requisitos de la normativa vigente en el menor espacio posible.

9.1. Pretratamiento

El pretratamiento consiste en la eliminación de sólidos de gran tamaño y materiales gruesos que pueden causar obstrucciones en los procesos siguientes. Consiste en el uso de equipos estáticos o dinámicos para eliminar materia flotante, arenas, gravas y otros materiales indeseables. Algunos de los procesos de esta fase son el desbaste o rejas y el tamizado.

9.1.1. Rejas

Descripción de la Tecnología

Las rejas (Ver Figura 6) en el tratamiento de aguas residuales funcionan como barreras físicas para retener sólidos gruesos presentes en el agua residual antes de que ingrese a las siguientes etapas del tratamiento. Están compuestas por barras paralelas, que permiten el paso del agua mientras retienen partículas grandes como huesos, pieles y otros desechos voluminosos que pueden obstruir los equipos siguientes [20].

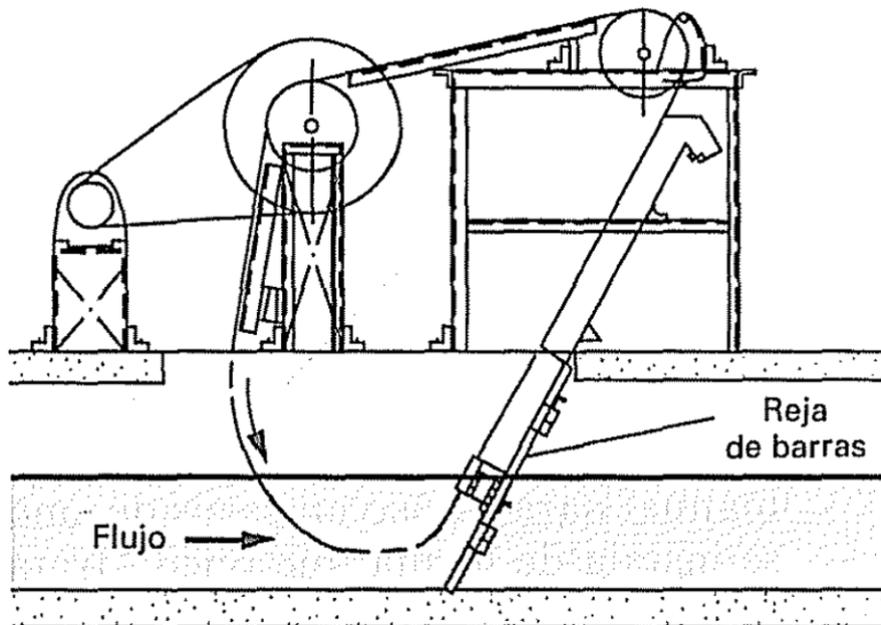


Figura 6: Rejas de barra de limpieza mecánica (Metcalf & Eddy)

Pueden ser de limpieza manual o automáticas. Las manuales requieren limpieza periódica para retirar los sólidos atrapados, asegurando así un funcionamiento eficiente,

mientras que las automáticas utilizan sistemas mecanizados como rastrillos accionados por cadenas, movimientos oscilatorios o cables para barrer las barras y eliminar los residuos atrapados en ellas. Este último tipo de limpieza minimiza el riesgo de obstrucción que pueden provocar desbordamientos o daños en equipos posteriores [20].

Ventajas y Desventajas:

Ventajas:

- Evita la obstrucción de bombas, tuberías y equipos posteriores al tratamiento

Desventajas:

- Requieren un espacio significativo.
- Consumen energía eléctrica para el funcionamiento de los motores y sistemas de limpieza.
- La disposición adecuada de los sólidos capturados puede ser costosa y requerir métodos específicos para evitar impactos ambientales.

9.1.2. Tamices

Descripción de la Tecnología

Los tamices son dispositivos para la separación de sólidos finos del agua residual antes de que esta entre a las etapas posteriores del tratamiento. Existen dos tipos más comunes de tamices: estáticos y dinámicos [20].

- Tamices estáticos: Están diseñados con una malla de acero inoxidable en forma de cuña con aberturas que generalmente varían entre 0,2 y 1,2 mm (Ver Figura 7). Se utilizan principalmente en plantas de tratamiento de pequeño tamaño debido a que generan pérdidas de carga moderadas, la limpieza de estos tamices se realiza una o dos veces al día con agua caliente a presión, vapor o agentes desengrasantes para remover las acumulaciones de grasa [20].

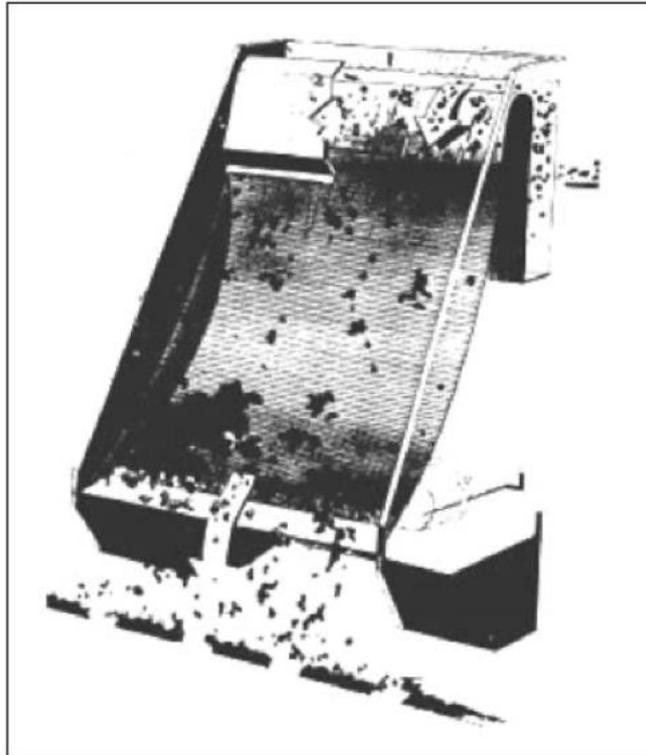


Figura 7: Tamiz estático (Sainz, 2005)

- Tamices dinámicos: Consisten en un cilindro giratorio cubierto con una malla fina de acero inoxidable, el agua residual puede circular de dos maneras, o bien entra por un extremo del tambor y sale a través de la malla filtrante, recogiendo los sólidos en la superficie interior de esta o, entra por la parte superior del tambor y sale por el interior de este, recolectando los sólidos en la superficie exterior del tambor (Ver Figura 8). Están diseñados para pérdidas de carga más bajas que los tamices estáticos [20].

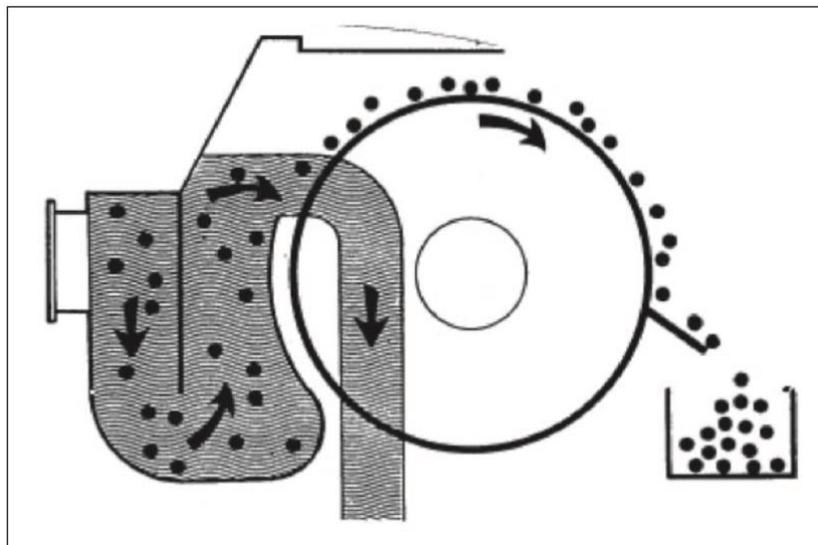


Figura 8: Tamiz dinámico o rotativo (Sainz, 2005)

Ventajas y Desventajas:

Ventajas:

- Eficiencia en la retención de sólidos finos como arena, fibras y otros materiales pequeños.
- Ayudan a prevenir la obstrucción de equipos más avanzados en el tratamiento de aguas residuales.
- Pueden limpiarse automáticamente con sistemas de rociado de agua.

Desventajas:

- Pueden requerir energía para el funcionamiento del motor que mueve el tambor.
- Son más costosos en comparación con otros tratamientos de retención de sólidos.

9.2. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario es la etapa más importante en el proceso de depuración, su principal objetivo es eliminar la materia orgánica, así como, reducir la carga contaminante y, por tanto, mejorar la calidad del efluente. Esta etapa de utiliza microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en el agua, transformándola en sólidos que pueden ser separados más fácilmente.

Inicialmente, los tratamientos biológicos se centraban únicamente en la eliminación de la materia orgánica de las aguas residuales. A lo largo del tiempo se le ha dado más usos como la oxidación del nitrógeno amoniacal (nitrificación), la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales transformando las formas oxidadas en N_2 (desnitrificación) y la eliminación de fósforo [23].

La digestión aerobia y anaerobia se utilizan como procesos individuales o combinados dependiendo de las características de las aguas residuales que se estén tratando.

9.2.1. Digestión aerobia

La digestión aerobia es un proceso biológico utilizado para estabilizar los lodos generados durante el tratamiento de aguas residuales. Este proceso se lleva a cabo en presencia de oxígeno, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica presente en el lodo. La digestión aerobia es comúnmente utilizada en plantas de tratamiento de tamaño pequeño a mediano y se puede realizar en diferentes configuraciones de reactores, algunos de ellos son:

- Lodos Activados
- Reactores Secuenciales (SBR)
- Biorreactor de Membrana (MBR)

9.2.1.1. Lodos Activados

Descripción de la Tecnología

El proceso de lodos activados (Ver Figura 9), también llamado fangos activos, es una técnica de tratamiento de aguas residuales que implica la mezcla de aguas residuales con microorganismos (biomasa) en un tanque aireado. La biomasa degrada la materia orgánica que está en las aguas residuales, utilizando el oxígeno disuelto.

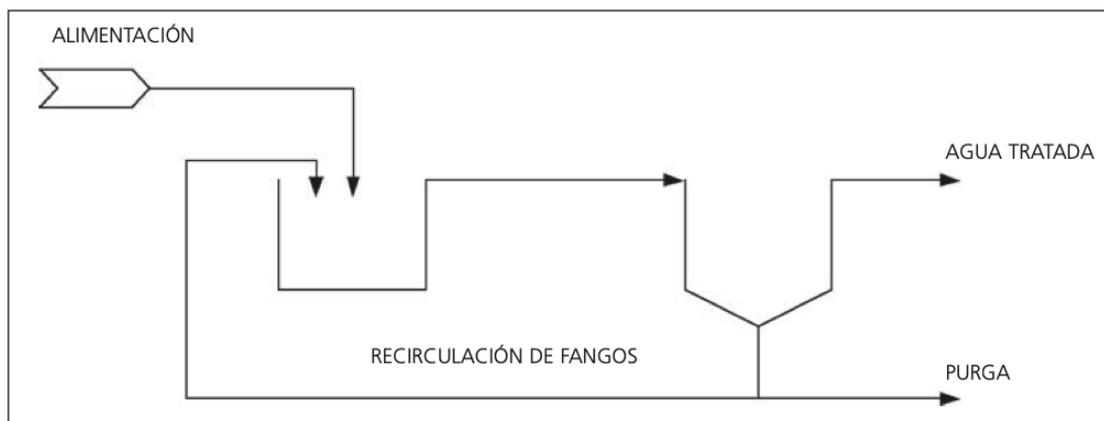


Figura 9: Proceso de fangos activos (Sainz, 2005)

El proceso consta de dos fases: aireación y sedimentación:

- **Aireación:** Se introduce aire en el reactor para proporcionar oxígeno a los microorganismos aeróbicos. La mezcla continua es necesaria para que los microorganismos reciban el suficiente alimento [24].
- **Sedimentación:** Después de la aireación, el licor mezcla pasa a un tanque de sedimentación, aquí, la biomasa floculada sedimenta, mientras que el efluente clarificado, libre de sólidos suspendidos, se descarga como efluente final. La mayor parte del lodo se devuelve al tanque de aireación para inocular a los microorganismos, y así mantener una población microbiana adecuada para la oxidación de las aguas residuales. El exceso de lodo, que representa entre el 8 % y el 10 % de lo producido diariamente, requiere tratamiento antes de su eliminación [24].

La característica principal de los lodos activados es la naturaleza floculante de la biomasa. Los flóculos deben ser eficientes en la adsorción y absorción de materia orgánica y separarse rápida y eficazmente del efluente tratado en el tanque de sedimentación, para obtener la calidad del efluente óptima.

Los componentes principales son los siguientes [24]

- **Reactor:** Se trata de un tanque en el que su contenido se puede mezclar y airear, también se conoce como tanque de aireación.
- **Lodo activado:** Biomasa que se encuentra dentro del reactor, el lodo es la materia que flocula por estos organismos, también se le conoce como licor mixto.
- **Sistema de aireación y mezcla:** Estos procesos pueden llevarse a cabo de forma independiente en tanques separados, pero normalmente se combinan utilizando un solo sistema. Se utiliza aireación superficial o aireación difusa.
- **Tanque de Sedimentación:** Los flóculos producidos en el tanque de aireación, se desplaza hasta este, aquí se produce el asentamiento del lodos, es decir, separa la biomasa del efluente tratado.
- **Lodo recirculado:** Parte del lodo asentado en el tanque de sedimentación es recirculado al reactor para mantener una población microbiana y así obtener una concentración requerida para garantizar la continuación del tratamiento.

Ventajas y Desventajas:

Ventajas:

- Alta eficiencia en eliminación de materia orgánica.
- Adaptable a diferentes condiciones (aerobia, anaerobia, anóxica).
- Método convencional sencillo y fácil de manejar.

Desventajas:

- Producción de lodos que necesitan tratamiento de alto coste.
- Requiere control riguroso de oxígeno disuelto, pH y temperatura.
- Alto coste de instalación y puesta en marcha.
- La calidad del producto no se puede garantizar

Varias tecnologías avanzadas han evolucionado a partir del proceso de lodos activados.

Algunas son:

- Reactor por Lotes de Secuenciación (SBR)
- Biorreactor de Membrana (MBR)

9.2.2. Reactores Secuenciales (SBR)

Descripción de la Tecnología

El Reactor secuenciales, también llamado reactor secuencial por lotes (SBR por sus siglas en inglés, Sequencing Batch Reactor) es un tipo de reactor que opera en lotes utilizando lodos activados. La tecnología se basa en llenar y vaciar el reactor. La principal diferencia entre los lodos activados y el sistema SBR, es que este último realiza todas las fases de tratamiento en un solo tanque, en lugar de en tanques separados (Ver Figura 10).

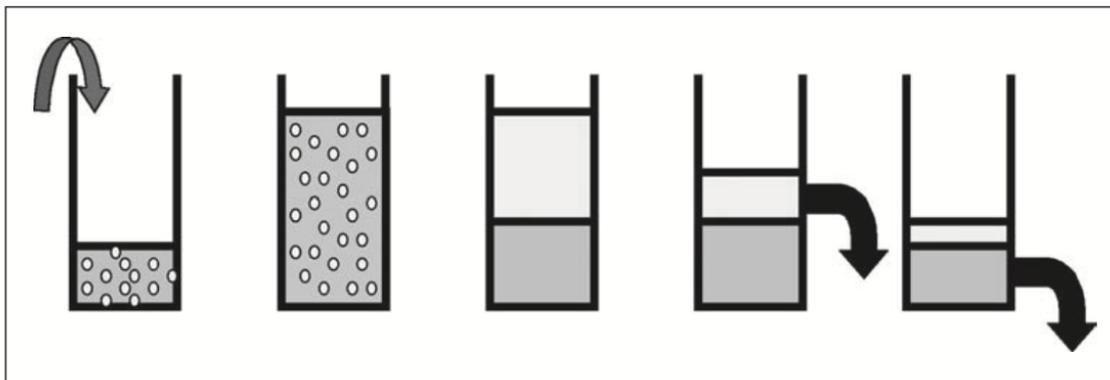


Figura 10: Proceso SBR (Sainz, 2005)

El proceso de operación trata de cinco fases: llenar, reaccionar, sedimentar, decantar y reposar [25]:

1. Fase de llenado: Las aguas residuales van hacia el tanque. Las sustancias orgánicas serán los nutrientes para los microorganismos.
2. Fase de reacción: Se activa el proceso de mezcla y la unidad de aireación, para reducir la materia orgánica. Se para el suministro del influente y la eliminación de materia orgánica aumenta drásticamente.
3. Fase de sedimentación: Se detiene todo el proceso para permitir la sedimentación del lodo. Esta fase es crítica ya que el lodo tiene que asentarse rápidamente, puede influir en la calidad del agua en la siguiente fase. El tiempo normal de sedimentación es de aproximadamente 30 a 60 minutos.

4. Fase de decantación: El agua limpia se retira de la parte superior con ayuda de un decantador. La altura desde la parte inferior hasta el decantador debe ser suficiente para no perturbar el lodo asentado. El ciclo será óptimo si el efluente es igual al influente.
5. Fase de reposo: Esta fase dura entre 0 y 1 hora, dependiendo del volumen del influente. Durante este tiempo, el lodo activado excedente se bombea fuera del sistema.

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Eficiencia en la eliminación de materia orgánica, sólidos suspendidos totales y nutrientes
- Capacidad para tratar diferentes tipos de aguas residuales.
- Capacidad de operación en un solo tanque.

Desventajas:

- Control de los tiempos de ciclo y parámetros operativos.
- Mayor complejidad en comparación con sistemas de lodos activados tradicionales.
- Necesidad de alto contenido de OD

9.2.3. Biorreactor de Membrana (MBR)

Descripción de la Tecnología

El Biorreactor de Membrana (MBR por sus siglas en inglés, Membrane Bioreactor) combina un proceso biológico convencional con una membrana que actúa como una barrera física para separar los sólidos suspendidos y otros contaminantes del agua tratada. Las membranas utilizadas en los MBR pueden ser de diferentes tipos con diferente grado de selectividad según en el tamaño de poro y la técnica de separación aplicada [22].

El proceso resumido de un MBR es el siguiente: Las aguas residuales entran al reactor, ahí la biomasa se encarga de descomponer la materia orgánica, este proceso es similar al de lodos activados. A continuación, el agua pasa por las membranas donde retienen los sólidos suspendidos y otros contaminantes presentes en el agua, por último, se obtiene el efluente. Durante el proceso, se genera lodo, que es la materia retenida en las membranas, este debe ser gestionado adecuadamente a través de distintos procesos [22].

Puede trabajar en distintas condiciones biológicas:

- Proceso Aerobio: se introduce oxígeno mediante aireación para favorecer la oxidación de la materia orgánica por microorganismos aerobios.
- Proceso Anaerobio: Requiere agitación y aireación controlada para facilitar la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno.

Hay dos configuraciones principales del proceso de MBR y son los mismos para las dos configuraciones: sumergido o inmerso (iMBR) y de flujo lateral o externo (sMBR).

- **Configuración Sumergida (iMBR):** los módulos de membrana están sumergidos directamente en el tanque del biorreactor (Ver Figura 11). Utiliza aireación para que se produzca la transferencia de masa a través de la membrana, mejorando así el flujo [22].

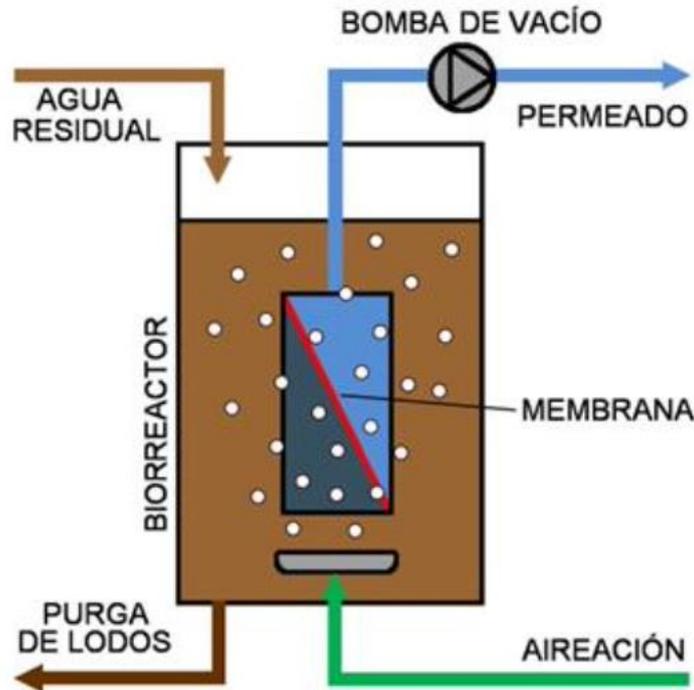


Figura 11: Biorreactor de membrana interna o sumergida (López, 2012)

- **Configuración de Flujo Lateral (sMBR):** En esta configuración, los módulos de membrana están fuera del tanque principal del biorreactor y el flujo se bombea lateralmente a través de ellos (Ver Figura 12). Esta opción es más propensa a la suciedad debido al bombeo de líquido y al mayor flujo que puede reducir la permeabilidad de la membrana [22]

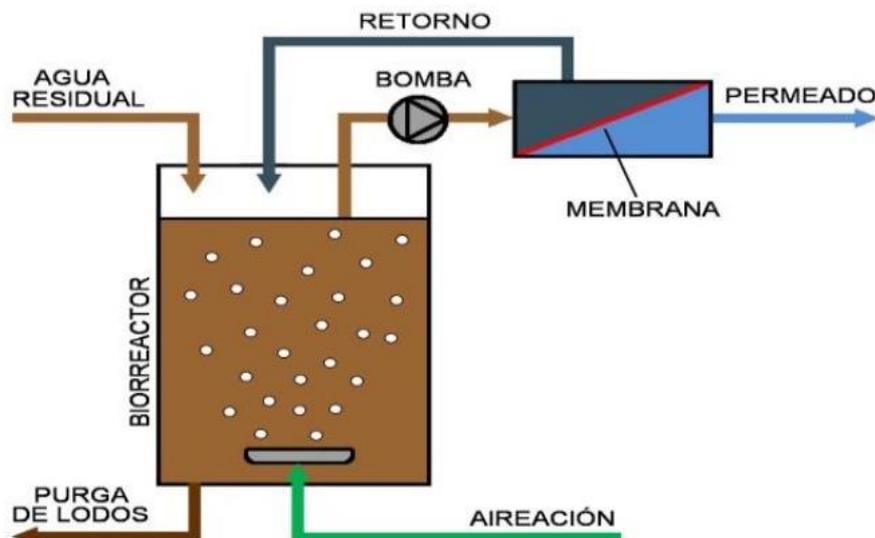


Figura 12: Biorreactor de membrana externa o de flujo lateral (López, 2012)

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Producción de un efluente de alta calidad.
- Eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos, materia orgánica y contaminantes.
- Requieren menos espacio en comparación con los sistemas convencionales
- Mejor control del proceso biológico y de separación debido a la alta eficiencia de las membranas.

