



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño de una planta que combina nanofiltración y ósmosis inversa para purificar y concentrar compuestos fenólicos procedentes de extractos hidroalcohólicos del alperujo con un caudal de 100 m³/día.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Casañ Liberos, Estefanía

Tutor/a: Vincent Vela, Maria Cinta

Cotutor/a: Alvarez Blanco, Silvia

Cotutor/a: Sánchez Arévalo, Carmen

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

El alperujo es un residuo semisólido generado en la etapa de centrifugación en el proceso de fabricación del aceite de oliva mediante la centrifugación de dos fases. El alperujo contiene una gran cantidad de polifenoles, que son productos de un alto valor añadido utilizados ampliamente en la industria alimenticia, farmacéutica y cosmética debido a sus efectos beneficiosos.

Por el contrario, cabe destacar que los polifenoles tienen un gran impacto negativo en el medioambiente. Incluso en bajas concentraciones son capaces de afectar negativamente a los microorganismos, plantas y pequeños vertebrados.

Por ello, la propuesta de este Trabajo Fin de Grado es combinar un proceso de membranas con el objetivo de recuperar dichos polifenoles. El proceso consta de dos etapas, la primera se trata de una nanofiltración para purificar los polifenoles, mientras que en la segunda se realiza la ósmosis inversa con el objetivo de concentrarlos.

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es el diseño de una planta para la purificación y concentración de los compuestos fenólicos procedentes del alperujo. La planta tratará un caudal de extracto ultrafiltrado de compuestos fenólicos de 100 m³/día. Los parámetros para poder realizar el diseño se han obtenido en laboratorio en una etapa previa a este trabajo.

La almazara tomada como referencia produce un total de 12 t/día de alperujo. A éste se le realiza una extracción sólido-líquido con una mezcla hidroalcohólica etanol-agua al 50% en volumen y con una proporción alperujo/disolvente de 1:10 (p/v) y se obtienen 120 m³/día de extracto para tratar por medio de la ultrafiltración, siendo esta la etapa previa a la nanofiltración y la ósmosis inversa. Con un factor de reducción de volumen de 5 se obtiene el caudal de permeado de salida de la ultrafiltración (que será el caudal de entrada de la nanofiltración) de 100 m³/día.

En cuanto a la nanofiltración, la membrana seleccionada es la NF270-400/34i. Se calcula que esta etapa está compuesta por 4 módulos de esta membrana. Se disponen dos tubos de presión en paralelo, habiendo dentro de un mismo tubo de presión dos membranas en serie. La corriente que se alimenta a la ósmosis inversa es el permeado. En cuanto a la ósmosis inversa, la membrana seleccionada es la SW30HR. Se calcula que esta etapa está compuesta por 22 módulos de esta membrana que siguen una configuración piramidal en la que las membranas se encuentran en serie dentro de tres tubos de presión.

Finalmente, se ha realizado un estudio económico con el objetivo de analizar la viabilidad del proyecto. La inversión inicial necesaria para las etapas de nanofiltración y ósmosis inversa que se han diseñado es de 694.764,97€. Los costes totales de explotación son de 180.127,93€. Los ingresos son de 843.030,72€. El beneficio neto es de 523.693,041€. Por lo tanto, el periodo de recuperación de la inversión inicial será de 2 años aproximadamente.

Palabras clave: recuperación de polifenoles; alperujo; nanofiltración; ósmosis inversa.

ABSTRACT

Wet olive pomace is a semi-solid residue generated in the centrifugation stage in the olive oil manufacturing process by two-phase centrifugation. Wet olive pomace contains a large amount of polyphenols, which are high value-added products widely used in the food, pharmaceutical and cosmetic industries due to their beneficial effects.

On the other side, it should be noted that polyphenols have a great negative impact on the environment. Even in low concentrations they are capable of negatively affect microorganisms, plants and small vertebrates.

Therefore, the proposal of this Final Degree Project is to combine a membrane process with the aim of recovering these polyphenols. The process consists of two stages, the first involves nanofiltration to purify the polyphenols, while the second involves reverse osmosis to concentrate them.

The objective of this Final Degree Project is the design of a plant for the purification and concentration of phenolic compounds from wet olive pomace. The plant will treat a flow of 100 m³/day. The parameters to vary out the design have been obtained in the laboratory in a previous stage to this work.

The oil mill produces a total of 12t/day of wet olive pomace, a solid-liquid extraction is performed with a 50% by volume hydroalcoholic ethanol-water mixture and with an alperujo/solvent ratio of 1:10 w/v. 120 m³/day are obtained to treat in ultrafiltration, that is the previous stage before the nanofiltration and reverse osmosis. With a volume reduction factor of 5 an ultrafiltration output permeate flow rate of 100 m³/day is obtained (which will be the nanofiltration input flow rate).

Regarding nanofiltration, the selected membrane is NF270-400/34i. It is estimated that this stage is made up of 4 modules of this membrane. Two pressure tubes are arranged in parallel, with the two membranes in series inside each pressure tube. The stream that is fed to reverse osmosis is the permeate. The membrane used in reverse osmosis is the SW30HR. It is calculated that this stage is composed of 22 modules of this membrane in a pyramidal configuration in which the membranes are in series within three pressure vessels.

Finally, an economic study has been carried out with the aim of analyzing the feasibility of the project. The initial investment required for the nanofiltration and reverse osmosis stages is 694.764,97€. Total operating costs are 180.127,93€. The income is 843.030,72€. The net profit is 523.693,041€. Therefore, the recovery period of the initial investment will be approximately 2 years.

Keywords: recovery of polyphenols; wet olive pomace; nanofiltration; reverse osmosis.

RESUM

El alperuix és un residu semisòlid generat a l'etapa de centrifugació en el procés de fabricació de l'oli d'oliva mitjançant la centrifugació de dos fases. El alperuix té una gran quantitat de polifenols, que són productes d'un alt valor afegit utilitzats àmpliament en l'indústria d'alimentació, farmacèutica i cosmètica gràcies als seus efectes beneficiosos.

Per contra, cal destacar que els polifenols tenen un gran impacte negatiu en el medi ambient, inclòs en baixes concentracions són capaços d'afectar negativament als microorganismes, plantes i xicotets vertebrats.

Es per això, que la proposta d'aquest Treball Fi de Grau és la combinació d'un procés de membranes amb l'objectiu de recuperar aquests polifenols. El procés consta de dues etapes, la primera es tracta d'una nanofiltració per a purificar els polifenols mentre que a la segona es realitza l'òsmosi inversa amb l'objectiu de concentrar-los.

L'objectiu d'aquest Treball Fi de Grau és el disseny d'una planta per a la purificació i concentració dels compostos fenòlics que procedeixen de l'alperuix. La planta tractarà un caudal de 100 m³/dia. Els paràmetres per a poder realitzar el disseny s'han obtingut al laboratori en una etapa prèvia a aquest treball.

El trull produeix un total de 12t/dia d'alperuix, al qual se li realitza una extracció sòlid-líquid amb una barreja hidroalcohòlica etanol-aigua al 50% en volum i amb una proporció alperuix/disolvent de 1:10 (p/v) i s'obtenen 120 m³/dia per a tractar en l'ultrafiltració, que es l'etapa prèvia a la nanofiltració i a l'òsmosi inversa. Amb un factor de reducció de volum de 5 s'obté un caudal de permeat d'eixida de l'ultrafiltració (que serà el d'entrada a la nanofiltració) de 100 m³/dia.

Pel que respecta a la nanofiltració, s'utilitza la membrana NF270-400/34i. Es calcula que aquesta etapa consta de 4 mòduls d'aquesta membrana. Es disposen dos tubs de pressió en paral·lel, havent dintre d'un mateix tub de pressió dos membranes en sèrie. La corrent que es du a l'òsmosi inversa es el permeat. Pel que respecta a l'òsmosi inversa, la membrana utilitzada és la SW30HR. Es calcula que aquesta etapa consta de 22 mòduls d'aquesta membrana que es disposen en una configuració piramidal en la qual les membranes es troben en sèrie dins de tres tubs de pressió.

Finalment, s'ha realitzat un estudi econòmic amb l'objectiu d'analitzar la viabilitat del projecte. La inversió inicial necessària per a les etapes de nanofiltració i òsmosi inversa que s'han dissenyat és de 694.764,97€. Els costos totals d'explotació són de 180.127,93€. Els ingressos són de 843.030,72 €. El benefici net és de 523.693,041 €. Per tant, el període de recuperació de la inversió inicial serà de 2 anys aproximadament.

Paraules clau: recuperació de polifenols; alperuix; nanofiltració; òsmosi inversa.

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA DESCRIPTIVA.....
2. PRESUPUESTO.....
3. PLANOS.....

ÍNDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA

1. JUSTIFICACIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. ANTECEDENTES.....	3
3.1 El sector olivícola.....	3
3.1.1 Materia prima.....	5
3.1.2 Factores que afectan al rendimiento y la calidad final del aceite.....	6
3.2 Proceso de producción del aceite de oliva.....	8
3.2.1 Sistema discontinuo.....	9
3.2.2 Sistema continuo.....	10
3.3 Subproductos.....	13
3.4 Alperujo.....	14
3.4.1 Composición y características.....	14
3.4.2 Valorización.....	14
3.5 Polifenoles.....	16
4. RECUPERACIÓN DE POLIFENOLES.....	18
4.1 Tecnologías de extracción de polifenoles.....	18
4.1.1 Método convencional.....	19
4.1.2 Métodos modernos.....	19
4.2 Tecnología de membranas para la separación y purificación de polifenoles.....	19
4.2.1 Modos de operación: tipos de flujo.....	21
4.2.2 Nanofiltración.....	22
4.2.3 Ósmosis inversa.....	22
4.2.4 Parámetros característicos.....	24
4.2.5 Ventajas e inconvenientes.....	25
5. DISEÑO DE LA PLANTA.....	26
5.1 Descripción del funcionamiento de la planta.....	27
5.2 Descripción de la corriente de alimentación.....	27
5.3 Diseño de las instalaciones de membranas.....	28
5.3.1 Diseño y dimensionamiento de la etapa de nanofiltración.....	31
5.3.2 Diseño y dimensionamiento de la OI.....	46
6. PRODUCTO OBTENIDO.....	54
7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....	55
8. ESTUDIO ECONÓMICO.....	56
8.1 Costes de explotación.....	56

8.1.1 Costes fijos	57
8.1.2 Costes variables	57
8.1.3 Resumen costes	61
8.3 Beneficios.....	62
9. CONCLUSIONES	63
10. BIBLIOGRAFÍA.....	64

ANEXOS

Anexo I. Dimensionado de equipos.....	69
Anexo II. Catálogos comerciales de los equipos.....	108
Anexo III. Ficha de seguridad P3 Ultrasil 115.....	109
Anexo IV. Ficha de seguridad NaOH.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

1. <i>Figura 1. Distribución de la producción del aceite de oliva en España</i>	4
2. <i>Figura 2. Partes de la aceituna</i>	5
3. <i>Figura 3. Distribuciones relativas de cada clase química analizada en muestras derivadas de olivo</i>	6
4. <i>Figura 4. Diagrama de bloques de la parte común del proceso de producción del aceite de oliva</i>	8
5. <i>Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema discontinuo</i>	9
6. <i>Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema de centrifugación de 3 fases</i>	10
7. <i>Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema de centrifugación de 2 fases</i>	11
8. <i>Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema de centrifugación de 2 fases</i>	12
9. <i>Figura 9. Evolución del pH durante la fermentación de la aceituna</i>	16
10. <i>Figura 10. Estructuras de los compuestos fenólicos mayoritarios en el alperujo</i>	17
11. <i>Figura 11. Esquema de una membrana</i>	20
12. <i>Figura 12. Esquema descriptivo de las membranas de MF y UF</i>	21
13. <i>Figura 13. Representación esquemática de la filtración frontal</i>	21
14. <i>Figura 14. Representación esquemática de la filtración de flujo cruzado a través de una membrana plana (A) y a través de una membrana tubular (B)</i>	22
15. <i>Figura 15. Esquema descriptivo de la membrana de NF</i>	22
16. <i>Figura 16. Esquema descriptivo de los procesos de ósmosis inversa (A) y ósmosis directa (B). Fuente: Nazir y otros (2019)</i>	23
17. <i>Figura 17. Esquema de la configuración estándar de la ósmosis inversa</i>	24
18. <i>Figura 18. Esquema general para la recuperación de polifenoles del alperujo</i>	26
19. <i>Figura 19. Diagrama de bloques del proceso de recuperación de polifenoles</i>	27
20. <i>Figura 20. Esquema de la disposición de membranas en serie</i>	30
21. <i>Figura 21. Esquema de la disposición de membranas en paralelo</i>	31
22. <i>Figura 22. Resultados experimentales de la densidad de flujo frente al factor de reducción de volumen para la etapa de nanofiltración con la membrana NF270</i>	32
23. <i>Figura 23. Esquema de la estructura de las membranas enrolladas en espiral</i>	33
24. <i>Figura 24. Diagrama de flujo de la etapa de NF</i>	35
25. <i>Figura 25. Depósitos verticales con pies de la marca Trépovi</i>	37
26. <i>Figura 26. Depósitos verticales cerrados de la marca Trépovi</i>	38
27. <i>Figura 27. Diagrama de flujo de la etapa de NF con diferenciación entre tramos de tuberías</i>	41
28. <i>Figura 28. Ábaco de Moody</i>	44
29. <i>Figura 29. Esquema de la estructura de las membranas enrolladas en espiral</i>	46

30. <i>Figura 30. Diagrama de flujo de la etapa de Ol</i>	48
31. <i>Figura 31. Diagrama de flujo de la etapa de Ol con diferenciación entre tramos de tuberías.</i>	51

ÍNDICE DE TABLAS

1. Tabla 1. Distribución de hectáreas de olivar según los continentes.	3
2. Tabla 2. Países con mayor producción en la campaña 2020/2021.	3
3. Tabla 3. Valor de las exportaciones de aceite de oliva en los países a los que más se exporta.....	4
4. Tabla 4. Características de los distintos tipos de aceituna.	6
5. Tabla 5. Parámetros característicos del alperujo.	14
6. Tabla 6. Procesos de membranas.	20
7. Tabla 7. Características de la corriente de alimentación a la nanofiltración.....	28
8. Tabla 8. Rechazos obtenidos en la nanofiltración.....	32
9. Tabla 9. Características de las membranas de nanofiltración.	33
10. Tabla 10. Características técnicas de la membrana NF270-4040.	34
11. Tabla 11. Características de la nanofiltración.....	34
12. Tabla 12. Composición de las corrientes de la nanofiltración.....	37
13. Tabla 13. . Dimensionado de los depósitos principales de la nanofiltración.	39
14. Tabla 14. Dimensionado de las tuberías principales de la nanofiltración.....	42
15. Tabla 15. Características de la bomba B1.....	44
16. Tabla 16. Características de la bomba B2.....	45
17. Tabla 17. Características de la bomba B3.....	45
18. Tabla 18. Características de la bomba B4.....	45
19. Tabla 19. Características de la bomba B5.....	45
20. Tabla 20. Características técnicas de la membrana NF270-4040.	46
21. Tabla 21. Características de la nanofiltración.....	47
22. Tabla 22. Resultados del cálculo de la composición de las corrientes en la ósmosis inversa.....	49
23. Tabla 23. . Dimensionado de los depósitos principales de la ósmosis inversa.	50
24. Tabla 24. Dimensionado de las tuberías principales de la ósmosis inversa.	52
25. Tabla 25. Características de la bomba B1.....	53
26. Tabla 26. Características de la bomba B2.....	53
27. Tabla 27. Características de la bomba B3.....	54
28. Tabla 28. Características de la bomba B4.....	54
29. Tabla 29. Composición final de la corriente concentrada de la ósmosis inversa.	54
30. Tabla 30. Límites de vertido a la red municipal de saneamiento de la comunidad valenciana.	55
31. Tabla 31. Tabla resumen de los costes fijos.	57
32. Tabla 32. Tabla resumen del coste anual del agua.	58
33. Tabla 33. Tabla resumen del coste anual de los productos de limpieza.....	59
34. Tabla 34. Tabla resumen del coste anual de la energía.....	60

35. <i>Tabla 35. Tabla resumen del coste anual de la mano de obra.</i>	60
36. <i>Tabla 36. Tabla resumen del coste anual de la reposición de las membranas.</i>	61
37. <i>Tabla 37. Tabla resumen de los costes totales.</i>	61

MEMORIA DESCRIPTIVA

1. JUSTIFICACIÓN

El sector del aceite de oliva tiene una gran importancia, tanto económica como social, especialmente en los países mediterráneos, donde se produce el 98% del aceite de oliva mundial (Ahmed, 2019). Los países con mayor producción de aceite de oliva son principalmente España, seguida de Italia, Grecia y Túnez. Entre estos cuatro países producen más del 79% de la producción mundial (Vilar y otros, 2019).

Debido a la actual expansión de la olivicultura y, por ende, a la mayor producción de aceite de oliva, se están buscando nuevas alternativas para revalorizar y recuperar los residuos generados en el proceso de producción.

En España se utiliza mayoritariamente el proceso de la centrifugación de 2 fases (debido al ahorro de agua y a la reducción del volumen de residuos). Este sistema da lugar a la generación de un residuo semisólido denominado alperujo, que es una mezcla de la pulpa y los huesos de aceituna, así como el agua que contiene esta fruta.

Se trata de un residuo que se genera en grandes cantidades (80kg/100kg de aceitunas) y de difícil gestión debido a que sus contaminantes están más concentrados. Sin embargo, el alperujo contiene una gran cantidad de polifenoles, compuestos de gran interés en las industrias farmacéutica, nutricional y cosmética debido a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas, antitumorales y antitrombóticas, además de prevenir enfermedades cardiovasculares. Cobra mucha importancia en este contexto la valorización del alperujo, donde la tecnología de membranas puede ser de gran utilidad para, mediante la nanofiltración, purificar dichos compuestos y, a continuación, mediante la ósmosis inversa concentrarlos.

Este Trabajo de Fin de Grado, se centra en la recuperación de polifenoles a partir de un extracto hidroalcohólico de alperujo, empleando, como se ha explicado anteriormente, un sistema de nanofiltración para purificar los compuestos que interesan y posteriormente una etapa de ósmosis inversa para concentrarlos una vez obtenidos con mayor pureza.

2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es la realización del diseño de una planta industrial para la recuperación de polifenoles procedentes del alperujo, con la finalidad de reducir el impacto ambiental y valorizar el residuo para la obtención de un beneficio económico.

Los objetivos secundarios son:

1. Diseño de las etapas de nanofiltración y ósmosis inversa (cuyo objetivo es el de purificar y concentrar los polifenoles, respectivamente) a partir de datos obtenidos en laboratorio en una etapa previa a este trabajo.
2. Realización de un estudio económico del proceso para analizar la viabilidad de la planta diseñada.

3. ANTECEDENTES

3.1 El sector olivícola

En la actualidad, la industria del aceite de oliva internacional se encuentra en plena expansión. Esto es debido a la rentabilidad de las nuevas explotaciones, así como a la valoración positiva del consumidor respecto al aceite de oliva. Así pues, actualmente hay más de 11,5 millones de hectáreas distribuidas en 67 países productores. En los últimos años, se ha pasado de 46 a 67 países productores y se han plantado 1,65 millones de hectáreas nuevas de olivar (Vilar y otros, 2019).

Tabla 1. Distribución de hectáreas de olivar según los continentes. Fuente: (Vilar y otros, 2019)

Continente	Superficie cultivada (Hectáreas)
Europa	6.221.197
África	3.503.030
Asia	1.428.703
América	325.019
Oceanía	42.653

Como se puede observar en la tabla, Europa es el gran líder mundial en cuanto a producción. Los países europeos son los que acaparan casi el total de la producción mundial, el 93,3% del aceite se produce en estos países.

En la campaña 2019/2020 la producción mundial llegó a las 3.266.500 toneladas. En la campaña 2020/2021 se produjo una caída en la producción, llegando a 1.389.000 toneladas. No obstante, se prevé que para la actual campaña 2021/2022 la producción mundial vuelva a subir y se sitúe en 3.098.500 toneladas (Agrónoma, 2022). En concreto, las cifras del aceite producido por cada país en la campaña 2020/2021 son las mostradas en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Países con mayor producción en la campaña 2020/2021. Fuente: (Agrónoma, 2022)

País	Toneladas
España	1.389.000
Italia	273.500
Grecia	275.000
Turquía	210.000
Túnez	140.000

El país productor más importante es España, seguida por Italia, Grecia, Turquía y Túnez.

Según datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en España, hay un total de 2,55 millones de hectáreas que pertenecen a olivar de almazara. Andalucía es la mayor región productora con 1,67 millones de hectáreas. Concentra el 80% de la producción total (cabe destacar la provincia de Jaén, donde se produce aproximadamente el 37% del total), seguida de Castilla La Mancha con el 8% y Extremadura con el 4%. Esta distribución queda reflejada en la *Figura 1*.

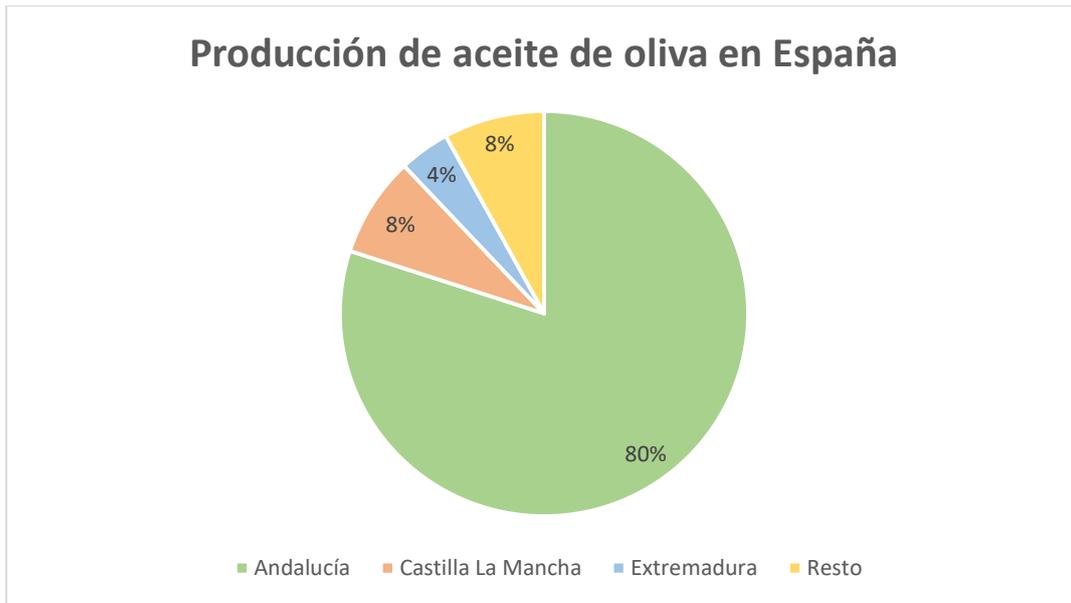


Figura 1. Distribución de la producción del aceite de oliva en España. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Ministerio (2022).

El aceite de oliva se trata de un producto que se consume principalmente en los países en los que se produce. Sin embargo, actualmente se está extendiendo su uso a otros países debido a al éxito de la dieta mediterránea, que está asociada con bajas incidencias de ciertos tipos de cáncer y enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas. La popularidad del aceite de oliva está también relacionada con los compuestos fenólicos que contiene, ya que estos tienen propiedades antiinflamatorias y antioxidantes (Dermeche, 2013).

En cuanto al mercado, España es el principal país exportador de aceite de oliva a nivel mundial. Como se ha dicho anteriormente, cada vez hay más países que consumen aceite de oliva, así pues, los países que más aceite importan en la actualidad son Estados Unidos, Italia, Rusia, Reino Unido, Francia y Alemania. Cabe destacar que han aparecido nuevos importadores como Canadá, Japón o Australia (Syngenta, 2020).

Especialmente en España, el sector olivícola tiene una gran importancia tanto económica como social y medioambiental. El aceite de oliva es el tercer producto agroalimentario más exportado en España. Con el objetivo de ver la importancia de su exportación, en la *Tabla 3* se observan los últimos datos de comercio exterior en cuanto a valor de las exportaciones en los 5 países donde más se exporta:

Tabla 3. Valor de las exportaciones de aceite de oliva en los países a los que más se exporta. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Ministerio de octubre de 2021 a febrero de 2022.

Países	Valor de las exportaciones (millones de €)
Italia	398,9
Estados Unidos	221,5
Portugal	120,5
Francia	93,7
Japón	58,1

3.1.1 Materia prima

El árbol del olivo es una planta perenne. Su apariencia es ancha y su altura corta: de 8 a 15 metros. Por lo regular presenta un único tronco retorcido con varios tallos. Prospera en hábitats de clima mediterráneo con estación seca, en suelos calcáreos y zonas cercanas a la costa. Es un árbol muy resistente y puede soportar diferentes tipos de suelo y salinidad, así como condiciones difíciles como sequías (Bioenciclopedia, 2022).

El fruto del olivo son las aceitunas. Son drupas carnosas de forma ovalada, entre 0,5-2cm. La carne se adhiere a un hueso único proporcionándole esa forma característica. Está formado por tres partes: (Aceitunas Torrent, s.f)

- Endocarpio o hueso de la aceituna. Es el encargado de proteger la semilla. Constituye el 15-23% del peso de la aceituna.
- Mesocarpio. Es la parte carnosa de la aceituna y le corresponde la mayor parte del peso, entre el 70-80%. Contiene una gran cantidad de aceite acumulado en las vacuolas celulares.
- Epicarpio o exocarpio. Es la capa exterior y más fina del fruto. Este tejido está compuesto por la epidermis con su cutícula. Le corresponde el 2-2,5% del peso de la aceituna.

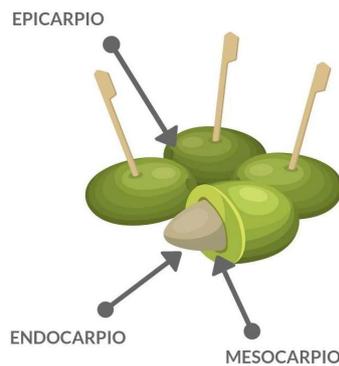


Figura 2. Partes de la aceituna. Fuente: (Aceitunas Torrent, s.f.)