Desventajas:

- Mayor inversión inicial debido a la tecnología de membranas
- Requieren un mantenimiento regular de las membranas para evitar el deterioro.
- Consumen más energía en comparación con los sistemas convencionales.

9.3. Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es un proceso biológico utilizado en el tratamiento de lodos procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales. Este proceso se lleva a cabo en un ambiente cerrado y sin oxígeno, donde los microorganismos descomponen la materia orgánica en ausencia de oxígeno, produciendo biogás y un residuo digerido más estable.

La digestión anaerobia se puede realizar en diferentes configuraciones de reactores, algunos de ellos son:

- Tanque Agitado Continuo
- Lagunas Aireadas
- Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)
- Filtros Percoladores

9.3.1. Tanque Agitado Continuo (CSTR)

Descripción de la Tecnología

El reactor de tanque agitado continuo (CSTR, por sus siglas en inglés, continuous stirred-tank reactor) es un tipo de reactor utilizado tanto en procesos aerobios como anaerobios (Ver Figura 13), permite la entrada continua o intermitente del influente o fangos y la salida continua del efluente o biogás, manteniendo siempre una mezcla homogénea [26].

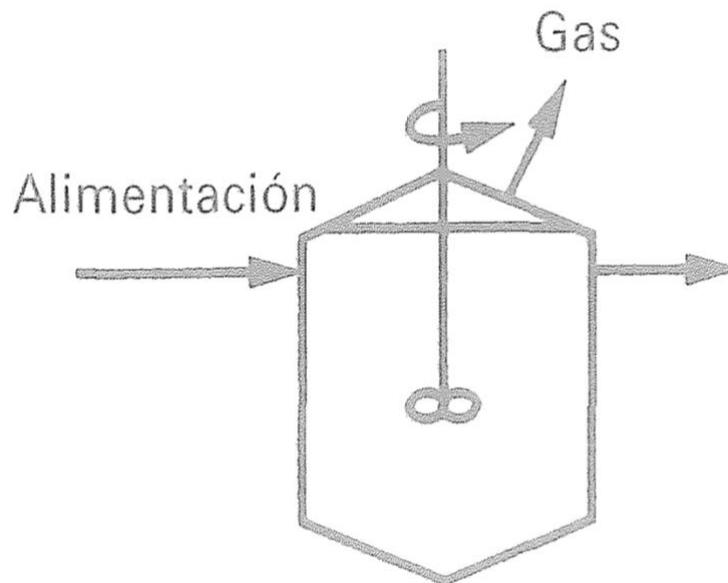


Figura 13: Reactor de tanque agitado (Metcalf & Eddy, 1995)

Como en todos los procesos anaerobios, el reactor trabaja en ausencia de oxígeno, el reactor se encuentra completamente cerrado y, los microorganismos descomponen la materia orgánica para producir biogás. Estos reactores son comunes en el tratamiento de lodos de las aguas residuales y en la gestión de residuos orgánicos.

Ventajas e Inconvenientes

Ventajas:

- Produce una mezcla homogénea, que influye en la eficiencia de la digestión anaerobia.
- Producción de biogás
- Puede digerir distintos tipos de materia orgánica,

Desventajas:

- Altos gastos energéticos debido a la cantidad de energía requerida para mantener el proceso continuo.
- Mantenimiento frecuente.

9.3.2. Lagunas Anaerobias

Descripción de la Tecnología

Las lagunas anaerobias son un sistema para la estabilización de la materia orgánica biodegradable en ausencia de oxígeno, combinan la sedimentación de sólidos y su acumulación en el fondo, con la biomasa activa suspendida en el agua residual (Ver Figura 14). Actúan como digestores donde las bacterias descomponen la materia orgánica. Se utilizan principalmente para tratar aguas residuales con altas concentraciones de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y DQO (Demanda Química de Oxígeno). Son útiles como etapa previa al tratamiento aerobio para reducir la carga orgánica. Una laguna anaerobia puede considerarse un proceso anaerobio a tasa baja en el cual la materia orgánica es estabilizada mediante su transformación en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) principalmente [20], por lo que pueden estar abiertas a la

atmósfera o cubiertas, para recoger el metano producido y controlar la emisión de olores.

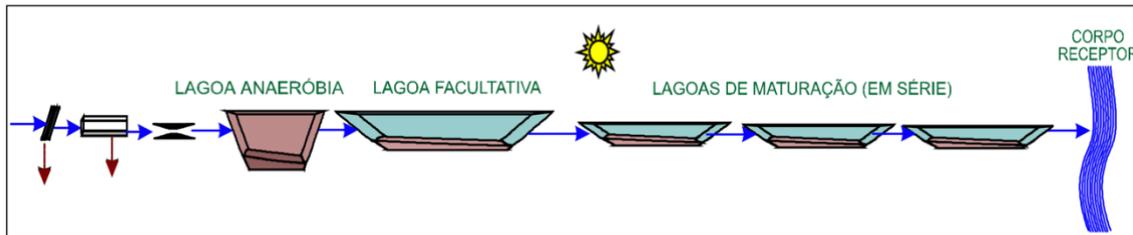


Figura 14: Lagunas anaerobias (Ortiz, 2014)

El proceso se divide en varias etapas: hidrólisis, formación de ácidos y formación de metano [20]:

- Hidrólisis: Conversión de compuestos orgánicos complejos en compuestos más simples y solubles en agua.
- Formación de ácidos: Los compuestos orgánicos simples se transforman en ácidos orgánicos volátiles (principalmente ácido acético, propiónico y butírico).
- Formación de metano: La materia orgánica se transforma en dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) por bacterias metanogénicas.

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Requieren poco mantenimiento y tienen costos operativos bajos.
- Logran una reducción significativa de DBO_5 y sólidos en suspensión.
- Consumen menos energía que otras tecnologías más avanzadas.

Desventajas:

- Requieren grandes áreas de terreno debido a su diseño superficial.
- Pueden generar olores desagradables
- Las bajas temperaturas pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso.

9.3.3. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)

Descripción de la Tecnología

El Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB por sus siglas en inglés, Upflow Anaerobic Sludge Blanket) (Ver Figura 15) es un sistema que permite que el afluente se mueva hacia arriba a través de un lecho de lodo granular en el cual microorganismos anaerobios descomponen la materia orgánica presente en el agua residual [27].

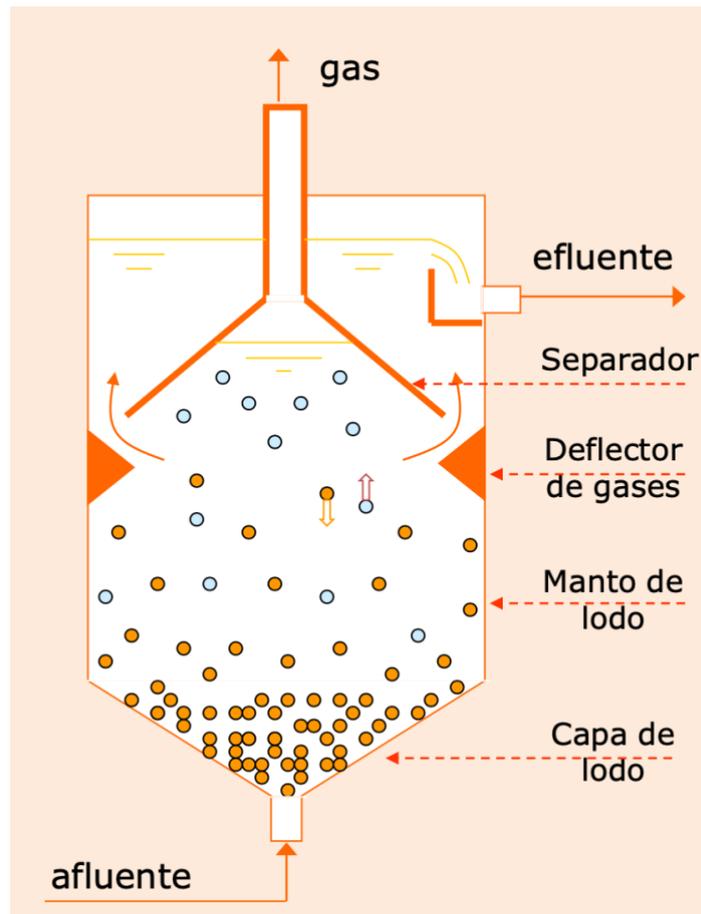


Figura 15: Reactor UASB (Ortiz, 2014)

Los componentes Principales del UASB son [27]:

- Zona de Entrada del Afluente: Aquí se introduce el agua residual en el reactor.
- Manta de Lodo: Cuenta con una capa de lodo granular que donde se encuentran los microorganismos. Existen dos mantas de lodo con diferentes concentraciones de biomasa. La biomasa realiza la digestión anaerobia, transformando los contaminantes orgánicos en biogás.
- Separador Trifásico: Se encuentra en la parte superior del reactor y permite la separación de las tres fases resultantes del proceso:
- Fase sólida: La biomasa que no se descompone completamente se mantiene en el reactor.
- Fase líquida: El efluente tratado, sale del reactor.
- Fase gas: El biogás generado durante la digestión anaerobia se recolecta para su uso.

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Requieren menos espacio comparado con otros sistemas
- El proceso es energéticamente eficiente ya que no requiere aireación

Desventajas:

- Son sensibles a cambios bruscos en la carga orgánica y condiciones ambientales

- El tiempo de arranque del reactor puede ser prolongado ya que necesita una biomasa adecuada.
- Monitoreo y control constante para asegurar que las condiciones ambientales y de carga orgánica son óptimas.

9.3.4. Filtros Percoladores

Descripción de la Tecnología

Los filtros percoladores, también conocidos como filtros biológicos o filtros de goteo, se trata de una filtración biológica donde microorganismos adheridos a un medio sólido degradan la materia orgánica presente en el agua residual (Ver Figura 16). Los filtros percoladores son sistemas utilizados para el tratamiento biológico de aguas residuales mediante el uso de un lecho filtrante sobre el cual se distribuye continuamente el agua residual [20]. El funcionamiento se basa en el crecimiento de una biopelícula sobre el medio filtrante que descompone la materia orgánica. Los filtros percoladores son eficaces para la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos

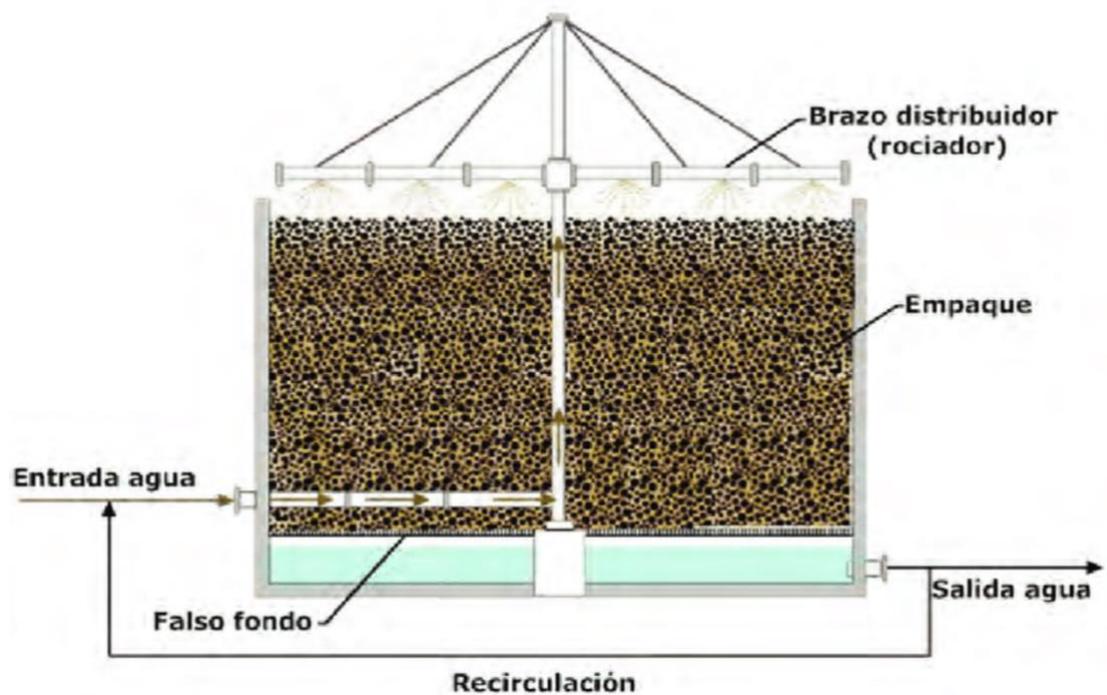


Figura 16: Filtros percoladores (Noyola et al., 2013)

Los componentes principales de los filtros percoladores son:

- Lecho de Medio Filtrante: compuesto por un medio sólido, proporciona una gran superficie para el crecimiento de la biopelícula microbiana [20].
- Sistema de Distribución del Afluente: El agua residual se distribuye de manera uniforme sobre el lecho a través de un sistema de distribución [20].
- Sistema de Recolección de Efluente: El efluente tratado se recoge en la base del filtro [20].

Ventajas y Desventajas

Ventajas:

- Algunos filtros pueden operar por gravedad, reduciendo así el consumo de energía.
- Eficiencia en la eliminación de materia orgánica.
- La tecnología se adapta a diferentes tipos de aguas residuales

Desventajas:

- Requiere áreas extensas.
- Producen olores desagradables si no se controlan adecuadamente.
- La biopelícula debe ser monitoreada y mantenida para asegurar la eficiencia del tratamiento.

10. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS DIFERENTES TECNOLOGÍAS.

Para el análisis del pretratamiento se presenta la siguiente tabla con las ventajas y desventajas de cada tecnología:

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Rejas	<ul style="list-style-type: none">• Evita obstrucción de bombas, tuberías y equipos posteriores	<ul style="list-style-type: none">• Requieren espacio significativo.• Consumen energía eléctrica.• Disposición de sólidos capturados puede ser costosa.
Tamices	<ul style="list-style-type: none">• Eficiencia en la retención de sólidos finos como arena, fibras y otros materiales pequeños.• Ayuda a prevenir obstrucción de equipos avanzados.	<ul style="list-style-type: none">• Requieren energía para el motor del tambor• Son más costosos comparados con otros métodos de retención de sólidos.

Tabla 7: Ventajas y desventajas de los pretratamientos (Elaboración propia)

A continuación, de la misma forma se presenta la Tabla 8 para facilitar la comprensión de los distintos tipos de tratamientos secundarios

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Lodos Activados	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia de eliminación de materia orgánica • Flexibilidad para manejar diferentes cargas • Relativamente bajo costo operativo 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de grandes espacios • Generación significativa de lodos secundarios • Sensible a fluctuaciones de carga y condiciones ambientales
SBR (Reactor Batch Secuencial)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia de tratamiento • Flexibilidad para manejar diferentes cargas y tipos de aguas residuales • Compacto 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere control automatizado preciso • Mayor consumo energético debido a ciclos operativos • Generación de lodos secundarios
MBR (Reactor Biológico de Membrana)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta calidad del efluente adecuado para reutilización • Menor huella espacial • Eliminación eficiente de patógenos y sólidos en suspensión 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo de inversión y operación • Alto consumo energético • Necesidad de mantenimiento y limpieza frecuentes de membranas
CSTR	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica • Producción de biogás • Menor producción de lodos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a cambios repentinos • Requiere mantenimiento regular
Lagunas Anaerobias	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de construcción y operación • Fácil de operar y mantener • Adecuado para áreas rurales 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere grandes áreas de terreno • Emisión de olores desagradables • Menor eficiencia en la eliminación de nutrientes
UASB (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica • Producción de biogás como fuente de energía • Baja generación de lodos 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensible a bajas temperaturas • Alto costo de inversión inicial • Necesita tratamiento posterior del efluente
Filtros Percoladores	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo operativo • Eficiente en la eliminación de DBO y nitrificación • Fácil operación y mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de recirculación para altas cargas • Posible problema de olores y moscas • Mayor consumo de energía para recirculación

Tabla 8: Ventajas y desventajas de los tratamientos biológicos (Elaboración propia)

Por último, para facilitar la comparación y selección de la tecnología más adecuada, se realizará una matriz de selección. Como criterios de selección se ha establecido los siguientes:

- **Eficiencia del Tratamiento:** Se refiere a la capacidad de la tecnología para eliminar contaminantes del agua residual.

- **Calidad del Efluente:** Se refiere a la pureza del agua después del proceso.
- **Costo de Inversión y de Operación:** Se refiere a los costos asociados con la instalación y el funcionamiento del equipo.
- **Requerimiento de Espacio:** Se refiere al área física necesaria para instalar y operar.
- **Generación de Residuos:** Se refiere a la cantidad y el tipo de residuos sólidos generados durante el proceso.
- **Mantenimiento y Operación:** Se refiere a la facilidad de uso y a lo necesario para mantener la tecnología en funcionamiento.

En primer lugar, se establece la eficiencia del tratamiento, ya que es necesario para asegurar que el sistema cumpla con la normativa ambiental. En segundo lugar, el requerimiento de espacio, las industrias cárnicas suelen estar ubicadas en áreas donde el suelo es costoso. En tercer lugar, el costo de inversión y operación, los costos deben asegurar la viabilidad económica del proyecto a corto y largo plazo. En cuarto lugar, la Calidad del Efluente ya que es importante que la tecnología funcione pero que además se consiga tener una buena composición. En quinto lugar, la generación de residuos, ya que menor generación de residuos reduce costos debido a que también se reduce la gestión de estos. En sexto lugar el mantenimiento y operación, debido a que es recomendable conseguir equipos fáciles de mantener y manejar.

Quedando la ponderación de la siguiente forma:

Criterio	Ponderación
Eficiencia del Tratamiento	0.25
Requerimiento de Espacio	0.20
Costo de Inversión y Operación	0.20
Calidad del Efluente	0.15
Generación de Residuos	0.10
Mantenimiento y Operación	0.10
Total	1.00

Tabla 9: Ponderación de los criterios (Elaboración propia)

A continuación, se muestran los puntajes para el pretratamiento y para el tratamiento secundario, se ha numerado del 1 al 10 según el grado de calidad, siendo 1 lo menos bueno y 10 lo mejor.

En primer lugar, se presenta la Tabla 10 donde se puntúa el pretratamiento en este caso, para rejas y tamices, según el criterio establecido

Criterio	Rejas	Tamices
Eficiencia del Tratamiento	6	8
Requerimiento de Espacio	7	8
Costo de Inversión y Operación	8	7
Calidad del Efluente	7	9
Generación de Residuos	6	8
Mantenimiento y Operación	7	7

Tabla 10: Puntuación de pretratamiento (Elaboración propia)

Se realiza el mismo procedimiento para el tratamiento biológico, en este caso para: lodos activados, SBR, MBR, CSTR, lagunas aireadas, UASB y filtros percolados:

Criterio	Lodos Activados	SBR	MBR	CSTR	Lagunas Aireadas	UASB	Filtros Percoladores
Eficiencia del Tratamiento	7	9	9	6	5	8	6
Requerimiento de Espacio	5	7	9	7	9	6	4
Costo de Inversión y Operación	3	5	7	5	4	7	9
Calidad del Efluente	7	9	9	6	6	8	6
Generación de Residuos	5	7	3	7	6	3	9
Mantenimiento y Operación	5	7	7	6	6	7	7

Tabla 11: Puntuación de tratamiento secundario (Elaboración propia)

Por último, se calcula la puntuación según el peso que tenga cada criterio, para ello se ha realizado el producto del peso del criterio con la puntuación recibida anteriormente, quedando así la Tabla 12:

Criterio	Rejas	Tamices
Eficiencia del Tratamiento	1,5	2
Requerimiento de Espacio	1,4	1,6
Costo de Inversión y Operación	1,6	1,4
Calidad del Efluente	1,05	1,4
Generación de Residuos	0,6	0,8
Mantenimiento y Operación	0,7	0,7
Total	6,85	7,9

Tabla 12: Matriz de selección del pretratamiento (Elaboración propia)

Se realiza el mismo procedimiento para el tratamiento secundario quedando de la siguiente forma la matriz de selección:

Criterio	Lodos Activados	SBR	MBR	CSTR	Lagunas Aireadas	UASB	Filtros Percoladores
Eficiencia del Tratamiento	1,75	2,3	2,25	1,5	1,25	2	1,5
Requerimiento de Espacio	1	1,4	1,8	1,4	1,8	1,2	0,8
Costo de Inversión y Operación	0,6	1	1,4	1	0,8	1,4	1,8
Calidad del Efluente	1,05	1,4	1,35	0,9	0,9	1,2	0,9
Generación de Residuos	0,5	0,7	0,3	0,7	0,6	0,3	0,9
Mantenimiento y Operación	0,5	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7
Total	5,4	7,4	7,8	6,1	5,95	6,8	6,6

Tabla 13: Matriz de selección de tratamiento biológico (Elaboración propia)

Como se puede observar los resultados obtenidos, la tecnología más interesante que se plantea para implementar es la de los tamices para el pretratamiento ya que es un tratamiento eficaz y ocupa menos espacio y la el MBR para el tratamiento biológico ya que este sistema ofrece buenos rendimientos de depuración, debido a que combina procesos biológicos aerobios con membranas para lograr una alta calidad de efluente tratado. Aunque se sabe que no es la única opción tecnológica viable para resolver los problemas de vertidos ocasionados en mataderos cárnicos, su diseño hace que sea una opción ideal para instalaciones donde el espacio es limitado.

11. DISEÑO PRELIMINAR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PROCEDENTES DE UN MATADERO.

11.1. Datos del agua de entrada

Para realizar el diseño de la unidad de tratamiento de aguas residuales de un matadero se ha planteado un escenario hipotético que permite establecer el diseño para un caudal nominal del 1.000 m³/d. Las condiciones del agua de alimentación a la planta de tratamiento es clave en el diseño de las unidades. Para este estudio se ha planteado utilizar los datos reflejados en el desarrollo de una Tesis Doctoral, donde se procedía a realizar mediciones de las aguas residuales procedentes de un matadero durante diferentes fechas del año [28]. Cabe destacar que las muestras son reales procedentes del Matadero de Scheneck ubicado en Montevideo, Uruguay. Según el estudio, las aguas residuales obtenidas vienen de diferentes puntos de la instalación, lavado de corrales, áreas de desangrado, evisceración y procesamiento de la carne y subproductos. Las muestras se recogieron en un punto específico del emisario, sin tener en cuenta el caudal ni la hora de muestreo.

En el Anexo I, se muestran los datos brutos que presenta este estudio y que han sido usados como punto de partida. Las características del agua residual son muy similares a la mayoría de los efluentes líquidos procedentes de mataderos, compuestas principalmente por compuestos orgánicos, con alta concentraciones de DBO₅ y niveles significativos de nitrógeno y desinfectantes como el cloro [28]. En este proyecto se usará

únicamente el análisis del primer punto, ya que permite conocer los valores del influente sin haber sufrido ningún tratamiento fisicoquímico ni biológico.

El proceso de diseño preliminar de una planta de una depuradora para aguas procedentes de un matadero se realizará mediante el software BioWin, desarrollado por EnviroSim Associates Ltd. El programa se encuentra especializado en la simulación de procesos de tratamiento de aguas residuales y se ha convertido en una herramienta útil para ingenieros y empresas de servicios públicos, ya que permite diseñar y optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) tanto municipales como industriales [29]. Cabe destacar que antes de la entrada al proceso secundario el sistema deberá tener un pretratamiento para retener todos los sólidos del sistema. La unidad de pretratamiento será descrita en el siguiente apartado.

Para la carga de datos en el software se debe iniciar un nuevo proyecto. A continuación, se dirige a la pestaña 'configurar', ahí se selecciona el elemento del 'influente' y se deja en el espacio en blanco, se presiona el botón de escape para salir de la opción de colocar elementos en el área de trabajo. Se hace doble clic sobre el icono y se selecciona 'edit data' (Ver Figura 17), se procede a introducir los datos del influente con el que se trabajará, en este caso de un matadero cárnico:

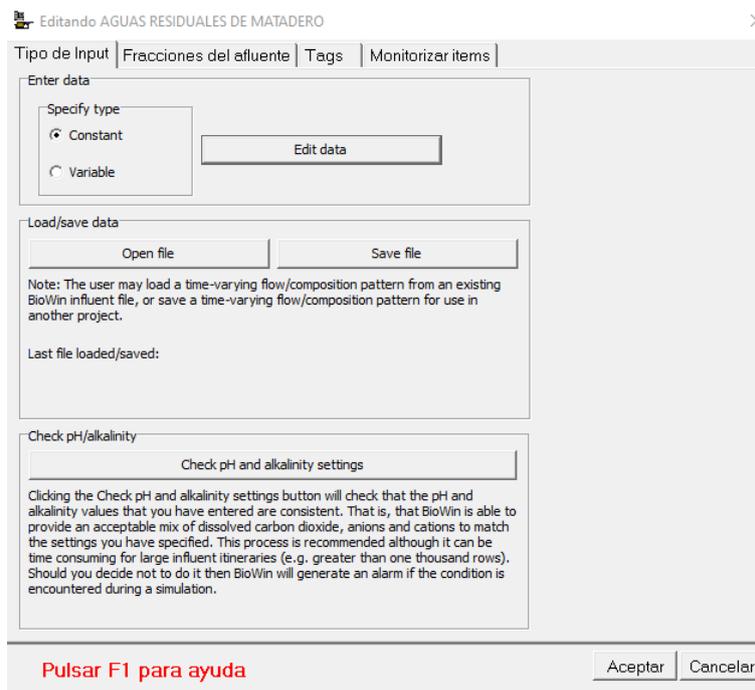


Figura 17: Editor del influente (Biowin)

Se establecerá un diseño en régimen estacionario, es decir, en un modelo estático, con lo que se especificarán datos constantes. Sin embargo, se sabe que un matadero cárnico rara vez va a tener el mismo número de sacrificios a lo largo del tiempo de forma constante, con lo que las características del agua residual nunca serán las mismas. Por tanto, se debe de crear un diseño para los valores medios. En este estudio se han establecido como punto de partida los datos proporcionados por la bibliografía que son serie de muestreos en continuo y permiten analizar la composición media del agua residual [28]. Los valores configurados son:

Nombre	Unidades	Valor
Caudal	m ³ /d	1.000
DQO total	mgDQO/L	3.320
NTK	mg N/L	236,6
P total	mg P /L	48,7
S – Total S	mg S/L	50
N – Nitrato	mg N/L	0
pH		7,03
Alcalinidad	mmol/L	7,72
ISS Total	mg SST/L	78
Calcio	mg/L	64,2
Magnesio	mg/L	22,3
O ₂ disuelto	mg/L	0,5

Tabla 14: Datos del influente (Cunha Apatie, 2015)

Una vez cumplimentado los datos del influente, se debe introducir la composición fraccional de las aguas residuales. Los valores fraccionales permiten establecer la composición del agua residual y su carácter biodegradable. Los datos utilizados son el resultado de estudios previos con aguas residuales reales procedentes de mataderos [28].

Nombre	Defecto	Valor
Fbs - Readily biodegradable (including Acetate) [gCOD/g of total COD]	0,1600	0,2330
Fac - Acetate [gCOD/g of readily biodegradable COD]	0,1500	0,3470
Fxsp - Lentamente biodeg. no coloidal [gDQO/g de DQO lentamente biodeg.]	0,7500	0,7500
Fus - Unbiodegradable soluble [gCOD/g of total COD]	0,0500	0,0200
Fup - Unbiodegradable particulate [gCOD/g of total COD]	0,1300	0,0900
Fcel - Cellulose fraction of unbiodegradable particulate [gCOD/gCOD]	0,5000	0,5000
Fna - Ammonia [gNH3-N/gTKN]	0,6600	0,6900
Fnox - Nitrógeno orgánico particulado [gN/g N Orgánico]	0,5000	0,5000
Fnus - NTK Soluble no biodeg. [gN/gNTK]	0,0200	0,0200
FupN - Ratio N:DQO para DQO particulada no biodeg. [gN/gDQO]	0,0700	0,0350
Fpo4 - Fosfato [gPO4-P/gP total]	0,5000	0,8620
FupP - Ratio P:DQO para DQO no biodeg. particulada del influente [gP/gDQO]	0,0220	0,0110
Fsr - Reduced sulfur [H2S] [gS/gS]	0,1500	0,1500
Fzbh - Ordinary heterotrophic COD fraction [gCOD/g of total COD]	0,0200	0,0200
Fzbm - Methylothetic COD fraction [gCOD/g of total COD]	1,000E-4	1,000E-4

Valores típicos (crudo) Valores típicos (decantado)

Note
Changing the cellulose fraction (Fcel) impacts the N and P content of unbiodegradable particulate COD (Fup)

Pulsar F1 para ayuda Aceptar Cancelar

Figura 18: Composición fraccional de las aguas residuales (Biowin)

11.2. Pretratamiento

El tratamiento secundario seleccionado para el proceso de depuración del agua procedente de un matadero fue un sistema de Biorreactor de Membrana (MBR). Estos sistemas requieren la instalación de un pretratamiento mediante tamices para asegurar que se eliminan todos los sólidos suspendidos de gran tamaño [22].

Para garantizar los requerimientos del sistema MBR se plantea instalar un sistema de tamiz de tambor rotativo autolimpiante. Se trata de equipos bastante habituales y con un funcionamiento estable y estandarizado. Se propone emplear el rototamiz (Ver Figura 19) de la casa Taga con una luz de paso de 0,5mm y capaz de tratar un caudal máximo de 50m³/h.



Figura 19: Tamiz tambor rotativo (Taga)

11.3. Diseño de tratamiento secundario para la eliminación de la materia carbonosa.

El objetivo de este análisis ha sido estudiar la concentración de sólidos suspendidos totales (X_0 en mg/l) en un biorreactor de membrana aerobio (MBR en sus siglas en inglés), con el objetivo de alcanzar la depuración del efluente a tratar. Para ello se ha estudiado el comportamiento del reactor modificando los valores de los principales parámetros de diseño: Volumen del reactor (V en m³), Oxígeno disuelto (OD en mg/l) y caudal de purga (en mg/l).

La configuración más habitual en los sistemas MBR es la sumergida, donde la membrana de ultrafiltración, encargada de la separación del efluente y la biomasa tratada, se encuentra en la propia cuba de aireación del reactor. Por tanto, para configurar esta unidad, se debe tener en cuenta la cantidad de cassettes a incluir en el reactor y el tamaño de estos, ya que condicionan el volumen útil para el crecimiento de la comunidad microbiana y la degradación de contaminantes. Para los cálculos del volumen de los cassettes y del área de las membranas, se han realizado mediante datos de fabricante, según las siguientes tablas:

Producto	Ancho (A) mm	Largo (B) mm	Alto (C) mm
500EV – 64M	1,744	2,136	2,735

Tabla 15: Dimensiones del Cassette (Veolia)

Aplicación	Superficie de la membrana m ²
MBR	500 EV – 49,2

Tabla 16: Propiedades de los módulos (Veolia)

Aplicación	Producto	Máximo de módulos	Mínimo de módulos
LEAP MBR	EV- 64M	64	32

Tabla 17: Cantidad típica de módulos (Veolia)

Para el cálculo del volumen de los casetes se utilizarán las siguientes dimensiones:

Ancho x largo x alto = 1,744 m x 2,136 m x 2,735 m = 10,19m³, estos datos se obtienen de la Tabla 15.

Para obtener el área total de las membranas, se ha calculado mediante la Tabla 16 y Tabla 17, respectivamente, el área total por la media de las membranas por módulos:

Área total de membranas = Área de superficie de membrana x Media de módulos = 49,2 m² x $\frac{(64+32)}{2}$ membranas = 2.361,3 m²

El área de membrana condiciona el flujo de filtración (J) que es la cantidad de agua que puede pasar mediante la membrana en un periodo de tiempo. Un flujo alto aumenta el ensuciamiento, reduciendo la vida útil de la membrana [22]. La acumulación de agentes ensuciantes sobre la membrana se denomina en la bibliografía como “fouling” y es uno de los principales inconvenientes de esta tecnología. Para controlar ese ensuciamiento los valores del flujo deben estar dentro de los límites establecidos por el fabricante. El flujo de filtración se mide en litros por metro cuadrado por hora (L/m²h ó LMH) y sirve para evaluar el rendimiento y la eficiencia del MBR. Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$J \left(\frac{L}{m^2h} \right) = \frac{Q \left(\frac{L}{h} \right)}{\text{Área de membrana (m}^2\text{)}}$$

Donde:

- J es el flujo.
- Q es el caudal de permeado.
- Área de membrana es la superficie disponible para la filtración.

Teniendo en cuenta el área a instalar en el sistema planteado, el flujo de filtración que se obtiene es de:

$$J \left(\frac{L}{m^2 h} \right) = \frac{1000 \left(\frac{m^3}{d} \right) \frac{1000}{24} \left(\frac{L \cdot d}{h \cdot m^3} \right)}{2361,3 (m^2)} = 17,65 \text{ LMH}$$

A continuación, se presenta la Tabla 18, que proporciona los datos según el fabricante 'Veolia' para los valores máximos permisibles para la filtración de membranas:

Parámetro	Veolia
Capacidad de aireación de la membrana, Nm ³ /h	100 (intermitente)
Ciclo	Retrolavados
Flujo neto normal LMH	20
Pico	35
Capacidad de aireación biológica, Nm ³ /h	100
Relación F/M	0,04 - 0,18
HRT, h	7,6 - 12,3
SRT, d	26 - 51
MLSS, g/L	10,4 - 11,2

Tabla 18: Datos de operación y mantenimiento (O&M), ensayos de Beverwijk (Judd, 2011)

Según estos datos, el flujo neto normal es de 20 LMH, con lo que el sistema opera cerca de lo que el fabricante estipula como válido, suponemos así, que la membrana funciona correctamente y asegura la eficiencia del equipo.

A continuación, se presenta la Figura 20, donde se puede ver como se han insertado los datos en el programa.

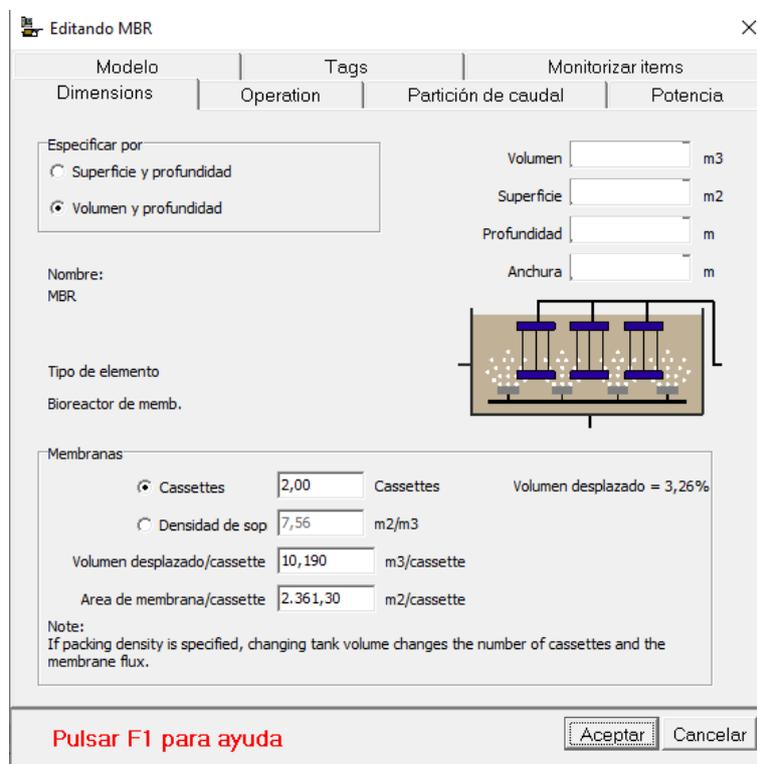


Figura 20: Editor del MBR - Editor de Cassettes (Biowin)

En este caso se ha utilizado una cantidad de dos cassette, para mantener el funcionamiento del equipo mientras se realiza la regeneración de las otras membranas del segundo cassette.

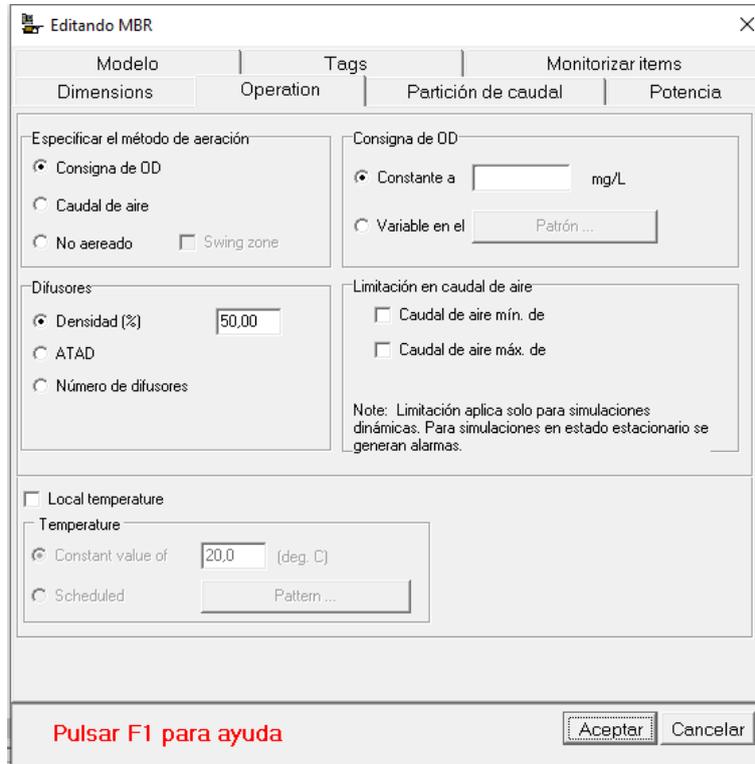


Figura 21: Editor del MBR - Editor de consigna de OD (Biowin)

Uno de los parámetros clave en el diseño de un biorreactor aerobio, es la consigna de oxígeno disuelto (OD), que indica el nivel de oxígeno (O_2) que habrá dentro del sistema. Si el nivel de oxígeno es demasiado bajo, la eficiencia del tratamiento se reduce y si es demasiado alto, se verá el aumento en el precio. Según la bibliografía, las concentraciones de OD debe ser aproximadamente 2 mg/L para asegurar la supervivencia y actividad de los microorganismos [22].

Por último, dentro de la configuración del MBR, se hace referencia al ratio, aunque en este caso no es una consigna que afecte directamente a la eliminación de materia orgánica, es una variable que también se puede cambiar. A continuación, se presenta la figura que muestra dónde se puede cambiar este valor.

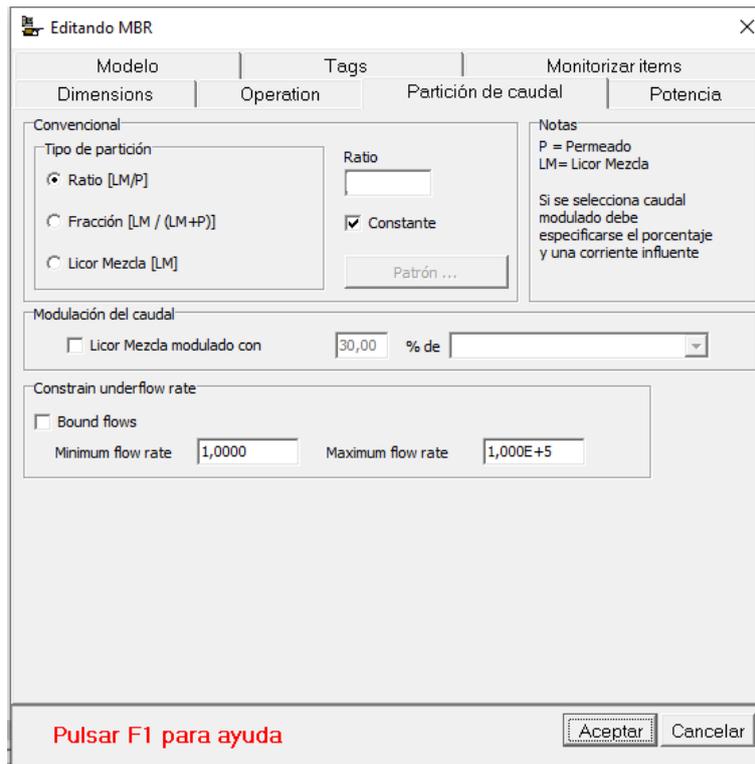


Figura 22: Editor del MBR - Editor del ratio (Biowin)

El ratio (LM/P) es la relación entre el flujo de licor mezcla (LM) y el flujo de permeado (P). El licor mezcla es el líquido que contiene los microorganismos y los contaminantes que se tratan en el MBR y el permeado es el líquido que pasa a través de la membrana de filtración y se recoge como efluente tratado. En este caso, el ratio no influye en el efluente, ya que no hay otros tratamientos que intervengan en el proceso, es decir, el agua que se filtra a través del MBR es la misma que la suspensión del reactor, no hay cambios en su composición.

A continuación, se presenta la figura representativa, se empleó un corriente de entrada, un equipo de MBR, una corriente de salida del efluente, una corriente de salida de lodos y dos separadores de corrientes:

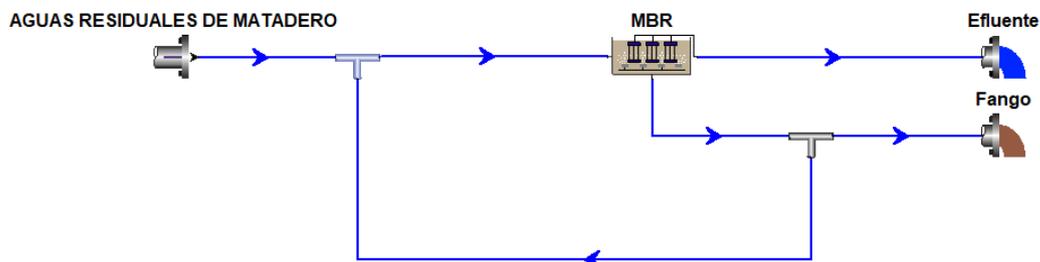


Figura 23: Diagrama representativos de las diferentes corrientes utilizados en la simulación (Elaboración propia)

El tiempo de retención de sólidos (TRS o en sus siglas en inglés SRT) y el tiempo de retención hidráulica (TRH o en sus siglas en inglés HRT) son dos parámetros importantes en el diseño de cualquier proceso de depuración biológica.

El SRT es el tiempo durante el cual los sólidos del biorreactor se mantienen en la unidad antes de ser eliminados y se utiliza para conocer el tiempo en el que los microorganismos tardan en descomponer la materia orgánica del agua residual [30]. La fórmula para calcular el SRT es:

$$TRS (d) = \frac{V_{reactor}(m^3) \cdot SSV \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{\left(\left(SSV_e \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot Q_e \left(\frac{m^3}{d}\right)\right) + \left(SSV_l \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot Q_l \left(\frac{m^3}{d}\right)\right)\right)}$$

Donde:

- $V_{reactor}$ es el volumen del reactor.
- SSV es la concentración de sólidos suspendidos volátiles en el reactor
- SSV_e es la concentración de sólidos suspendidos volátiles en el efluente.
- Q_e es el caudal de salida de efluente.
- SSV_l es la concentración de sólidos suspendidos volátiles en los lodos extraídos
- Q_l es el caudal de lodos.