La aceituna en su mayoría está constituida por agua y aceite, pero además también contienen azúcares y polisacáridos. Los polifenoles (compuestos de interés en el trabajo), se encuentran mayoritariamente en la pulpa, aunque también pueden encontrarse en la piel, en las semillas e incluso en el tronco y en las hojas del olivo. Constituyen entre el 1% y el 3% del peso de la aceituna. En la *Figura 3* puede observarse como se distribuyen los polifenoles en las diferentes partes de la aceituna y del olivo:

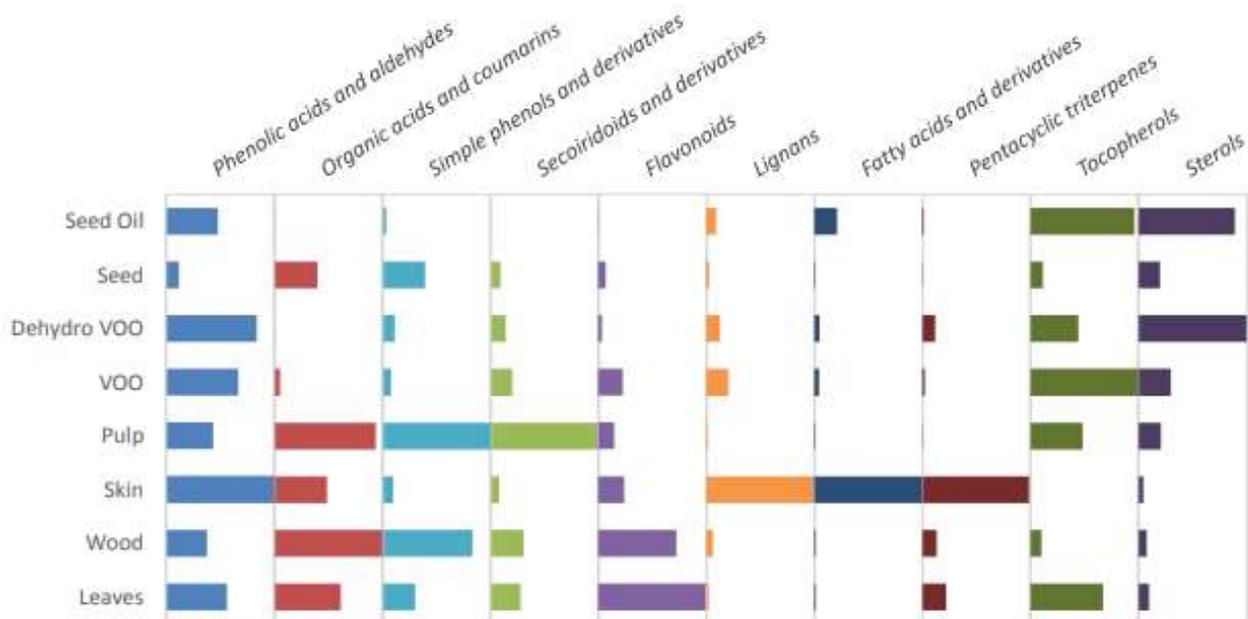


Figura 3. Distribuciones relativas de cada clase química analizada en muestras derivadas de olivo.
Fuente: Olmo-García, 2018.

3.1.2 Factores que afectan al rendimiento y la calidad final del aceite

Los principales factores que influyen en la calidad del aceite de oliva son: la variedad de la aceituna, el clima, factores agronómicos, el tipo de recolección utilizado y el proceso de producción

Se ha de tener en cuenta que cada variedad de la aceituna tiene unas características diferentes, es decir, se obtendrá aceite con diferentes características dependiendo del tipo de aceituna seleccionado, por ejemplo:

Tabla 4. Características de los distintos tipos de aceituna Fuente: (Escuela Superior del Aceite de Oliva, 2020)

Tipo de aceituna	Características
Picual	- Porcentaje de ácido palmítico entre 8-10% - Gran contenido de ácido oleico (más del 77%) - Alto nivel en compuestos fenólicos (500 a 600 mg/kg)
Hojiblanca	- Porcentaje de ácido palmítico entre 8-10% - Gran contenido de ácido oleico (más del 77%) - Bajo nivel en compuestos fenólicos (100-300 mg/kg)
Cornicabra	- Gran contenido de ácido oleico (más del 77%) - Alto nivel en compuestos fenólicos (500 a 600 mg/kg)
Arbequina	- Porcentaje de ácido palmítico de más del 14% - Bajo nivel en compuestos fenólicos (100-300 mg/kg)

La variedad más utilizada es la Picual, que representa un 20% de la producción a nivel mundial y un 50% en España. Sus características son de un aceite con olor y sabor afrutado de aceituna y amargo (Verema, 2012).

En cuanto a los compuestos fenólicos que se encuentran en el aceite de oliva, su contenido varía dependiendo de la variedad de aceituna (como puede observarse en la *Tabla 4*), de su madurez en el momento de recolección, del área de cultivo, del clima y del tipo de proceso utilizado para extraer el aceite (Sánchez-Rodríguez et al., 2018).

El clima ideal para cultivar el olivo es el clima mediterráneo. En cuanto a los factores agronómicos, el tipo de suelo influye en la fracción insaponificable, es decir, terrenos pobres producen aceites más aromáticos que los suelos fértiles. De la misma forma, olivares que se sitúan en altitudes o terrenos geográficamente desfavorables, pueden verse afectados por heladas, lo que puede afectar a varios factores como el índice de peróxidos o influir en la composición de los ácidos grasos disminuyendo la proporción de ácido oleico y aumentando la de palmítico (ESAO, 2020).

El tipo de recolección utilizado es fundamental para el resultado final del producto. Hay dos tipos de recolección principalmente: del árbol (a mano o con máquinas) y del suelo (con instrumentos manuales o con máquinas). Es muy importante evitar la rotura del fruto en la recogida de la aceituna. Cuando hay frutos rotos, existirá un caldo de cultivo perfecto para los microorganismos existentes en el epicarpio de las aceitunas, preferentemente levaduras, que podrían provocar fermentaciones y generar metabolitos que determinarían la pérdida aromática y aparición de defectos (ESAO, 2020).

Finalmente, en el proceso de producción se pueden producir reacciones que se deben evitar si se quiere conservar la calidad del aceite, estas son:

- Hidrólisis: se trata de una reacción donde los triglicéridos junto con el agua dan lugar a glicerol y ácidos grasos, esto provoca enranciamiento de la grasa. Las condiciones óptimas para que se produzca esta reacción son el medio ácido y a altas temperaturas, es por ello por lo que debe trabajarse con las condiciones contrarias, es decir, evitar el medio ácido y a bajas temperaturas.
- Oxidación: es la reacción con oxígeno. Se ve favorecida por el calor y la humedad, por lo que se deben evitar estas condiciones. Ocurre en grasas insaturadas y da lugar a peróxidos y radicales libres que producen: aldehídos, cetonas, éteres, etc., que son sustancias con olor a rancio y mal sabor.

3.2 Proceso de producción del aceite de oliva

Se pueden distinguir dos tipos de procesos de producción: en discontinuo y en continuo. Ambos procesos tienen una parte común, la cual consiste en las siguientes etapas: recepción de la materia prima, limpieza y/o lavado previo de la aceituna, molienda y batido. En el siguiente diagrama de bloques se representa esta parte común de ambos procesos:

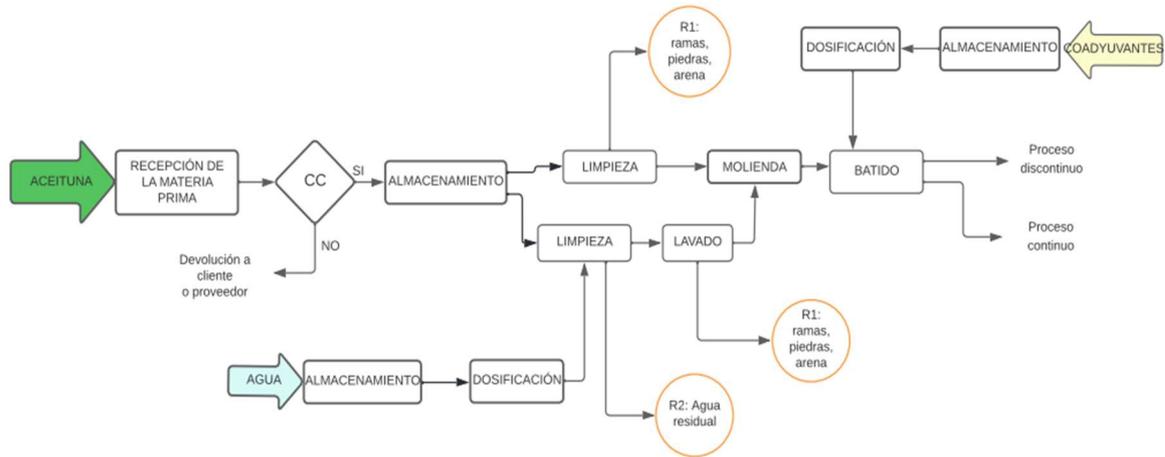


Figura 4. Diagrama de bloques de la parte común del proceso de producción del aceite de oliva.
Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, se realiza la recepción de la materia prima, donde la aceituna después de ser recolectada y transportada se deposita en la tolva subterránea. Antes de llevarla mediante una cinta transportadora a la fase de limpieza y/o lavado, es necesario que la aceituna pase un control de calidad basado en el APPC (análisis de peligros y puntos de control críticos).

Dependiendo del grado de suciedad que tenga la aceituna hay dos posibilidades:

- Hacer solo la limpieza cuando el nivel de suciedad es bajo. Esta consiste en eliminar ramas, hojas, piedras, etc. Se realiza con un ventilador para la eliminación de las hojas y con un sistema de vibración y cribado para eliminar el polvo y las piedras.
- Realizar la limpieza y el lavado cuando el nivel de suciedad es elevado. El sistema de limpieza es el mismo explicado anteriormente y en cuanto al lavado, se introduce agua y se obtendrá como residuo el agua residual, que será necesario tratarla mediante una flotación para la eliminación de las grasas y una decantación para eliminar los sólidos en suspensión.

La molienda consiste en triturar la aceituna con el objetivo de romper las vacuolas que contienen el aceite. Como resultado se obtiene una pasta compuesta por una fase sólida (restos de tejidos vegetales y hueso) y una fase líquida (aceite y agua).

En la fase de batido el objetivo es reunir las gotas de aceite dispersas en la pasta molida en gotas mayores y separarlas de las otras fases. Consiste en hacer girar la masa y aumentar las probabilidades de que las gotas se junten y fluyan. Este proceso calienta la masa, con la precaución de no superar los 35°C, así el aceite es menos viscoso y fluye de manera más eficiente. Se pueden añadir coadyuvantes para mejorar la condición térmica de la pasta.

Esta es la última fase que tienen en común el proceso discontinuo y el proceso continuo. A continuación, se explicará cada uno de ellos por separado.

3.2.1 Sistema discontinuo

Las etapas que se llevan a cabo en el proceso discontinuo son las siguientes: prensado, filtración y decantación. En el diagrama de bloques de la *Figura 5*, se representa la continuación del diagrama de bloques de la *Figura 4* con el proceso discontinuo:

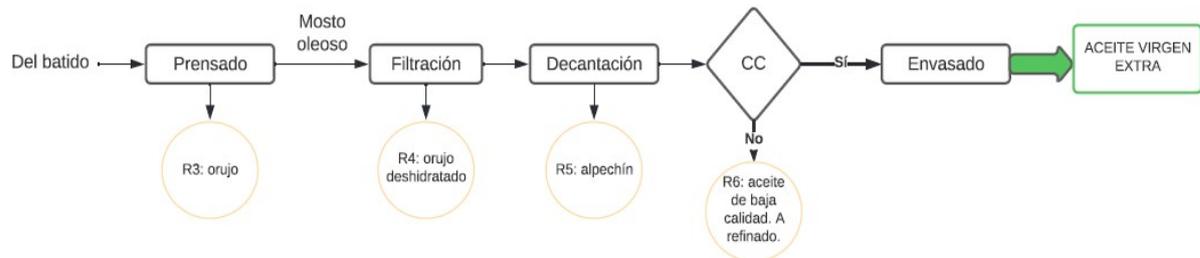


Figura 5. Diagrama de bloques del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema discontinuo. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, el prensado se realiza en una prensa hidráulica en la que se colocan monocapas del material filtrante y de la masa procedente del batido, alternativamente. Se prensa a 120-200 kg/cm³ y dura alrededor de 1-1,5 horas. De este proceso se obtienen dos corrientes. Por un lado, se obtiene el mosto oleoso, que es el que pasa a la etapa de filtración. Contiene un 30% aceite, 60% de agua y 10% de pulpa. Por otra parte, se obtiene el orujo, que es el residuo formado por una parte sólida con trazas de aceite. Se trata de la materia prima de las orujeras.

Seguidamente, al mosto oleoso se le aplica una filtración que separa el orujo deshidratado de la parte líquida, que es el agua y el aceite. La filtración se puede llevar a cabo mediante el filtro prensa, que es un conjunto de placas con material filtrante colocadas en horizontal por los cuales se introduce el mosto que se quiere filtrar, se aplica presión y por el otro lado se obtiene la fracción líquida (agua y aceite) quedándose el orujo deshidratado entre los filtros. O, por otro lado, se puede llevar a cabo mediante tamices vibratorios, que consisten en una columna de tamices con un sistema de vibración, donde el aceite pasa a la parte más baja y el residuo sólido se queda retenido en los tamices.

Finalmente, en la etapa de decantación, se persigue la separación del aceite y el agua por acción de la gravedad. Se utilizan tanques de decantación o pozuelos, que son depósitos con base cónica conectados entre sí por la parte superior. El funcionamiento se basa en la diferencia de densidad entre el aceite y el agua. Al ser el aceite menos denso, este se queda en la parte superior del pozuelo y va pasando por los diferentes decantadores, arrastrando cada vez menos agua, hasta que al final solo queda aceite. Se obtiene como residuo el alpechín, que contiene agua y muy poca cantidad de aceite.

Después de la decantación, el aceite obtenido ha de pasar un control de calidad en el que se mide la acidez del aceite. Hay distintas posibilidades:

- Acidez < 1º: se puede envasar directamente como aceite de oliva virgen extra
- Acidez < 2º: se puede envasar como aceite de oliva virgen fino
- Acidez > 2º: se le deberá aplicar un proceso de refinado para producir aceite refinado suave o intenso

3.2.2 Sistema continuo

En el sistema continuo se pueden distinguir dos métodos diferentes: la centrifugación de 3 fases y la centrifugación de 2 fases.

Si se utiliza el método de centrifugación de tres fases, el diagrama de bloques es el que corresponde a la *Figura 6*:

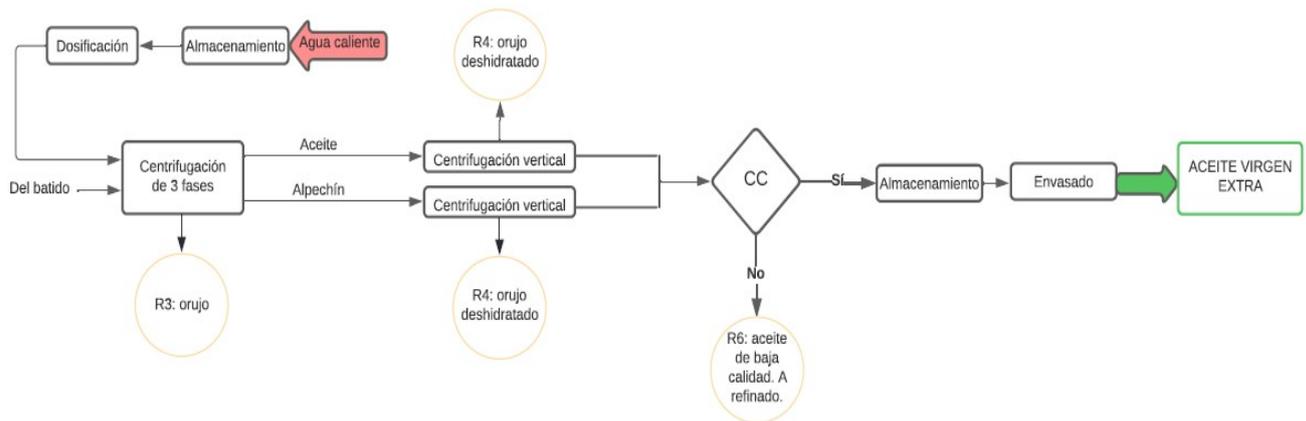


Figura 6. Diagrama de bloques del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema de centrifugación de 3 fases. Fuente: elaboración propia.

Este proceso se basa en las diferencias de densidades entre el aceite, el agua y la materia sólida, aprovechando para la separación las fuerzas centrífugas. Se realiza en una centrífuga horizontal. Los líquidos (el aceite y el alpechín) forman anillos concéntricos según su densidad y salen al exterior por diferentes conducciones. Para conseguir una mejor separación, se le adiciona agua caliente (aproximadamente a 30°C), lo que provoca varios inconvenientes: se favorecen las reacciones de hidrólisis y oxidación y, además, al introducirse agua, esta debe ser tratada posteriormente.

De la centrífuga horizontal, salen dos corrientes, una formada por el aceite y restos de fase acuosa y otra formada por la fase acuosa y restos de aceite. Ambos se someten a una centrifugación vertical con el objetivo de extraer el aceite de ambos tipos de líquidos.

El principal problema de la centrifugación de 3 fases es la gran cantidad de agua residual generada (1,2-1,3 litros/kg de aceituna procesada) debido a la adición de agua caliente en la centrífuga horizontal. Se trata de un agua residual de difícil tratamiento debido a su alta contaminación y elevada concentración de polifenoles que impide su tratamiento en una depuradora convencional. Se deposita en balsas para su evaporación generando así un aumento de los costos, problemas de salud e impacto visual (Ruedaoliva, s.f.).

Por otra parte, si se utiliza el método de centrifugación de dos fases, el diagrama de bloques se muestra en la *Figura 7*:

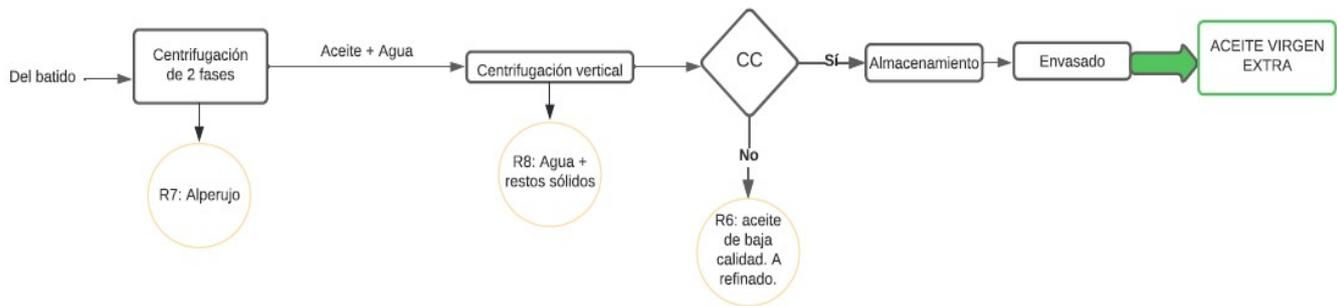


Figura 7. Diagrama de bloques del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema de centrifugación de 2 fases. Fuente: elaboración propia.

Este es el sistema más utilizado en España debido a la reducción en la generación de agua residual. Es por ello que es de gran importancia la valorización del alperujo, residuo que se genera en este método de producción.

En comparación al sistema de centrifugación en 3 fases, donde se generan orujo, orujo deshidratado y agua residual de difícil tratamiento, en el sistema de centrifugación de 2 fases, como se ha dicho anteriormente, solo se genera como residuo el alperujo y agua residual en mucha menos proporción que en el sistema de 2 fases.

El sistema de 2 fases es más ventajoso debido a que tiene un rendimiento superior al de 3 fases por el hecho de que no se le añade agua a la pasta y se evita la formación de emulsiones aceite/agua (Ruedaoliva, s.f.).

Se trata de un sistema similar al explicado anteriormente. En primer lugar, se introduce la masa procedente del batido en la centrifugadora horizontal y, en este caso se generan dos fases: el aceite junto con una pequeña cantidad de agua que, posteriormente pasará por una centrifugación vertical para eliminar el agua; y por otra parte el alperujo, materia semisólida que se buscará valorizar para la recuperación de polifenoles, objeto de este Trabajo Fin de Grado.

Debido a la importancia de este proceso de producción, se representa el diagrama de flujo en la *Figura 8*.

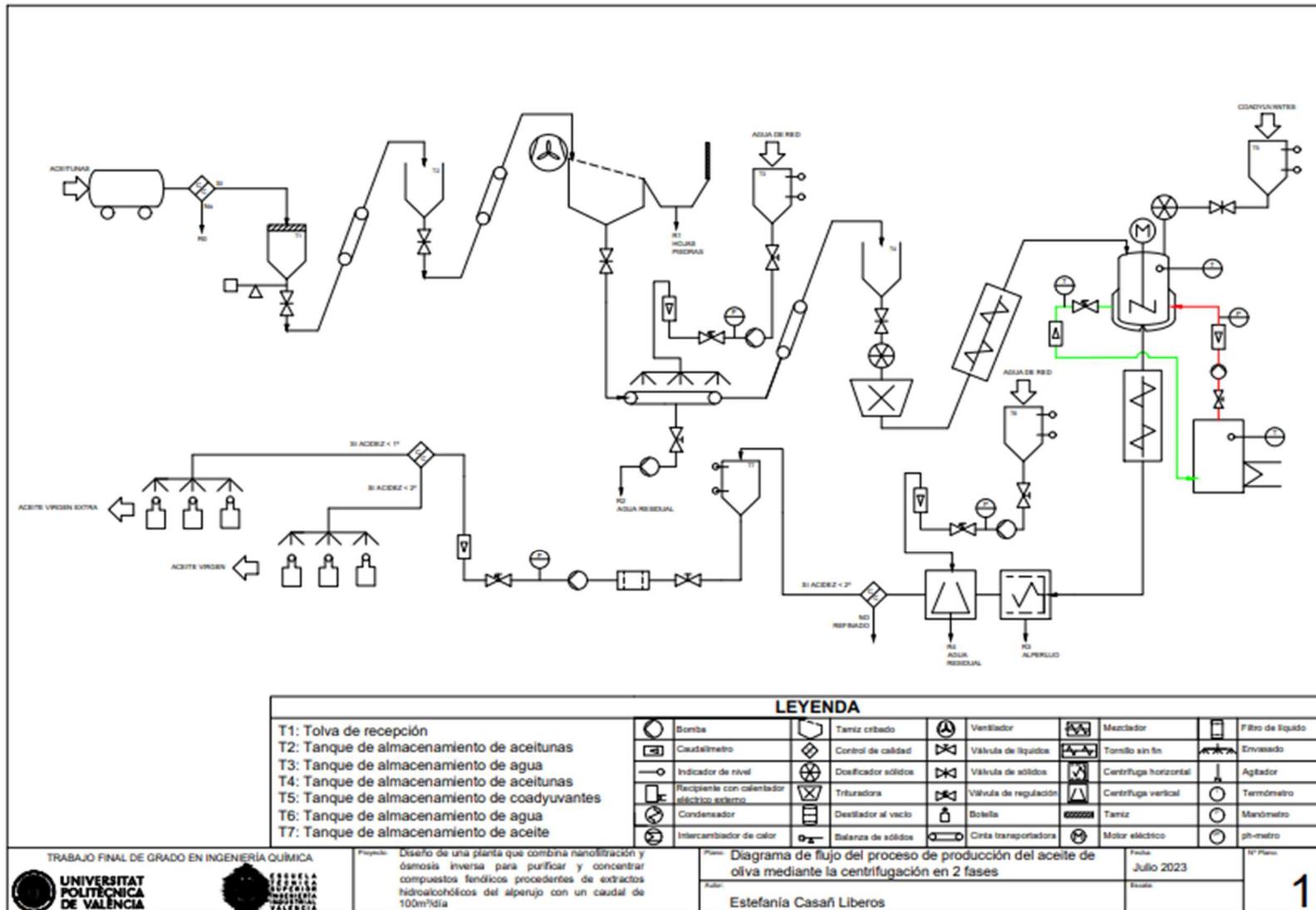


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso de producción del aceite de oliva mediante el sistema de centrifugación de 2 fases. Fuente: elaboración propia.

Este proceso empieza cuando se reciben las aceitunas en la tolva de recepción (T1), las cuales, mediante el uso de una balanza, se dosifican a una cinta transportadora que la conduce a la etapa de limpieza, donde se eliminan hojas y piedras. Posteriormente se conduce a la etapa de lavado. Al salir de la etapa de lavado, mediante una cinta transportadora, llega hasta el tanque T3 donde se dosifican a la trituradora. La pasta, gracias a un tornillo sin fin, es dirigida a un proceso de batido donde se adicionan los coadyuvantes. En esta etapa, la pasta es calentada mediante un sistema de recirculación de agua caliente, no debiendo superarse los 35°C para evitar el deterioro del aceite. A continuación, la pasta con coadyuvantes, es dirigida al sistema de centrifugación en dos fases mediante un tornillo sin fin. De la centrífuga horizontal se obtiene como residuo el alperujo. Finalmente, el aceite obtenido se somete a un control de calidad para determinar su acidez: si esta es $>2^\circ$ se requerirá un proceso de refinado, si es $<2^\circ$ se envasará como aceite virgen y si es $<1^\circ$ se envasará como aceite virgen extra.

3.3 Subproductos

En el proceso de producción del aceite de oliva, como se ha visto anteriormente en los diagramas de bloques, se producen diferentes residuos cuya valorización es muy importante tanto a nivel económico como a nivel medioambiental. Dependiendo del proceso utilizado se obtienen diferentes residuos. Los más importantes en la centrifugación de tres fases son: el alpechín y el orujo y el más importante en la centrifugación de dos fases es el alperujo.

El alpechín es un líquido de color marrón oscuro ligeramente ácido y de alta conductividad. Se producen entre 80-120L por 100kg de aceitunas en el sistema de centrifugación en tres fases. Está constituido por un 83-92% en peso de agua, compuestos fenólicos, azúcares y ácidos orgánicos. Los compuestos fenólicos incluyen muchas sustancias orgánicas que tienen la característica común de poseer un anillo aromático con uno o más sustituyentes del grupo hidroxil y una cadena funcional. Estos son los principales responsables de la toxicidad del alpechín y es por ello que se están estudiando nuevos tratamientos para reducir su toxicidad (Kapellakis et al., 2008).