Por otro lado, la utilización de un sistema MBR garantiza que la concentración de sólidos en el efluente es cero, por tanto, este término se anula, quedando de la siguiente forma:

$$TRS (d) = \frac{V_{reactor}(m^3) \cdot SSV \left(\frac{kg}{m^3}\right)}{\left(SSV_l \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot Q_l \left(\frac{m^3}{d}\right)\right)}$$

También, se puede reducir aún más, debido a que todos los SSV del reactor, son iguales a los SSV de la purga. Por tanto, finalmente queda:

$$TRS (d) = \frac{V_{reactor}(m^3)}{Q_l \left(\frac{m^3}{d}\right)}$$

Este parámetro se regula mediante el volumen del reactor, como se pudo ver anteriormente, y también mediante del caudal de purga. En el programa, se ajusta utilizando el fraccionador de caudal, de la siguiente forma.

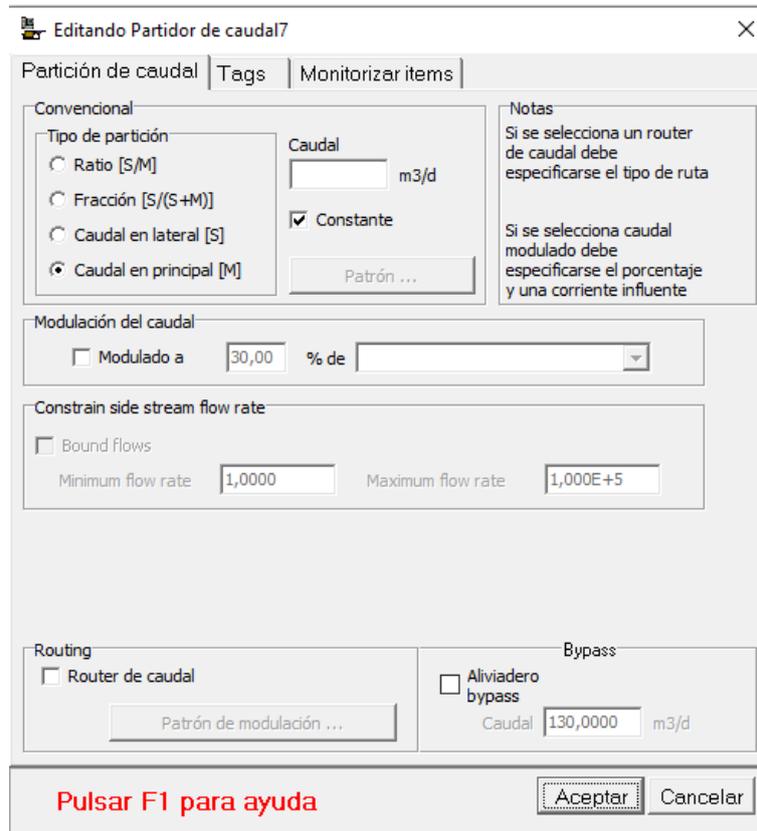


Figura 24: Editor del partidor de caudal (BioWin)

El HRT es el tiempo durante el cual las aguas residuales se mantienen en el reactor y mide la velocidad a la que el agua se mueve a través de reactor y afecta a la eficacia del tratamiento [30]. La fórmula para calcular el HRT es:

$$TRH (h) = \frac{V_{reactor}(m^3) \cdot 24 \left(\frac{h}{d}\right)}{Q \left(\frac{m^3}{d}\right)}$$

Donde:

- $V_{reactor}$ es el volumen del reactor.
- Q es el caudal de entrada de agua residual al reactor.

Para analizar las mejores condiciones de operación del biorreactor se evaluaron tres tiempos de residencia (2, 5 y 10h) analizando la influencia de la edad de lodo y la concentración de oxígeno disuelto. En la Figura 25, A, B y C, se muestran los resultados obtenidos en la determinación de sólidos suspendidos totales para diferentes tiempos de residencia hidráulico (TRH) en función del tiempo de retención celular (TRS). El resto de los resultados procedentes de la simulación se encuentran en el Anexo II.

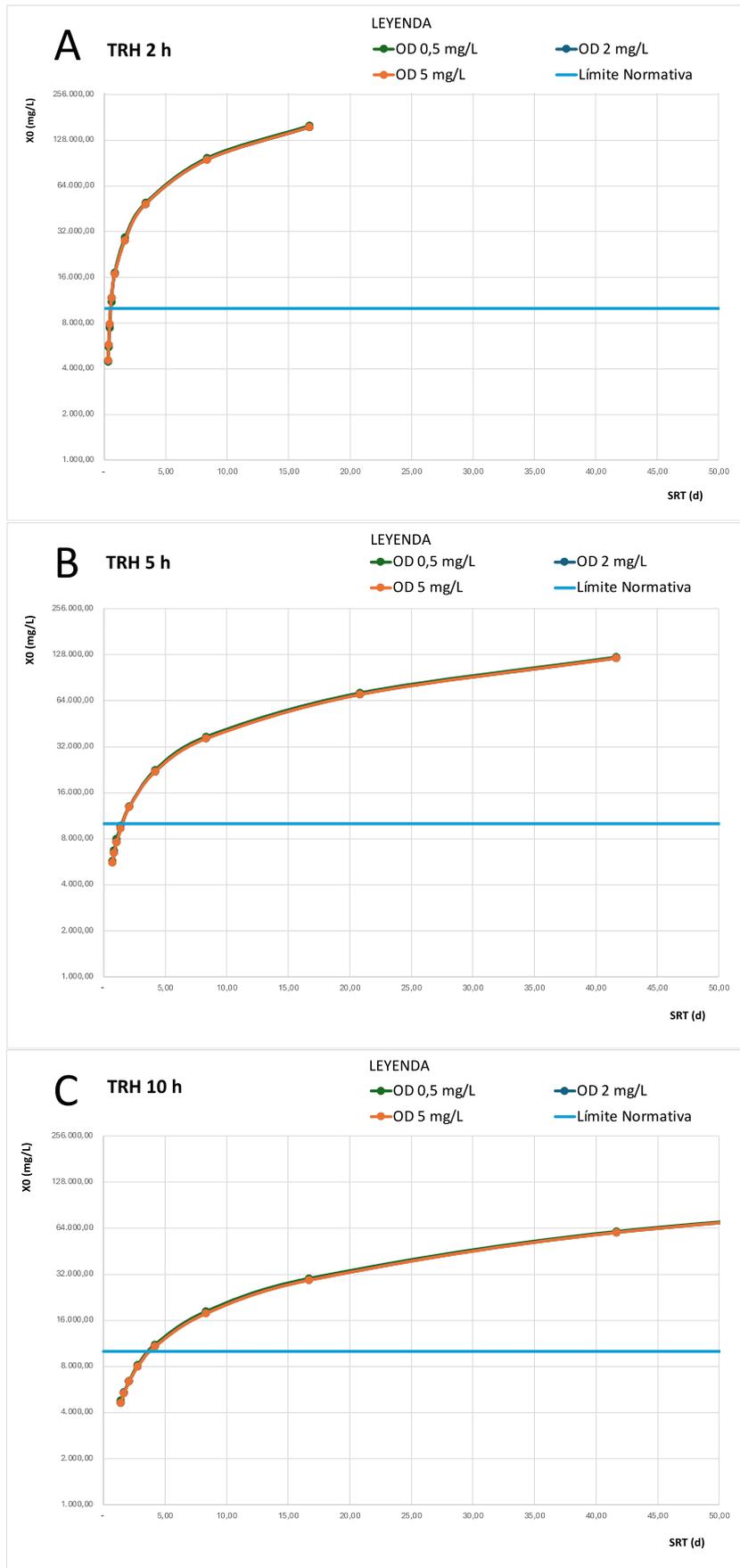


Figura 25: Evolución de los sólidos suspendidos para distintos TRH (A, TRH= 2 h; B TRH= 5 h y C; TRH= 10h) (Elaboración propia)

Como se observa, el oxígeno disuelto no afecta en la producción de sólidos suspendidos (SS) independientemente del tiempo de residencia hidráulico. Estos resultados son evidentes puesto que el OD únicamente afecta a la actividad metabólica y al crecimiento de los microorganismos.

La concentración de los sólidos en suspensión en el reactor presenta un crecimiento típico correspondiente a la cinética de Monod. Es decir, independientemente del tiempo de retención hidráulico impuesto, una mayor edad de lodo se traduce en un incremento de la concentración de sólidos hasta alcanzar un valor estable. Un TRS elevado se traduce en una mayor acumulación de biomasa en el reactor, por tanto, aumenta también la concentración de sólidos en suspensión, al estabilizar el sistema, la concentración de sólidos termina manteniéndose casi constante. Este comportamiento tiene relación con el concepto de mantenimiento celular, puesto que a elevadas concentraciones se producen severas condiciones de limitación de sustrato. La situación de inanición produce que los microorganismos utilicen el sustrato disponible principalmente, para su mantenimiento y no para actividades relacionadas con el desarrollo de nueva biomasa, lo cual reduce el crecimiento neto del lodo.

Por otra parte, una elevada concentración de sólidos en el biorreactor se traduce en problemas de ensuciamiento de la membrana y dificultad para mantener la concentración de oxígeno disuelto, debido a su elevada viscosidad [22]. El fabricante de las membranas seleccionadas establece como criterio de diseño una concentración de sólidos suspendidos totales es entre 10,4 g/l y 11,2 g/l, según la Figura 18.

Por tanto, se ha descartado todas las condiciones de operación que resultan con una concentración de sólidos suspendidos igual o mayor a 10.000 mg/l (10 g/l) para asegurar el funcionamiento correcto de las membranas y así mantener la vida útil que propone el fabricante (Anexo III). A la vista de los resultados, la concentración de sólidos se controla mediante el caudal de purga, es decir, solo se trabajará con purgas mayores de 200 m³/d para TRH de 2 horas y 150 m³/d para TRH de 5 y 10 horas. En la Figura 26, se muestran las condiciones estudiadas que cumplen con el criterio de diseño establecido.

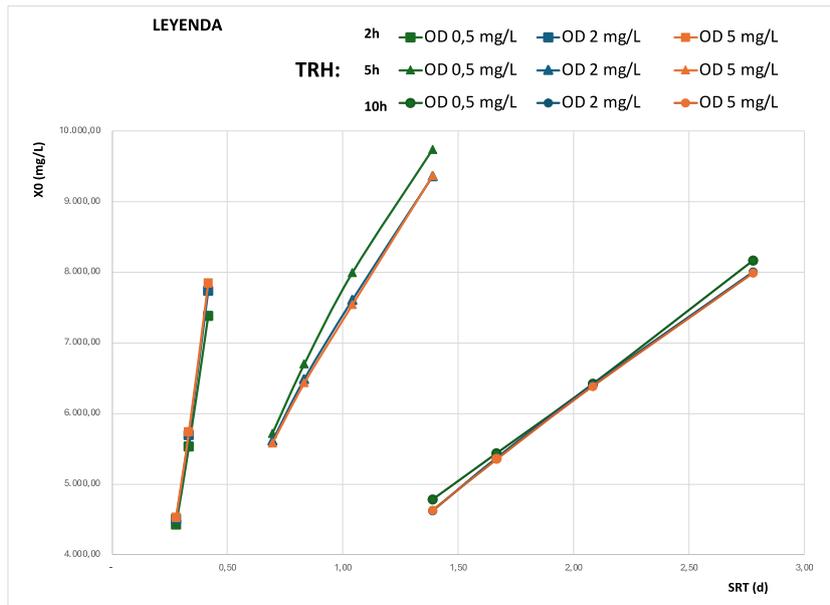


Figura 26: Evolución de los sólidos suspendidos en valores viables para diferentes TRH (Elaboración propia)

El objetivo del diseño es alcanzar una depuración biológica que permita el vertido al dominio público. El grado de eliminación de materia orgánica se ha realizado mediante el seguimiento de la Demanda Química de Oxígeno (DQO). A continuación, se presenta la evolución de la DQO para diferentes valores de TRS, TRH y cantidades de oxígeno disuelto. Únicamente se representan los datos viables, atendiendo al criterio de diseño relativo a la concentración de sólidos disueltos en el biorreactor. Los resultados quedan de la siguiente forma:

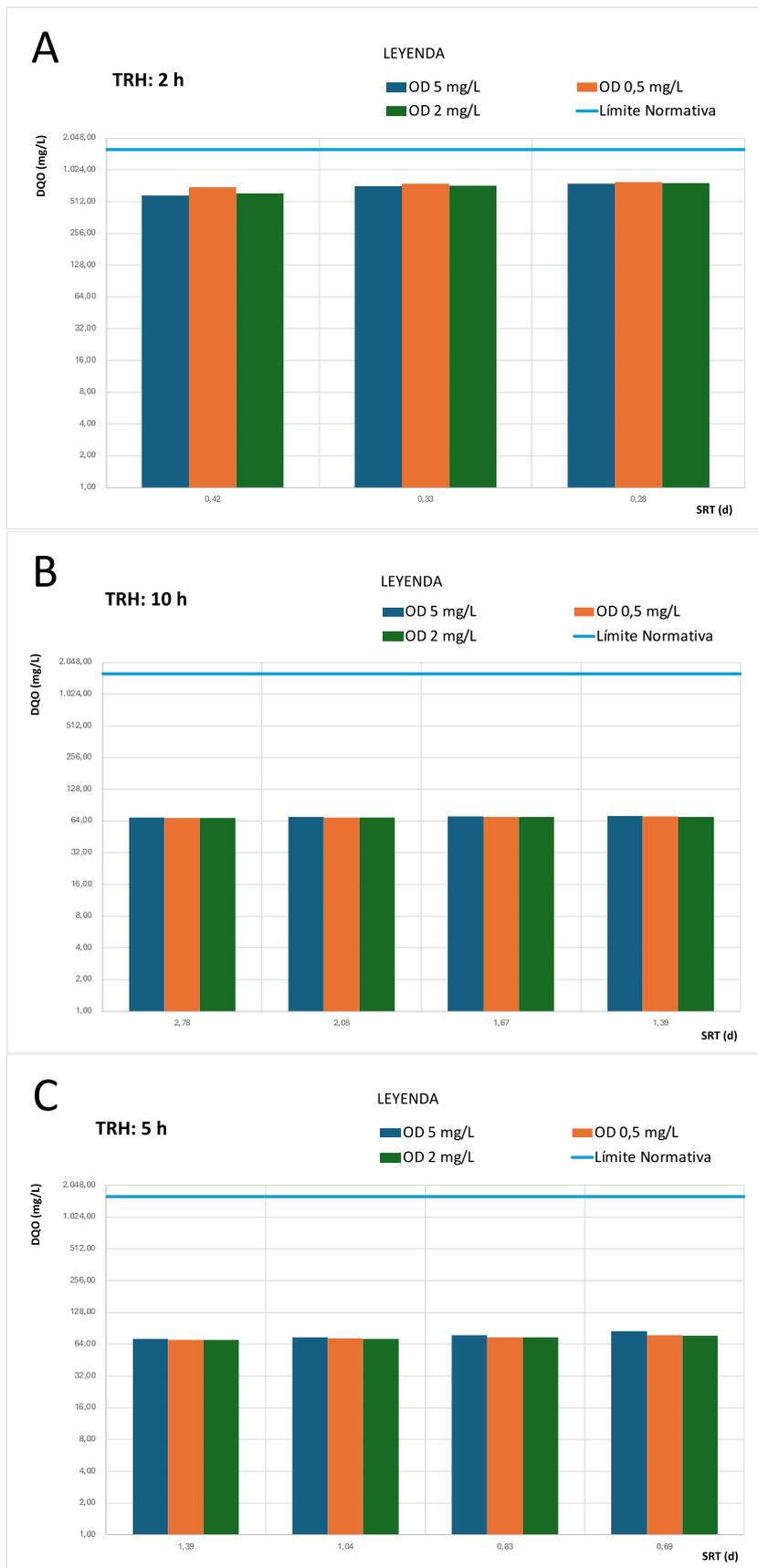


Figura 27: Variación del OD a lo largo de distintos TRS (A, TRH= 2 h; B TRH= 5 h y C; TRH= 10h) (Elaboración propia)

En este sentido, se puede observar una clara diferencia al aumentar el volumen del reactor. Cuando se establece un tiempo de retención hidráulica de dos horas, los valores de DQO en el efluente están en torno a 700 mg/L, independientemente de la edad de lodo impuesta o la consigna de concentración de oxígeno disuelto (OD). Sin embargo, cuando el TRH se incrementa por encima de 5 horas el sistema experimenta valores próximos de DQO en la corriente de salida, próximos a 64 mg/L (ver Figura 27). Esto tiene sentido, ya que el volumen, el TRH y el SRT están relacionados. Por lo tanto, a mayor TRH el agua residual permanece más tiempo en contacto con los microorganismos, y estos pueden eliminar más materia orgánica y, por consiguiente, reducen la DQO. Por otro lado, es clave incrementar la edad de lodo ya que se reduce significativamente el volumen purgado y, por tanto, se minimiza la corriente de residuos sólidos peligrosos a tratar.

En la degradación de la materia orgánica, se puede ver como el oxígeno disuelto está relacionado con la actividad de los microorganismos. Cuanto más oxígeno disuelto haya, los microorganismos se mantienen más activos, lo que hace que disminuya la DQO. Cabe destacar, que no existe una degradación significativa cuando se incrementa el oxígeno disuelto de 2 a 5 mg/L, pero sí se ve un aumento considerable en los costos. Estos resultados están en concordancia con la bibliografía [22].

A continuación, se muestra la relación entre el oxígeno disuelto y el coste por metro cúbico:

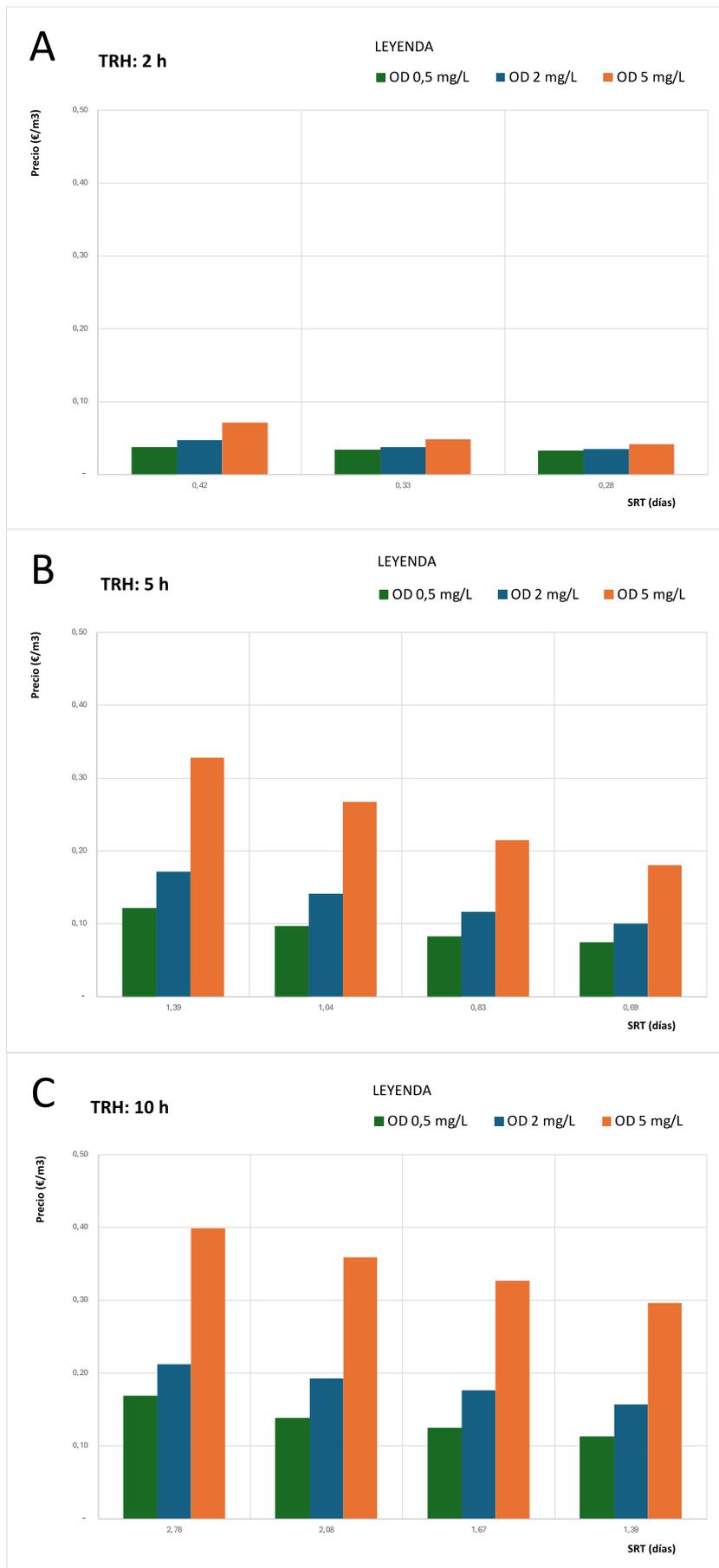


Figura 28: Balance de precios en distintos TRH y OD (A, TRH= 2 h; B TRH= 5 h y C; TRH= 10h) (Elaboración propia)

Como se puede observar si hay grandes cambios en cuanto al coste por metro cúbico derivado del proceso de aireación biológica. A medida que aumenta el oxígeno disuelto y el volumen del reactor, el precio también aumenta considerablemente. Esto se debe a que en los sistemas de aireación mantener altos niveles de oxígeno disuelto es costoso. Por lo que se debe encontrar un equilibrio entre la eficacia del tratamiento y las condiciones de operación viables económicamente.

Una vez analizados estos parámetros, se puede considerar que el TRH óptimo es de 2 horas, atendiendo a los siguientes criterios:

- Se cumple con la normativa general de vertido de la provincia de Santa Cruz de Tenerife, asegurando que el efluente vertido cumpla con los estándares establecidos de: DQO y DBO, SST, Temperatura, Grasas y aceites y Aceites minerales.
- Se mantiene un precio razonable por m^3 , manteniendo la eficiencia del tratamiento con el precio.

Pero no se cumple con la normativa nacional de eliminación de nutrientes, que requiere una eliminación de entrada entre un 70-80 % para el nitrógeno y un 80% para el fósforo, que en el estudio se busca alcanzar valores de menor o igual a 71,76 mg/L para nitrógeno y menor o igual a 9,74 mg/L para el fósforo.

Los resultados encontrados revelan que es necesario pensar una configuración que permita eliminar los nutrientes y optimizar el volumen de purga.

11.4. Diseño del tratamiento secundario para la eliminación de nutrientes

Este apartado se centra en realizar un diseño preliminar del tratamiento secundario para alcanzar la eliminación de nutrientes del agua residual procedente de un matadero. Partiendo del estudio anterior, se sabe que, incluso en el peor de los casos se cumplen los requisitos de concentración de eliminación de materia carbonosa (DQO), además de todos los demás parámetros establecidos en el Plan Hidrológico de Tenerife.

En esta segunda parte, para el diseño del proceso de depuración óptimo, se debe encontrar la solución para la máxima eliminación de las distintas formas de nitrógeno y para el fósforo, teniendo en cuenta el coste energético, el espacio ocupado y la producción de lodos.

Para ello es importante describir los procesos de nitrificación y desnitrificación, que permiten la eliminación del nitrógeno:

- **Nitrificación:** Transforma el amoníaco (NH_3) en nitrito (NO_2^-) y luego en nitrato (NO_3^-). El nitrito normalmente se encuentra en bajas concentraciones debido a la elevada velocidad de transformación a nitratos.
- **Desnitrificación:** Transforma los nitratos (NO_3^-) en nitrógeno gas (N_2), que se libera a la atmósfera. Este proceso requiere condiciones anóxicas y aporte de carbono.

Para ello, en primer lugar, se optimizará el comportamiento del reactor aerobio modificando los valores de los siguientes parámetros de diseño: Volumen del reactor

aerobio (V en m^3) y Oxígeno disuelto (OD en mg/l). En segundo lugar, se incorporará un reactor anóxico y se estudiará el comportamiento variando los siguientes parámetros: Volumen del reactor anóxico (V en m^3) y el caudal de recirculación entre el reactor aerobio y anóxico (sin unidades). En el Anexo IV, se muestra los resultados de todas las simulaciones realizadas.

Para estudiar la evolución de las formas de nitrógeno: amonio, nitrato, nitrito y nitrógeno total, se estudiaron cuatro tiempos de residencia (10, 15, 20 y 25 h), en función del tiempo celular, para una concentración de oxígeno disuelto de 2 mg/L . En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos.

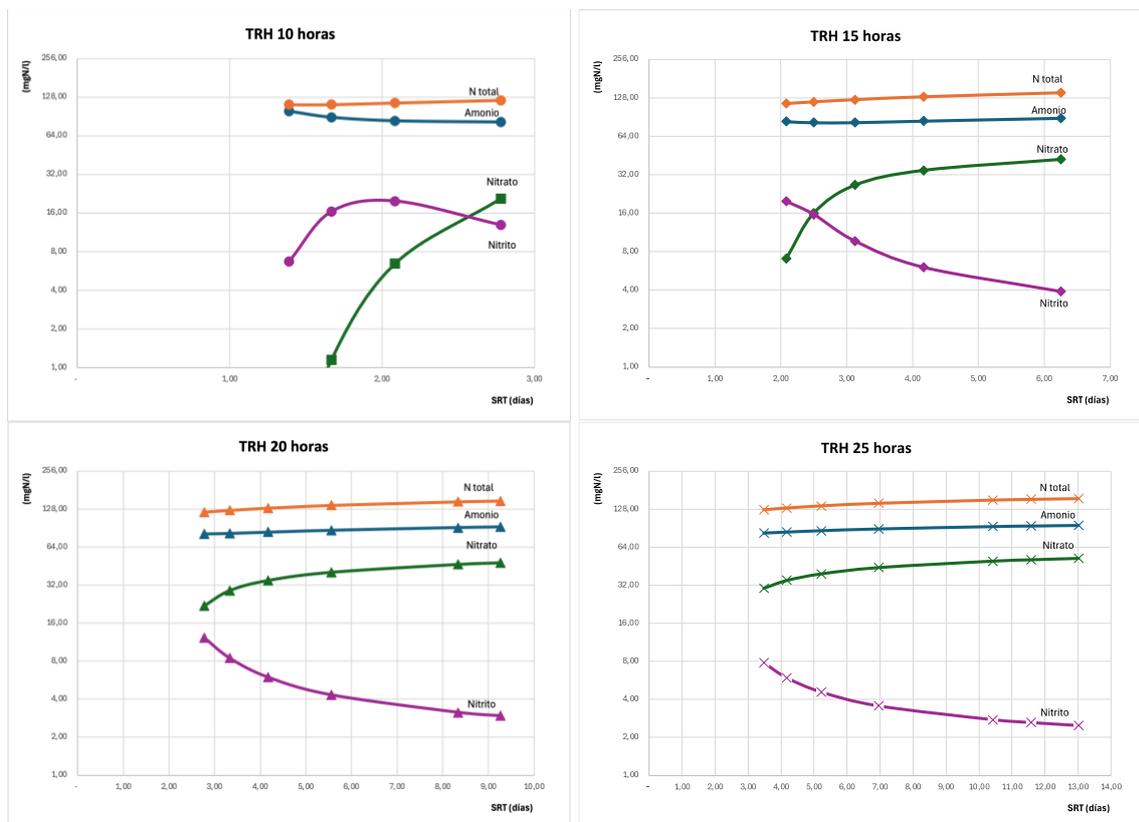


Figura 29: Evolución de las formas de nitrógeno para distintos TRH en horas (Elaboración propia)

Los resultados muestran la evolución típica de la cinética de nitrificación cuando se modifica el tiempo de retención celular y el hidráulico. Para alcanzar el mayor rendimiento de eliminación de nitrógeno mediante la vía de nitrificación-desnitrificación se debe alcanzar la máxima concentración de nitratos en el sistema. En definitiva, imponer unas condiciones de operación que permitan la nitrificación total. Los resultados muestran que a un tiempo de retención celular inferior a tres días el sistema no es viable. Bajo esas condiciones el sistema no alcanza el proceso de nitrificación completa y se obtienen elevadas concentraciones de nitritos.

A edades de lodo superiores a tres se muestra un descenso de la concentración de nitritos y el sistema es capaz de alcanzar de alcanzar una nitrificación completa, independientemente del tiempo de retención hidráulico. Sin embargo, como era de

esperar, mayores TRH permiten alcanzar una mayor nitrificación. Según ese criterio, la mejor opción de diseño es de un TRH 25 horas, ya que, se consiguen valores mínimos de nitrito y máximos de nitratos, mientras que, por otro lado, las concentraciones de nitrógeno (N_2) y de amonio son constantes a lo largo del tiempo.

Otro aspecto fundamental es el costo energético asociado a este proceso. A continuación, se representan los resultados obtenidos para los diferentes tiempos de residencia hidráulico (TRH) representando los precios frente a los tiempos de retención de sólidos (TRS) para una concentración de oxígeno disuelto de 2 mg/L:

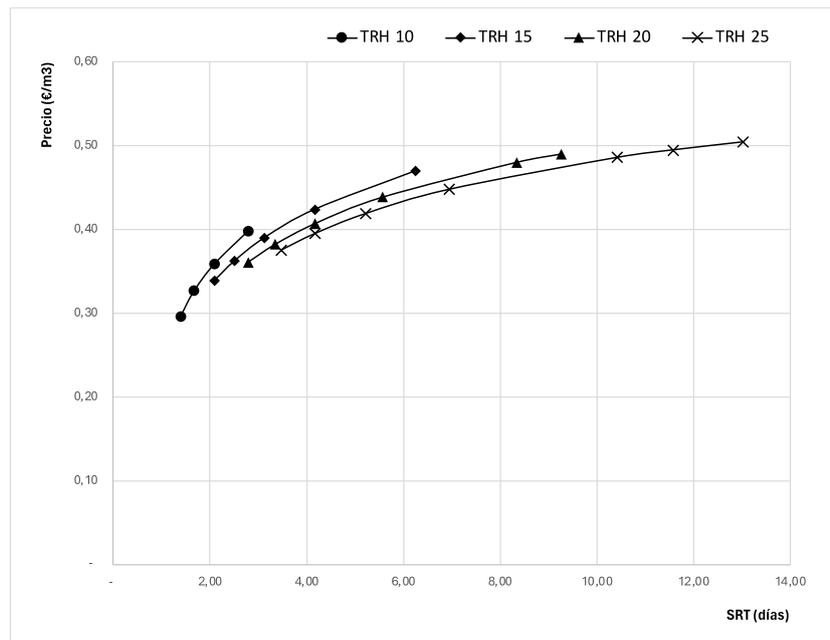


Figura 30: Evolución del precio para distintos TRH (Elaboración propia)

Los resultados encontrados, muestran que un incremento del tiempo de retención se traduce en un mayor coste específico (€/m^3). Este comportamiento es atribuido a que un mayor TRH se traduce en un reactor mayor y, por tanto, elevados consumos específicos de aire para la degradación biológica. Según estos resultados se puede concluir que la mejor opción es un TRH 15 horas a un SRT de 6 días. Estos resultados muestran unas concentraciones de nitrato de 42,25 mg/L, y nitritos de 3,91 mg/L, amonio de 88,16 mg/L y nitrógeno de 139,69 mg/L. Por otra parte, según la bibliografía, 'Veolia' indica que un MBR suelen trabajar con valores entre 7,6 y 12,6 horas para el HRT, según la Tabla 18.

El segundo aspecto que analizar para la optimización del biorreactor aerobio es la concentración de oxígeno disuelto (OD). Como ya se ha comentado anteriormente este parámetro está relacionado con la actividad microbiana, y por consiguiente influye en la eliminación de nutrientes. Regular adecuadamente esta variable es importante ya que repercute directamente en los costos, por otro lado, si no se opera con una aireación adecuada, los nutrientes no se degradarán correctamente. Para ello se analizó diferentes concentraciones para los SRT y HRT óptimos del paso anterior. En la figura siguiente se puede contemplar la variación de las distintas formas de nitrógeno frente a las distintas consignas de OD.

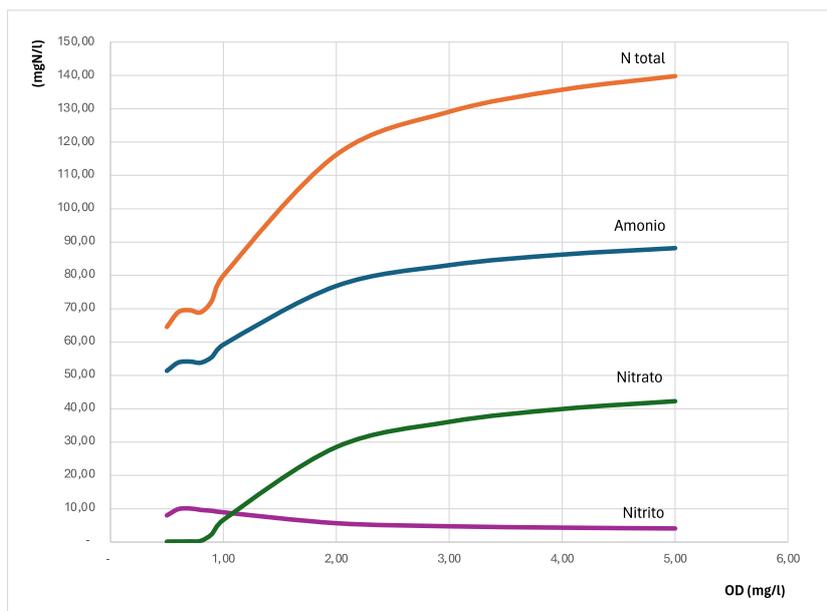


Figura 31: Variación de las formas de nitrógenos respecto al Oxígeno suministrado (Elaboración propia)

Como se puede observar a concentraciones superiores a 2 mg/L, se alcanza las máximas concentraciones de nitrato para el caso estudiado. Estos datos están en concordancia con la bibliografía que ponen como concentraciones óptimas entre 1-1,5 mg/L [30]. En este caso se seleccionará como óptimo 2mg/L, ya que, se considera que después de esa concentración los niveles de nitritos permanecen constantes, mientras que el amonio y el nitrógeno total aumentan. Además, se debe considerar el aspecto económico que supone una mayor concentración de OD, a continuación, se presenta la Figura 32, donde se ve reflejado esta variación exponencial del precio:

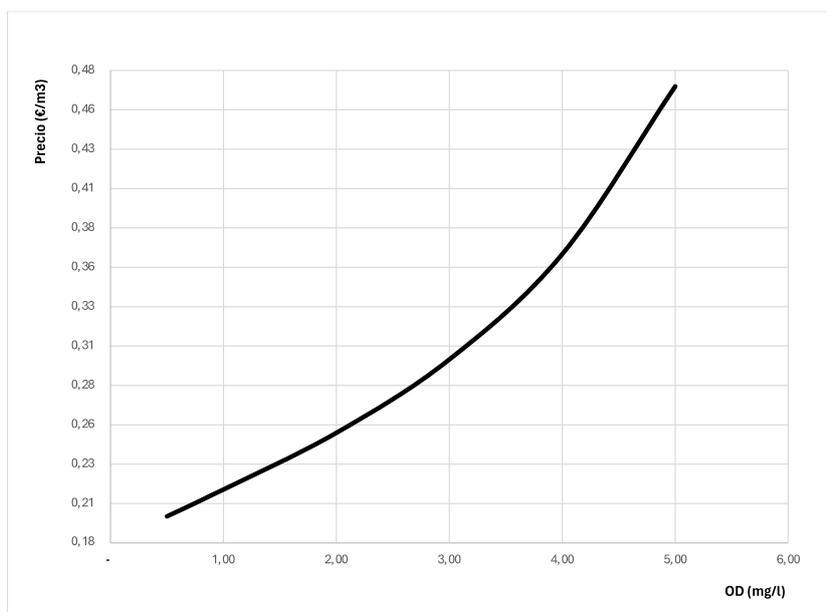


Figura 32: Variación del costo energético frente a un aumento de oxígeno en el reactor (Elaboración propia)

Por tanto, a valores superiores de 2mg/l de OD se considera no viable económicamente.

Cabe mencionar que durante estas simulaciones el fósforo no ha tenido un cambio significativo en cuanto a su concentración, se puede decir que, el proceso de membranas no ofrece ningún beneficio a la eliminación del fósforo [22]. Estos resultados, además de los mencionados anteriormente, se puede ver en los Anexo IV y V.

A continuación, se presenta una tabla con las características principales del reactor biológico aerobio optimizado. Estas características no se modificarán, ya que se supone que no se podrá conseguir un reactor más eficiente:

MBR	Volumen reactor (m³)	OD (mg/L)	Purga (m³/d)
	625	2	100

Tabla 19: Representación de los valores óptimos del biorreactor (Elaboración propia)

Una vez optimizado el biorreactor aerobio, se debe analizar el segundo proceso del ciclo de la eliminación del nitrógeno, la desnitrificación. Como se mencionaba al principio de este apartado, la desnitrificación necesita un medio anóxico, es decir, un medio libre de oxígeno. Para ello se integra un reactor anóxico en el sistema ya optimizado. Este se colocará anterior al reactor aerobio con un sistema de recirculación. Según la bibliografía esta configuración se denomina sistema modificado de Ludzack-Ettinger [31]. La siguiente figura muestra la configuración escogida.

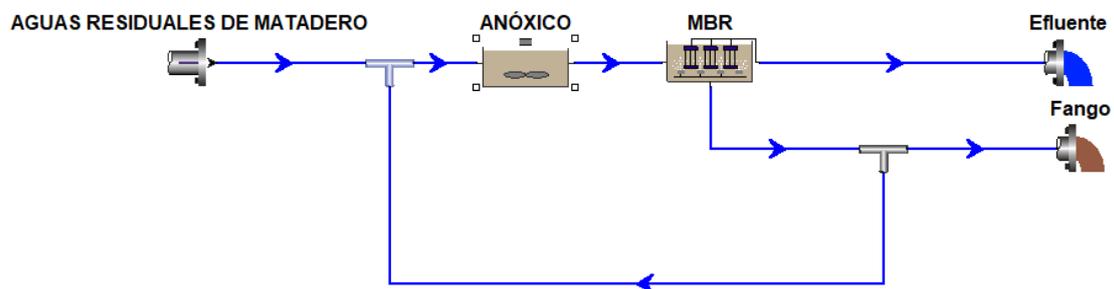


Figura 33: Diagrama representativo del proceso anaerobio y anóxico (Elaboración propia)

El primer paso es encontrar el volumen del reactor anóxico óptimo. Para ello se simulan distintos volúmenes, entre 50 y 200 m³, estos resultados se muestran en el Anexo VI. A continuación, se muestra la imagen donde se intercambia este parámetro en el software.

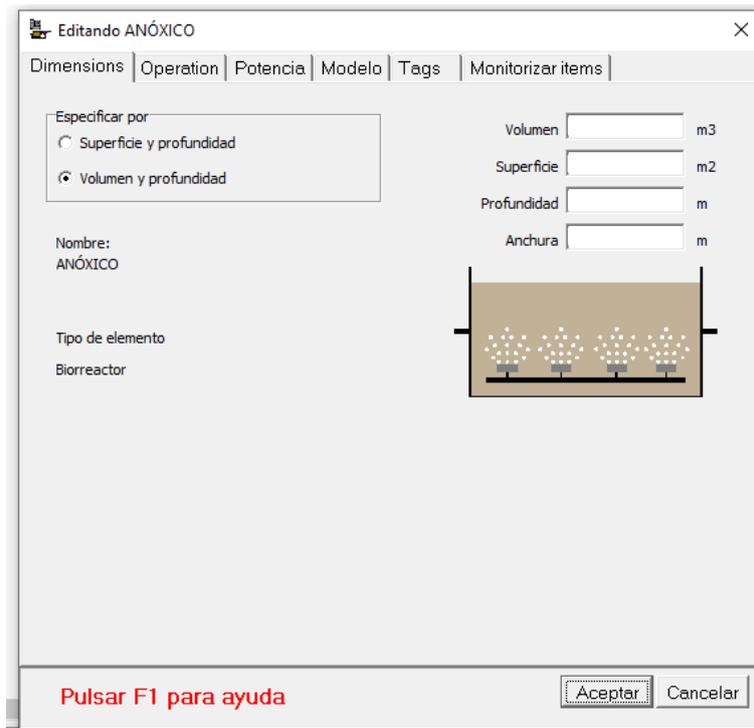


Figura 34: Editor del volumen reactor anóxico (BioWin)

Por otro lado, el equipo en el programa se encuentre como “biorreactor”, para convertirlo en anóxico, se debe declarar la consigna de OD como cero, o simplemente clicar en “no aireado”.

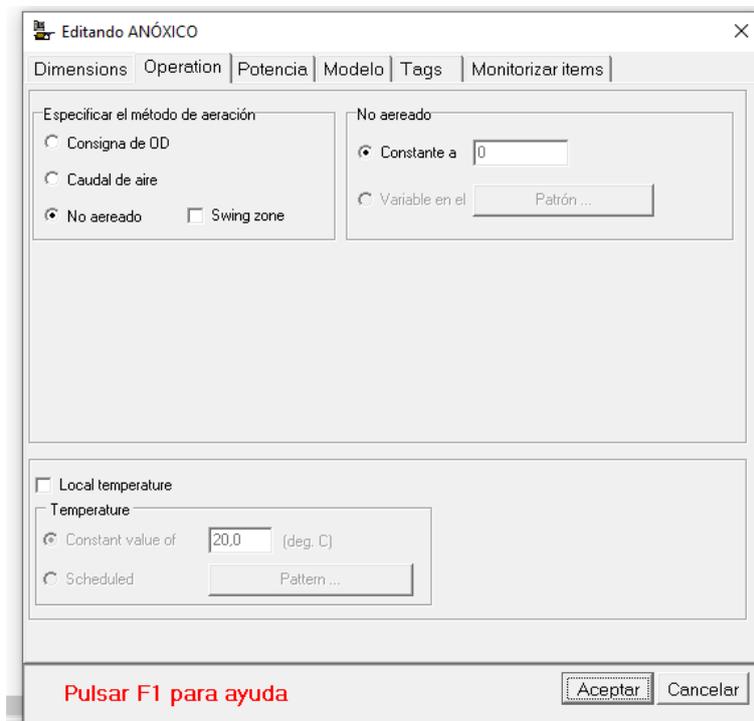


Figura 35: Modificar el biorreactor a anóxico (BioWin)

Una vez se ha estudiado los diferentes volúmenes, se observa cómo evolucionan la concentración de nutrientes en el efluente. En el Anexo VI se muestran todos los resultados de las diferentes simulaciones.

En la Figura 36 se representa la evolución del contenido en nitrógeno en función del volumen del reactor anóxico.