El orujo es un residuo que tiene un contenido en agua entre 25-35% en peso y entre 3-12% de contenido en aceite. Debido a la considerable cantidad de aceite que posee y a las grandes cantidades que se generan (alrededor de 3 millones de toneladas en una campaña), el orujo se ha convertido actualmente en un residuo que genera un importante negocio (Escobar, 2018). El aceite de orujo se obtiene mediante una extracción sólido líquido con disolventes y posteriormente se realizan destilaciones para separar el aceite del disolvente. Finalmente, se somete a un proceso de refinado que da lugar al aceite de orujo para comercializar.

También es posible la valorización del orujo como combustible debido a su alto poder calorífico (4500 kcal por kg en base seca) o como alimentación animal o compostaje.

Por último, el alperujo es el residuo en el que se centra este Trabajo Fin de Grado por lo que se explicará en el siguiente apartado con más detalle.

3.4 Alperujo

3.4.1 Composición y características

El alperujo es un residuo semisólido procedente del sistema de centrifugación de 2 fases. Debido a que es uno de los sistemas de producción de aceite de oliva que más se usa actualmente, se produce una cantidad de alperujo situado entre 13 y 18 millones de toneladas a nivel mundial, por lo que su valorización se ha vuelto muy relevante (Vilar y otros, 2019).

Sus propiedades dependen de la variedad de aceituna utilizada, el tipo de suelo y el momento en el que se recolecta el fruto, entre otros.

Está formado principalmente por la pulpa, el hueso de aceituna y el agua que presenta la aceituna de forma natural. Presenta elevada humedad, su pH es ligeramente ácido y la conductividad varía entre 1,2-5,2 dS/m. Por lo que respecta a su contenido en nutrientes, destaca el alto contenido en potasio en contraste con los bajos valores de fósforo, calcio y magnesio. Tiene altos niveles de materia orgánica, lípidos y compuestos fenólicos y, debido a las altas concentraciones de estos compuestos, presenta propiedades fitotóxicas y es perjudicial para el medioambiente. Se recogen estas características con datos numéricos en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Parámetros característicos del alperujo. Fuente: Elaboración propia a partir de Roig et al. (2006)

Parámetro	Rango
Relación C/N	29,3-59,7
Humedad (%)	49,6-71,4
pH	4,9-6,8
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,2-5,2
Materia orgánica (%)	60,3-98,5
N (g/kg)	9,7-18,5
K (g/kg)	6,3-29
P (g/kg)	0,3-1,5
Ca (g/kg)	2,3-12
Mg (g/kg)	0,5-1,7
Na (g/kg)	0,2-1
Lípidos (%)	3,76-18
Fenoles (%)	0,5-2,4

3.4.2 Valorización

Como se ha comentado en apartados anteriores, el alperujo es uno de los residuos que más se genera en la producción del aceite de oliva en España debido al uso extendido del sistema de centrifugación de dos fases. Debido a este motivo, la valorización del alperujo adquiere una gran importancia. A continuación, se van a exponer distintos tipos de valorización del residuo.

Actualmente, la opción más utilizada es el secado del alperujo en grandes depósitos al aire libre y la posterior extracción química del aceite residual que contiene mediante hexano para producir aceite de orujo. Posteriormente, el alperujo seco se utiliza para la cogeneración de energía eléctrica. Sin embargo, se trata de un proceso bastante costoso

debido a la elevada humedad del residuo (ver *Tabla 5*). El aprovechamiento del alperujo seco puede no ser satisfactorio debido a la humedad que aun contiene. Es por ello por lo que se están buscando nuevas alternativas de valorización (Medina y otros, 2018).

Otra de las posibles opciones para valorizar este residuo es su aplicación directa al suelo. Como se puede observar en la *Tabla 5*, el alperujo es rico en nutrientes, especialmente en potasio, que se trata de un nutriente generalmente escaso en los suelos. Por ello, se trataría de una buena opción de valorización. Sin embargo, se han de tener en cuenta otros parámetros característicos del alperujo que pueden afectar negativamente al suelo, tales como el pH ligeramente ácido o el elevado nivel de fenoles, que podría producir fitotoxicidad. Una de las opciones si quiere utilizarse como fertilizante es compostar el alperujo, pero ha de tenerse en cuenta que tiene que ser sometido a aireación, ha de tener una adecuada relación C/N y una humedad óptima (entre el 50-70%), para lo cual deberá utilizarse agua si esta se encuentra por debajo del mínimo.

Por otra parte, también puede aprovecharse energéticamente, produciendo bioenergía y biocombustibles. El alperujo puede utilizarse para producir biohidrógeno, biometano y bioetanol debido a su contenido en azúcares, ácidos volátiles, polialcoholes y grasas (Dermeche, 2013).

Por último, se encuentra la extracción de compuestos de valor añadido como los polifenoles, objeto de estudio de este Trabajo Fin de Grado. Es de gran interés su recuperación debido a los efectos beneficiosos que aportan, ya que son antioxidantes, antiinflamatorios y tienen efecto contra la diabetes, enfermedades cardíacas o cáncer, entre otros (Ray, 2019). Hay diferentes técnicas que se emplean en la recuperación de polifenoles, entre ellas se encuentran la extracción enzimática, la extracción por disolventes, la centrifugación, procedimientos cromatográficos o la separación por membranas, utilizándose estas últimas en el caso de efluentes líquidos y habiéndose obtenido buenos porcentajes de recuperación (Dermeche, 2013).

Como se ha comentado anteriormente, hay ciertos parámetros en los que se debe hacer hincapié, ya que se han de tener en cuenta a la hora de aplicar un tratamiento u otro en la valorización del alperujo, estos son:

1. Acidez: los bajos valores de pH son debidos a los ácidos presentes de forma natural en la aceituna. Durante la fermentación de la aceituna, como se puede observar en la *Figura 9*, el pH va disminuyendo, lo que es debido al crecimiento de microorganismos productores de sustancias ácidas como el ácido acético y el ácido láctico. Es muy importante la medida del pH durante la extracción del aceite, ya que el medio ácido favorece la reacción de hidrólisis y la ruptura de interacciones entre polifenoles y otros compuestos orgánicos.

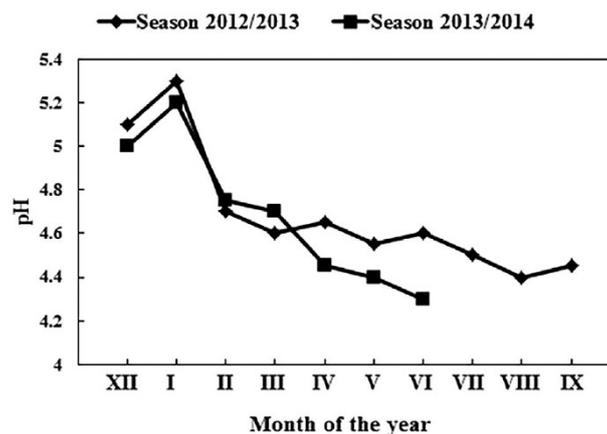


Figura 9. Evolución del pH durante la fermentación de la aceituna. Fuente: (Medina y otros, 2018)

2. Conductividad eléctrica: es directamente proporcional a la cantidad de sales disueltas, por lo que un valor alto de conductividad durante la extracción indicará una mayor extracción de los compuestos iónicos del alperujo.
3. Turbidez: es directamente proporcional a los sólidos en suspensión. Se debe medir y controlar para evitar posibles obturaciones en las etapas de filtración por membrana.
4. Color: su determinación es de gran importancia para determinar la presencia de materia orgánica en los extractos que se obtienen.
5. Concentración de azúcares: el rendimiento de la extracción dependerá de la naturaleza del compuesto extraíble, grado de polimerización y relación con la polaridad del solvente utilizado en la extracción (Soto-García et al., 2016).
6. Concentración de compuestos fenólicos: es el parámetro en el que se centra el presente trabajo. El alperujo es rico en compuestos fenólicos, siendo el hidroxitirosol el más abundante, obtenido debido a procesos de hidrólisis de la oleuperina (Medina y otros, 2018).
7. DQO: determina el oxígeno consumido en el proceso de oxidación. Conocer este parámetro tiene mucha importancia, ya que la prevención de la biodegradación de las muestras y la reducción de la fitotoxicidad dependen de la reducción o eliminación de la materia orgánica de este.

3.5 Polifenoles.

Los compuestos fenólicos son sustancias orgánicas caracterizadas por la presencia de uno o varios anillos aromáticos unidos a uno o más sustituyentes del grupo hidroxilo (-OH) y una cadena lateral funcional.

Es posible clasificarlos en clases según las características estructurales, así pues, las principales clases son: ácidos y aldehidos fenólicos, flavonoides, lignanos, estilbenos, taninos y ligninas.

Las familias de los compuestos fenólicos más importantes que se encuentran en los subproductos y residuos de la almazara son los alcoholes fenólicos, los secoiridoides y ligst (Ray, 2019).

Es en el alperujo donde se encuentran el 98% de los compuestos fenólicos de la aceituna. Los compuestos fenólicos mayoritarios son el tirosol y el hidroxitirosol, seguidos de la oleuropeína y el ácido caféico.

Las estructuras de los compuestos fenólicos mayoritarios en el alperujo son las siguientes:

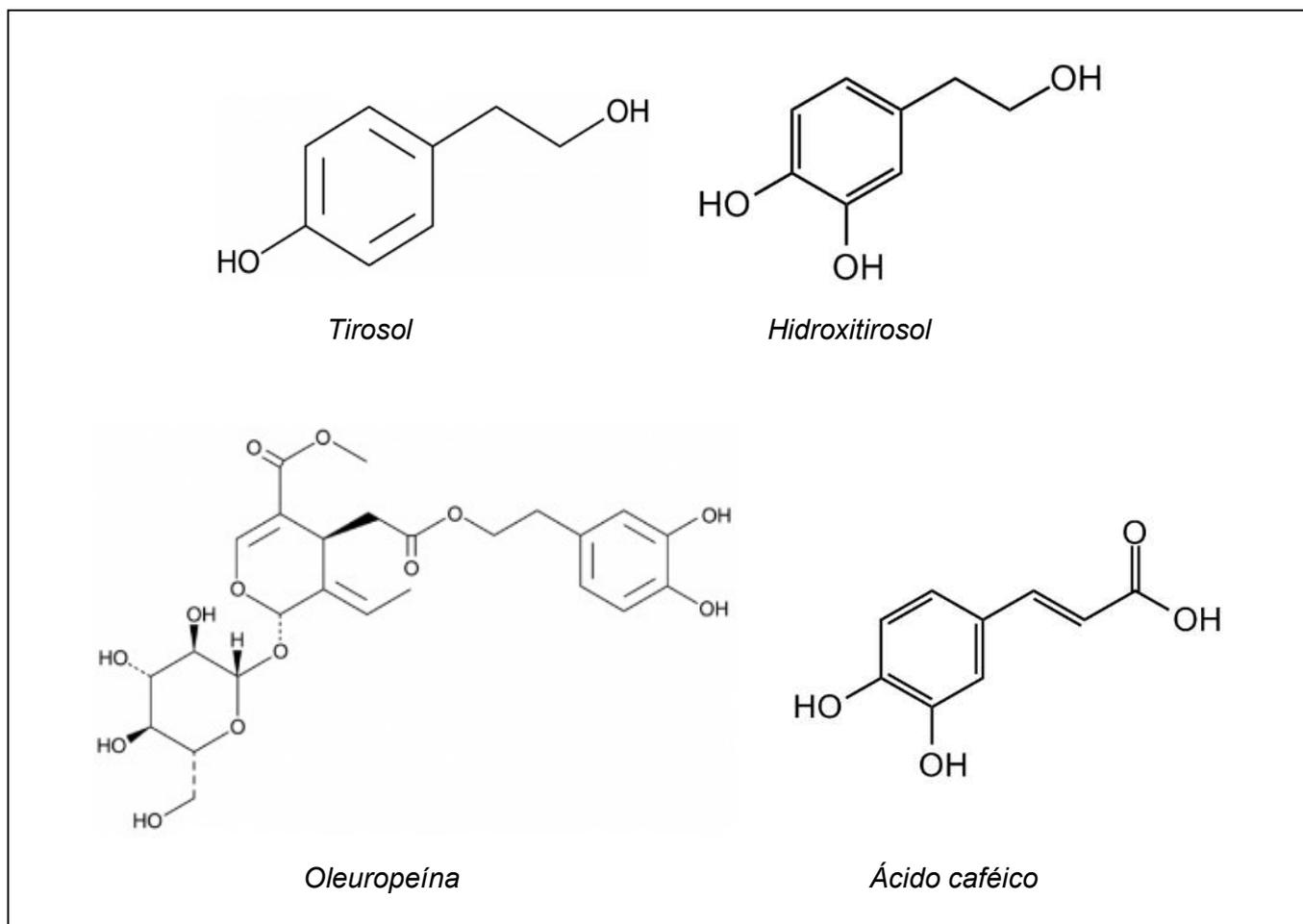


Figura 10. Estructuras de los compuestos fenólicos mayoritarios en el alperujo.

Los polifenoles han sido asociados a muchos de los efectos beneficiosos del aceite de oliva, tales como propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, mejora de la salud digestiva y efectos contra la diabetes, osteoporosis, enfermedades cardiovasculares, enfermedades neurológicas y cáncer (Ray, 2019). Profundizando en los beneficios de los polifenoles:

Propiedades antioxidantes y antiinflamatorias: muchos problemas de salud están asociados al estrés oxidativo, así como también la inflamación. El estrés ocurre cuando las células son incapaces de eliminar los radicales libres conocidos como especies reactivas de oxígeno (ROS) utilizando el sistema de defensa antioxidante natural. Los polifenoles poseen actividad antioxidante, reduciendo así la actividad de las especies reactivas de oxígeno.

Salud digestiva: los polifenoles tienen contacto directo con la mucosa gástrica e intestinal, lo que permite la exposición celular.

Enfermedades cardiovasculares y neurológicas: el hidroxitirosol es capaz de revertir la inflamación crónica y el estrés oxidativo que conllevan al desarrollo de enfermedades cardiovasculares y neurológicas.

Osteoporosis: se ha demostrado que los extractos fenólicos aumentan la proliferación de células osteoblásticas.

Cáncer: la incidencia de muchos tipos de cáncer y el consumo de aceite de oliva están inversamente relacionados. Numerosos estudios concuerdan en que la oleuropeína y el hidroxitirosol inhiben la proliferación de las células cancerígenas sin afectar a las células normales.

Debido a todos estos efectos beneficiosos, la recuperación de los polifenoles resulta muy importante.

4. RECUPERACIÓN DE POLIFENOLES

Como se ha comentado en apartados anteriores, la presencia de polifenoles tiene un gran impacto negativo en el medioambiente. Incluso en bajas concentraciones son capaces de afectar negativamente a los microorganismos, plantas y pequeños vertebrados (Sánchez-Arévalo, 2021). En cambio, los polifenoles se usan ampliamente en la industria alimenticia, farmacéutica y cosmética debido a sus efectos beneficiosos explicados en el apartado 3.5 "Polifenoles".

Normalmente, los polifenoles se sintetizan mediante métodos químicos que hacen que su precio aumente considerablemente. Por este motivo, la recuperación de polifenoles de los residuos de la almazara cobra una gran importancia debido a los beneficios económicos que puede aportar (García-Castelló, 2010).

El proceso que más se utiliza para la extracción de polifenoles en el alperujo se basa en la extracción sólido-líquido mediante el uso de disolventes como el metanol, etanol, acetona, dietiléter o acetato de etilo, normalmente mezclados con diferentes proporciones de agua (Brglez Mojzer, 2016). Junto con los compuestos fenólicos se extraen otros compuestos presentes en el alperujo, como azúcares, proteínas, ácidos orgánicos, etc., por lo que se necesita una separación y purificación posterior. Para ello, en este Trabajo Fin de Grado, se utilizará la tecnología de membranas, en concreto un proceso de nanofiltración seguido de ósmosis inversa, que se desarrollará posteriormente en el apartado 5.

4.1 Tecnologías de extracción de polifenoles

Para elegir un método de extracción u otro se han de tener en cuenta varios factores, tales como: la naturaleza química de la sustancia, el tamaño práctico de la muestra y la presencia de sustancias que interfieren (Sánchez-Arévalo, 2022).

Por otro lado, los parámetros que afectan a la extracción son los siguientes: la temperatura que se alcanza, el número de extracciones que se necesitan, los disolventes y la proporción en la que se utilizan y el tiempo de extracción. En cuanto a la solubilidad, esta está influenciada por el tiempo de extracción y la temperatura. Una mayor temperatura aumenta la solubilidad y la transferencia de materia, así como también disminuye la viscosidad y la

tensión superficial de los disolventes, consiguiendo así un mayor porcentaje de extracción (Brglez Mojzer, 2016).

A continuación, se va a profundizar en los diferentes tipos de métodos de extracción, distinguiendo entre el método convencional y los métodos modernos.

4.1.1 Método convencional

Este método consiste en una extracción líquido-líquido o sólido-líquido en la que se utilizan disolventes tales como alcoholes (metanol y etanol), acetona, dietiléter o acetato de etilo que suelen mezclarse con diferentes proporciones de agua. Utilizar este método puede llevar a problemas de salud debido a que pueden permanecer restos de disolvente en el producto final. Por ello que es necesaria una purificación posterior.

Se han de tener en cuenta diferentes factores que afectan a este tipo de extracción, como: el tipo de disolvente, la temperatura, el tiempo de extracción y el pH del medio y de la muestra.

4.1.2 Métodos modernos

Principalmente existen dos tipos de métodos modernos para la extracción sólido-líquido con disolventes (Rajbhar et al., 2014):

Extracción sólido-líquido asistida por microondas: Este método tiene como ventajas un tiempo de extracción más corto, ahorros significativos de energía y una reducción de la contaminación medioambiental debido a una menor emisión de CO₂ a la atmósfera.

Extracción sólido-líquido asistida por ultrasonidos: Este método ayuda a intensificar la transferencia de materia. Cuando hay altas temperaturas, aumenta la solubilidad, la difusividad y la presión, lo que ayuda a las ondas a penetrar en los tejidos.

4.2 Tecnología de membranas para la separación y purificación de polifenoles

Como se ha comentado en el apartado 4 “Recuperación de polifenoles”, la técnica que se utiliza para la extracción de estos del alperujo es una extracción sólido-líquido que se puede realizar con diferentes disolventes y en diferentes proporciones. Seguida de esta extracción, se realiza una purificación y concentración para eliminar todo lo que acompaña a los polifenoles, llevadas a cabo normalmente mediante membranas (Sánchez-Arévalo, 2023).

Durante las tres últimas décadas se han utilizado exitosamente las operaciones de membranas impulsadas por presión. Este tipo de operaciones se ha consolidado debido a que se trata de procesos atérmicos, que no involucran cambios de fase ni agentes químicos. Además, tienen una alta eficiencia, los equipos son sencillos y consumen poca energía (Cassano et al., 2018).

Estos procesos se llevan a cabo cuando se aplica una fuerza impulsora, por ejemplo, un gradiente de presión, entre los dos lados de una barrera permeoselectiva. Como resultado, la corriente de alimentación queda dividida en una corriente de permeado, que contiene todos los componentes que han podido atravesar la membrana y por otro lado se obtiene

la corriente de rechazo que contiene todos los compuestos rechazados por la membrana como puede observarse en la *Figura 11* (Cassano et al., 2018).

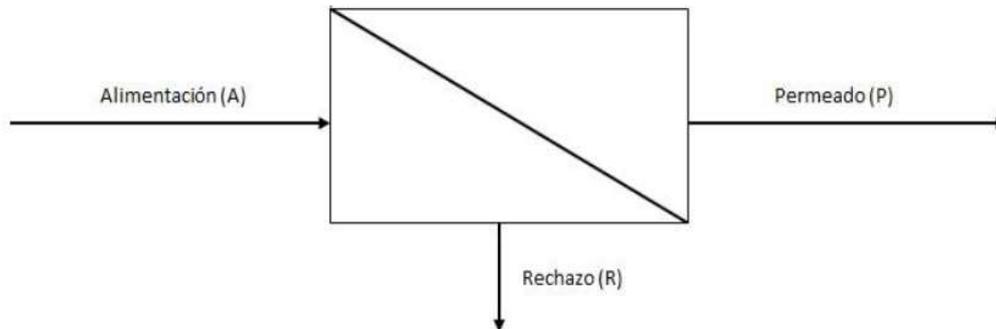


Figura 11. Esquema de una membrana. Fuente: elaboración propia.

Pueden distinguirse varios tipos de membrana atendiendo a la presión requerida y a los tamaños de poro (Cassano et al., 2017), como se muestra en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Procesos de membranas. Fuente: elaboración propia a partir de Cassano et al. (2017)

Proceso de membranas	Tamaño de poro	Presión requerida (bar)
Microfiltración (MF)	0,1-5 μm	1-10
Ultrafiltración (UF)	0,5-100 nm	1-10
Nanofiltración (NF)	0,5-10 nm	10-30
Ósmosis inversa (OI)	<0,5 nm	35-100

Las membranas de microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) contienen poros por los que fluye el líquido debido a la diferencia de presión aplicada. Las membranas de MF tienen poros de gran tamaño que van desde 0,1-5 μm . Principalmente se utilizan para separar partículas suspendidas. Se suele utilizar como pretratamiento para evitar incrustaciones de partículas cuando posteriormente se van a aplicar la nanofiltración (NF) u ósmosis inversa (OI). Las membranas de UF contienen poros de menor tamaño que son capaces de retener macro y micromoléculas. En la *Figura 12* puede observarse una descripción esquemática de lo que separan ambos tipos de membrana:

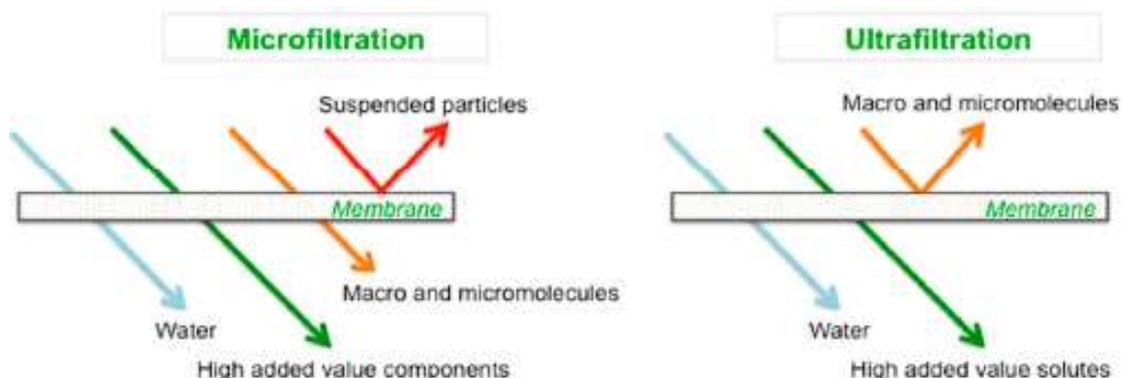


Figura 12. Esquema descriptivo de las membranas de microfiltración y ultrafiltración.

Fuente: Cassano et al. (2017)

En este Trabajo Fin de Grado, se realizará una primera separación mediante una nanofiltración y seguida de una concentración que se llevará a cabo con la ósmosis inversa. En los subapartados 4.2.2 “Nanofiltración” y 4.2.3 “Ósmosis inversa” se procederá a explicar ambas técnicas con más detalle.

4.2.1 Modos de operación: tipos de flujo

En las membranas pueden aplicarse principalmente dos modos de operación (Van Der Bruggen, 2018):

1. Filtración frontal: la alimentación se aplica perpendicularmente a la membrana como puede observarse en la *Figura 13*. En este modo de operación, puede ocurrir una acumulación de solutos cerca de la superficie de la membrana que influye en la separación disminuyendo el flujo y la permeabilidad de la membrana. Este tipo de filtración puede aplicarse con flujo constante y aumentado la presión para compensar la reducción del flujo que pasa a través de la membrana con el tiempo.

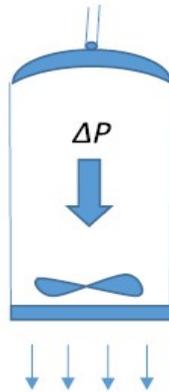


Figura 13. Representación esquemática de la filtración frontal. Fuente: Van Der Bruggen (2018)

2. Filtración de flujo tangencial: tiene como intención mejorar la estabilidad del flujo y el rechazo mediante la aplicación de fuerzas en la superficie de la membrana aplicando el flujo de alimentación de manera tangencial a la membrana como puede observarse en la *Figura 14*. Este modo de operación consume más energía, pero no por ello es más costoso ya que su rendimiento es mayor.

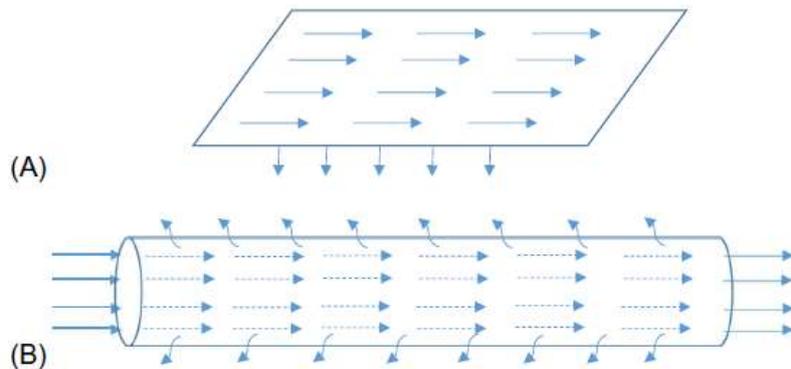


Figura 14. Representación esquemática de la filtración de flujo tangencial a través para una membrana plana (A) y una membrana tubular (B). Fuente: Van Der Bruggen (2018).

En cuanto a la NF y a la OI, el modo de operación óptimo es el de flujo cruzado. Esto es debido a que, en el flujo frontal, la acumulación de concentración de soluto y de sales sería demasiado elevada en estos dos tipos de membrana.

4.2.2 Nanofiltración

La nanofiltración es una técnica de separación que combina las características de los procesos de ultrafiltración y ósmosis inversa, ya que se basa en la separación por diferencias de tamaños (como la ultrafiltración) y en el mecanismo de disolución-difusión (como la ósmosis inversa).

La nanofiltración puede separar o fraccionar especies orgánicas de bajo peso molecular, rechazando iones multivalentes y especies de alto peso molecular, como puede observarse en la Figura 15:

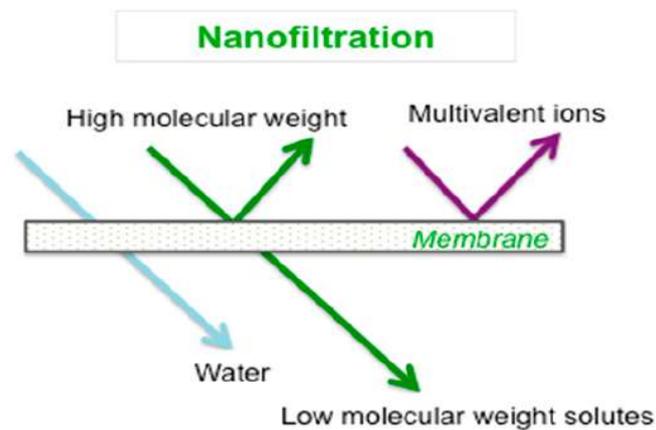


Figura 15. Esquema descriptivo de la membrana de nanofiltración. Fuente: Cassano et al. (2017)

Normalmente, las membranas comerciales de nanofiltración están hechas de poliamida, poliaminas, acetato de celulosa, polietersulfona, polisulfona, polidimetilsiloxano, alcohol polivinílico o tereftalato de polietileno. Independientemente del proceso para el que se utilice la membrana, esta debe estar alojada dentro de unos compartimentos llamados módulos. Existen diferentes configuraciones de módulos de membranas. Los más comunes son los módulos planos, tubulares, en espiral o de fibras huecas (Nazir y otros, 2019).

4.2.3 Ósmosis inversa

La ósmosis directa se trata de un proceso para eliminar el agua debido a una diferencia de presión osmótica. En ausencia de cualquier fuerza aplicada desde el exterior, el agua se moverá desde bajas concentraciones hasta altas concentraciones pasando a través de una membrana, así pues, el proceso se encuentra dominado por la presión osmótica. Para contrarrestar este efecto, se necesita aplicar una presión mayor que la presión osmótica. Esto se realiza presurizando la alimentación. Este proceso es el llamado ósmosis inversa (Nazir, 2019). Puede observarse esquemáticamente el proceso explicado en la Figura 16.

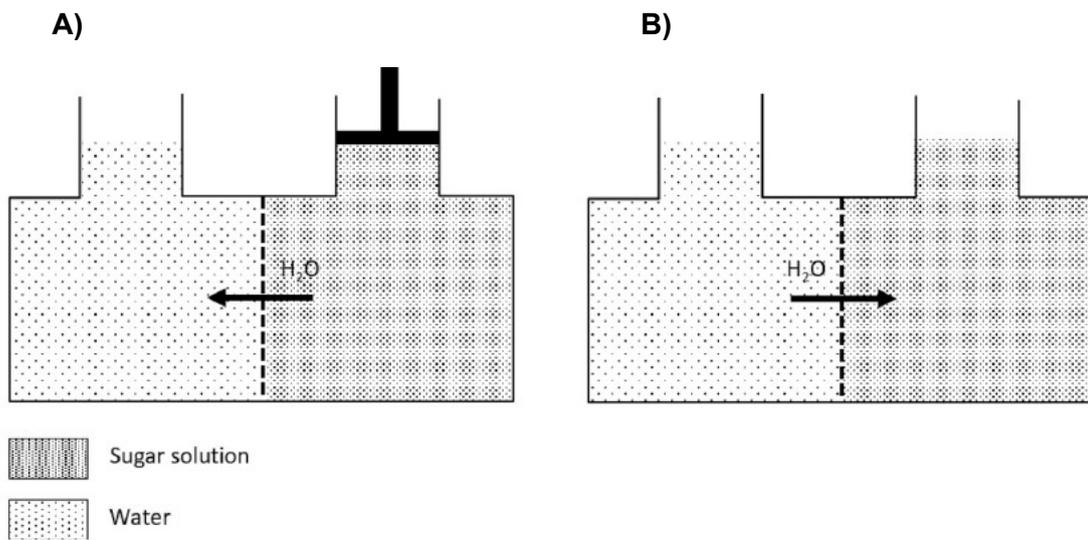


Figura 16. Esquema descriptivo de los procesos de ósmosis inversa (A) y ósmosis directa (B). Fuente: Nazir y otros (2019).

La separación ocurre debido a un mecanismo de disolución-difusión. Este mecanismo describe el transporte de soluto y disolvente a través de las membranas en términos de afinidad relativa de estos componentes para la membrana y su transporte difusivo a través del interior de la membrana (Muñoz Espinosa, 2020).

La presión osmótica puede calcularse mediante la ecuación de Gibbs:

$$\Pi = - \frac{R \cdot T \cdot \ln X_A}{V_m} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

R es la constante de los gases

T es la temperatura absoluta

V_m es el volumen molar del líquido puro

X_A es la fracción molar del líquido puro

Por lo que respecta a la configuración de una unidad estándar de ósmosis inversa, está formada por una serie de etapas que se comprenden por tubos de presión donde se conectan en serie los elementos de las membranas como puede observarse en la Figura 17.

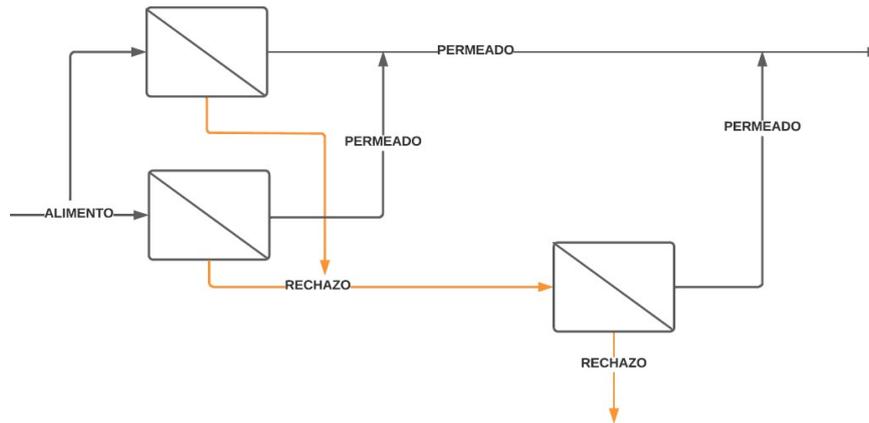


Figura 17. Esquema de la configuración estándar de la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Parámetros característicos

A continuación, van a exponerse los parámetros de diseño y operación más importantes que se utilizan en los sistemas de NF y OI (Sánchez-Arévalo, 2021) (Nazir y otros, 2019) (Carbonell Alcaina, 2017) (Muñoz Espinosa, 2020) (Gil, 2021):

- Retención o rechazo (R): determina la capacidad de la membrana para retener un compuesto

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \cdot 100$$

Donde:

C_p (mg/L) es la concentración de soluto en el permeado.

C_f (mg/L) es la concentración de soluto en la alimentación.

- La presión transmembranal (TMP) se define como la fuerza impulsora necesaria para que el permeado atraviese la membrana,

$$TMP = \frac{P_F + P_R}{2} - P_E$$

Donde:

P_F es la presión de entrada al módulo.

P_R es la presión de salida del rechazo.

P_E es la presión de salida del permeado.

- Densidad de flujo de permeado (J): se trata de la densidad de flujo que atraviesa la membrana cuyas unidades se dan en $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2}$ y se determina utilizando agua pura como alimentación,

$$J = \frac{\Delta P}{\mu \cdot R}$$

Donde:

ΔP (bar) es la presión transmembrana.

μ es la viscosidad del permeado.

R es la resistencia intrínseca de la membrana si la alimentación es agua o la resistencia de la membrana más otras debidas a los fenómenos de ensuciamiento de la membrana, si la alimentación tiene solutos

A partir de esta ecuación, también puede definirse la permeabilidad hidráulica de la membrana (L_p), cuyas unidades son $L \cdot h^{-1} \cdot m^{-2} \cdot bar^{-1}$, como:

$$L_p = \frac{J}{\Delta p}$$

- Factor de conversión: se define como un rendimiento

$$\eta = Y = \frac{Q_p}{Q_A}$$

Donde:

Q_p es el caudal del permeado

Q_A es el caudal de la alimentación

- Factor de reducción de volumen (FRV): designa la reducción de volumen o de masa que se obtiene en el concentrado. Existen dos formas de definir el FRV según se trate de un proceso en continuo o por lotes

$$\text{Proceso en continuo: } FRV = \frac{Q_A}{Q_R}$$

$$\text{Proceso por lotes: } FRV = \frac{V_A}{V_R}$$

Donde:

Q_R es el caudal de rechazo

V_R es el volumen de rechazo

V_A es el volumen de alimentación

- Flujo de soluto por unidad de superficie de membrana:

$$J_s = B_{sm} \cdot \Delta C$$

Donde:

B_{sm} es el coeficiente de permeabilidad del soluto

ΔC es la diferencia entre las concentraciones del soluto a ambos lados de la membrana

4.2.5 Ventajas e inconvenientes

Como se ha comentado en apartados anteriores, el uso de membranas supone una reducción en el gasto de energía, tienen una alta eficiencia, no se involucra en ellas ningún cambio de fase ni agentes químicos que faciliten la separación (aunque estos sí se utilizan en la limpieza de las membranas). Además, tienen unas condiciones de operación más suaves, pudiendo operar a temperaturas mucho más bajas, siendo así un proceso atómico. Las condiciones de uso y los equipos son sencillos, pudiendo operar con ellos fácilmente (Cassano et al., 2018).

Por otra parte, como se ha comentado en apartados anteriores, pueden tener problemas de acumulación de solutos y ensuciamiento de la membrana que pueden reducir el

rendimiento de la misma, así como su vida útil. Por ello es necesaria una limpieza periódica de las membranas (Van Der Bruggen, 2018).

5. DISEÑO DE LA PLANTA

En este apartado se va a realizar el diseño de una planta para la recuperación de polifenoles a partir de un extracto hidroalcohólico de alperujo. Se diseñarán las etapas de purificación y concentración de polifenoles. Se hará a partir de un proceso de membranas, en primer lugar, se diseñará la nanofiltración para conseguir purificar los polifenoles y posteriormente, se diseñará la ósmosis inversa para concentrarlos.

Con el objetivo de tener una visión más clara del proceso completo para la recuperación de polifenoles del alperujo, puede observarse la *Figura 18*.

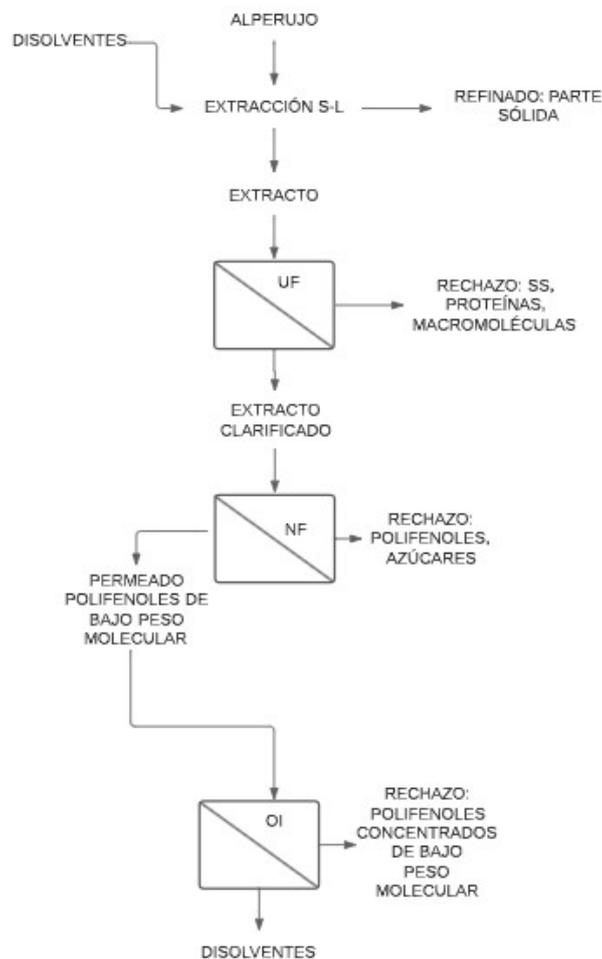


Figura 18. Esquema general para la recuperación de polifenoles del alperujo. Fuente: Elaboración propia.

La planta estará en funcionamiento durante 8 horas al día y 5 días a la semana, es decir, 20 días al mes. El resto del tiempo la producción estará detenida. Estará operativa durante los meses en los que se produce aceite de oliva de nueva cosecha, es decir, durante los meses de octubre, noviembre y diciembre.

El caudal volumétrico que va a tratar la planta es de 100 m³/día, los cálculos se detallarán en apartados posteriores, así como también las características de la corriente de alimentación.

5.1 Descripción del funcionamiento de la planta

El alperujo es un residuo que se obtiene del proceso de centrifugación de 2 fases, como se ha explicado en el apartado 3.4 “Alperujo”.

En la misma planta de producción de aceite de oliva, se instalará también una línea que trate el subproducto para así conseguir la recuperación de polifenoles.

Se muestra a continuación un diagrama de bloques y un diagrama de flujo para poder observar el proceso con claridad.

En primer lugar, en la *Figura 19* puede observarse el diagrama de bloques del proceso de extracción y purificación de los compuestos fenólicos:

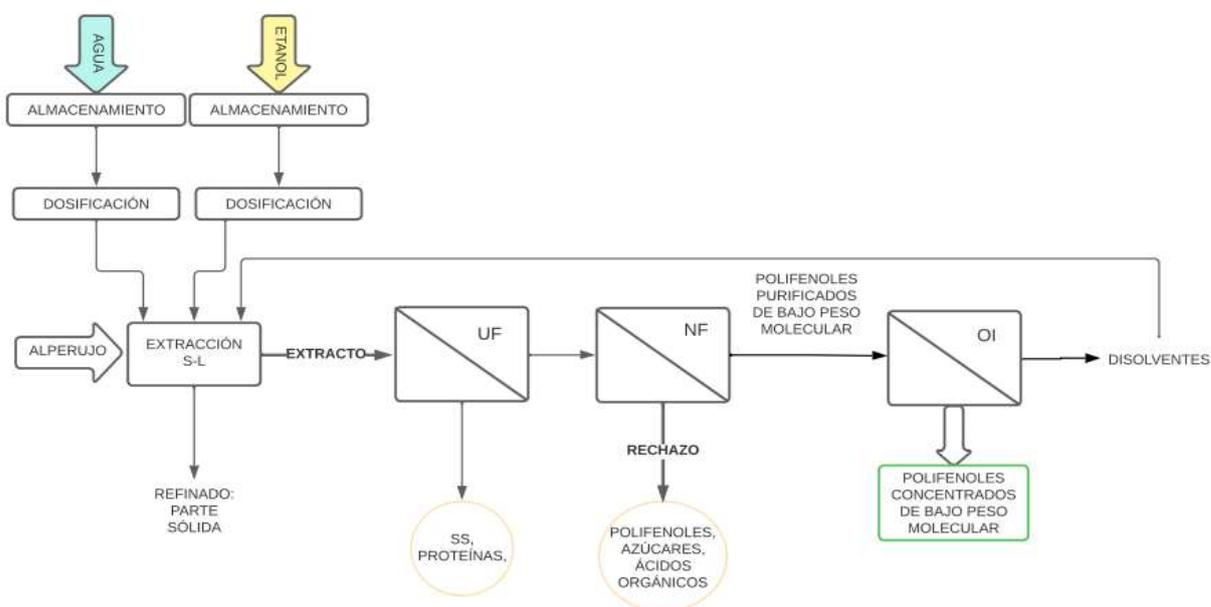


Figura 19. Diagrama de bloques del proceso de recuperación de polifenoles. Fuente: Elaboración propia.

Primeramente, se realiza una extracción sólido-líquido utilizando como disolvente una mezcla etanol-agua 50:50 (v/v) en proporción alperujo-disolvente 1:10. El extracto pasa a la ultrafiltración, donde se separan las partículas y las moléculas más grandes, como los sólidos en suspensión o las proteínas. El permeado de la ultrafiltración pasa a la nanofiltración donde se purificarán los polifenoles de bajo peso molecular, separándolos de los azúcares y los ácidos orgánicos y, finalmente, estos polifenoles purificados pasarán a la etapa de ósmosis inversa, con el objetivo de concentrarlos separándolos de una parte de los disolventes, los cuales se reciclan al proceso.

5.2 Descripción de la corriente de alimentación

En este Trabajo Fin de Grado, se va a trabajar con un extracto de alperujo que se obtiene mediante una extracción sólido-líquido, utilizando como disolvente una mezcla 50:50 (v/v) de etanol/agua, siguiendo el procedimiento que se describe en el trabajo realizado por Sánchez-Arévalo et al., 2022.

Este extracto, previo a las etapas que se van a diseñar (nanofiltración y ósmosis inversa), se trata mediante ultrafiltración con la membrana UP005, de la casa comercial Mycrodin Nadir, a la presión de 2 bar. El permeado obtenido de esta membrana es la corriente de alimentación para los ensayos de nanofiltración, cuyas características se resumen en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Características de la corriente de alimentación a la nanofiltración. Fuente: Elaboración propia a partir de datos bibliográficos.

Compuesto	Concentración (ppm)
Tirosol	25
Hidroxitirosol	25
Oleuropeína	150
Luteolina	15
Ácido caféico	120
Ácido p-cumárico	5
Ácido hidroxioctadecanoico	5
Ácido cítrico	350
Sacarosa	50
Fructosa	300
Glucosa	1500

Uno de los factores más importantes para poder empezar a realizar el diseño de la planta es la cantidad de extracto que va a tratar. Teniendo en cuenta que una almazara media produce 12t/día de alperujo y que la extracción sólido-líquido es 1:10 (1 parte de alperujo y 10 partes de extracto), se tendrán 120 m³/día para tratar en la ultrafiltración. El factor de reducción de volumen que se alcanza es igual a 5. Con este valor y el valor del caudal de alimentación, se obtiene el caudal de rechazo de la ultrafiltración:

$$FRV = \frac{Q_A}{Q_R} \rightarrow 5 = \frac{120}{Q_R} \rightarrow Q_R = \frac{120}{5} = 24m^3/día$$

Entonces, mediante un balance de materia es posible obtener el caudal de permeado de la ultrafiltración, que es el caudal de alimento de la nanofiltración:

$$Q_P = Q_A - Q_R = 120 - 24 = 96 m^3/día$$

Siendo:

- FRV: factor de reducción de volumen
- Q_A: caudal de alimentación
- Q_R: caudal de rechazo
- Q_P: caudal de permeado

Por tanto, el caudal de permeado de la ultrafiltración (que será el de alimentación a la nanofiltración) es de 96m³ que se redondea a 100m³/día.

5.3 Diseño de las instalaciones de membranas

Los resultados que se utilizan en este Trabajo Fin de Grado son los obtenidos en un ensayo de laboratorio ajeno a este proyecto.

El ensayo se llevó a cabo con la membrana NF270 en la celda METcell de la marca EVONIK, cuyas dimensiones son 63,6 cm² de área, de los cuales 51 cm² son de área

activa. Puede llegar a aplicarse una presión de 69 bar. El material con el que está hecho el cuerpo de la celda es de acero inoxidable 316.

Las condiciones de operación del ensayo fueron a una presión de 36 bar llegando a alcanzar un factor de reducción de volumen de 5.

Existen varios factores importantes a tener en cuenta a la hora de utilizar procesos de separación mediante membranas:

- La presión en la corriente de rechazo no es constante, disminuye en la dirección del flujo a lo largo de la membrana. En cambio, la presión en el permeado normalmente permanece constante (Nazir y otros, 2019).
- La presión transmembranal es la presión necesaria para que el permeado pase a través de la membrana y se define como (Nazir y otros, 2019):

$$\Delta P_{TM} = \frac{P_1 + P_2}{2} - P_3$$

Donde:

P_1 es la presión de entrada al módulo

P_2 es la presión del rechazo

P_3 es la presión de salida del permeado

Para poder medir esta presión se instalarán los manómetros necesarios, es decir, uno en la entrada al módulo, otro en la corriente de rechazo y por último uno en la corriente del permeado. Esto se hará para el proceso de nanofiltración, así como también para el de ósmosis inversa.

- El ensuciamiento de la membrana es el responsable de que en el proceso se vaya produciendo una disminución del flujo de permeado, así como también de la pérdida de calidad del proceso. Por ello, es necesario que se tenga un método de limpieza. Existen distintos métodos:

1) Limpieza química: es el más utilizado y es el que se aplicará en este Trabajo Fin de Grado. Pueden utilizarse uno o varios compuestos químicos a la vez. Los más utilizados son detergentes, ácidos, bases, desinfectantes, etc. En este Trabajo Fin de Grado, se utilizará el producto P3 Ultrasil 115 para la nanofiltración siguiendo el modelo expuesto en el trabajo "Effect of the operating conditions on a nanofiltration process to separate low-molecular-weight phenolic compounds from the sugars present in olive mill wastewaters". Y para la ósmosis inversa se utilizará NaOH debido a que se aplican lavados alcalinos cuando la membrana se ensucia por materia orgánica.

2) Limpieza mediante ultrasonidos

3) Limpieza mecánica

4) Limpieza eléctrica

- Existen dos modos de operación en los procesos de membranas:

1) En continuo

1. De paso único: este modo de operación se lleva a cabo impulsando la corriente de alimentación desde el tanque sin recircular el rechazo hasta el tanque de

alimentación. Con el objetivo de alcanzar la concentración de rechazo deseada, se utilizan varias etapas. Se denomina configuración piramidal. El rechazo que proviene de una etapa se junta y se convierte en el alimento para la próxima etapa.

2. Con recirculación (Feed and Bleed): una parte del rechazo se recircula a una segunda bomba en serie con la primera y el resto sirve como alimento para la siguiente etapa. Las corrientes de rechazo y permeado se mantienen constantes. Este modo de operación se utiliza en grandes plantas donde puedan colocarse grandes áreas de membranas y donde la polarización por concentración sea importante, como sucede en la microfiltración y ultrafiltración.

2) En discontinuo (Batch)

Puede operar en dos configuraciones diferentes, con recirculación abierta o cerrada. Se emplea normalmente en plantas pequeñas o en ensayos a escala de laboratorio, debido a que los caudales de agua a tratar son pequeños. No se recomienda este modo de operación si el producto deseado es el rechazo debido al elevado tiempo de residencia.

1. Recirculación abierta: el alimento es impulsado desde el tanque de alimentación hasta los módulos de membranas y, el rechazo obtenido se devuelve al tanque de alimentación. Así, va aumentando la concentración de la corriente de rechazo y el volumen del tanque de alimentación va disminuyendo.
2. Recirculación cerrada: una parte del rechazo se recircula a una segunda bomba en serie con la primera.
En todos estos modos de operación, las membranas pueden disponerse en serie, en paralelo o en serie-paralelo:

- 1) En serie: el rechazo de una es el alimento para la siguiente membrana. Esto puede observarse en la *Figura 20*.

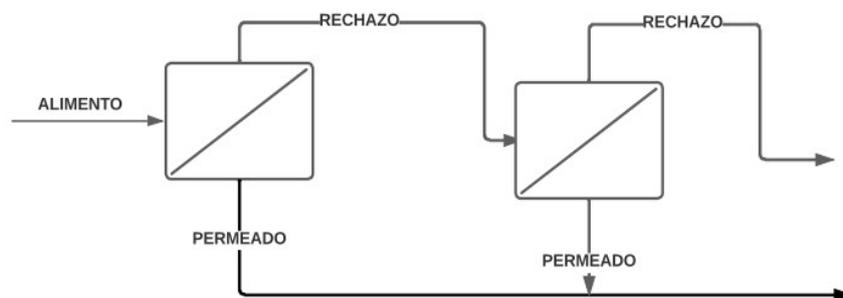


Figura 20. Esquema de la disposición de membranas en serie. Fuente: Elaboración propia.

- 2) En paralelo: el alimento se divide entre la cantidad de membranas que se necesitan. Puede observarse el esquema en la *Figura 21*.

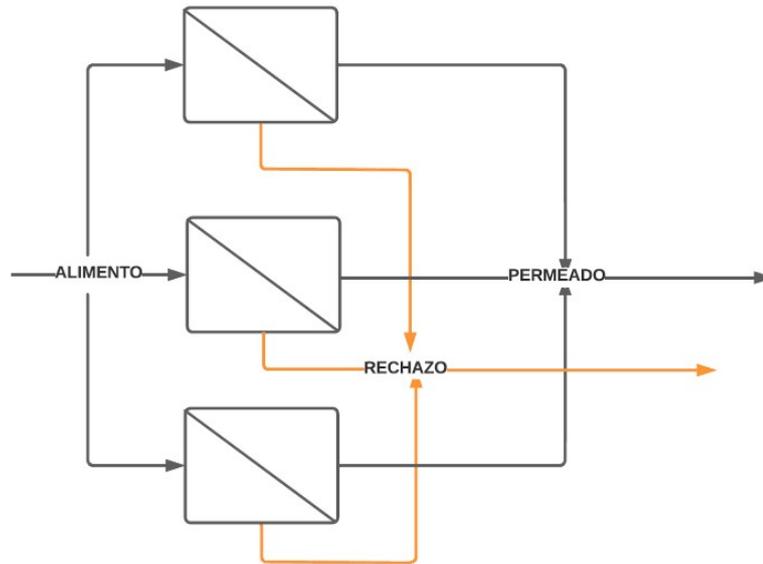


Figura 21. Esquema de la disposición de membranas en paralelo. Fuente: Elaboración propia.

Para el diseño de la planta de membranas de NF y OI se ha seleccionado el modo de operación en continuo de paso único debido a que el permeado de la nanofiltración es el alimento de la ósmosis inversa y en ningún momento se recircula el rechazo, sino que se utilizan varias etapas para conseguir las concentraciones deseadas. El producto final será el rechazo de la ósmosis inversa, que serán los polifenoles de bajo peso molecular purificados y concentrados.

5.3.1 Diseño y dimensionamiento de la etapa de nanofiltración

Los elementos que se han de tener en cuenta para el diseño de la etapa de nanofiltración con la membrana NF270 son los siguientes:

1. Membranas

Los parámetros que son necesarios para realizar el diseño de las etapas de membranas son el área de membrana, las concentraciones de la corriente de alimentación, el volumen a tratar, el factor de reducción de volumen y finalmente, los rechazos obtenidos para las distintas especies involucradas. En este caso, los datos que se utilizan para el diseño son los que se obtuvieron en los ensayos a escala de laboratorio recogidos en el trabajo “Feasibility of several commercial membranes to recover valuable phenolic compounds from extracts of wet olive pomace through organic solvent nanofiltration” (C.M. Sánchez-Arévalo et al., 2023) publicado en la revista Separation and Purification Technology 305 (2023) 122396 y realizado en el marco del proyecto de investigación “Implementación de tecnología de membranas para la valorización de los compuestos fenólicos presentes en las aguas residuales de la industria de producción de aceite de oliva” financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (referencia CTM2017-88645-R y realizado en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la UPV.