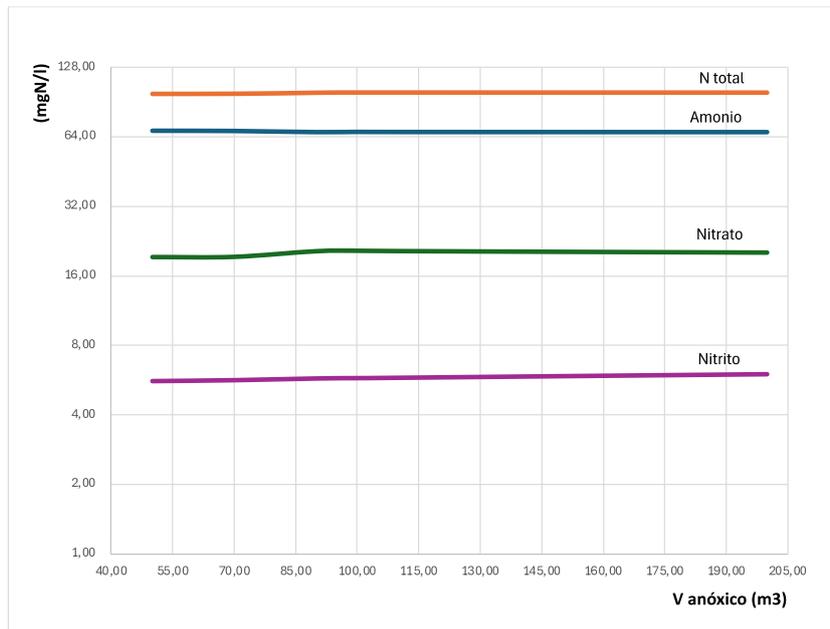


Figura 36: Evolución de las formas de nitrógeno al añadir un reactor anóxico (Elaboración propia)

En cuanto a los nitrógenos, la adición de un reactor anaerobio no influye significativamente, por otro lado, si influye en la eliminación del fósforo. Se observa que a un volumen de 90 m³, el fósforo cae exponencialmente (Figura 37) llegando a los 0,42 mg/L, por tanto, suponemos este tamaño, como el óptimo para el reactor anóxico. Se observa que el tamaño anóxico del reactor no influye significativamente en el coste energético (Anexo VI), igualmente, el tamaño seleccionado corresponde con el precio más económico (0,30 €/m³).

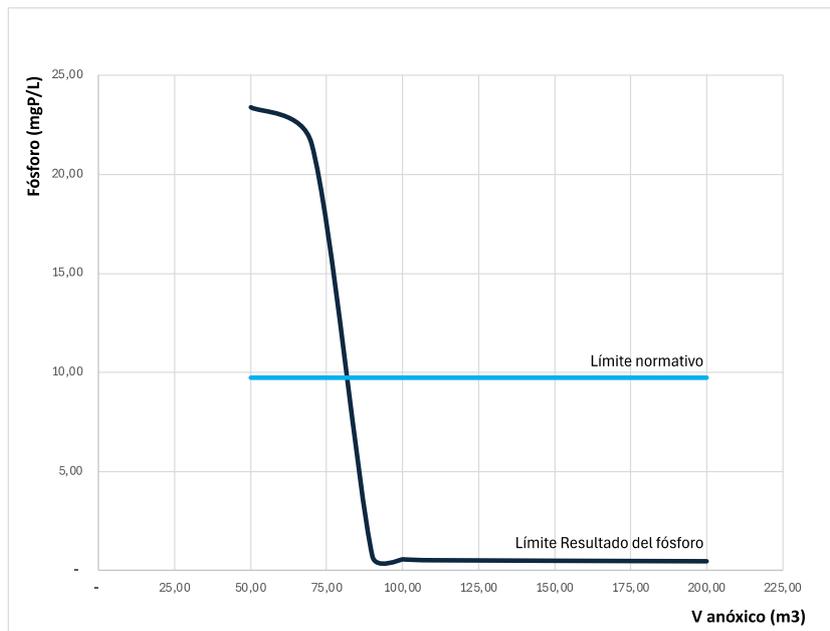


Figura 37: Evolución del fósforo al añadir un reactor anóxico (Elaboración propia)

Por último, se selecciona el ratio de recirculación entre el reactor aerobio y anóxico, ya que en este caso si influye, debido a que, el influente prácticamente no tiene nitratos y la desnitrificación es necesario recircularlos desde le reactor aerobio. Se introducen diferentes valores, en el estudio se ha simulado valores desde 1 a 5, los resultados se pueden observar en el Anexo VI.

A continuación, se muestra la figura para intercambiar este valor de ratio de recirculación en el software:

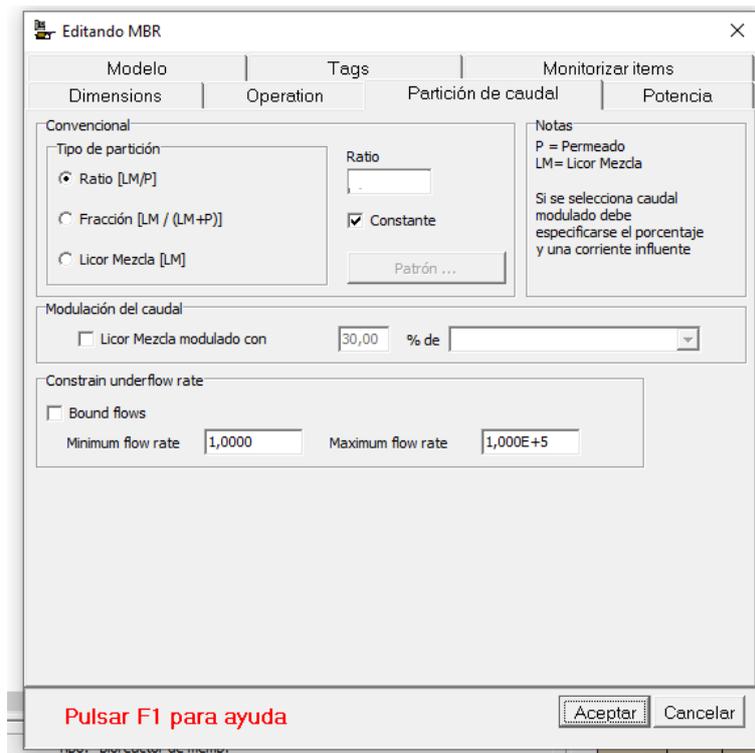


Figura 38: Variación de ratio en el reactor biológico (BioWin)

Una vez realizadas las simulaciones pertinentes, la siguiente gráfica muestra el contenido en nitrógeno:

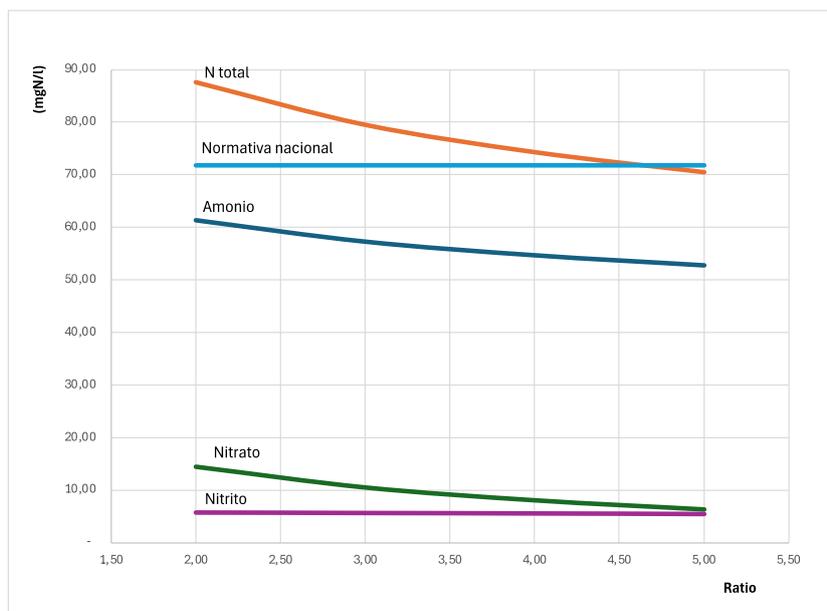


Figura 39: Variación de las formas de nitrógeno según el ratio (Elaboración propia)

Se observa como finalmente cumple con la normativa nacional lo que permite obtener un efluente que cumple con los estándares requeridos consiguiendo reducir el nitrógeno hasta los 70,45 mg/L, permitiendo su descarga al colector. Por otro lado, en cuanto al costo energético no supone una variación significativa.

A continuación, se presenta una tabla con los valores necesarios para la caracterización de los equipos, así como los valores finales del efluente:

V anóxico (m ³)	V MBR (m ³)	OD (mg/l)	Ratio	Caudal de purga (m ³ /d)
90	625	2	5	100

Tabla 20: Valores de caracterización de equipos (Elaboración propia)

TRH MBR (h)	SRT MBR (d)	€/m ³
15	6,25	0,3

Tabla 21: Tiempos de residencia del reactor aeróbico y costo energético (Elaboración propia)

SSV _{reactor} (mg/L)	Nitrógeno T (mg/L)	Fósforo (mg/L)	DBO ₅	DQO
9.717,00	70,45	0,42	1,14	77,78

Tabla 22: Valores del efluente final (Elaboración propia)

11.5. Tratamiento de lodos.

Para finalizar este diseño se decide implantar una línea de fangos compuesta por un digestor anaerobio y una unidad de deshidratado. Además, se contempla la instalación de un sistema de cogeneración eléctrica y así obtener una reducción de consumo eléctrico, además de, contribuir con el medioambiente. Esta última parte únicamente se centra en los lodos, con lo que los datos del efluente no se ven afectados.

El estudio se llevará a cabo optimizando el tamaño del digestor, esta variable está directamente relacionada con el tiempo que permanecerá el sustrato en el reactor, los resultados óptimos serán aquellos en los que el digestor trabaje a un tiempo de residencia medio, según la bibliografía 30-40 días teóricos [32]. Esto se debe a que el

proceso de digestión ocurre en 4 fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada una de estas partes conlleva una serie de bacterias que requieren diferentes días para poder generar biogás. Las bacterias de la fase acidogénica son facultativas, mientras que las bacterias de la fase metanogénica son anaerobias estrictas, con lo que se trabajará en digestores puramente anaerobios [33].

La composición del biogás depende mayoritariamente del sustrato con el que se trabajará, igualmente los componentes y porcentajes típicos son los siguientes:

Componente	Fórmula	Contenido (%)
Metano	CH ₄	50-75
Dióxido de Carbono	CO ₂	25-45
Vapor de agua	H ₂ O	2-7
Sulfuro de hidrógeno	H ₂ S	0,002-2
Nitrógeno	N ₂	<2
Amoníaco	NH ₃	<1
Hidrógeno	H ₂	<1
Otros		<2

Tabla 23: Composición promedio de biogás (Monteros et al., 2017).

El biogás se produce en grupos de cogeneración produciendo energía eléctrica o térmica, este se produce en un biodigestor que es un reactor en el que las reacciones químicas tienen un origen biológico.

Existen varios tipos de tecnologías de biodigestión. Los biodigestores utilitarios suelen tener una alimentación continua o semicontinua. Cada vez que ingresa al biodigestor un sustrato, sale prácticamente el mismo volumen, con grados variables de digestión. El volumen dentro del biodigestor es siempre estable. En este caso se usará el marino, se trata de un modelo horizontal, más ancho que profundo, puede estar enterrado o no, la cámara de aire se infla con la producción de gas teniendo así mayor área para la cámara de gas, aumentando la producción de biogás.

Para dimensionar un biodigestor hay tres factores importantes: la carga de sustrato, la temperatura de trabajo y el tiempo de retención hidráulica.

- El caudal de purga establecido en los apartados previos.
- La temperatura en la que se puede producir el proceso de biodigestión es entre 10 y 55 °C. Los procesos pueden agruparse en tres grupos principales: Psicrófilos: trabajan de 10 a 25 °C, Mesófilos: trabajan de 25 a 40 °C y Termófilos: trabajan de 40 a 55 °C [33]. La temperatura es una variable difícil de controlar ya que para mantener altas temperaturas dentro del reactor cuando la temperatura ambiente es baja, se necesitan calidad en los materiales y un buen aislamiento, lo que conlleva a mayores costos de inversión. Además, se debe tener en cuenta que, para un mismo tiempo y material, se producirá más biogás a temperaturas termofílicas que a temperaturas psicrófilas. Es importante recordar que en los distintos rangos de temperatura trabajan grupos de microorganismos diferentes, por lo que no es necesario operar a la mayor temperatura, sino garantizar que esta sea estable dentro del biodigestor, ya que, si la temperatura varía, los microorganismos no podrán colonizar el medio de

forma permanente y, por tanto, la producción de biogás no será constante. Debido a este razonamiento, se decide trabajar a un rango de temperatura de 35°C, debido a que en Tenerife el rango de temperaturas en invierno y verano suelen ser en torno a los 20°C y 30°C, respectivamente, con lo que es una temperatura medianamente fácil de mantener [33]. A continuación, se presenta la Figura 40 donde se introduce la temperatura en el programa.

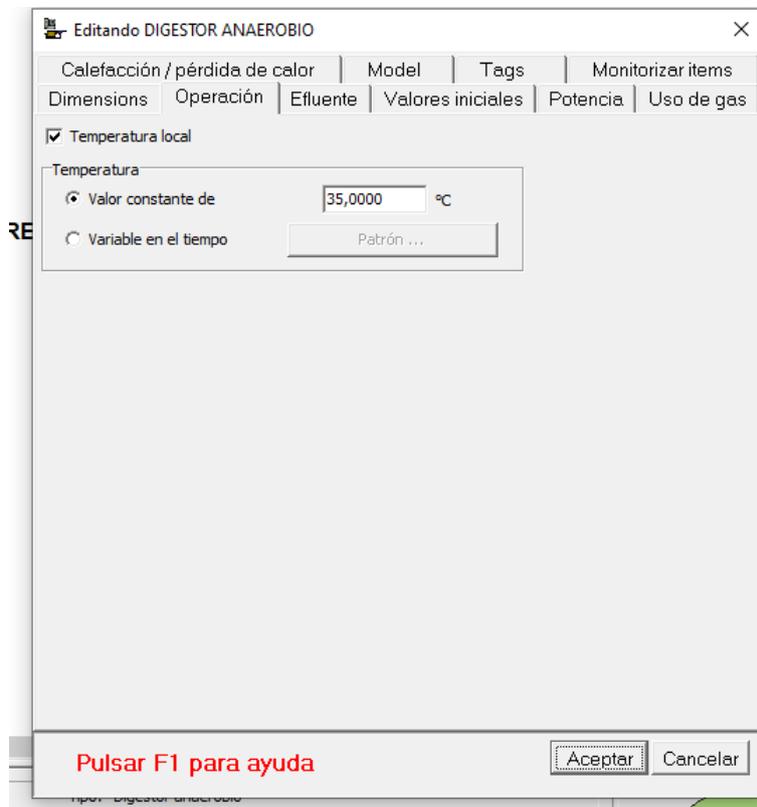


Figura 40: Incorporación de temperatura del digestor (BioWin)

- El tiempo de retención hidráulica indica el tiempo que se encuentra el sustrato dentro del digestor. Esta variable se determina por el volumen del reactor y se encuentra directamente relacionada con la temperatura y, en consecuencia, con la tecnología a utilizar [32]. Como se muestra la siguiente figura, en ella se introduce el volumen del reactor con el que se trabajará con un TRH de 30 días.

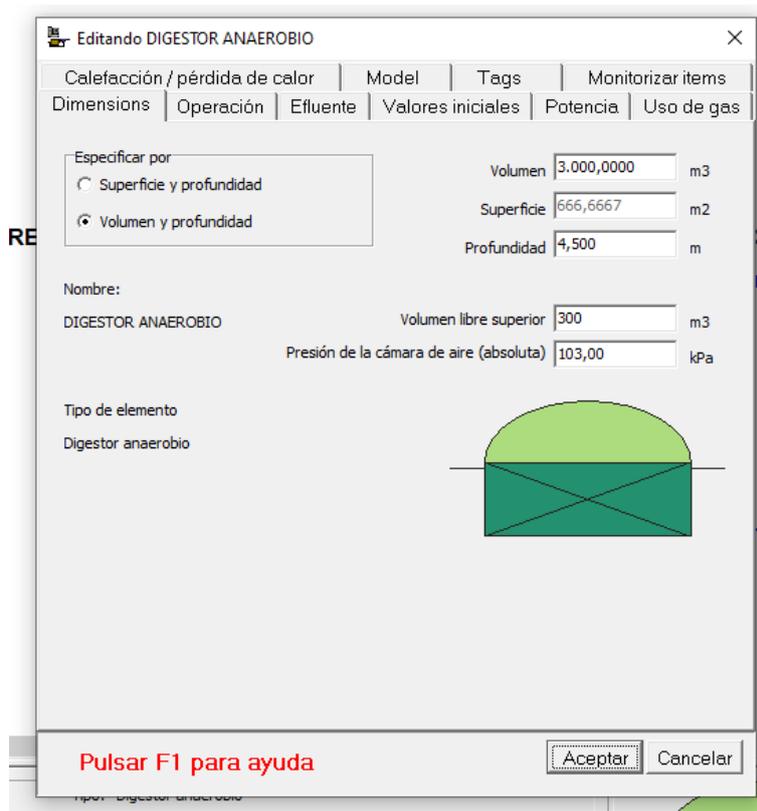


Figura 41: Editor de volumen y volumen libre del digestor (BioWin)

Es importante mantener un volumen libre superior que puede ser entre el 10 y el 50% del volumen líquido, aunque lo recomendable es que no supere el 20-30%. En este caso se ha impuesto un 10% [32].

La producción de biogás en el proceso de biodigestión puede variar entre 15 y 120 días. Los procesos pueden agruparse en tres grupos principales: Psicrófilicos: de 50 a 120 días, Mesófilicos: de 25 a 50 días y Termófilicos: 15 a 25 días. Debido a que, en el apartado de la temperatura, según la bibliografía se trabajará mayoritariamente con bacterias mesófilicas, en este caso, se debe trabajar con un TRH entre 25 y 50 días [33]. Para mantener las necesidades térmicas del reactor, el software de diseño empleado presenta varias alternativas. Se selecciona la implantación de una caldera, ya que es el sistema más habitual en este tipo de industrias. Además, se puede intercambiar también el tipo de combustible con el que trabaja la caldera, las más comunes en fábricas suelen ser las calderas de gas o calderas eléctricas.

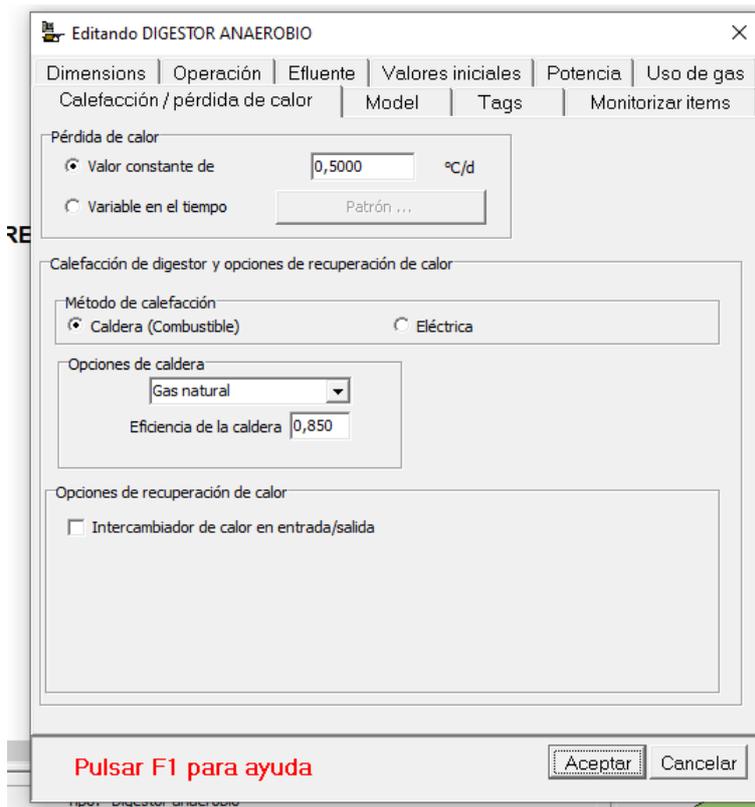


Figura 42: Tipos de caldera (BioWin)

En este caso, se ha decidido optar por el uso de gas natural, debido a que suele ser más eficiente y económico en comparación con otras opciones. Además, el gas natural genera menores emisiones de gases efecto invernadero en comparación con otros combustibles, lo que contribuye a una operación más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

Por último, se implementa la cogeneración en el programa, es decir, se utiliza el biogás producido como energía eléctrica o térmica, para así reducir costos. En el Anexo VII se puede ver esta reducción.

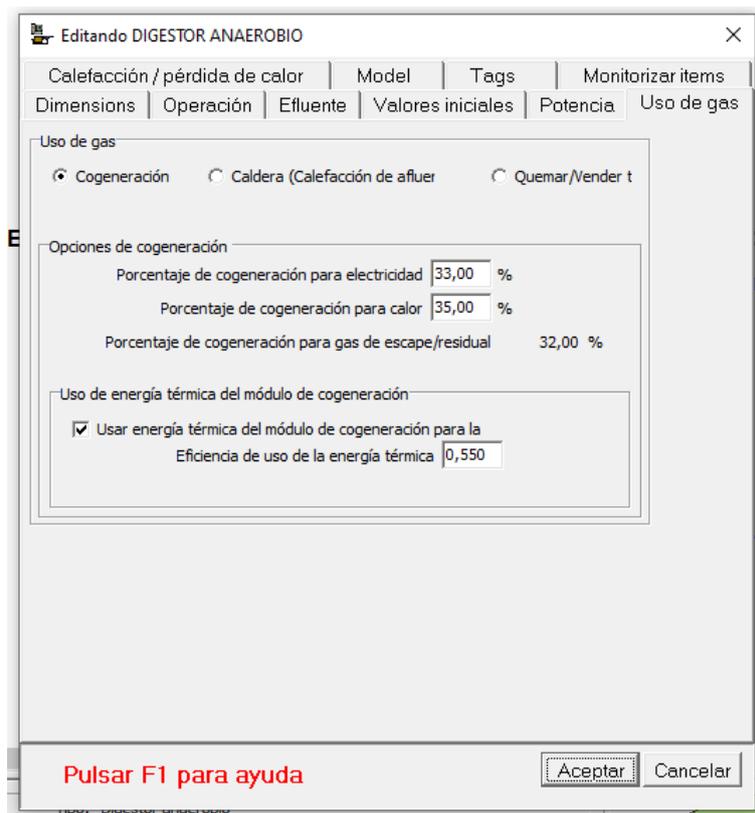


Figura 43: Selección del uso del biogás generado (BioWin)

Los porcentajes de cogeneración vienen integrados en el programa. El gas generado puede ser utilizado como combustible para alimentar las calderas, sustituyendo parcial o totalmente el gas natural comprado, lo que supone un ahorro. Disminuyendo así hasta el precio de 0,23 €/m³.