Las concentraciones de los diferentes compuestos en la corriente de alimentación pueden observarse en la *Tabla 7*, el volumen a tratar en la nanofiltración son 100 m³/día, el factor de reducción de volumen considerado es de 5 y, finalmente, los rechazos a los principales compuestos pueden observarse en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Rechazos obtenidos en la nanofiltración con la membrana NF270. Fuente: Elaboración propia a partir de datos bibliográficos (Sánchez-Arévalo, 2023).

Compuesto	Rechazo (%)
Tirosol	0
Hidroxitirosol	0
Oleuropeína	98,819
Luteolina	79,450
Ácido caféico	13,712
Ácido p-cumárico	36,028
Ácido hidroxioctadecanoico	94,102
Ácido cítrico	55,641
Sacarosa	100
Fructosa	80,61
Glucosa	79,99

En la Figura 22 se muestran los resultados experimentales de la densidad de flujo de permeado frente al factor de reducción de volumen.

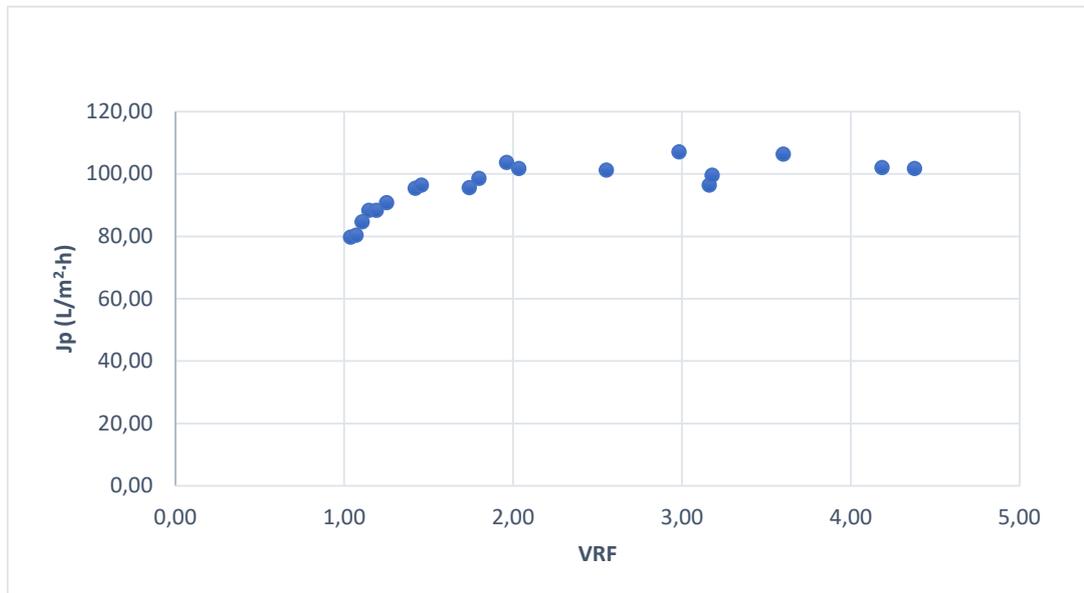


Figura 22. Resultados experimentales de la densidad de flujo frente al factor de reducción de volumen para la etapa de nanofiltración con la membrana NF270. Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados del ensayo experimental.

La membrana seleccionada en el ensayo de laboratorio cuenta con una superficie activa de 63,6 cm³, por lo que a nivel industrial ha de utilizarse una de un tamaño mayor. El modelo que se empleará es el mismo, es decir, la membrana NF270 del fabricante FilmTec, pero enrollada en espiral, cuyo esquema se observa en la Figura 23.

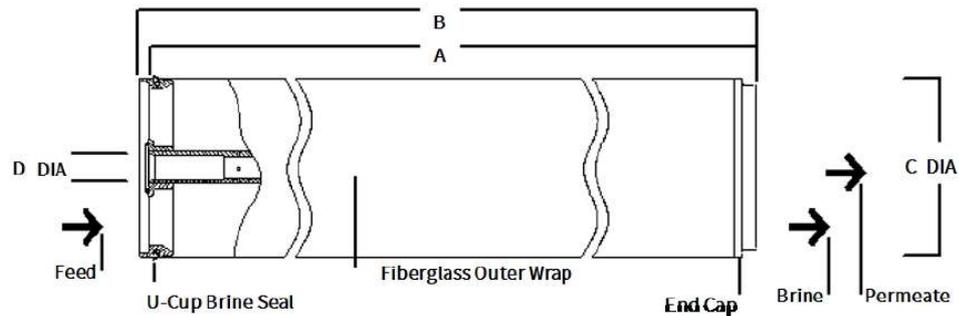


Figura 23. Esquema de la estructura de la membrana NF270 enrollada en espiral. Fuente: Catálogo FilmTec.

Como puede observarse en la Figura 23, el funcionamiento de las membranas enrolladas en espiral consiste en un tubo central por el que se recoge el producto de la nanofiltración, es decir, el permeado. Alrededor de este tubo se encuentran las membranas enrolladas que se separan entre ellas por un espaciador. La alimentación entra por este espacio entre membranas, por lo que cuanto menor sea el espesor del espaciador, se tendrá una mayor superficie de membranas ocupando el mismo espacio en planta, por lo que el proceso es más ventajoso.

Por otra parte, también se ha de tener en cuenta el ensuciamiento de las membranas debido a que estas pueden obturarse si el espesor del espaciador es demasiado pequeño. A continuación, en la Tabla 9 se observan las dos opciones que se han escogido del catálogo de FilmTec, el área de la membrana de cada una, el espesor del espaciador y el número de módulos que requieren. El cálculo del área de membrana se ha realizado en el Anexo I y ha resultado ser de 137,4 m². A partir de este dato, se han obtenido también el número de módulos necesarios para cada membrana.

Tabla 9. Características de las membranas de nanofiltración. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo de FilmTec.

Opciones de membranas	Área de la membrana (m ²)	Espesor del espaciador (mil)	Número de módulos
NF270-440	41	28	4
NF270-440/34i	37	34	4

En función de los parámetros de la Tabla 9, se ha decidido escoger el modelo NF270-440/34i, ya que ambas necesitan el mismo número de módulos, por lo que se escoge la que tiene un mayor espesor del espaciador para evitar posibles obturaciones.

Las características de la membrana escogida se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Características técnicas de la membrana NF270-440734i. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo de FilmTec.

Características técnicas	Valores
Material	Polipiperazina
Área activa de la membrana (m ²)	37
Longitud de la membrana (mm)	1016
Espesor del espaciador (mil)	34
Máxima temperatura de operación (°C)	45
Máxima presión de operación (bar)	41

La planta opera durante 8h incluyendo la etapa de limpieza que tiene una duración de 1h 55min, por lo que la duración de la nanofiltración es de 6h y 5min. En el Anexo I, se encuentran los cálculos realizados para obtener el área total de la instalación, siendo esta de 137,4 m². Se necesitan 4 módulos para tratar la corriente de alimentación, por lo que, recalculando el tiempo de operación, este resulta ser de 6,083h.

En la *Tabla 11* pueden observarse las características de la nanofiltración.

Tabla 11. Características de la nanofiltración. Fuente: Elaboración propia.

Caudal de alimentación (m ³ /día)	100
Caudal de permeado (m ³ /día)	80
Caudal de rechazo (m ³ /día)	20
Número de módulos	4
Área total (m ²)	137,34
Tiempo de operación (h)	6,083
Tiempo de limpieza (h)	1,917

La configuración que se obtiene son dos módulos en paralelo y dos en serie dentro de un mismo tubo de presión los dos.

El esquema de la nanofiltración puede observarse en la *Figura 24*.

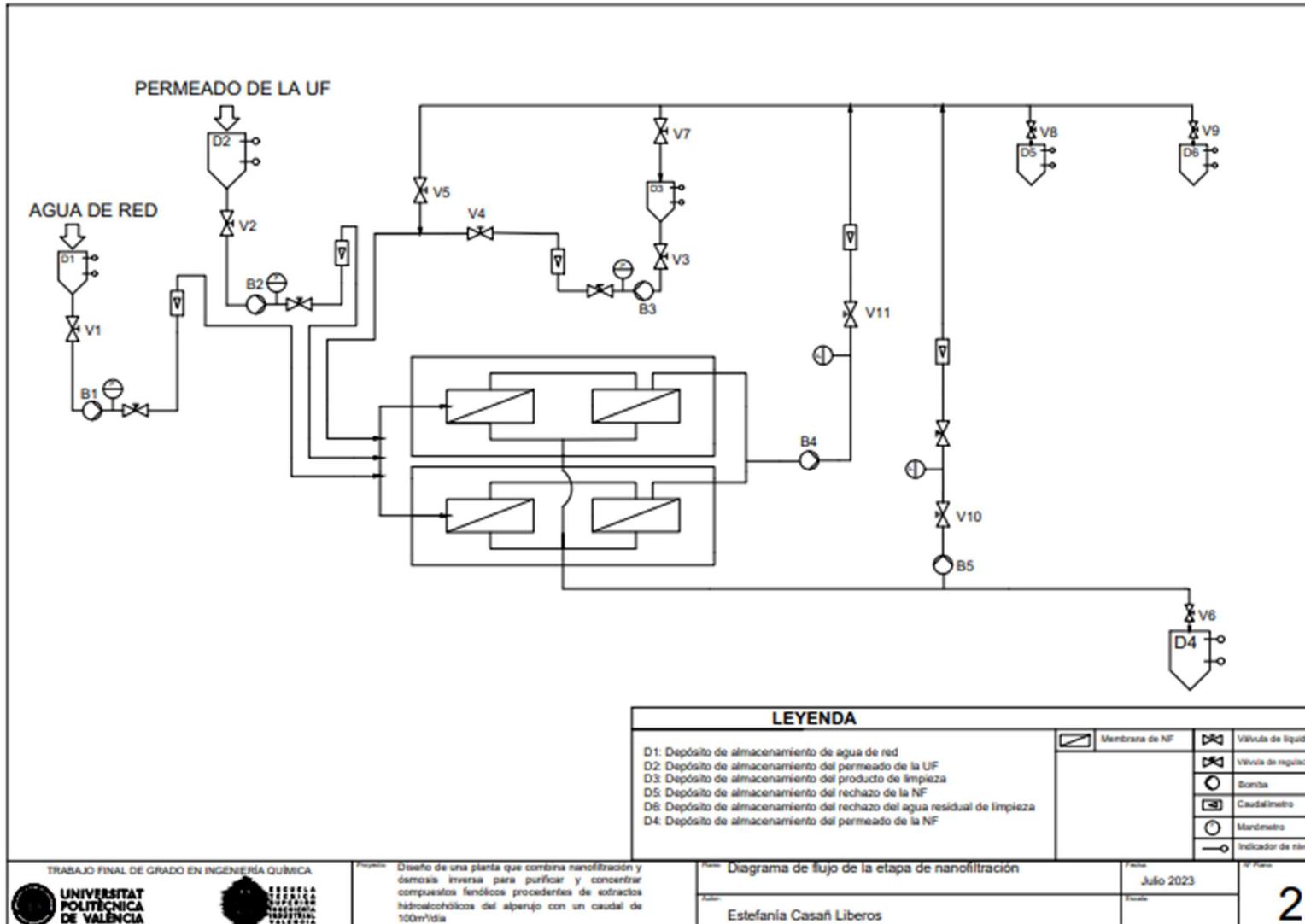


Figura 24. Diagrama de flujo de la etapa de NF. Fuente: Elaboración propia.

2. Proceso de limpieza

La limpieza se realiza siguiendo el modelo expuesto en el trabajo “Effect of the operating conditions on a nanofiltration process to separate low-molecular-weight phenolic compounds from the sugars present in olive mill wastewaters” (C.M. Sánchez-Arévalo et al., 2021). Para el proceso de limpieza se seguirán estos tres pasos:

1. Las membranas se enjuagan con agua de red sin recirculación durante 10 minutos.
2. Se lleva a cabo la limpieza con una disolución acuosa al 0,7% (v/v) del producto P3 Ultrasil 115 a pH=11 durante 1 hora con recirculación. Este producto se reutilizará durante una semana laborable, es decir, durante 5 días.
3. Se enjuagan de nuevo con agua de red durante 45 minutos.

La explicación del proceso de limpieza se realizará siguiendo la *Figura 24*. En primer lugar, se abre la válvula V1 mientras se mantienen cerradas las válvulas V2 y V3 y se hace circular el agua a través de las membranas. El agua no se recircula, por lo que las válvulas V11, V8, V10, V6, V7 Y V3 estarán cerradas y el rechazo se almacenará en el depósito D6 abriendo la válvula V9.

Por otro lado, la limpieza con P3 Ultrasil 115 se realizará abriendo las válvulas V3 y V4. La bomba B3, impulsará el producto y circulará por las membranas, para conseguir esto permanecerán cerradas las válvulas V1 y V2. En esta etapa el producto se recircula, por lo que se abrirán las válvulas V10 y V5, mientras que V11, V8, V9, V6 y V7 permanecerán cerradas. Después de 1 hora, la disolución de limpieza se devuelve al depósito D3, para ello se abrirá la válvula V7 (manteniendo abierta la válvula V10) mientras que V5, V8, V9, V6 y V3 permanecerán cerradas.

3. Composición de las corrientes

Para el cálculo de la concentración de los compuestos en la corriente de rechazo se seguirá la siguiente fórmula:

$$C_R = C_A \cdot FRV^R$$

Donde:

C_R es la concentración de los compuestos en la corriente de rechazo

C_A es la concentración de los compuestos en la corriente de alimentación

FRV es el factor de reducción de volumen

R es el porcentaje de rechazo conocido

Para el cálculo de la concentración de los compuestos en la corriente de permeado se realizará el siguiente balance de materia:

$$Q_A \cdot C_A = Q_R \cdot C_R + Q_P \cdot C_P$$

$$C_P = \frac{Q_A \cdot C_A - Q_R \cdot C_R}{Q_P}$$

La *Tabla 12* muestra un resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 12. Composición de las corrientes de la nanofiltración. Fuente: Elaboración propia.

Compuesto	Concentración alimentación (ppm)	Rechazo (%)	Concentración rechazo (ppm)	Concentración permeado (ppm)
Tirosol	25	0	25	25
Hidroxitirosol	25	0	25	25
Oleuropeína	150	98,819	735,88	3,53
Luteolina	15	79,450	53,87	5,28
Ácido caféico	120	13,712	149,63	112,6
Ácido p-cumárico	5	36,028	8,93	4,02
Ácido oh-esteárico	5	94,102	22,74	0,57
Ácido cítrico	350	55,641	857	223,25
Sacarosa	50	100	250	0
Fructosa	300	80,61	1097,89	100,53
Glucosa	1500	79,99	5434,97	516,26

4. Depósitos

Para el diseño de los depósitos se tomará el volumen de almacenamiento necesario considerando además un margen de seguridad del 20% para prevenir posibles variaciones en el caudal y evitar desbordamientos.

Se utilizarán depósitos de la marca Trépovi verticales con pies y verticales cerrados, cuyas dimensiones pueden observarse en la *Figura 25* y en la *Figura 26*, respectivamente.

DEPÓSITO VERTICAL CERRADO CON PIES

REFERENCIA	VOLUMEN	Ø	ALTURA
	litros		
DVSP-005-2000	5000	2000	2450
DVSP-008-2000	8000	2000	3400
DVSP-010-2500	10000	2500	3000
DVSP-012-2500	12000	2500	3400
DVSP-015-2500	15000	2500	4020
DVSP-020-2500	20000	2500	5050
DVSP-025-2500	25000	2500	6060
DVSP-030-2500	30000	2500	7080
DVSP-040-3000	40000	3000	6550
DVSP-050-3000	50000	3000	7950

Figura 25. Depósitos verticales con pies de la marca Trépovi. Fuente: Catálogo Trépovi.

DEPÓSITO VERTICAL CERRADO

REFERENCIA	VOLUMEN	Ø	ALTURA
	litros	mm	mm
DVST-004-1600	4000	1600	2200
DVST-004-1800	4000	1800	1800
DVST-005-2000	5000	2000	1850
DVST-006-2000	6000	2000	2150
DVST-008-2000	8000	2000	2800
DVST-010-2250	10000	2250	2800
DVST-010-2500	10000	2500	2350
DVST-012-2250	12000	2250	3300
DVST-012-2500	12000	2500	2750
DVST-015-2250	15000	2250	4050
DVST-015-2500	15000	2500	3350
DVST-020-2250	20000	2250	5300
DVST-020-2500	20000	2500	4400
DVST-025-2500	25000	2500	5400
DVST-030-2500	30000	2500	6400
DVST-040-3000	40000	3000	5900
DVST-040-3400	40000	3400	4800
DVST-050-3000	50000	3000	7350
DVST-050-3400	50000	3400	5900
DVST-060-3400	60000	3400	7000
DVST-070-4000	70000	4000	5950
DVST-080-4000	80000	4000	6750
DVST-090-4000	90000	4000	7550
DVST-100-4000	100000	4000	8350
DVST-150-4000	150000	4000	12350

Figura 26. Depósitos verticales cerrados de la marca Trépovi. Fuente: Catálogo Trépovi.

La nanofiltración cuenta con los siguientes depósitos como puede observarse en la Figura 24:

- D1: depósito de almacenamiento de agua de red para el aclarado. El volumen del depósito será de 18,84 m³ como se ha calculado en el Anexo I. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 20 m³. El depósito es vertical con pies con un diámetro de 2,5m y una altura de 5,05m.
- D2: depósito de alimentación cargado con el permeado de la ultrafiltración. El volumen del depósito será de 125 m³ como se ha calculado en el Anexo I. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 150 m³. El depósito es vertical cerrado con un diámetro de 4m y una altura de 12,320m.
- D3: depósito de almacenamiento del producto P3 Ultrasil 115. El volumen del depósito será de 2500 L como se ha calculado en el Anexo I. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Aquaenergy de 3000 L con un diámetro de 1,74 m y una altura de 1,5m.
- D4: depósito de recogida del permeado de la nanofiltración. El volumen del depósito será de 100 m³. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 100 m³. El depósito es vertical cerrado con un diámetro de 4m y una altura de 8,350m.

- D5: depósito de recogida del rechazo de la nanofiltración. El volumen del depósito será de 25 m³. Se seleccionará un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 25 m³. El depósito es vertical con pies con un diámetro de 2,5m y una altura de 6,06m.
- D6: depósito de recogida de agua de red tras el aclarado. El volumen del depósito será de 18,84 m³. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 20 m³. El depósito es vertical con pies con un diámetro de 2,5m y una altura de 5,05m.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados. A modo resumen, se observan en la *Tabla 13*.

Tabla 13. Dimensionado de los depósitos principales de la nanofiltración. Fuente: Elaboración propia.

Depósito	Volumen teórico (m³)	Volumen real (m³)	Diámetro (m)	Altura (m)
D1	18,84	20	2,5	5,05
D2	125	150	4	12,320
D3	2,5	3	1,74	1,5
D4	100	100	4	8,350
D5	25	25	2,5	6,06
D6	18,84	20	2,5	5,05

5. Tuberías

Para realizar el diseño de las tuberías, deben tenerse en cuenta los siguientes parámetros: caudal de circulación (Q) y velocidad tangencial (v). Por lo que se utilizará la siguiente ecuación para el cálculo del diámetro (D):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}}$$

La velocidad tangencial que se tomará será de 1,5 m/s, debido a que se encuentra dentro del rango de valores recomendados.

El espesor de cada tubería se escogerá en función de la presión a soportar por cada tramo. Las tuberías se dividirán por tramos en función del caudal que deben transportar

Los tramos son los siguientes:

- Tramo 1: tubería de alimentación de agua de red a cada tubo de presión y tubería de llegada al depósito de almacenamiento de rechazo de agua de red.
- Tramo 2: tuberías de alimentación del permeado de la ultrafiltración, es decir, del alimento de la nanofiltración, a cada tubo de presión.
- Tramo 3: tubería de alimentación y de recirculación del producto de limpieza.
- Tramo 4: tubería de salida común a las salidas individuales del permeado de los tubos de presión.

- Tramo 5: tubería de salida común a las salidas individuales del rechazo de los tubos de presión.
- Tramo 6: tuberías de salida individuales del rechazo de las membranas en paralelo.
- Tramo 7: tuberías de salida individuales del permeado de las cuatro membranas.
- Tramo 8: tubería de salida común del permeado de las membranas del tubo de presión superior.
- Tramo 9: tuberías de salida individuales del rechazo de los tubos de presión.
- Tramo 10: tuberías de entrada individuales a cada tubo de presión.

Estos tramos pueden observarse en la *Figura 27*.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados. La longitud de los tramos de tubería se estimará de forma que se deje espacio entre los equipos por si es necesario renovarlos o hacerles mantenimiento en un futuro.

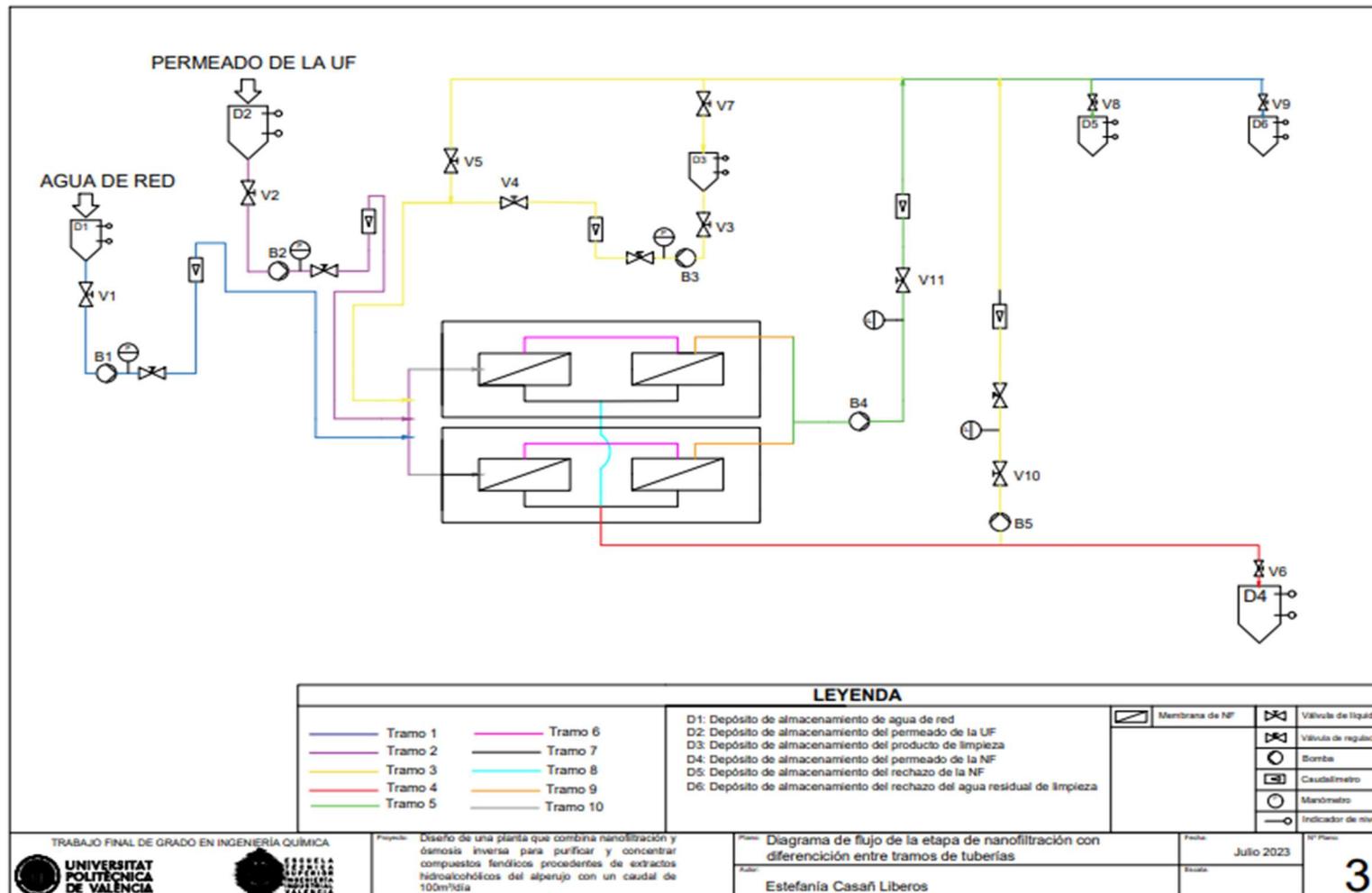


Figura 27. Diagrama de flujo de la etapa de NF con diferenciación entre tramos de tuberías Fuente: Elaboración propia.

A modo resumen, pueden observarse los resultados en la *Tabla 14*, una vez seleccionado el catálogo de las tuberías (Gama ISO de acero inoxidable de la casa Hatnik).

Tabla 14. Dimensionado de las tuberías principales de la nanofiltración. Fuente: Elaboración propia.

Tuberías NF	Diámetro teórico (mm)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)	Velocidad de circulación (m/s)
Tramo 1	160	200	219,1	5	209,1	15	0,87
Tramo 2	62	65	76,1	1,6	72,9	15	1,1
Tramo 3	150	150	168,3	3,6	161,1	40	1,37
Tramo 4	56	65	76,1	1,6	72,9	20	0,89
Tramo 5	28	32	42,4	1,6	39,2	10	0,75
Tramo 6	34	40	48,3	1,6	37,1	4	1,26
Tramo 7	28	32	42,4	1,6	39,2	14	0,75
Tramo 8	39	40	48,3	1,6	37,1	4	1,66
Tramo 9	19,7	20	26,9	1,2	24,5	4	0,98
Tramo 10	44	50	60,3	1,2	57,9	4	0,87

6. Bombas

La nanofiltración cuenta con las siguientes bombas:

- B1: es la encargada de impulsar el agua de red desde el depósito D1 para la realización del proceso de limpieza.
- B2: es la encargada de impulsar la alimentación de la nanofiltración desde el depósito D2 hasta las membranas.
- B3: es la encargada de impulsar el producto de limpieza desde el depósito D3 hasta las membranas.
- B4: es la encargada de impulsar el rechazo de la nanofiltración hasta el depósito D5.
- B5: encargada de la recirculación del producto de limpieza.