Para conocer la cantidad de energía (en kW) que necesitará el sistema, se debe hacer una conversión de unidades. Sabiendo que el programa impone un precio de 0,1324 €/kWh (7,55 kW/€) al intercambiar las variables necesarias, se puede determinar que el diseño consume:

$$7,55 \text{ kWh/€} * 9,40 \text{ €/h} = 70,99 \text{ kW}$$

Además, el consumo de energía por volumen es:

$$7,55 \text{ kW/h} * 0,23 \text{ €/m}^3 = 1,73 \text{ kW/m}^3$$

A continuación, se presenta la figura que muestra cómo quedaría la ilustración final del diseño:

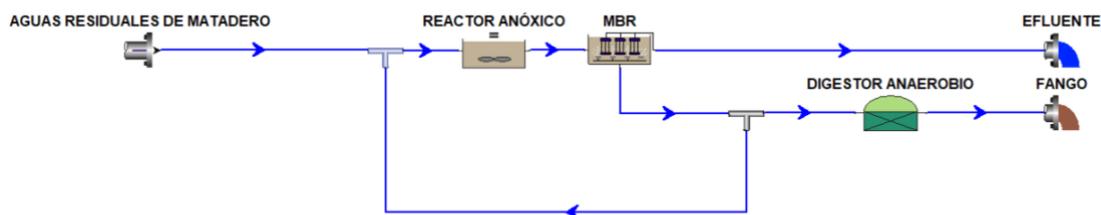


Figura 44: Diagrama representativo del proceso anaerobio, anóxico y anaerobio (Elaboración propia)

El sistema de digestión anaerobia permite reducir la cantidad de fangos que se encuentran en exceso. Del tratamiento secundario se extraen 971,70 Kg/d que tras ser digeridos se reducen a 570,30 kg/d, es decir se consigue reducir un 59% de volumen de fangos. Finalmente, los fangos se deberán introducir en una centrifuga que permita alcanzar una sequedad del 20% y los fangos producidos se podrán retirar por un gestor de residuos peligrosos para su gestión posterior.

12.CONCLUSIONES

- Después de haber analizado diferentes tecnologías específicas para el tratamiento de aguas provenientes de un matadero cárnico, según criterios como la eficiencia del tratamiento, el requerimiento de espacio y el costo de inversión y operación, entre otras, se han considerado que los tamices y el MBR son las tecnologías más adecuadas para estas aguas. Otras tecnologías interesantes para el tratamiento biológico han podido ser el SBR y el UASB.
- Según las condiciones de operación de un TRH de 15 horas y un SRT de 6 días para el MBR, se permite eliminar la materia carbonosa necesaria para verter a colector cumpliendo con el Decreto 372/2023, de 18 de septiembre, que aprueba definitivamente el plan hidrológico insular de la demarcación hidrográfica de Tenerife, tercer ciclo (2021-2027).
- Habiendo introducido un reactor anóxico previo al MBR, de un volumen de 90 m³, se permite eliminar el porcentaje exigido de fósforo y nitrógeno, asegurando un vertido responsable y cumpliendo con la Directiva del Consejo de 21 de mayo de 1991 sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- En último lugar, integrando un reactor anaerobio, como es un digestor, se permite que los lodos producidos sean tratados adecuadamente, y se consigue minimizar el volumen de residuos, además, se consigue un subproducto como el biogás, que se puede usar en la cogeneración de energía eléctrica y térmica, reduciendo así los costos energéticos.

13.CONCLUSIONS

- After analysing various specific technologies for the treatment of water from a meat slaughterhouse, including criteria such as treatment efficiency, space requirements, investment and operating costs, it was considered that screens and MBR were the most appropriate technologies for these waters. Other interesting technologies for biological treatment were SBR and UASB.

- According to the operating conditions of a HRT of 15 hours and a SRT of 6 days for the MBR, it is possible to eliminate the carbonaceous matter required to be discharged into the collector, in accordance with Decree 372/2023 of 18 September, which definitively approves the Insular Hydrological Plan of the Hydrographic Demarcation of Tenerife, third cycle (2021-2027).
- The installation of a 90 m³ anoxic reactor upstream of the MBR will make it possible to eliminate the required percentage of phosphorus and nitrogen, ensuring responsible discharge and compliance with the Council Directive of 21 May 1991 on the treatment of urban waste water.
- Finally, the incorporation of an anaerobic reactor, such as a digester, allows the sludge produced to be treated appropriately, minimising the volume of waste and obtaining a by-product, such as biogas, which can be used in the cogeneration of electrical and thermal energy, thus reducing energy costs.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ecoembes, «¿Sabes cuántos litros de agua se consumen para fabricar unos vaqueros?,» 2023. [En línea]. Available: <https://reducereutilizarecicla.org/cuantos-litros-de-agua-se-consumen-para-fabricar-unos-vaqueros/>. [Último acceso: 04 2024].
- [2] Real Decreto 1620/2007, «Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.,» 2007. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21092>.
- [3] Legislación., «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.,» (s/f). [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/legislacion.html>.
- [4] Esamur, «GUÍA PRÁCTICA PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA,» 2020.
- [5] Anice, «Asociación Nacional de Industrias de la Carne de España,» 2023. [En línea]. Available: https://www.anice.es/industrias/el-sector/el-sector-carnico-espanol_171_1_ap.html. [Último acceso: 01 2024].
- [6] Orús, Abigail, «Statista,» [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/556900/principales-empresas-del-sector-carnico-en-espana-segun-facturacion/>. [Último acceso: 01 2024].
- [7] Depares, Beatriz, «Carnica,» 2022. [En línea]. Available: <https://carnica.cdecomunicacion.es/noticias/50146/25-empresas-ligadas-a-la-industria-carnica-que-mas-han-crecido-2021>. [Último acceso: 01 2024].
- [8] Gob. España, «Informe del Consumo Alimentario en España,» 2022. [En línea]. Available: https://www.mapa.gob.es/eu/alimentacion/temas/consumo-tendencias/informe_2022_alta_tcm35-685877.pdf.
- [9] Fernández, Silvia, «El grupo canario Montesano se integra en el gigante agroalimentario Vall Companys,» *CANARIAS7*, pp. <https://www.canarias7.es/economia/grupo-canario-montesano-integra-gigante-agroalimentario-valls-20230711230310-nt.html>, 11 07 2023.
- [10] Directiva 2000/60/CE , 22 diciembre 2000. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2000-82524>.
- [11] Directiva 91/271/CEE. , 1991. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1991-80646>.
- [12] Real Decreto 509/1996, 26 marzo 1996. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1996-7159>.
- [13] Decreto 372/2023, 27 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.aguastenerife.org/images/pdf/PHT3erCiclo/boc-a-2023-191-3191.pdf>.
- [14] Canales, Carmen Canales; Vidal, Andrés Pascual, «GUÍA DE MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES EN ESPAÑA DEL SECTOR CÁRNICO,» 1 03 2024. [En línea]. Available: <https://www.mapa.gob.es/app/nutricionanimal/fichaMtd.aspx?Ing=es&id=sector-carnico-mejores-tecnicas#>.

- [15] Bustillo Lecompte, Ciro; Mehrvar, Mehrab; Quiñones Bolaños, Edgar,, «Slaughterhouse Wastewater Characterization and Treatment: An Economic and Public Health Necessity of the Meat Processing Industry in Ontario, Canada,» *Journal of Geoscience and Environment Protection*, p. Vol.4, 2013.
- [16] J. Fabregas, «Tratamiento de aguas residuales de matadero y procesamiento de carne,» 10 julio 2023. [En línea]. Available: <https://sigmadafclarifiers.com/aguas-residuales-de-matadero/>.
- [17] Gobierno de España. Ministerio de Consumo, [En línea]. Available: https://rgsa-web-aesan.mscbs.es/rgsa/formulario_principal_js.jsp. [Último acceso: 01 2024].
- [18] Pozo, Rodrigo del; Taş, Didem Okutman; Dulkadiroğlu, Hakan; Orhon, Derin; Diez, Victorino, «Biodegradability of slaughterhouse wastewater with high blood content under anaerobic and aerobic conditions,» *Journal of Chemical Technology & Biotechnology Volume 78, Issue 4*, pp. 371-485, 2003.
- [19] Real Decreto 3454/2000, 23 diciembre 2000. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2000/12/22/3454>.
- [20] Metcalf, Leonard; Eddy, Harrison P, Ingeniería De Aguas Residuales. Tratamiento Vertido y Reutilización, Madrid: Editorial McGraw-Hill. 3a Edición, 1995.
- [21] Torres, Nuria Jiménez, «Diseño de un reactor biológico de fangos activos,» 2014.
- [22] S. Judd, The MBR Book Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [23] Robles Martínez, Á. Seco Torrecillas, A. y Robles Martínez, Á., Tratamientos biológicos de aguas residuales (3ed.), Valencia: Editorial e la Universidad Politécnica de Valencia., 2018.
- [24] M. Scholz, Wetlands for Water Pollution Control (Third Edition), 2024.
- [25] Khac-Uan Do, Van-Linh Nguyen, Current Developments in Biotechnology and Bioengineering Advances in Biological Wastewater, 2022.
- [26] Mettler Toledo, «Reactores con depósito agitado continuo (CSTR),» 29 febrero 2024. [En línea]. Available: https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/continuous-stirred-tank-reactor-cstr.html.
- [27] Imran Ahmad, Aida Batrisyia Jasni , Norhayati Abdullah , Santhana Krishnan , Iwamoto Koji , Shreeshivadasan Chelliapan , Ali Yuzir , Mohd Nasrullah, Techno-economics and Life Cycle Assessment of Bioreactors, 2022.
- [28] Cunha Apatie, Nicolás, «Evaluation of a MBR for treating slaughterhouse wastewater in Montevideo, Uruguay,» Universidad del Valle, 2015. [En línea]. Available: https://saniup.org/wp-content/uploads/2018/01/UWS-SE-CALI-2016-10-Nicolas-Cunha-Apatie_Final-version.pdf.
- [29] EnviroSim - Wastewater Modeling Software, s.f., [En línea]. Available: <https://envirosim.com>.
- [30] Rahman, T. U., Roy, H., Islam, M. R., Tahmid, M., Fariha, A., Mazumder, A., Tasnim, N., Pervez, M. N., Cai, Y., Naddeo, V., & Islam, M. S., «The Advancement in Membrane Bioreactor (MBR) Technology toward Sustainable Industrial Wastewater Management. Membranes,» 2023. [En línea]. Available: <https://doi.org/10.3390/membranes13020181>.

- [31] Vázquez, Carlos M. López; Méndez, Germán Buitrón; García, Héctor A.; Carrillo, Francisco J. Cervantes, «Tratamiento Biológico de Aguas Residuales: Principios, Modelación y Diseño,,» 2017. [En línea]. Available: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bull-ebooks/detail.action?docID=5188465..>
- [32] Org, de las Naciones Unidas , «GUÍA TEÓRICO-PRÁCTICA SOBRE EL BIOGÁS Y LOS BIODIGESTORES,» 2019.
- [33] Espicio Monteros, Luis Durand, Eduardo Mora, Edgar Santos, «Comparación de dos tipos de biomasa para generación de biogás a partir de excretas de ganado porcino y bovino en el laboratorio.,» 2017.

ANEXO I: CARACTERIZACIÓN DEL AGUA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE SCHENECK

Sample taken from point:	TKN (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	PO ₄ ⁻ (mg/L)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	ISS (mg/L)
1	234	236.6	48.7	42	1273	1195	78
2	146	147.6	21.4	18.8	778	656	122
3	132	133.2	24.8	21.5	231	184	48
4	109	110.4	22.9	19.4	203	183	20
5	43	69.4	16.8	13.1	188	177	11
6	37.8	68.0	11.1	8	145	138	7

Sample taken from point:	pH	Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Acetate (mg/L)
1	7.03	772.8	64.2	22.3	268
2	7.25	916.3	79.6	29.2	12.3
3	7.83	949.4	71.4	26.6	20.4
4	7.69	982.6	68.7	26	23.2
5	8.24	982.6	62.7	26.4	11
6	8.33	828.0	55.9	27.3	23.9

Sample taken from point:	pH	Alkalinity (mg CaCO ₃ /L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Acetate (mg/L)
1	7.03	772.8	64.2	22.3	268
2	7.25	916.3	79.6	29.2	12.3
3	7.83	949.4	71.4	26.6	20.4
4	7.69	982.6	68.7	26	23.2
5	8.24	982.6	62.7	26.4	11
6	8.33	828.0	55.9	27.3	23.9

ANEXO II: RESULTADOS PROCEDENTES DE LA SIMULACIÓN INICIAL

V (m ³)	J (LMH)	OD (mg/L)	Ratio	Caudal de purga (m ³ /d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m ³ /d)	Xe (mg/L)	Qe (m ³ /d)	Xp (mg/L)	Qp (m ³ /d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m ³
83,33	2	1	1	5	160088	1000	0	995	160088	5	2	16,67	47,55	0,03	5,88	58,73	28,41	5,55	1,09	67,99	15,18	0,36
83,33	2	1	1	10	97925	1000	0	990	97925	10	2	8,33	51,22	0,01	7,83	64,36	23,00	5,79	1,28	68,25	13,22	0,32
83,33	2	1	1	25	49477	1000	0	975	49477	25	2	3,33	59,46	0	2,01	66,85	15,85	6,39	1,94	69,22	10,22	0,25
83,33	2	1	1	50	29184	1000	0	950	29184	50	2	1,67	117,68	0	0	123,16	15,36	7,02	3,53	72,08	6,48	0,16
83,33	2	1	1	100	17201	1000	0	900	17201	100	2	0,83	137,95	0	0	143,78	23,65	7,11	12,41	84,52	3,78	0,09
83,33	2	1	1	150	10991	1000	0	850	10991	150	2	0,56	164,09	0	0	171,12	33,29	7,12	259,83	430,07	2,26	0,05
83,33	2	1	1	200	7385	1000	0	800	7385	200	2	0,42	177,87	0	0	188,10	39,02	7,14	453,69	700,56	1,54	0,04
83,33	2	1	1	250	5535	1000	0	750	5535	250	2	0,33	178,91	0	0	191,73	40,22	7,17	493,93	756,62	1,40	0,03
83,33	2	1	1	300	4432	1000	0	700	4432	300	2	0,28	178,40	0	0	1936,29	40,74	7,18	511,13	780,57	1,35	0,03
83,33	2	2	1	5	156345	1000	0	995	156345	5	2	16,67	82,22	37,65	3,22	128,41	28,97	5,34	1,03	67,89	19,49	0,47
83,33	2	2	1	10	95431	1000	0	990	95431	10	2	8,33	77,21	29,01	5,30	116,87	23,73	5,57	1,17	68,07	17,03	0,41
83,33	2	2	1	25	48584	1000	0	975	48584	25	2	3,33	75,03	1,51	19,11	101,08	16,27	6,27	1,67	68,77	13,10	0,31
83,33	2	2	1	50	28060	1000	0	950	28060	50	2	1,67	107,02	0	0,03	112,60	13,38	6,97	2,88	70,67	9,38	0,23
83,33	2	2	1	100	16863	1000	0	900	16863	100	2	0,83	128,76	0	0	134,59	20,25	7,09	7,97	77,83	5,31	0,13
83,33	2	2	1	150	11680	1000	0	850	11680	150	2	0,56	142,29	0	0	148,60	25,58	7,14	42,28	125,97	3,96	0,10
83,33	2	2	1	200	7744	1000	0	800	7744	200	2	0,42	172,98	0	0,01	181,88	36,95	7,16	392,19	615,25	1,96	0,05
83,33	2	2	1	250	5701	1000	0	750	5701	250	2	0,33	177,56	0	0,01	189,32	39,43	7,17	471,47	725,51	1,58	0,04
83,33	2	2	1	300	4513	1000	0	700	4513	300	2	0,28	177,86	0	0,02	191,91	40,29	7,18	498,76	763,37	1,45	0,03
83,33	2	5	1	5	156005	1000	0	995	156005	5	2	16,67	95,34	51,99	2,50	155,17	29,02	5,28	1,04	67,91	37,65	0,90
83,33	2	5	1	10	95191	1000	0	990	95191	10	2	8,33	88,60	42,87	3,78	140,62	23,79	5,48	1,17	68,08	32,81	0,79
83,33	2	5	1	25	48480	1000	0	975	48480	25	2	3,33	81,79	18,21	14,33	119,78	16,30	6,13	1,65	68,74	25,23	0,61
83,33	2	5	1	50	28008	1000	0	950	28008	50	2	1,67	101,88	0,08	4,32	111,86	12,74	6,96	2,78	70,33	18,35	0,44
83,33	2	5	1	100	16774	1000	0	900	16774	100	2	0,83	125,86	0	0,02	131,71	19,22	7,13	7,35	76,81	9,89	0,24
83,33	2	5	1	150	11704	1000	0	850	11704	150	2	0,56	139,66	0	0,01	145,95	24,65	7,18	31,53	110,76	7,04	0,17
83,33	2	5	1	200	7853	1000	0	800	7853	200	2	0,42	170,89	0,01	0,04	179,48	36,13	7,19	369,46	583,67	2,96	0,07
83,33	2	5	1	250	5747	1000	0	750	5747	250	2	0,33	177,07	0,03	0,10	188,67	39,19	7,18	465,36	717,06	2,03	0,05
83,33	2	5	1	300	4536	1000	0	700	4536	300	2	0,28	177,67	0,03	0,12	191,64	40,16	7,18	495,84	759,31	1,75	0,04
208,33	2	1	1	5	123061	1000	0	995	123061	5	5	41,67	45,01	0,04	3,85	54,15	34,11	5,34	0,98	67,86	12,88	0,31
208,33	2	1	1	10	71793	1000	0	990	71793	10	5	20,83	46,25	0,03	4,86	56,40	30,94	5,45	1,04	67,92	12,06	0,29
208,33	2	1	1	25	37204	1000	0	975	37204	25	5	8,33	50,23	0,02	7,50	63,03	24,47	5,72	1,22	68,16	10,37	0,25
208,33	2	1	1	50	22537	1000	0	950	22537	50	5	4,17	53,68	0,01	6,81	65,83	18,71	6,04	1,56	68,64	8,79	0,21
208,33	2	1	1	100	13014	1000	0	900	13014	100	5	2,08	108,93	0	0	14,34	15,22	6,98	2,35	70,36	6,30	0,15
208,33	2	1	1	150	9742	1000	0	850	9742	150	5	1,39	117,79	0	0	123,27	15,40	7,02	3,55	72,11	5,04	0,12
208,33	2	1	1	200	8000	1000	0	800	8000	200	5	1,04	125,81	0	0	131,38	18,34	7,06	5,22	74,46	4,00	0,10

V (m³)	J (LMH)	OD (mg/L)	Ratio	Caudal de purga (m³/d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m³/d)	Xe (mg/L)	Qe (m³/d)	Xp (mg/L)	Qp (m³/d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m³
208,33	2	1	1	250	6707	1000	0	750	6707	250	5	0,83	132,97	0	0	138,66	21,60	7,09	7,85	78,12	3,41	0,08
208,33	2	1	1	300	5722	1000	0	700	5722	300	5	0,69	138,13	0	0	143,97	23,71	7,11	12,60	84,78	3,08	0,07
208,33	2	2	1	5	121400	1000	0	995	121400	5	5	41,67	87,68	45,07	2,25	140,31	34,36	5,18	0,96	67,80	16,38	0,39
208,33	2	2	1	10	70335	1000	0	990	70335	10	5	20,83	84,64	41,07	2,71	133,73	31,39	5,26	0,99	67,84	15,37	0,37
208,33	2	2	1	25	36257	1000	0	975	36257	25	5	8,33	78,51	31,67	4,51	120,04	25,17	5,50	1,12	68,01	13,25	0,32
208,33	2	2	1	50	22012	1000	0	950	22012	50	5	4,17	74,07	17,41	10,57	107,44	19,41	5,89	1,37	68,35	11,20	0,27
208,33	2	2	1	100	12971	1000	0	900	12971	100	5	2,08	81,95	0,06	15,95	103,44	14,30	6,55	2,04	69,29	8,95	0,21
208,33	2	2	1	150	9363	1000	0	850	9363	150	5	1,39	107,21	0	0,02	112,79	13,39	6,98	2,89	70,69	7,16	0,17
208,33	2	2	1	200	7614	1000	0	800	7614	200	5	1,04	114,56	0	0,01	120,20	14,74	7,02	4,06	72,35	5,89	0,14
208,33	2	2	1	250	6493	1000	0	750	6493	250	5	0,83	122,31	0	0	128,03	17,70	7,06	5,66	74,60	4,85	0,12
208,33	2	2	1	300	5616	1000	0	700	5616	300	5	0,69	128,97	0	0	134,82	20,33	7,10	8,05	77,95	4,19	0,10
208,33	2	5	1	5	121412	1000	0	995	121412	5	5	41,67	102,38	60,45	1,85	170,00	34,36	5,13	0,97	67,82	31,38	0,75
208,33	2	5	1	10	70230	1000	0	990	70230	10	5	20,83	98,48	55,84	2,16	161,82	31,41	5,21	1,01	67,86	29,40	0,71
208,33	2	5	1	25	36165	1000	0	975	36165	25	5	8,33	90,42	45,54	3,31	144,63	25,23	5,42	1,13	68,02	25,24	0,61
208,33	2	5	1	50	21964	1000	0	950	21964	50	5	4,17	83,54	32,97	6,66	128,57	19,46	5,75	1,37	68,35	21,24	0,51
208,33	2	5	1	100	12921	1000	0	900	12921	100	5	2,08	84,39	4,74	19,81	114,42	14,36	6,48	1,98	69,20	16,78	0,40
208,33	2	5	1	150	9371	1000	0	850	9371	150	5	1,39	102,12	0,08	4,13	111,90	12,74	6,96	2,79	70,35	13,68	0,33
208,33	2	5	1	200	7548	1000	0	800	7548	200	5	1,04	111,19	0,01	0,08	116,93	13,73	7,05	3,87	71,90	11,14	0,27
208,33	2	5	1	250	6439	1000	0	750	6439	250	5	0,83	118,99	0	0,03	124,75	16,54	7,09	5,32	73,95	8,96	0,22
208,33	2	5	1	300	5588	1000	0	700	5588	300	5	0,69	126,09	0	0,02	131,95	19,30	7,13	7,42	76,91	7,51	0,18
416,67	2	1	1	5	110222	1000	0	995	110222	5	10	83,33	44,12	0,04	3,36	52,77	36,10	5,28	0,96	67,83	11,74	0,28
416,67	2	1	1	10	60936	1000	0	990	60936	10	10	41,67	44,89	0,04	3,80	53,98	34,29	5,33	0,98	67,86	11,33	0,27
416,67	2	1	1	25	30034	1000	0	975	30034	25	10	16,67	46,65	0,03	5,25	57,19	29,93	5,49	1,06	67,95	10,35	0,25
416,67	2	1	1	50	18316	1000	0	950	18316	50	10	8,33	49,89	0,02	7,37	62,56	24,90	5,70	1,20	68,14	9,22	0,22
416,67	2	1	1	100	11117	1000	0	900	11117	100	10	4,17	53,37	0,01	7,11	65,81	19,14	6,01	1,52	68,59	7,86	0,19
416,67	2	1	1	150	8167	1000	0	850	8167	150	10	2,78	57,87	0	3,06	66,30	16,12	6,33	1,88	69,12	7,01	0,17
416,67	2	1	1	200	6421	1000	0	800	6421	200	10	2,08	103,73	0	0,01	109,14	15,46	6,96	2,24	70,17	5,76	0,14
416,67	2	1	1	250	5439	1000	0	750	5439	250	10	1,67	114,48	0	0	119,92	14,77	7,01	2,76	70,98	5,19	0,12
416,67	2	1	1	300	4785	1000	0	700	4785	300	10	1,39	116,91	0	0	122,38	15,09	7,02	3,34	71,81	4,68	0,11
416,67	2	2	1	5	109495	1000	0	995	109495	5	10	83,33	89,58	47,47	2,03	144,39	36,21	5,13	0,94	67,78	14,85	0,36
416,67	2	2	1	10	60148	1000	0	990	60148	10	10	41,67	87,85	45,30	2,23	140,69	34,54	5,17	0,95	67,80	14,36	0,34
416,67	2	2	1	25	29382	1000	0	975	29382	25	10	16,67	83,66	39,74	2,89	131,61	30,42	5,29	1,01	67,86	13,16	0,32
416,67	2	2	1	50	17852	1000	0	950	17852	50	10	8,33	78,88	32,41	4,32	120,96	25,59	5,48	1,11	67,99	11,74	0,28
416,67	2	2	1	100	10854	1000	0	900	10854	100	10	4,17	74,21	19,15	9,65	108,40	19,85	5,85	1,34	68,31	9,98	0,24
416,67	2	2	1	150	8006	1000	0	850	8006	150	10	2,78	74,49	2,98	18,70	101,61	16,63	6,23	1,62	68,70	8,84	0,21
416,67	2	2	1	200	6411	1000	0	800	6411	200	10	2,08	80,24	0,07	17,35	103,14	14,62	6,49	1,96	69,18	8,04	0,19
416,67	2	2	1	250	5376	1000	0	750	5376	250	10	1,67	90,14	0,03	8,46	104,13	13,44	6,76	2,34	69,72	7,34	0,18
416,67	2	2	1	300	4626	1000	0	700	4626	300	10	1,39	104,69	0	0,06	110,30	13,36	6,96	2,75	70,45	6,55	0,16