La selección de las bombas se realizará en función del caudal que impulsa y de la altura necesaria calculada mediante la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + H_B = \frac{P_I}{\rho \cdot g} + z_I + \frac{v_I^2}{2 \cdot g} + h_{pérdidas}$$

Donde pueden simplificarse los términos cinéticos debido a la baja velocidad de trabajo, quedando:

$$H_B = \frac{P_I - P_A}{\rho \cdot g} + z_I - z_A + h_{pérdidas}$$

Donde:

P_I es la presión en el punto de impulsión

P_A es la presión en el punto de aspiración

ρ es la densidad del fluido

g es la aceleración de la gravedad

z_A es la cota en el punto de aspiración

z_i es la cota en el punto de impulsión

$h_{pérdidas}$ es el total de las pérdidas en la instalación

Las pérdidas en la instalación pueden definirse como:

$$h_{pérdidas} = h_{primarias} + h_{secundarias}$$

Siendo las pérdidas primarias:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

Donde:

- f : factor de fricción
- L : longitud de la tubería (m)
- v : velocidad de circulación del fluido (m/s)
- g : aceleración de la gravedad = $9,81 \text{ m/s}^2$
- D : diámetro de la tubería (m)

El factor de fricción (f) se obtiene de dos formas diferentes dependiendo de si se trata de flujo turbulento o flujo laminar. Si el flujo es laminar ($Re < 2000$) el factor de fricción se calcula como:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Si se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$) el factor de fricción se obtiene mediante el ábaco de Moody que puede observarse en la *Figura 29*. Se entra al mismo con el número de Reynolds y la rugosidad relativa (ϵ_R), que pueden obtenerse mediante las siguientes fórmulas:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon}{D}$$

Donde:

- ρ : densidad del fluido = 1000 kg/m^3
- v : velocidad de circulación del fluido (m/s)
- ϵ : rugosidad absoluta tubos acero inoxidable = $0,002 \text{ mm}$

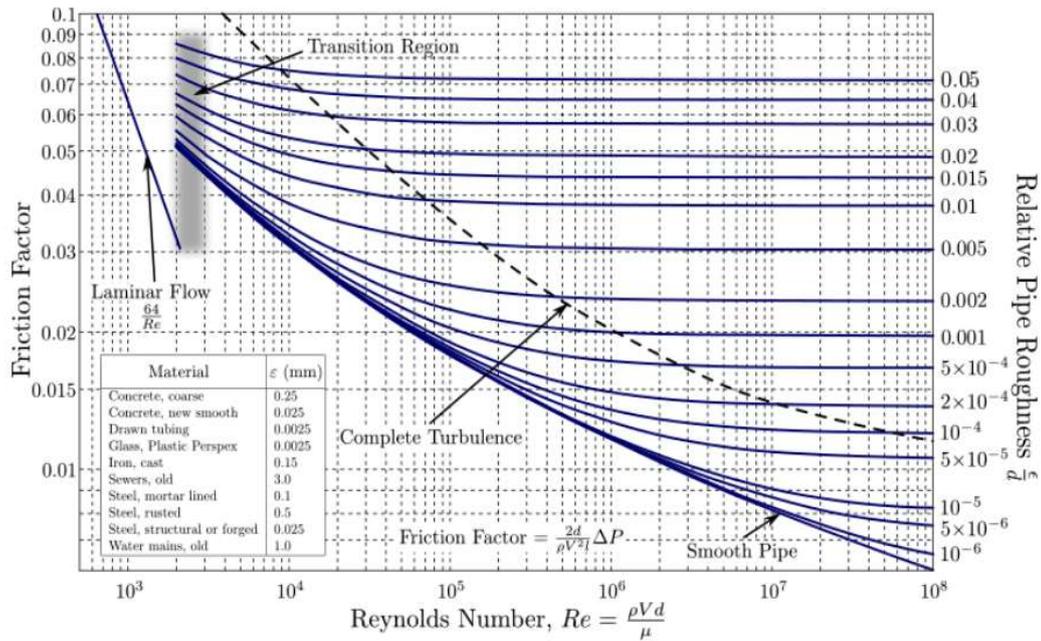


Figura 28. Ábaco de Moody.

Por otra parte, las pérdidas secundarias son:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

Siendo para los tres términos:

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

Donde K es una constante tabulada.

Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo I. A continuación, se realizará una tabla resumen para cada bomba. Las bombas se seleccionarán mediante la página web Grundfos.

Bomba B1

La bomba B1 es la encargada de impulsar el agua de red desde el depósito D1 para la realización del proceso de limpieza.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 10,45$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 109,09$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 100-200/195, que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 15*.

Tabla 15. Características de la bomba B1. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	109,09
Altura (m)	10,45
Potencia (kW)	5,173

Bomba B2

La bomba B2 es la encargada de impulsar la alimentación de la nanofiltración hasta las 4 membranas.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 179,92$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 16,44$ m³/h. Se adquiere la bomba CR 20-14 que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 16*.

Tabla 16. Características de la bomba B2. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	16,44
Altura (m)	179,92
Potencia (kW)	13,28

Bomba B3

La bomba B3 es la encargada de impulsar el producto de limpieza desde el depósito D3. En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 10,87$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 100$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 100-200/195 que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 17*.

Tabla 17. Características de la bomba B3. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	100
Altura (m)	10,87
Potencia (kW)	5,173

Bomba B4

La bomba B4 es la encargada de impulsar el permeado de la nanofiltración hasta el depósito D4.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 4,32$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 13,15$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 32-125/130 que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 18*.

Tabla 18. Características de la bomba B4. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	13,15
Altura (m)	4,32
Potencia (kW)	0,328

Bomba B5

La bomba B5 es la encargada de la recirculación del producto de limpieza.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 19,38$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 100$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 65-125/137 que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 19*.

Tabla 19. Características de la bomba B5. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	100
Altura (m)	19,38
Potencia (kW)	7,549

6.3.2 Diseño y dimensionamiento de la OI

Los elementos que se han de tener en cuenta para el diseño de la etapa de ósmosis inversa son los siguientes:

1. Membranas

Los parámetros que son necesarios para realizar el diseño de las membranas son el área de membrana, las concentraciones de la corriente de alimentación, el volumen a tratar, el factor de reducción de volumen y finalmente, los rechazos generados en la planta. En este caso, los resultados que se utilizan son los correspondientes al ensayo a escala de laboratorio realizado por Usman Taqui Syed, Carla Brazinha, João G. Crespo, Jorge M. Ricardo-da-Silva (Syed, 2017).

Las concentraciones en la corriente de alimentación son las obtenidas en el permeado de la nanofiltración y se han calculado previamente, pudiendo observarse en la *Tabla 12*.

El volumen a tratar en la ósmosis inversa son 80 m³/día, ya que, el alimento de la ósmosis inversa es el permeado obtenido en la nanofiltración. El factor de reducción de volumen considerado es de 6 y la presión transmembranal es de 50 bar.

El modelo de membrana empleado es la membrana SW30HR, cuyo esquema puede observarse en la *Figura 29*.

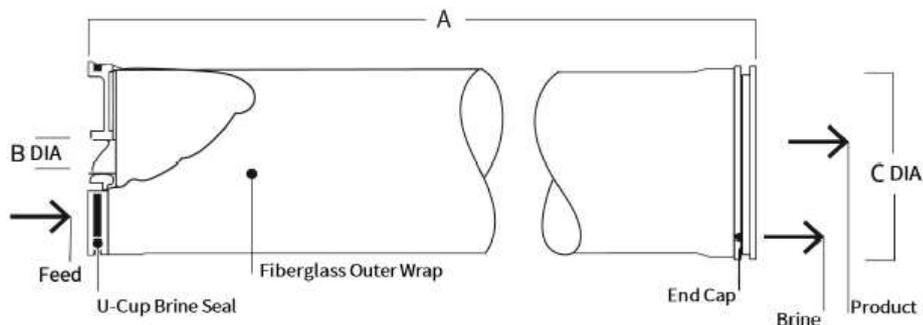


Figura 29. Esquema de la estructura de la membrana SW30HR. Fuente: Catálogo FilmTec.

Las características de la membrana escogida se muestran en la *Tabla 20*.

Tabla 20. Características técnicas de la membrana SW30HR. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo de FilmTec.

Características técnicas	Valores
Material	Poliamida
Rechazo de sales (%)	99,7
Área activa de la membrana (m ²)	35
Longitud de la membrana (mm)	1016
Espesor del espaciador (mil)	28
Máxima temperatura de operación (°C)	45
Máxima presión de operación (bar)	69

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados y En la *Tabla 21* pueden observarse una tabla resumen de los resultados obtenidos para la ósmosis inversa:

Tabla 21. Características de la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Caudal de alimentación (m ³ /día)	80
Caudal de permeado (m ³ /día)	69,08
Caudal de rechazo (m ³ /día)	10,92
Número de módulos	22
Número de tubos de presión	3
Tiempo de operación (h)	7,17
Tiempo de limpieza (h)	0,833
Conversión total (%)	83,87

El esquema de la OI se observa en la *Figura 30*.

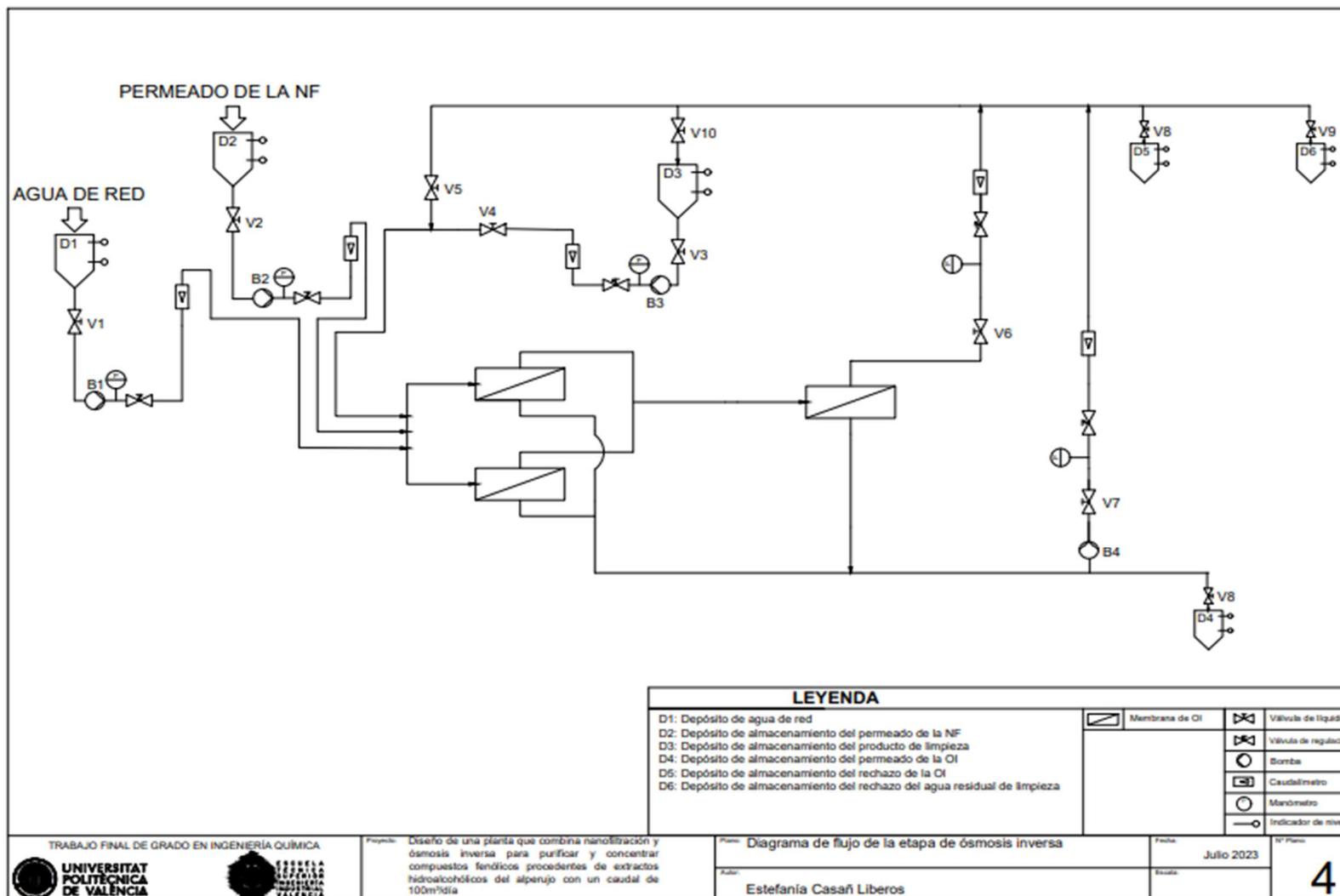


Figura30. Diagrama de flujo de la etapa de OI Fuente: Elaboración propia

2. Proceso de limpieza

El proceso de limpieza que se seguirá en las membranas de ósmosis inversa será el siguiente:

1. Enjuague con agua de red durante 10 minutos.
2. Limpieza química con una disolución de hidróxido de sodio al 0.5% durante 30 minutos con recirculación.
3. Enjuague con agua de red durante 10 minutos.

3. Composición de las corrientes

Para el cálculo de la composición de las corrientes en la ósmosis inversa, se debe tener en cuenta que el rechazo para los compuestos fenólicos es del 100% (Syed, 2017).

Este cálculo se realizará de la misma manera que se ha explicado anteriormente en la nanofiltración.

En la *Tabla 22* se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 22. Resultados del cálculo de la composición de las corrientes en la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Compuesto	Concentración alimentación (ppm)	Concentración rechazo (ppm)
Tirosol	25	183,15
Hidroxitirosol	25	183,15
Oleuropeína	3,53	25,86
Luteolina	5,28	38,68
Ácido caféico	112,6	824,91
Ácido p-cumárico	4,02	29,45
Ácido oh-esteárico	0,57	4,18
Ácido cítrico	223,25	1635,53
Fructosa	100,53	736,48
Glucosa	516,26	3782,12

4. Depósitos

Al igual que en el diseño de la nanofiltración, para el diseño de los depósitos en la ósmosis inversa, se tomará el volumen de almacenamiento necesario, considerando además un margen de seguridad del 20% para prevenir posibles variaciones en el caudal y evitar desbordamientos. Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo I. Se seleccionarán los depósitos de la marca Trépovi cuyas dimensiones se observan en la Figura 25 y la Figura 26. La ósmosis inversa cuenta con los siguientes depósitos como puede observarse en la *Figura 30*:

- D1: depósito de almacenamiento de agua para la limpieza de las membranas. El volumen teórico del depósito será de 4,6 m³. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 5 m³. El depósito es vertical cerrado con pies con un diámetro de 2 m y una altura de 2,450 m.
- D2: depósito de alimentación de la OI cargado con el permeado de la nanofiltración. El volumen teórico del depósito será de 100 m³ como se ha calculado en el Anexo

I. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 100 m³. El depósito es vertical cerrado con un diámetro de 4 m y una altura de 8,350 m.

- D3: depósito de almacenamiento del producto de limpieza: NaOH al 0,5N. El volumen del depósito será de 3,23 m³ como se ha calculado en el Anexo I. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 4 m³. Se trata de un depósito vertical cerrado con un diámetro de 1,6 m y una altura de 2,2 m.
- D4: depósito de recogida del permeado de la ósmosis inversa. El volumen teórico del depósito será de 86,35 m³. Se ha seleccionado un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 90 m³. El depósito es vertical cerrado con un diámetro de 4 m y una altura de 7,550 m.
- D5: depósito de recogida del rechazo total de la ósmosis inversa. El volumen teórico del depósito será de 13,65 m³. Se seleccionará un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Trépovi de 15 m³. El depósito es vertical cerrado con un diámetro de 2,5 m y una altura de 3,350 m.
- D6: depósito de recogida del rechazo del agua de red. El volumen del depósito será de 0,63 m³. Se seleccionará un depósito de plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) de la marca Aquaenergy de 1000 L. con un diámetro de 1,12 m y una altura de 1,4 m.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados. A modo resumen, se observan en la *Tabla 23*.

Tabla 23. Dimensionado de los depósitos principales de la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Depósito	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)
D1	4,6	5	2	2,450
D2	100	100	4	8,350
D3	3,23	4	1,6	2,2
D4	86,35	90	4	7,550
D5	13,65	15	2,5	3,350
D6	0,63	1	1,12	1,4

5. Tuberías

Por lo que respecta al diseño de las tuberías en la ósmosis inversa, se realizará de la misma manera que para la nanofiltración.

La velocidad tangencial que se tomará será de 1,5 m/s debido a que se encuentra dentro del rango de valores recomendados.

El espesor de cada tubería se escogerá en función de la presión a soportar por cada tramo. Las tuberías se dividirán por tramos en función del caudal que deben transportar como puede observarse en la *Figura 31*.

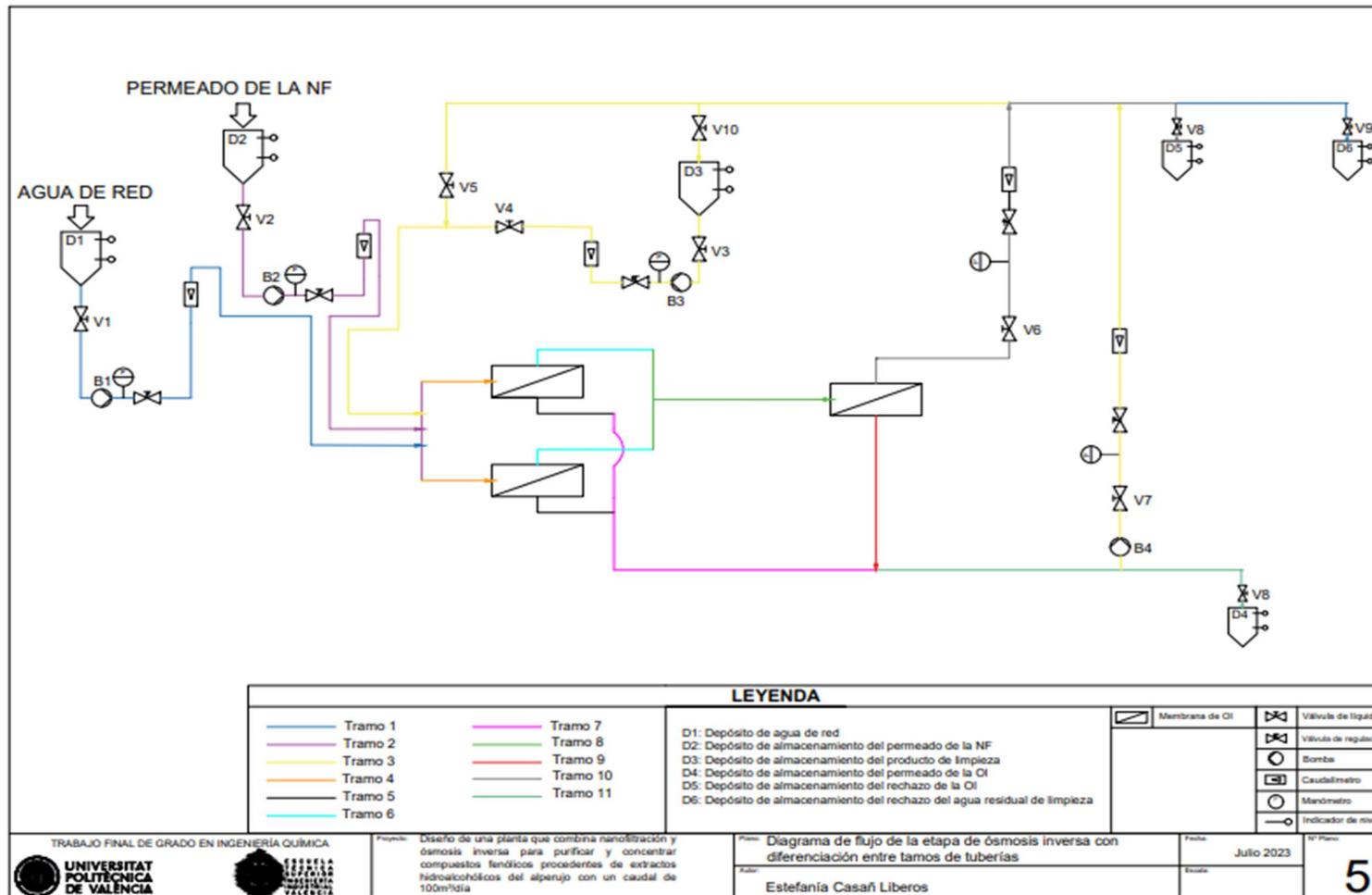


Figura 31. Diagrama de flujo de la etapa de OI con diferenciación entre tramos de tuberías Fuente: Elaboración propia

Los tramos son los siguientes:

- Tramo 1: tubería de alimentación de agua de red al sistema de membranas.
- Tramo 2: tubería de alimentación del permeado de la nanofiltración al sistema de membranas.
- Tramo 3: tubería de alimentación y recirculación del producto de limpieza.
- Tramo 4: tuberías de entrada individuales a los tubos de presión de la primera etapa.
- Tramo 5: tuberías de salida individuales del permeado de cada tubo de presión de la primera etapa.
- Tramo 6: tuberías de salida individuales del rechazo de cada tubo de presión de la primera etapa.
- Tramo 7: tubería de salida común del permeado de la primera etapa.
- Tramo 8: tubería de salida común del rechazo de la primera etapa.
- Tramo 9: tubería de salida del permeado de la segunda etapa.
- Tramo 10: tubería de salida del rechazo de la segunda etapa.
- Tramo 11: tubería común del permeado de las dos etapas.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados.

La longitud de los tramos se ha estimado de forma que se deje espacio entre los equipos por si es necesario renovarlos o hacerles mantenimiento en un futuro.

A modo resumen, pueden observarse los resultados en la *Tabla 24*, una vez seleccionado el catálogo de las tuberías (Gama ISO de acero inoxidable de la casa Hatnik).

Tabla 24. Dimensionado de las tuberías principales de la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Tuberías OI	Ø teórico (mm)	Ø nominal (mm)	Ø exterior (mm)	Espesor (mm)	Ø interior (mm)	Longitud (m)	v (m/s)
Tramo 1	240	250	273	6	261	17	1,25
Tramo 2	50	50	60,3	2	56,3	15	1,2
Tramo 3	190	200	219,1	6	207,1	40	1,3
Tramo 4	35	40	48,3	1,6	45,1	4	0,94
Tramo 5	29	32	42,4	1,6	39,2	4	0,8
Tramo 6	22	25	33,7	1,6	30,5	4	0,8
Tramo 7	40	40	48,3	1,6	45,1	7	1,19
Tramo 8	32	32	42,4	1,6	39,2	4	1
Tramo 9	24	25	33,7	1,6	21,8	4	1,95
Tramo 10	19	20	26,9	1,2	24,5	8	0,89
Tramo 11	48	50	60,3	2	56,3	7	1,08

6. Bombas

El cálculo de las bombas para la ósmosis inversa se realizará de manera análoga a como se ha realizado para la nanofiltración. La selección de la bomba dependerá pues, del caudal a tratar y de la altura calculada mediante la ecuación de Bernoulli. La ósmosis inversa como se observa en la *Figura 30*, cuenta con 4 bombas:

- Bomba B1: es la encargada de impulsar el agua de red desde el depósito D1 para la realización del proceso de limpieza.
- Bomba B2: es la encargada de impulsar el permeado de la nanofiltración que, a su vez, es la alimentación de la ósmosis inversa desde el depósito D2 hasta las membranas
- Bomba B3: es la encargada de impulsar el producto de limpieza desde el depósito D3 hasta las membranas.
- Bomba B4: es la encargada de la recirculación del producto de limpieza.

Los cálculos detallados para cada bomba se encuentran en el Anexo I, a continuación, se incluirá una tabla resumen para cada una.

Bomba B1

La bomba B1 es la encargada de impulsar el agua de red desde el depósito D1 para la realización del proceso de limpieza.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 10,8$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 242,42$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 125-200/219 que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 25*.

Tabla 25. Características de la bomba B1. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	242,42
Altura (m)	10,8
Potencia (kW)	9,205

Bomba B2

La bomba B2 es la encargada de impulsar el permeado de la nanofiltración que, a su vez, es la alimentación de la ósmosis inversa desde el depósito D2 hasta las membranas.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 589$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 11,16$ m³/h. Se adquiere la bomba VS 19/58 de la marca LIKITECH que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 26*.

Tabla 26. Características de la bomba B2. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	11,16
Altura (m)	589
Potencia (kW)	37

Bomba B3

La bomba B3 es la encargada de impulsar el producto de limpieza desde el depósito D3 hasta las membranas.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 12,79$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 160$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 100-200/211 que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 27*.

Tabla 27. Características de la bomba B3. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	160
Altura (m)	12,79
Potencia (kW)	7,681

Bomba B4

La bomba B4 es la encargada de la recirculación del producto de limpieza.

En el Anexo I se encuentran los cálculos detallados donde se obtiene la altura de la bomba, $H_B = 11,9$ m y el caudal que debe impulsar es de $Q = 160$ m³/h. Se adquiere la bomba NB 100-200/211, que cuenta con las características que se muestran en la *Tabla 28*.

Tabla 28. Características de la bomba B4. Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo comercial.

Caudal (m³/h)	160
Altura (m)	11,9
Potencia (kW)	7,764

6. PRODUCTO OBTENIDO

Los compuestos obtenidos en la corriente de rechazo de la ósmosis inversa se observan en la *Tabla 29* y como el caudal de la corriente de rechazo es de 10,92 m³/día pueden obtenerse los kg/día de cada compuesto:

Tabla 29. Composición final de la corriente concentrada de la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Compuesto	Concentración (mg/L)	Caudal (kg/día)
Tirosol	183,15	2
Hidroxitirosol	183,15	2
Oleuropeína	25,86	0,28
Luteolina	38,68	17,86
Ácido caféico	824,91	0,42
Ácido p-cumárico	29,45	9
Ácido oh-esteárico	4,18	0,32
Ácido cítrico	1635,53	0,046
Fructosa	736,48	8,04
Glucosa	3782,12	41,30

Por lo que respecta a los kg/día obtenidos de compuestos fenólicos, si se suman todos los compuestos se obtiene un total de 31,56 kg/día.

En cuanto a los residuos generados en la planta, se encuentran el agua de red que se ha utilizado para la limpieza de las membranas, el producto de limpieza agotado y el rechazo

de las membranas de nanofiltración que, como se ha podido observar en el diseño, se acumulan en depósitos de almacenamiento. En cuanto al permeado de la ósmosis inversa, este se recircula al proceso de extracción con disolventes, por lo que no es un residuo. Por lo que respecta al agua residual y al producto de limpieza agotado, estos pueden verse por el alcantarillado para su posterior tratamiento en una EDAR, debido a que sus pH se encuentran dentro de los límites de vertido, como puede observarse en la *Tabla 30*, ya que, aunque el pH del producto de limpieza es de 11, este se encuentra muy diluido al ser mezclado con las aguas resultantes de los aclarados, por lo que entraría dentro del rango de vertido.

Tabla 30. Límites de vertido a la red municipal de saneamiento de la comunidad valenciana. Fuente: EPSAR (<https://www.epsar.gva.es/>), 2022.

Parámetros	Concentración media diaria máxima
pH	5,5-9
Sólidos en suspensión (mg/L)	500
DBO (mg/L)	500
DQO (mg/L)	1000
Temperatura (°C)	40
Conductividad eléctrica (µS/cm)	3000

Por lo que respecta al rechazo de las membranas, se trata de un residuo de difícil tratamiento debido a su alto contenido en polifenoles, porque como se ha explicado en apartados anteriores, estos poseen un alto carácter fitotóxico.

Una posible valorización del rechazo de la nanofiltración sería el tratamiento con un reactor biológico secuencial (SBR). Se propone una adsorción/desorción con resinas para recuperar los polifenoles seguido de un tratamiento biológico con SBR siendo posible la recuperación de un 90% de los compuestos fenólicos totales en la corriente de rechazo de la nanofiltración y además una gran parte de la materia orgánica después del proceso de adsorción es eliminada en el SBR (M. Cifuentes-Cabezas, 2022).

7. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los objetivos de desarrollo sostenible son un conjunto de objetivos globales adoptados por los líderes mundiales el 25 de septiembre de 2015, que tienen el objetivo de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. Estos objetivos son los siguientes (Naciones Unidas, 2023):

1. Fin de la pobreza
2. Hambre cero
3. Salud y bienestar
4. Educación de calidad
5. Igualdad de género
6. Agua limpia y saneamiento
7. Energía asequible y no contaminante
8. Trabajo decente y crecimiento económico
9. Industria, innovación e infraestructuras
10. Reducción de las desigualdades

11. Ciudades y comunidades sostenibles
12. Producción y consumo responsable
13. Acción por el clima
14. Vida submarina
15. Vida de ecosistemas terrestres
16. Paz, justicia e instituciones sólidas
17. Alianzas para lograr objetivos

En este Trabajo Fin de Grado existe una elevada relación con varios de estos objetivos de desarrollo sostenible.

En primer lugar, el diseño de la planta se realiza para recuperar los polifenoles del alperujo, ya que estos tienen un alto carácter contaminante y gran valor añadido. Además, se propone la valorización del residuo de la planta, que es el rechazo de la nanofiltración, con SBR, por lo que se cumplen los ODS 9, 13 Y 15. Además también se observa una elevada relación con los ODS 11 y 12, ya que se consigue una economía circular gracias a esta valorización.

El agua residual obtenida durante el proceso se trata en una EDAR, cumpliendo así el ODS 6.

Por otra parte, los polifenoles tienen muchos efectos beneficiosos como se ha explicado durante el proyecto, por lo que además de cumplir los objetivos nombrados anteriormente, también existe una elevada relación con el ODS 3.

Finalmente, también se alcanza el ODS 8 debido que no existe discriminación por razón de género, las condiciones de trabajo son buenas y se genera crecimiento económico.

8. ESTUDIO ECONÓMICO

Se realiza un estudio económico con el objetivo de conocer la viabilidad del proyecto de la planta de purificación y concentración de polifenoles. Se tendrán en cuenta los gastos de inversión, los gastos de explotación y los ingresos producidos.

La planta, como se ha comentado en apartados anteriores, opera durante los meses de octubre, noviembre y diciembre, es decir, durante 3 meses debido a que es cuando se da la producción de aceite. Opera los 5 días laborables a la semana, por lo que durante 3 meses operará 60 días. El tiempo que opera son 8h al día, pero debe tenerse en cuenta que el proceso incluye también la limpieza de las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa, por lo que opera 6,083h y 7,17h al día respectivamente. La planta trata un caudal de 100 m³/día del permeado obtenido de la ultrafiltración.

8.1 Costes de explotación

En los costes de explotación se calcularán por un lado los costes fijos, que son los de amortización de la planta y por otro lado los costes variables tales como consumo de agua, consumo de energía, mano de obra, producto de limpieza y reposición de las membranas.

8.1.1 Costes fijos

En cuanto a los costes fijos, estos se refieren a la amortización, calculada en base al presupuesto total de ejecución por contrata (PEC) tanto de la planta de extracción como de la planta de purificación y concentración de polifenoles diseñada en este Trabajo Fin de Grado durante un plazo de amortización de 15 años.

Se deben tener en cuenta para la obtención de los costes fijos las etapas previas a la purificación y concentración. Estas son, en primer lugar, la extracción sólido-líquido y, posteriormente, la ultrafiltración. Para ello, se considerarán los estudios realizados por Moreno (2020) y Rojo (2020). En ellos, Moreno diseña una planta de extracción con una capacidad de 9,856 m³/día de alperujo, mientras que Rojo diseña un proceso de ultrafiltración combinado con evaporación para purificar y concentrar los compuestos fenólicos de un extracto de 120 m³/día.

Moreno establece un presupuesto de 45.460,54€ para una planta con capacidad de 9,856 m³/día de alperujo y, teniendo en cuenta que la capacidad de la planta de ultrafiltración de Rojo es de 120 m³/día de extracto se estimará un presupuesto de 553.496,83€ para la etapa de extracción.

Rojo establece un presupuesto de 881.697,55€ para una planta que trata 120 m³/día de extracto. Teniendo en cuenta que en este TFG se tratan 100 m³/día se estimará un presupuesto de 401.133,57€ para la ultrafiltración.

Los costes fijos se calcularán dividiendo el PEC entre los 15 años que se consideran como plazo de amortización.

Estos cálculos se encuentran resumidos en la *Tabla 31*.

Tabla 31. Tabla resumen de los costes fijos. Fuente: Elaboración propia.

Etapas	Coste (€)
Extracción	553.496,83
Ultrafiltración	401.133,57
Nanofiltración y ósmosis inversa	651.164,72
Costes fijos de amortización	43.410,98

8.1.2 Costes variables

Consumo de agua

El consumo de agua en la planta dependerá del agua necesaria para el aclarado y del agua necesaria para la preparación de las disoluciones de limpieza.

Para el aclarado de las etapas de NF y de OI el caudal es el mismo que el de las corrientes de alimentación, por lo que, teniendo en cuenta la duración de estas etapas (55 min y 20 min, respectivamente), el agua necesaria para el aclarado en la etapa de nanofiltración es de 100 m³, mientras que el agua necesaria para el aclarado en la etapa de ósmosis inversa es de 80 m³. Por tanto, se utilizará un volumen de 180 m³ diarios, lo que supone un volumen de 10800 m³ en 60 días.

En cuanto al volumen necesario para la preparación de las disoluciones de limpieza, se debe tener en cuenta que ambas disoluciones se reutilizan durante los 5 días laborables. Para el producto P3 Ultrasil 115 se necesita un volumen semanal de disolución al 0,7% v/v de 2,5 m³. Este es el volumen que se ha obtenido al sumar el volumen muerto de las tuberías y de las membranas. Se considerará el doble del volumen muerto, por lo que en

60 días supone un volumen de 60 m³. De la misma forma, por lo que respecta a la disolución de limpieza de NaOH, se necesita un volumen semanal de 3,23 m³, por tanto, considerando el doble del volumen muerto, en 60 días supone un volumen de 77,52 m³. La tarifa del consumo del agua para usos industriales con consumos superiores a 3000 m³/año como es el caso que ocupa a este Trabajo Fin de Grado es de 0,570 €/m³ (DOGV, 2023). Teniendo en cuenta que la planta opera durante 60 días, en la *Tabla 32* se muestra el coste anual.

Tabla 32. Tabla resumen del coste anual del agua. Fuente: Elaboración propia.

Uso del agua	Volumen (m ³ /semana)	Coste semanal (€/semana)	Coste anual (€/año)
Aclarado NF	500	285	3.420
Aclarado OI	400	228	2.736
Disolución de limpieza NF	5	2,85	30,96
Disolución de limpieza OI	6,46	3,68	44,19
		TOTAL	6.231,15

Además, también se debe tener en cuenta el coste del tratamiento de las aguas residuales. Se vierten dos corrientes al alcantarillado para ser tratadas por una EDARU: el producto de limpieza agotado y el agua de aclarado, por lo que, en total, se vierten 905,73 m³/semana. La tarifa para verter al alcantarillado en la comunidad valenciana es de 0,414€/m³, por lo que el coste anual será:

$$905,73 \frac{m^3}{semana} \cdot \frac{0,414€}{m^3} \cdot 12 \frac{semanas}{año} = 4.499,67€/año$$

Finalmente, el coste total del consumo de agua será de **10.730,82€**.

Consumo de productos de limpieza

La disolución de limpieza, como se ha explicado en apartados anteriores se recircula durante los 5 días laborables de la semana.

En cuanto al producto P3 Ultrasil 115, se utiliza una disolución al 0,7% v/v, es decir 0,7 mL de producto por cada 100 mL de disolución. Se necesitan 2,5 m³ de limpieza cada vez que esta se realiza, por lo que el volumen necesario de producto será:

$$V = 2500 L \cdot \frac{0,7mL}{100mL} = 17,5 L/semana$$

Si se utiliza durante 12 semanas (60 días) se obtiene un volumen de 210 L/año.

Estos productos de limpieza siguen el mismo recorrido que el agua de aclarado, por lo que estos productos quedarán diluidos debido a que el volumen muerto que se retiene en las tuberías se impulsa con agua de red hasta que acaba en el depósito de almacenamiento. El volumen necesario para compensar esta dilución será:

$$V = 926,34 L \cdot \frac{0,7 mL}{100 mL} = 6,48 L/semana$$

Anualmente supondrá un volumen de 77,81 L/año.

Por lo que el volumen anual del producto de limpieza necesario es de 287,81 L/año.

Se obtendrá la masa de producto necesaria conociendo que la densidad relativa es de 1,35 kg/m³.

$$1,35 = \frac{\rho}{1000 \text{ kg/m}^3} \rightarrow \rho = 1.350 \text{ kg/m}^3$$

$$0,28781 \text{ m}^3 \cdot \frac{1350 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 388,54 \text{ kg/año}$$

El precio de este producto de limpieza es de 4,53 €/kg, por lo que el coste anual total será:

$$C_T = 388,54 \frac{\text{kg}}{\text{año}} \cdot \frac{4,53 \text{€}}{\text{kg}} = 1.760,10 \text{€/año}$$

Por lo que respecta a la disolución de NaOH, se utiliza una disolución al 0,5% p/v (0,5g de NaOH por 100 mL de disolución). Para prepararla se necesitan 3.230 L, por lo que:

$$m_{\text{NaOH}} = 3.230 \text{ L} \cdot 5 \text{ g/L} = 16.150 \text{ g/semana}$$

Anualmente supondrán 193.800 g/año, que serán 193,8 kg/año.

Como se ha comentado, es necesario reponer la cantidad que se diluye por el volumen muerto, por lo que:

$$V = 1.292 \text{ L} \cdot \frac{0,5 \text{ g}}{0,1 \text{ L}} = 6.460 \text{ g/semana}$$

Lo que anualmente supone 77.520 g/año, que serán 77,52 kg/año.

La cantidad total que se necesita al año son 271,32 kg/año

El precio de la NaOH es de 7,68€/kg, por lo que el coste total anual será de 2.083,74 €/año.

En la *Tabla 33* puede observarse un resumen de los cálculos realizados.

Tabla 33. Tabla resumen del coste anual de los productos de limpieza. Fuente: Elaboración propia.

Producto	Kg necesarios (kg/año)	Coste anual (€/año)
P3 Ultrasil 115	388,54	1.760,1
NaOH	271,32	2.083,74
TOTAL		3.843,84

Consumo de energía

El consumo de energía depende de la potencia de las bombas que se han seleccionado previamente. En la *Tabla 34* se muestra el tipo de bomba, las unidades de cada una, el tiempo de operación para cada una dependiendo de si se utiliza para la nanofiltración o para la ósmosis inversa, la potencia requerida, el coste diario, el coste semanal y el coste anual.

El precio de las tarifas de consumo para industrias en España en 2023 es de 0,201€/kWh.

Tabla 34. Tabla resumen del coste anual de la energía. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de bomba	Unidades	Tiempo de operación (h/día)	Potencia (kW)	Coste diario (€/día)	Coste semanal (€/semana)	Coste anual (€/año)
NB 100-200/195	2	6,083	5,173	62,93	314,67	3.776,08
CR 20-14	1	6,083	13,28	80,78	403,91	4.846,93
NB 32-125/130	1	6,083	0,328	1,99	9,98	119,71
NB 65-125/137	1	6,083	7,549	45,92	229,60	2.755,23
NB 125-200/219	1	7,17	9,205	65,99	329,99	3.959,99
NB 32-125.1/100	1	7,17	0,812	5,82	29,11	349,32
VS 19/58	1	7,17	37	265,29	1326,45	15.917,40
NB 100-200/211	1	7,17	7,681	55,07	275,36	3.304,37
					TOTAL	35.029,04

Mano de obra

Para la planta se decide contratar a un operario para ambos procesos ya que la planta está automatizada. Por otra parte, también se contratarán un operario de mantenimiento que se encargará del mantenimiento y reparación de los equipos.

Se contratará además un ingeniero químico que será el encargado de la planificación y supervisión del proceso.

Se contratarán una persona encargada del trabajo administrativo y una persona encargada de la limpieza de la planta, que trabajarán a jornada parcial.

En la *Tabla 35* se realiza el cálculo del coste total al año, obteniendo los datos de los salarios promedio de la web Indeed (<https://es.indeed.com/>)

Tabla 35. Tabla resumen coste anual de la mano de obra. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Indeed (<https://es.indeed.com/>).

Mano de obra	Número de empleados	Salario bruto (€/mes)	Horas cotizadas (h/semana)	Coste total (€/año)
Operario de planta	1	1.642,58	40	4.927,74
Operario de mantenimiento	1	1.853,25	40	5.559,75
Ingeniero químico	1	2.417,66	40	7.252,98
Administrativo	1	1.548,17	20	2.322,26
Personal de limpieza	1	1.184	20	1.776
TOTAL				21.838,73

Reposición de las membranas

La vida útil de las membranas de NF es de aproximadamente 5 años. La vida útil de las membranas de ósmosis inversa está entre 5 y 8 años. En este Trabajo Fin de Grado se repondrán cada 5 años para evitar problemas de bajo rendimiento.

La planta solo opera durante 3 meses al año, por lo que la duración de las membranas será de 20 años. A los 20 años se repondrán las membranas de NF y OI. Hay un total de 4 membranas de NF y 22 membranas de OI, por lo que para las membranas de NF el coste previsto será de 0,2 unidades al año, mientras que para las membranas de OI el coste previsto será de 1,1 unidades al año.

El precio de la unidad de la membrana de nanofiltración es de 1.163,62 €, lo que supondrá un coste anual de 232,72 €/año.

El precio de la unidad de la membrana de ósmosis inversa es de 1.272,53 €, lo que supondrá un coste anual de 1.399,78 €/año.

En la *Tabla 36* se observa un resumen de los cálculos realizados.

Tabla 36. Tabla resumen del coste anual de la reposición de las membranas. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de membrana	Unidades al año	Precio unitario (€/ud.)	Coste anual (€/año)
NF270-400/34i	0,2	1.163,62	232,72
SW30HR-380	1,1	1.272,53	1.399,78
TOTAL			1.632,5

8.1.3 Resumen costes

El resumen de los costes se muestra en la *Tabla 37*.

Tabla 37. Tabla resumen de los costes totales. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de coste	Concepto	Coste (€/año)
Costes variables	Consumo de agua	10.730,82
	Productos de limpieza	3.843,84
	Consumo de energía	35.029,04
	Mano de obra	21.838,73
	Reposición de las membranas	1.632,5
Costes fijos	Amortización	107.053
TOTAL		180.127,93

8.2 Ingresos

Los ingresos de la planta se obtendrán a partir de la venta del concentrado de compuestos fenólicos.

Se debe buscar un producto de venta para saber el precio de venta. Se decide seleccionar el producto "Polifenoles RX" de la marca Enerzona. Cada caja contiene 24 cápsulas y cada cápsula contiene 31,4 mg de compuestos fenólicos. El precio es de 16,77 €/caja, por lo que el precio de cada cápsula es de 0,699 €/cápsula. Por tanto, el precio por gramo es de:

$$\text{precio/gramo} = \frac{0,699\text{€/cápsula}}{0,0314\text{g/cápsula}} = 22,26\text{€/g}$$

Sin embargo, se debe tener en cuenta que este es el precio de los compuestos fenólicos de venta al público, por lo que el precio de venta al fabricante será el 2% del precio de venta al público, quedando 0,4452€/g.

La cantidad de polifenoles extraídos tras el proceso de purificación y concentración es de 31,56kg al día. Se obtiene entonces, el valor de los ingresos totales:

$$\frac{31,56\text{kg}}{\text{día}} \cdot 60\text{días} \cdot \frac{10^3\text{g}}{1\text{kg}} \cdot \frac{0,4452\text{€}}{\text{g}} = 843.030,72\text{€}$$

8.3 Beneficios

El beneficio bruto anual, se calcula mediante la diferencia entre los ingresos y los costes totales:

$$\textit{Beneficio bruto} = 843.030,72 - 180.127,93 = 662.902,79\text{€/año}$$

El beneficio neto anual se calcula restando los impuestos al beneficio bruto anual, siendo estos de un 21%:

$$\textit{Beneficio neto} = \textit{Beneficio bruto} - \textit{Beneficio bruto} \cdot 0,21$$

$$\textit{Beneficio neto} = 662.902,79 - 662.902,79 \cdot 0,21 = 523.693,041\text{€}$$

Finalmente, se calcula el periodo de recuperación de la inversión inicial como:

$$\textit{Periodo de recuperación} = \frac{\textit{inversión inicial}}{\textit{beneficio neto}} = \frac{694.764,97}{523.693,041} = 1,33 \text{ años} \approx 2 \text{ años}$$

9. CONCLUSIONES

Tras la realización de este Trabajo Fin de Grado pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Para la primera etapa del proceso diseñado, que corresponde a la purificación de los compuestos fenólicos extraídos del alperujo, se ha seleccionado la técnica de membranas de nanofiltración. Se ha considerado un modo de operación en continuo de paso único. La membrana elegida en la nanofiltración es la NF270-400/34i. Se ha considerado un FRV igual a 5, para lo que el área de membrana requerida es de 137,4 m², necesitándose 4 módulos de membranas. Se han considerado 2 tubos de presión, los cuales se disponen en paralelo, con 2 membranas dentro en serie en cada uno de ellos. La corriente enriquecida en compuestos fenólicos corresponde al permeado de la NF. La pureza de los compuestos fenólicos en esta corriente es del 17,27%
- En la segunda etapa que es la concentración de los compuestos fenólicos, se utiliza la técnica de membranas de ósmosis inversa. Se sigue un modo de operación en continuo de un único paso. La membrana elegida es la SW30HR. Se considera un FRV igual a 6. El área de membrana requerida es de 743 m², para lo que se requieren 22 módulos de membrana. El proceso se divide en dos etapas para conseguir una mayor concentración. En la primera se disponen dos tubos de presión en paralelo, cada uno de ellos con 8 membranas en serie en su interior y, en la segunda, se dispone un tubo de presión en serie con los anteriores con 6 membranas en serie en su interior.
- La corriente que se obtiene finalmente corresponde al rechazo de la OI, la cual tiene un caudal de 10,92 m³/día y la cantidad de compuestos fenólicos totales obtenidos en la planta será de 31,56 kg/día.
- La inversión inicial necesaria para las etapas de nanofiltración y ósmosis inversa que se han diseñado es de 694.764,97€. Los costes totales de explotación son de 180.127,93€. Los ingresos son de 843.030,72€. El beneficio neto es de 523.693,041€. Por lo tanto, el periodo de recuperación de la inversión inicial será de 2 años aproximadamente.

10. BIBLIOGRAFÍA

Aceitunas Torrent. (s.f.). *¿Sabes cuáles son las partes de la aceituna?* Recuperado el 24 de febrero de 2022. <https://www.aceitunastorrent.com/es/sabes-cuales-son-las-partes-de-la-aceituna/>

Agrónoma. (14 de enero de 2022). *La producción mundial de aceite de oliva aumentará cerca de un 3%, según el COI.* <https://sevilla.abc.es/agronoma/noticias/cultivos/aceites-de-oliva/estimaciones-produccion-mundial-aceite-coi/?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

Ahmed, P.M., Fernández, P.M., Figueroa, L.I.C., Pajot, H.F. (2019). Exploitation alternatives of olive mill wastewater: production of value-added compounds useful for industry and agriculture. *Biofuel Research Journal*, 22, 980-994. [10.18331/BRJ2019.6.2.4](https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.4)

Arenas, S. (2019). *Extracción de compuestos fenólicos mediante el uso de disolventes orgánicos a partir del subproducto obtenido en la elaboración de aceite de oliva virgen (alperujo)* [Trabajo fin de máster, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/134096>

Baena, M. C. (2018). *Caracterización del aceite de oliva (cv picual) de la provincia de Granada.* [Trabajo Final de Grado, Universidad Miguel Hernández]. <https://hdl.handle.net/11000/5338>

Bioenciclopedia. (20 de octubre de 2022). *Olivo.* <https://www.bioenciclopedia.com/olivo/>

Brglez Mojzer, E., Knez Hrnčič, M., Škerget, M., Knez, Ž., Bren, U. (2016). Polyphenols: Extraction Methods, Antioxidative Action, Bioavailability and Anticarcinogenic Effects. *Molecules*, 21, 901. [10.3390/molecules21070901](https://doi.org/10.3390/molecules21070901)

Carbonell Alcaina, C. (2017). *Recuperación de compuestos fenólicos contenidos en la salmuera residual de proceso de fermentación de las aceitunas de mesa mediante procesos de membrana: Combinación de la ultrafiltración y la nanofiltración.* [Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/86142>

Cassano, A., De Luca, G., Conidi, C., Drioli, E. (2017). Effect of polyphenols-membrane interactions on the performance of membrane-based processes. *Coordination Chemistry Reviews*, 351, 45-75. [10.1016/j.ccr.2017.06.013](https://doi.org/10.1016/j.ccr.2017.06.013)

Cassano, A., Conidi, C., Ruby-Figueroa, R., Castro-Muñoz, R. (2018). Nanofiltration and Tight Ultrafiltration Membranes for the Recovery of Polyphenols from Agro-Food By-Products. *Molecular Sciences*, 19(2), 351. [10.3390/ijms19020351](https://doi.org/10.3390/ijms19020351)

Cifuentes Cabezas, M., Mendoza-Roca, J.A., Vicent-Vela, M., Álvarez-Blanco, S. (2022). Management of reject streams from hybrid membrane processes applied to phenolic compounds removal from olive mill wastewater by adsorption/ desorption and biological processes. *Journal of Water Process Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103208>

Dermeche, S., Nadour, M., Larroche, C., Moulti-Mati, F., Michaud, P. (2013). Olive mill wastes: Biochemical characterization and valorization strategies. *Process Biochemistry*, 48, 1532-1552. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2013.07.010>

Escuela superior del aceite de oliva (13 de febrero de 2020). Factores que influyen en la calidad del Aceite de Oliva Virgen. *Blog Escuela superior del aceite de oliva.* Recuperado

el 24 de febrero de 2022 de <https://blog.esao.es/factores-que-influyen-en-la-calidad-del-aceite-de-oliva-virgen>

Escobar, S. (20 de marzo de 2018). *Residuos de almazara. Segunda parte: El orujo de oliva*. Aceite antojo del sur. <https://www.antojodelsur.com/residuos-almazara-el-orujo-de-oliva/>

García, B. (2020). *Apuntes procesos industriales de la ingeniería química*. Universitat Politècnica de València.

García De La Fuente, R. (2011). *Caracterización y uso de compost de alperujo como enmienda orgánica. Evaluación agronómica y medioambiental*. [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/11406>

García-Castello, E., Cassano, A., Criscuoli, A., Conidi, C., Drioli, E. (2010). Recovery and concentration of polyphenols from olive mill wastewaters by integrated membrane system. *Water research*, 44, 3883-3892. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.05.005>

Gil Calabor, N. (2021). *Diseño de una planta para la recuperación de compuestos fenólicos a partir de 3.000 m³/año de aguas residuales obtenidas en el envasado de alcachofas mediante tecnología de membranas*. [Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/171188>

Kapellakis, I. E., Tsagarakis, K. P., & Crowther, J. C. (2008). Olive oil history, production and by-product management. *Environmental Science Biotechnology*, 7, 1-26. [10.1007/s11157-007-9120-9](https://doi.org/10.1007/s11157-007-9120-9)

Medina, E., Romero, C., Brenes, M. (2018). Residual Olive Paste as a Source of phenolic Compounds and Triterpenic Acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 120, 1-6. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201700368>

Moreno, P. (2020). *Diseño, análisis y mejora de un proceso de extracción sólido-líquido para recuperar polifenoles del alperujo*. [Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/149136>

Muñoz Espinosa, A. (2020). *Valorización de una corriente residual procedente de una industria de elaboración de aceite de oliva mediante la recuperación de polifenoles por ósmosis inversa* [Trabajo fin de grado, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/154545>

Nazir, A., Khan, K., Maan, A., Zia, R., Giorno, L., & Schroën, K. (2019). Membrane separation technology for the recovery of nutraceuticals from food industrial streams. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 426-438. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.049>

Olmo-García, L., Kessler, N., Neuweger, H., Wendt, K., Olmo-Peinado, J.M., Fernández-Gutiérrez, A., Baessmann, C., Carrasco-Pancorbo, A (2018). Unravelling the Distribution of Secondary Metabolites in *Olea europaea* L.: Exhaustive Characterization of Eight Olive-Tree Derived Matrices by Complementary Platforms (LC-ESI/APCI-MS and GC-APCI-MS). *Molecules*, 23, 1-16. [10.3390/molecules23102419](https://doi.org/10.3390/molecules23102419)

Penco, J. M. (25 de noviembre de 2020). *Compostaje de alperujo. Aspectos técnicos, económicos y ambientales*. Asociación Española de Municipios del Olivo. [Archivo PDF] <https://www.aemo.es/slides/slide/1a-charla-compostaje-de-alperujo-proyecto-life-regrow-252/download>

Radu, A., van Steen, M., Vrouwenvelder, J., van Loosdrecht, M., & Picioreanu, C. (2014). *Water Research* (Vol. 64).

Rajbhar, K., Dawda, H., Mukundan, U. Polyphenols: Methods of extraction. (2015) *Scientific Reviews and Chemical Communications*, 5(1), 1-6.