V (m ³)	J (LMH)	OD (mg/L)	Ratio	Caudal de purga (m ³ /d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m ³ /d)	Xe (mg/L)	Qe (m ³ /d)	Xp (mg/L)	Qp (m ³ /d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m ³
416,67	2	5	1	5	109679	1000	0	995	109679	5	10	83,33	104,79	63,25	1,70	175,06	36,18	5,09	0,95	67,80	28,32	0,68
416,67	2	5	1	10	60161	1000	0	990	60161	10	10	41,67	102,60	60,71	1,84	170,47	34,53	5,13	0,97	67,81	27,36	0,66
416,67	2	5	1	25	29329	1000	0	975	29329	25	10	16,67	97,23	54,33	2,28	159,17	30,46	5,24	1,02	67,88	25,00	0,60
416,67	2	5	1	50	17807	1000	0	950	17807	50	10	8,33	90,96	46,29	3,19	145,80	25,65	5,40	1,12	68,01	22,21	0,53
416,67	2	5	1	100	10830	1000	0	900	10830	100	10	4,17	83,98	34,25	6,18	129,80	19,90	5,72	1,34	68,32	18,78	0,45
416,67	2	5	1	150	7990	1000	0	850	7990	150	10	2,78	81,68	20,74	12,92	120,78	16,66	6,07	1,60	68,68	16,61	0,40
416,67	2	5	1	200	6388	1000	0	800	6388	200	10	2,08	83,55	6,45	19,82	115,30	14,68	6,42	1,91	69,10	14,96	0,36
416,67	2	5	1	250	5353	1000	0	750	5353	250	10	1,67	89,06	1,15	169,41	112,14	13,48	6,69	2,25	69,59	13,62	0,33
416,67	2	5	1	300	4632	1000	0	700	4632	300	10	1,39	99,37	0,12	6,72	111,77	12,84	6,92	2,65	70,15	12,35	0,30

ANEXO III: RESULTADOS CON SST < 10.000 MG/L

V (m ³)	J (LMH)	OD (mg/L)	Ratio	Caudal de purga (m ³ /d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m ³ /d)	Xe (mg/L)	Qe (m ³ /d)	Xp (mg/L)	Px (kg/d)	Qp (m ³ /d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m ³
83,33	2	1	1	200	7385	1000	0	800	7385	1477	200	2	0,42	177,87	0	0	188,10	39,02	7,14	453,69	700,56	1,54	0,04
83,33	2	1	1	250	5535	1000	0	750	5535	1384	250	2	0,33	178,91	0	0	191,73	40,22	7,17	493,93	756,62	1,40	0,03
83,33	2	1	1	300	4432	1000	0	700	4432	1330	300	2	0,28	178,40	0	0	193,29	40,74	7,18	511,13	780,57	1,35	0,03
83,33	2	2	1	200	7744	1000	0	800	7744	1549	200	2	0,42	172,98	0	0,01	181,88	36,95	7,16	392,19	615,25	1,96	0,05
83,33	2	2	1	250	5701	1000	0	750	5701	1425	250	2	0,33	177,56	0	0,01	189,32	39,43	7,17	471,47	725,51	1,58	0,04
83,33	2	2	1	300	4513	1000	0	700	4513	1354	300	2	0,28	177,86	0	0,02	191,91	40,29	7,18	498,76	763,37	1,45	0,03
83,33	2	5	1	200	7853	1000	0	800	7853	1571	200	2	0,42	170,89	0,01	0,04	179,48	36,13	7,19	369,46	583,67	2,96	0,07
83,33	2	5	1	250	5747	1000	0	750	5747	1437	250	2	0,33	177,07	0,03	0,10	188,67	39,19	7,18	465,36	717,06	2,03	0,05
83,33	2	5	1	300	4536	1000	0	700	4536	1361	300	2	0,28	177,67	0,03	0,12	191,64	40,16	7,18	495,84	759,31	1,75	0,04
208,33	2	1	1	150	9742	1000	0	850	9742	1461	150	5	1,39	117,79	0	0	123,27	15,40	7,02	3,55	72,11	5,04	0,12
208,33	2	1	1	200	8000	1000	0	800	8000	1600	200	5	1,04	125,81	0	0	131,38	18,34	7,06	5,22	74,46	4,00	0,10
208,33	2	1	1	250	6707	1000	0	750	6707	1677	250	5	0,83	132,97	0	0	138,66	21,60	7,09	7,85	78,12	3,41	0,08
208,33	2	1	1	300	5722	1000	0	700	5722	1717	300	5	0,69	138,13	0	0	143,97	23,71	7,11	12,60	84,78	3,08	0,07
208,33	2	2	1	150	9363	1000	0	850	9363	1404	150	5	1,39	107,21	0	0,02	112,79	13,39	6,98	2,89	70,69	7,16	0,17
208,33	2	2	1	200	7614	1000	0	800	7614	1523	200	5	1,04	114,56	0	0,01	120,20	14,74	7,02	4,06	72,35	5,89	0,14
208,33	2	2	1	250	6493	1000	0	750	6493	1623	250	5	0,83	122,31	0	0	128,03	17,70	7,06	5,66	74,60	4,85	0,12
208,33	2	2	1	300	5616	1000	0	700	5616	1685	300	5	0,69	128,97	0	0	134,82	20,33	7,10	8,05	77,95	4,19	0,10
208,33	2	5	1	150	9371	1000	0	850	9371	1406	150	5	1,39	102,12	0,08	4,13	111,90	12,74	6,96	2,79	70,35	13,68	0,33
208,33	2	5	1	200	7548	1000	0	800	7548	1510	200	5	1,04	111,19	0,01	0,08	116,93	13,73	7,05	3,87	71,90	11,14	0,27
208,33	2	5	1	250	6439	1000	0	750	6439	1610	250	5	0,83	118,99	0	0,03	124,75	16,54	7,09	5,32	73,95	8,96	0,22
208,33	2	5	1	300	5588	1000	0	700	5588	1676	300	5	0,69	126,09	0	0,02	131,95	19,30	7,13	7,42	76,91	7,51	0,18
416,67	2	1	1	150	8167	1000	0	850	8167	1225	150	10	2,78	57,87	0	3,06	66,30	16,12	6,33	1,88	69,12	7,01	0,17
416,67	2	1	1	200	6421	1000	0	800	6421	1284	200	10	2,08	103,73	0	0,01	109,14	15,46	6,96	2,24	70,17	5,76	0,14
416,67	2	1	1	250	5439	1000	0	750	5439	1360	250	10	1,67	114,48	0	0	119,92	14,77	7,01	2,76	70,98	5,19	0,12
416,67	2	1	1	300	4785	1000	0	700	4785	1436	300	10	1,39	116,91	0	0	122,38	15,09	7,02	3,34	71,81	4,68	0,11
416,67	2	2	1	150	8006	1000	0	850	8006	1201	150	10	2,78	74,49	2,98	18,70	101,61	16,63	6,23	1,62	68,70	8,84	0,21
416,67	2	2	1	200	6411	1000	0	800	6411	1282	200	10	2,08	80,24	0,07	17,35	103,14	14,62	6,49	1,96	69,18	8,04	0,19
416,67	2	2	1	250	5376	1000	0	750	5376	1344	250	10	1,67	90,14	0,03	8,46	104,13	13,44	6,76	2,34	69,72	7,34	0,18
416,67	2	2	1	300	4626	1000	0	700	4626	1388	300	10	1,39	104,69	0	0,06	110,30	13,36	6,96	2,75	70,45	6,55	0,16
416,67	2	5	1	150	7990	1000	0	850	7990	1199	150	10	2,78	81,68	20,74	12,92	120,78	16,66	6,07	1,60	68,68	16,61	0,40
416,67	2	5	1	200	6388	1000	0	800	6388	1278	200	10	2,08	83,55	6,45	19,82	115,30	14,68	6,42	1,91	69,10	14,96	0,36
416,67	2	5	1	250	5353	1000	0	750	5353	1338	250	10	1,67	89,06	1,15	16,41	112,14	13,48	6,69	2,25	69,59	13,62	0,33
416,67	2	5	1	300	4632	1000	0	700	4632	1390	300	10	1,39	99,37	0,12	6,72	111,77	12,84	6,92	2,65	70,15	12,35	0,30

ANEXO IV: OPTIMIZACIÓN DEL MBR – VARIANDO TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICO

V (m ³)	OD (mg/L)	Caudal de purga (m ³ /d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m ³ /d)	Xe (mg/L)	Qe (m ³ /d)	Xp (mg/L)	Px (kg/d)	Qp (m ³ /d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m ³
208,33	5	150	9371	1000	0	850	9371	1406	150	5	1,39	102,12	0,08	4,13	111,90	12,74	6,96	2,79	70,35	13,68	0,33
208,33	5	200	7548	1000	0	800	7548	1510	200	5	1,04	111,19	0,01	0,08	116,93	13,73	7,05	3,87	71,90	11,14	0,27
208,33	5	250	6439	1000	0	750	6439	1610	250	5	0,83	118,99	0,00	0,03	124,75	16,54	7,09	5,32	73,95	8,96	0,22
208,33	5	300	5588	1000	0	700	5588	1676	300	5	0,69	126,09	0,00	0,02	131,95	19,30	7,13	7,42	76,91	7,51	0,18
416,67	5	150	7990	1000	0	850	7990	1199	150	10	2,78	81,68	20,74	12,92	120,78	16,66	6,07	1,60	68,68	16,61	0,40
416,67	5	200	6388	1000	0	800	6388	1278	200	10	2,08	83,55	6,45	19,82	115,30	14,68	6,42	1,91	69,10	14,96	0,36
416,67	5	250	5353	1000	0	750	5353	1338	250	10	1,67	89,06	1,15	16,41	112,14	13,48	6,69	2,25	69,59	13,62	0,33
416,67	5	300	4632	1000	0	700	4632	1390	300	10	1,39	99,37	0,12	6,72	111,77	12,84	6,92	2,65	70,15	12,35	0,30
625,00	5	100	9630	1000	0	900	9630	963	100	15	6,25	88,16	42,25	3,91	139,69	23,46	5,50	1,18	68,10	19,58	0,47
625,00	5	150	7187	1000	0	850	7187	1078	150	15	4,17	84,11	34,65	6,04	130,20	20,05	5,71	1,34	68,30	17,67	0,42
625,00	5	200	5803	1000	0	800	5803	1161	200	15	3,13	82,00	26,54	9,69	123,66	17,70	5,93	1,50	68,53	16,26	0,39
625,00	5	250	4892	1000	0	750	4892	1223	250	15	2,50	81,84	16,06	15,64	118,99	16,02	6,18	1,68	68,79	15,10	0,36
625,00	5	300	4243	1000	0	700	4243	1273	300	15	2,08	83,30	7,08	19,79	115,60	14,79	6,40	1,88	69,07	14,12	0,34
833,33	5	90	9525	1000	0	910	9525	857	90	20	9,26	92,25	48,06	2,95	148,61	26,66	5,36	1,09	67,97	20,43	0,49
833,33	5	100	8839	1000	0	900	8839	884	100	20	8,33	91,20	46,65	3,14	146,35	25,85	5,39	1,11	68,00	20,01	0,48
833,33	5	150	6624	1000	0	850	6624	994	150	20	5,56	87,01	40,43	4,32	137,13	22,54	5,55	1,22	68,14	18,28	0,44
833,33	5	200	5379	1000	0	800	5379	1076	200	20	4,17	84,17	34,84	5,97	130,39	20,11	5,70	1,33	68,30	16,97	0,41
833,33	5	250	4559	1000	0	750	4559	1140	250	20	3,33	82,39	29,01	8,45	125,27	18,27	5,87	1,45	68,47	15,93	0,38
833,33	5	300	3972	1000	0	700	3972	1192	300	20	2,78	81,65	21,99	12,23	121,31	16,85	6,04	1,58	68,65	15,05	0,36
1041,67	5	80	9713	1000	0	920	9713	777	80	25	13,02	95,45	52,16	2,48	155,43	29,11	5,28	1,04	67,91	21,02	0,50
1041,67	5	90	8922	1000	0	910	8922	803	90	25	11,57	94,40	50,85	2,62	153,21	28,32	5,30	1,06	67,93	20,62	0,49
1041,67	5	100	8274	1000	0	900	8274	827	100	25	10,42	93,43	49,61	2,76	151,14	27,57	5,33	1,07	67,95	20,25	0,49
1041,67	5	150	6203	1000	0	850	6203	930	150	25	6,94	89,38	44,12	3,55	142,41	24,43	5,45	1,15	68,05	18,67	0,45
1041,67	5	200	5052	1000	0	800	5052	1010	200	25	5,21	86,39	39,40	4,58	135,75	22,04	5,58	1,24	68,17	17,46	0,42
1041,67	5	250	4297	1000	0	750	4297	1074	250	25	4,17	84,21	34,98	5,93	130,52	20,16	5,70	1,33	68,30	16,47	0,40
1041,67	5	300	3755	1000	0	700	3755	1127	300	25	3,47	82,69	30,42	7,80	126,32	18,65	5,83	1,43	68,43	15,66	0,38

ANEXO V: OPTIMIZACIÓN DEL MBR – VARIANDO CONSIGNA DE OXÍGENO DISUELTO

V (m ³)	OD (mg/L)	Caudal de purga (m ³ /d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m ³ /d)	Xe (mg/L)	Qe (m ³ /d)	Xp (mg/L)	Px (kg/d)	Qp (m ³ /d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m ³
625	1	100	9906	1000	0	900	9906	991	100	15	6,25	51,36	0,01	7,90	64,57	22,66	5,81	1,30	68,27	8,20	0,20
625	1	100	9843	1000	0	900	9843	984	100	15	6,25	53,84	0,03	9,82	68,99	22,85	5,82	1,26	68,21	8,34	0,20
625	1	100	9788	1000	0	900	9788	979	100	15	6,25	54,16	0,07	10,03	69,58	23,01	5,80	1,22	68,16	8,48	0,20
625	1	100	9743	1000	0	900	9743	974	100	15	6,25	53,82	0,24	9,59	68,97	23,15	5,77	1,20	68,16	8,62	0,21
625	1	100	9713	1000	0	900	9713	971	100	15	6,25	55,56	2,32	9,29	72,50	23,24	5,75	1,18	68,10	8,77	0,21
625	1	100	9698	1000	0	900	9698	970	100	15	6,25	59,23	6,56	8,83	79,96	23,28	5,73	1,18	68,09	8,91	0,21
625	2	100	9654	1000	0	900	9654	965	100	15	6,25	76,82	28,44	5,52	116,14	23,39	5,59	1,18	68,09	10,41	0,25
625	3	100	9641	1000	0	900	9641	964	100	15	6,25	83,05	36,02	4,58	129,02	23,43	5,54	1,18	68,09	12,35	0,30
625	4	100	9634	1000	0	900	9634	963	100	15	6,25	86,23	39,89	4,15	135,64	23,45	5,51	1,18	68,09	15,14	0,36
625	5	100	9630	1000	0	900	9630	963	100	15	6,25	88,16	42,25	3,91	139,69	23,46	5,50	1,18	68,10	19,58	0,47

ANEXO VI: SOLUCIÓN DEL PROCESO: ANAEROBIO + AEROBIO

V Anóxico (m³)	V (m³)	OD (mg/L)	Ratio	Caudal de purga (m³/d)	X0 (SST) (mg/L)	Q0 (m³/d)	Xe (mg/L)	Qe (m³/d)	Xp (mg/L)	Px (kg/d)	Qp (m³/d)	TRH (h)	SRT (d)	Amonio (mgN/L)	Nitrato (mgN/L)	Nitrito (mgN/L)	Nitrógeno total (mgN/L)	Fósforo (mgP/L)	pH	DBO ₅ (mg/L)	DQO (mg/L)	€/h	€/m³
50	625	2	1	100	9552	1000	0	900	9552	955	100	15	6,25	67,73	19,24	5,61	97,88	23,38	5,60	1,15	68,14	12,79	0,31
70	625	2	1	100	9553	1000	0	900	9553	955	100	15	6,25	67,67	19,28	5,66	97,93	21,54	5,60	1,15	68,48	12,77	0,31
90	625	2	1	100	9628	1000	0	900	9628	963	100	15	6,25	67,25	20,46	5,76	99,17	0,71	5,61	1,15	74,63	12,35	0,30
100	625	2	1	100	9647	1000	0	900	9647	965	100	15	6,25	67,34	20,54	5,78	99,44	0,55	5,61	1,15	75,75	12,30	0,30
110	625	2	1	100	9676	1000	0	900	9676	968	100	15	6,25	67,29	20,47	5,80	99,37	0,50	5,61	1,15	76,24	12,32	0,30
200	625	2	1	100	9741	1000	0	900	9741	974	100	15	6,25	67,25	20,15	6,01	99,27	0,45	5,63	1,17	77,09	12,57	0,30
90	625	1	1	100	9703	1000	0	900	9703	970	100	15	6,25	55,35	4,90	9,05	75,00	0,63	5,75	1,17	75,14	10,52	0,25
90	625	2	1	100	9628	1000	0	900	9628	963	100	15	6,25	67,25	20,46	5,76	99,17	0,71	5,61	1,15	74,63	12,35	0,30
90	625	3	1	100	9603	1000	0	900	9603	960	100	15	6,25	71,27	25,81	4,80	107,59	0,75	5,56	1,15	74,44	14,71	0,35
90	625	4	1	100	9590	1000	0	900	9590	959	100	15	6,25	73,30	28,52	4,37	111,88	0,77	5,54	1,15	74,32	18,12	0,43
90	625	2	2	100	9724	1000	0	900	9724	972	100	15	6,25	61,31	14,53	5,76	87,62	0,36	5,62	1,14	79,53	12,19	0,29
90	625	2	3	100	9805	1000	0	900	9805	981	100	15	6,25	57,24	10,53	5,68	79,50	0,35	5,62	1,14	79,78	12,45	0,30
90	625	2	4	100	9752	1000	0	900	9752	975	100	15	6,25	54,65	8,06	5,60	74,27	0,39	5,62	1,14	78,53	12,56	0,30
90	625	2	5	100	9717	1000	0	900	9717	972	100	15	6,25	52,75	6,29	5,50	70,45	0,42	5,61	1,14	77,78	12,60	0,30
90	625	2	5	95	10084	1000	0	905	10084	958	95	15	6,58										
90	625	2	5	100	9717	1000	0	900	9717	972	100	15	6,25	52,75	6,29	5,50	70,45	0,42	5,61	1,14	77,78	12,60	0,30

ANEXO VII: SOLUCIÓN DEL PROCESO: ANAEROBIO + AEROBIO + DIGESTOR

V Digestor (m ³)	X0 (SST) (mg/L)	Xp (mg/l)	Px (kg/d)	Qp (m ³ /d)	TRH Digestor (d)	€/h	€/m ³
1000	6992	6992	699	100	10	12,60	0,30
2000	6268	6268	627	100	20	9,73	0,23
3000	5915	5915	592	100	30	9,40	0,23
4000	5703	5703	570	100	40	9,21	0,22
5000	5561	5561	556	100	50	9,08	0,22