Resolución 9502 de 2022 [Generalitat Valenciana] Diari Oficial de la Generalitat Valenciana. Por la cual se establece el canon de saneamiento. 31 de diciembre de 2022.

Rojo, C. (2021). *Diseño de un proceso de ultrafiltración combinado con evaporación para recuperar polifenoles de un extracto acuoso de alperujo de 120 t/día*. [Trabajo Fin de Grado, Universitat Politècnica de València]. <http://hdl.handle.net/10251/174033>

Ruedaoliva. (s.f). *Elaboración Aceite de Oliva*. <http://ruedaoliva.com/web/es/6/proceso-elaboracion.html>

Sánchez-Arévalo, C., Croes, T., Van der Bruggen, B., Vicent-Vela, C., Álvarez-Blanco, S. (2023). Feasibility of several commercial membranes to recover valuable phenolic compounds from extracts of wet olive pomace through organic solvent nanofiltration. *Separation and Purification Technology*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122396>

Sánchez-Arévalo, C., Iborra-Clar, A., Vicent-Vela, C., Álvarez-Blanco, S. (2022). Exploring the extraction of the bioactive content from the two-phase olive mill waste and further purification by ultrafiltration. *LWT – Food Science and Technology*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113742>

Sánchez-Arévalo, C., Jimeno-Jiménez, A., Carbonell-Alcaina, C., Vicent-Vela, C., Álvarez-Blanco, S. (2021). Effect of the operating conditions on a nanofiltration process to separate low-molecular-weight phenolic compounds from the sugars present in olive mill wastewaters. *Process Safety and Environmental Protection*, 148, 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.10.002>

Sánchez-Rodríguez, E., Mesa, M. (2018). Compuestos bioactivos del aceite de oliva virgen. *Nutrición Clínica en Medicina*, 12, 80-94. [10.7400/NCM.2018.12.2.5064](https://doi.org/10.7400/NCM.2018.12.2.5064).

Soto-García, M., Rosales-Castro, M. (2016). Efecto del solvente y de la relación masa/solvente, sobre la extracción de compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de extractos de corteza de *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxylla*. *Maderas Ciencia y tecnología*, 18(4), 701- 714. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2016005000061>

Syngenta. (26 de noviembre de 2020). Panorama mundial del olivar – Día Mundial del Olivo. *Alimentando con innovación*. Recuperado el 24 de febrero de 2022 de <https://blog.syngenta.es/panorama-mundial-del-olivar-dia-mundial-delolivo/>

Syed, U.T., Brazinha, C., Crespo, J., Ricardo-da-Silva, J. (2017). Valorisation of grape pomace: Fractionation of bioactive flavan-3-ols by membrane processing. *Separation and Purification Technology*, 172, 404-414. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.07.039>

Van der Bruggen, B. (2018). Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis and forward osmosis. *Fundamental Modeling of Membrane Systems*, 25-70. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813483-2.00002-2>

Verema. (3 de julio de 2012). Variedades de aceitunas utilizadas para la producción de aceite de oliva. *Blog de Verema*. Recuperado el 1 de marzo de 2022 de

<https://www.verema.com/blog/aceite-oliva/984330-variedades-aceitunas-utilizadas-para-produccion-aceite-oliva>

Vilar, J., Caño, S., Raya, I., Moreno, L., Velasco, M. (2019). *El sector de procesado de alpeorujo. Posibilidades de un potencial colapso financiero y operativo*. Juan Vilar Consultores estratégicos. [Archivo PDF]

ANEXOS

ANEXO I. Dimensionado de equipos.

1. Diseño de la etapa de nanofiltración

Cálculo de caudales y selección de la membrana

El factor de reducción de volumen que se alcanza en la etapa previa de ultrafiltración es igual a 5. Con este valor y el valor del caudal de alimentación, se obtiene el caudal de rechazo de la ultrafiltración:

$$FRV = \frac{Q_A}{Q_R} \rightarrow 5 = \frac{120}{Q_R} \rightarrow Q_R = \frac{120}{5} = 24 \text{ m}^3/\text{día}$$

Entonces, mediante un balance es posible obtener el caudal de permeado de la ultrafiltración, que es el caudal de alimento de la nanofiltración:

$$Q_P = Q_A - Q_R = 120 - 24 = 96 \text{ m}^3/\text{día}$$

Este caudal se redondeará a 100 m³/día.

De la misma forma, se obtiene el caudal de permeado de la nanofiltración:

$$FRV = \frac{Q_A}{Q_R} \rightarrow 5 = \frac{100}{Q_R} \rightarrow Q_R = \frac{100}{5} = 20 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q_P = Q_A - Q_R = 100 - 20 = 80 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se considera que el tiempo de operación de esta etapa son 8h incluyendo la etapa de limpieza que tiene una duración total de 1h 55min. Por tanto, la duración de la nanofiltración es de 6h 5min (6,083 h). Por tanto, el caudal de permeado finalmente será:

$$Q_P = 80 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{6,083 \text{ h}} = 13,15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con el objetivo de calcular el área de membrana, se realizará la media de la densidad de flujo obtenida en el ensayo experimental que puede observarse en la *Tabla 38*.

Tabla 38. Densidad de flujo frente al factor de reducción de volumen obtenidos experimentalmente. Fuente: Elaboración propia a partir de datos bibliográficos (Sánchez-Arévalo, 2022).

FRV	Jp (L/m ² ·h)
1,04	79,71
1,07	80,36
1,11	84,64
1,15	88,39
1,19	88,39
1,25	90,86
1,42	95,45
1,46	96,43
1,74	95,60
1,80	98,57
1,96	103,71
2,03	101,79
2,55	101,30
2,98	107,14
3,16	96,43
3,18	99,63
3,6	106,35
4,19	102,10
4,38	101,79

Siendo finalmente:

$$J_P = 95,72 \frac{L}{h \cdot m^2} = 0,09572 \frac{m^3}{h \cdot m^2}$$

Con los datos que se han obtenido, puede finalmente obtenerse el área total de la instalación de membranas de nanofiltración de la siguiente forma:

$$J_P = \frac{Q_P}{A_T} \rightarrow A_T = \frac{Q_P}{J_P} = \frac{13,15}{0,09572} = 137,4 \text{ m}^2$$

La membrana plana NF270 que se utilizó en el ensayo tiene una superficie activa de 63,6 cm², por lo que no puede utilizarse a nivel industrial. Por ello, se ha seleccionado del catálogo comercial la membrana NF270-400/34i con arrollamiento en espiral.

Las características técnicas de dicha membrana se resumen en la *Tabla 39*.

Tabla 39. Características técnicas de la membrana NF270-4040 Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo de FilmTec.

Características técnicas	Valores
Área activa de la membrana	37 m ²
Longitud de la membrana	1016 mm
Espesor del espaciador	34 mil

A partir del área total (A_T) y del área activa de la membrana (A_m), puede obtenerse el número de módulos necesarios:

$$N^{\circ} \text{módulos} = \frac{A_T}{A_m} = \frac{137,4}{37} = 3,71 \approx 4 \text{ módulos}$$

A continuación, se obtendrá el caudal de alimentación de cada uno de los módulos de la membrana (Q_m), calculado mediante:

$$Q_m = v_{\text{tangencial}} \cdot S_{\text{trans}}$$

La velocidad tangencial de un módulo de arrollamiento en espiral para procesos de nanofiltración y ósmosis inversa se encuentra entre 0,06 m/s y 0,2 m/s (Radu, 2014). Para el cálculo se selecciona un valor intermedio entre ambos. Se toma un valor de velocidad tangencial igual a 0,14 m/s.

La superficie transversal del módulo puede conocerse a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{\text{trans}} = h \cdot b \cdot \varepsilon$$

Siendo:

- h: espesor del espaciador
- ε : porosidad del espaciador

Se puede calcular b de la siguiente manera, ya que se conoce la longitud del módulo L, a partir del catálogo del fabricante.

$$b = \frac{A_m}{2 \cdot L} = \frac{37}{2 \cdot 1,016} = 18,21 \text{ m}$$

Considerando la porosidad del espaciador como 0,89 (un valor promedio para el módulo de arrollamiento en espiral), ya se puede obtener la superficie transversal del módulo

$$S_{\text{trans}} = 8,636 \cdot 10^{-4} \cdot 18,21 \cdot 0,89 = 0,014 \text{ m}^2$$

Y por último ya puede obtenerse el caudal de alimentación de cada uno de los módulos:

$$Q_m = 0,14 \cdot 0,014 = 0,00196 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sabiendo que opera durante 6,083h al día:

$$0,00196 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{6,083 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 42,92 \text{ m}^3/\text{día}$$

Por lo que el número de módulos a colocar en paralelo será:

$$N_{\text{paralelo}} = \frac{Q_A}{Q_m} = \frac{100}{42,92} = 2,33$$

La opción más económica sería la colocación de dos membranas en paralelo y dos en serie dentro de un mismo tubo de presión las dos que están en serie. Para comprobar la viabilidad se calculará si las velocidades tangenciales de entrada a los tubos de presión, de entrada a la segunda membrana del tubo y de salida de los tubos de presión se encuentran entre el rango de valores mencionado anteriormente.

Se recalcula el caudal de entrada a cada módulo, suponiendo que se colocan 2 módulos en paralelo:

$$Q'_m = \frac{Q_A}{N_{\text{paralelo}}} = \frac{100}{2} = 50 \text{ m}^3/\text{día} = 0,00228 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se calcula la nueva velocidad tangencial (siendo esta la de alimentación a los módulos) para comprobar que se encuentre entre los valores típicos de 0,06m/s y 0,2m/s:

$$v_{\text{tangencial}} = \frac{Q'_m}{S_{\text{trans}}} = \frac{0,00228}{0,014} = 0,163 \text{ m/s}$$

Se calcula la velocidad tangencial con la que entra a la segunda membrana del tubo.

En primer lugar, el caudal de entrada a la segunda membrana del tubo es:

$$Q_E = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,93 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00137 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Finalmente calculando la velocidad tangencial:

$$v_{\text{tangencial}} = \frac{Q_E}{S_{\text{trans}}} = \frac{0,00137}{0,014} = 0,09 \text{ m/s}$$

Se comprueba que se encuentra dentro del rango de valores típicos (0,03-2).

Por último, se calcula la velocidad tangencial a la salida de los tubos de presión.

El caudal de permeado de cada una de las membranas será igual a:

$$Q_{pm} = J_p \cdot A_m = 0,09572 \cdot 37 = 3,54 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 20,01 \text{ m}^3/\text{día}$$

Si se toman 2 membranas en serie para cada tubo de presión:

$$Q_{p1} = N \cdot Q_{pm} = 2 \cdot 20,01 = 40,02 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 0,001827 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{R1} = Q'_m - Q_{p1} = 50 - 40,02 = 9,98 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 0,00046 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se comprueba que la velocidad tangencial a la salida de los tubos de presión se encuentra dentro del rango de valores típicos:

$$v_{\text{tangencial}} = \frac{Q_{R1}}{S_{\text{trans}}} = \frac{0,00046 \text{ m}^3/\text{s}}{0,014 \text{ m}^2} = 0,033 \text{ m/s}$$

Como esta velocidad tangencial es superior a la mínima (0,03 m/s) para módulos enrollados en espiral y por tanto, se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente, se concluye que la distribución mencionada anteriormente es viable.

Finalmente, el factor de reducción de volumen será:

$$FRV = \frac{Q'_m}{Q_{R1}} = \frac{50}{9,98} = 5$$

Y el caudal total de permeado:

$$Q_{PT} = 2 \cdot Q_{p1} = 2 \cdot 40,02 = 80,04 \text{ m}^3/\text{día} \approx 80 \text{ m}^3/\text{día}$$

Cálculo del volumen de los depósitos

Se ampliará un 20% la capacidad de estos depósitos para evitar desbordamientos.

Así pues:

- D1: depósito de almacenamiento de agua de red para el aclarado.
El caudal de agua de red que se utilizará para la limpieza será el mismo con el que se alimenta la nanofiltración, pero el tiempo que dura este aclarado no es el mismo tiempo que dura el tratamiento de la NF, ya que, el tiempo de aclarado solamente dura 55 min, es decir, 0,917 h. Entonces, el volumen del depósito se calculará en relación a este tiempo.
El volumen del depósito será:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = 100 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1 día}{6,083h} = 16,44 \frac{m^3}{h}$$

$$V = Q \cdot t = 16,44 \frac{m^3}{h} \cdot 0,917h = 15,075m^3$$

Ampliando un 20% su capacidad:

$$V_{D1} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{15,075}{0,8} = 18,84 \text{ }^3$$

- D2: depósito de alimentación cargado con el permeado de la ultrafiltración.
Conociendo el caudal de entrada a la nanofiltración que es de 100 m³/día y que en este caso coincide con el volumen del depósito, que serán 100 m³, se amplía un 20% su capacidad:

$$V_{D2} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{100}{0,8} = 125m^3$$

- D3: depósito de almacenamiento del producto P3 Ultrasil 115 para la limpieza. Para la realización del cálculo del volumen del depósito D3, se calculará el volumen muerto de las tuberías y de las membranas.
En primer lugar, el volumen muerto del tramo de tuberías por el que circula el producto de limpieza se calcula mediante:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot L$$

La longitud es la del tramo por el que circula el producto de limpieza.

En la *Tabla 40* pueden observarse los resultados del volumen muerto para cada tramo.

Tabla 40. Volumen muerto para cada tramo de tubería en la nanofiltración. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	Radio (mm)	Longitud (m)	Volumen muerto (m ³)
2	36,45	2	0,0083
3	80,55	40	0,82
4	36,45	3	0,013
5	12,25	10	0,0047
6	28,55	4	0,01
7	7,4	14	0,0024
8	9,45	4	0,0011
10	28,95	4	0,01

El volumen muerto total de las tuberías será:

$$V_T = 0,8695 \text{ m}^3 = 869,5 \text{ L}$$

En segundo lugar, el volumen muerto de las membranas se calcula mediante:

$$V = V_{\text{módulo}} \cdot N$$

El volumen de cada módulo se calcula mediante:

$$V_{\text{módulo}} = S_{\text{trans}} \cdot L_{\text{módulo}}$$

La superficie transversal se calcula mediante:

$$S_{\text{trans}} = h \cdot b \cdot \varepsilon$$

Siendo:

h el espesor del espaciador

ε la porosidad del espaciador

Y pudiendo calcular b como:

$$b = \frac{A}{2 \cdot L} = \frac{37}{2 \cdot 1,016} = 18,2 \text{ m}$$

Por lo que:

$$S_{\text{trans}} = 8,63 \cdot 10^{-4} \cdot 18,2 \cdot 0,89 = 0,014 \text{ m}^2$$

El volumen del módulo será:

$$V_{\text{módulo}} = 0,014 \cdot 1,016 = 0,014 \text{ m}^3 = 14,2 \text{ L}$$

Finalmente:

$$V = 14,2 \cdot 4 = 56,84 \text{ L}$$

Sumando el volumen muerto de las tuberías y el volumen muerto de las membranas, se obtendrá el volumen del depósito de limpieza de:

$$V_{D4} = 869,5 + 56,84 = 926,34 \text{ L}$$

Se considerará un volumen del depósito D4 igual al doble del volumen muerto calculado, por lo que finalmente, el volumen del depósito será de 1852,68 L. Se redondeará a 2000 L.

Considerando un margen de seguridad del 20%:

$$\frac{2000}{0,8} = 2500 L$$

- D4: depósito de recogida del permeado de la nanofiltración. El volumen de permeado que se obtiene durante este tiempo son 80 m³. Si se amplía un 20% su capacidad:

$$V_{D7} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{80}{0,8} = 100m^3$$

- D5: depósito de recogida del rechazo de la nanofiltración. En este caso el volumen coincide con el caudal. por lo que el volumen de rechazo obtenido son 20 m³. Ampliando un 20% su capacidad:

$$V_{D5} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{20}{0,8} = 25 \quad 3$$

- D6: depósito de recogida de agua de red tras el aclarado. El aclarado se hace sin presión, por lo que todo el aclarado que se alimenta se recoge como rechazo. El volumen del depósito, por tanto, será el mismo que D1, es decir 18,84 m³.

Cálculo de los diámetros de las tuberías

1) Tramo 1: tubería de alimentación de agua de red a cada tubo de presión y tubería de entrada al depósito de almacenamiento de rechazo de agua de red.

Teniendo en cuenta que el caudal que circula por esta tubería es de 100 m³/día y que la etapa de limpieza tiene una duración de 55 minutos:

$$Q_A = 100m^3/día = 109,05 m^3/h = 0,03m^3/s$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_A}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,03}{\pi \cdot 1,5}} = 0,16 m$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, es decir, se escoge el de 200mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 219,1mm. Se escoge un espesor de 5mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot espesor = 219,1 - 2 \cdot 5 = 209,1mm$$

Recalculando la velocidad:

$$0,2091 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,03}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,87 \text{ m/s}$$

2) Tramo 2: tubería de alimentación del permeado de la ultrafiltración.

El caudal que circula por esta tubería es el de alimentación, por lo que:

$$Q_A = 100 \text{ m}^3/\text{día} = 16,44 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0046 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{\text{teórico}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_A}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0046}{\pi \cdot 1,5}} = 0,062 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, es decir se escoge el de 65mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 76,1mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{\text{interior}} = D_{\text{exterior}} - 2 \cdot \text{espesor} = 76,1 - 2 \cdot 1,6 = 72,9 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0729 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0046}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,1 \text{ m/s}$$

3) Tramo 3: tubería de alimentación y de recirculación del producto de limpieza.

El caudal que circula por esta tubería es de 100 m³/día, teniendo en cuenta que solo opera durante 1h al día:

$$Q = 100 \text{ m}^3/\text{día} = 100 \text{ m}^3/\text{h} = 0,028 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo que el diámetro:

$$D_{\text{teórico}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,028}{\pi \cdot 1,5}} = 0,15 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es el mismo, 150mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 168,3mm. Se escoge un espesor de 3,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{\text{interior}} = D_{\text{exterior}} - 2 \cdot \text{espesor} = 168,3 - 2 \cdot 3,6 = 161,1 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,1611 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,028}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,37 \text{ m/s}$$

4) Tramo 4: tubería de salida común a las salidas individuales del permeado de los tubos de presión.

El caudal que circula por esta tubería es el caudal de permeado total, es decir, 80 m³/día, por lo que:

$$Q_p = 80 \text{ m}^3/\text{día} = 13,15 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0037 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{\text{teórico}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_p}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0037}{\pi \cdot 1,5}} = 0,056 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 65mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 76,1mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{\text{interior}} = D_{\text{exterior}} - 2 \cdot \text{espesor} = 76,1 - 2 \cdot 1,6 = 72,9 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0729 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0037}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,89 \text{ m/s}$$

5) Tramo 5: tuberías de salida común a las salidas individuales del rechazo de los tubos de presión.

El caudal de rechazo total es de 20 m³/día, por lo que:

$$Q_R = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 3,29 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00091 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{\text{teórico}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_R}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00091}{\pi \cdot 1,5}} = 0,028 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 32mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 42,4mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{\text{interior}} = D_{\text{exterior}} - 2 \cdot \text{espesor} = 42,4 - 2 \cdot 1,6 = 39,2 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0392 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00091}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,75 \text{ m/s}$$

6) Tramo 6: tuberías de salida individuales del rechazo de las membranas en paralelo

El caudal que circula por esta tubería es de 30 m³/día, como la planta opera 6,083h al día, el caudal en m³/s será:

$$Q = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 4,93 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00137 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{\text{teórico}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00137}{\pi \cdot 1,5}} = 0,034 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 40mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 48,3mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 40,3 - 2 \cdot 1,6 = 37,1 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0371 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00137}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,26 \text{ m/s}$$

5) Tramo 7: tuberías de salida individuales del permeado de las cuatro membranas.

El caudal de rechazo de cada membrana es de 20 m³/día, como la planta opera 6,083h al día, el caudal será:

$$Q = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 3,28 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00091 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00091}{\pi \cdot 1,5}} = 0,028 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 32mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 42,4mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 42,4 - 2 \cdot 1,6 = 39,2 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0392 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00091}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,75 \text{ m/s}$$

5) Tramo 8: tubería de salida común del rechazo de las membranas del tubo de presión superior.

El caudal de rechazo común de las membranas del tubo de presión superior será el caudal individual de cada membrana multiplicado por las dos membranas que contiene el tubo de presión superior, por lo que:

$$Q = 20 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 2 = 40 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 6,57 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,0018 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0018}{\pi \cdot 1,5}} = 0,039 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 40mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 48,3mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 48,3 - 2 \cdot 1,6 = 37,1 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0371 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0018}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,66 \text{ m/s}$$

5) Tramo 9: tuberías de salida individuales del rechazo de los tubos de presión.

El caudal es de 10 m³/día. Como la planta opera durante 6,083 horas al día:

$$Q = 10 \frac{m^3}{día} = 1,64 \frac{m^3}{h} = 0,00046 \frac{m^3}{s}$$
$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00046}{\pi \cdot 1,5}} = 0,0197 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 20mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 26,9mm. Se escoge un espesor de 1,2mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 26,9 - 2 \cdot 1,2 = 24,5 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0245 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00046}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,98 \text{ m/s}$$

5) Tramo 10: tuberías de entrada individuales a cada tubo de presión.

El caudal de entrada a cada tubo de presión será el caudal de alimentación dividido entre dos, por lo que:

$$Q = 50 \text{ m}^3/\text{día} = 8,22 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0023 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0023}{\pi \cdot 1,5}} = 0,044$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 50mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 60,3mm. Se escoge un espesor de 1,2mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 60,3 - 2 \cdot 1,2 = 57,9 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0579 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0023}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,87 \text{ m/s}$$

Cálculo de las bombas

Las bombas se seleccionarán en función del caudal que han de proporcionar y de la altura que deben aportar. Por lo que para cada bomba se calcularán estos dos parámetros.

Las diferentes bombas que pueden observarse en la *Figura X* son:

Bomba B1

Esta bomba es la encargada de impulsar el agua de red desde el depósito D1 para la realización del proceso de limpieza.

En primer lugar, se calcula la altura de la bomba con la ecuación de Bernoulli

$$H_B = \frac{P_I - P_A}{\rho \cdot g} + z_I - z_A + h_{p\acute{e}rdidas}$$

Donde se realizan las siguientes consideraciones:

- Presi3n = 1bar
- Se desprecia la cota de aspiraci3n al ser un circuito cerrado

Las p\acute{e}rdidas primarias del tramo 1 se calculan a partir de:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 41*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 41. Datos para el tramo 1. Fuente: Elaboraci3n propia.

Tramo NF	Di\acute{a}metro te3rico (mm)	Di\acute{a}metro nominal (mm)	Di\acute{a}metro exterior (mm)	Espesor (mm)	Di\acute{a}metro interior (mm)	Longitud (m)	Velocidad de circulaci3n (m/s)
Tramo 1	160	200	219,1	5	209,1	15	0,87

Por otra parte, el factor de fricci3n f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,87 \cdot 0,2}{1 \cdot 10^{-3}} = 174000$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al \xc1baco de Moody para obtener f.

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,2} = 1 \cdot 10^{-5}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricci3n $f = 0,013$

Por lo que las p\acute{e}rdidas primarias del tramo 1:

$$h_{primarias} = \frac{0,013 \cdot 15 \cdot 0,87^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2} = 0,038 \text{ m}$$

Las p\acute{e}rdidas secundarias del tramo 1 se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{v\acute{a}lvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{v\acute{a}lvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En este tramo, se pueden observar 2 válvulas y 7 codos, por lo que:

Tabla 42. Cálculo de las pérdidas secundarias para la bomba B1. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	$h_{\text{secundarias}}$
Válvulas	2	0,131	0,87	0,01
Codos	7	0,750	0,87	0,2
Uniones en T	1	0,300	0,87	0,012

Por lo que las pérdidas secundarias serán:

$$h_{\text{secundarias}} = 0,01 + 0,2 + 0,012 = 0,22 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = \frac{100.000}{1000 \cdot 9,81} + 0,038 + 0,22 = 10,45 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde D1 hasta las membranas es de 100 m³/día, como el agua solamente se suministra durante 55 min, se tiene un caudal de 109,09 m³/h.

Bomba B2

Es la bomba encargada de impulsar el alimento de la nanofiltración.

En primer lugar, se calcula el diferencial de presión, que es la presión necesaria que debe proporcionar la bomba para que las membranas produzcan las corrientes que se desean. La presión en el punto de impulsión será la misma que en la entrada a las membranas, por lo que:

$$P_i = p_e$$

La pérdida de presión en cada membrana se obtiene del catálogo y es de 1 bar. Por lo que, al haber 4 membranas, la pérdida de presión total será de 4 bar.

La presión en el punto de aspiración:

$$P_A = 0 \text{ bar}$$

Por lo que respecta a las cotas:

$$z_A = 0 \text{ m}$$

$$z_i = 6 \text{ m}$$

Realizando una revisión bibliográfica, se encuentra que en ensayos con la membrana NF270, la presión transmembranal óptima son 15 bar, por lo que:

$$P_i = TPM + \frac{\Delta P}{2} = 15 + \frac{4}{2} = 17 \text{ bar}$$

$$p_s = p_e - \Delta P = 17 - 4 = 13 \text{ bar}$$

Por último, queda el cálculo de las pérdidas. En cuanto a las pérdidas primarias:

$$h_{\text{primarias}} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 43* pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 43. Datos para el tramo 2. Fuente: Elaboración propia.

Tramo NF	Diámetro teórico (mm)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)	Velocidad de circulación (m/s)
Tramo 2	62	65	76,1	1,6	72,9	15	1,1

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,1 \cdot 0,065}{1 \cdot 10^{-3}} = 71500$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f .

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,065} = 3,07 \cdot 10^{-6}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricción $f = 0,019$

Por lo que las pérdidas primarias en el tramo 2:

$$h_{\text{primarias}} = \frac{0,019 \cdot 15 \cdot 1,1^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,065} = 0,27 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias en el tramo 2 se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{\text{secundarias}} = h_{\text{uniones}} + h_{\text{codos}} + h_{\text{válvulas}}$$

$$h_{\text{uniones}} = h_{\text{codos}} = h_{\text{válvulas}} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En este tramo, se pueden observar 2 válvulas, 7 codos y 1 unión en T, por lo que:

Tabla 44. Cálculo de las pérdidas secundarias para la bomba B2. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	$h_{\text{secundarias}}$
Válvulas	2	0,131	1,1	0,016
Codos	7	0,750	1,1	0,32
Uniones en T	1	0,300	1,1	0,019

Por lo que las pérdidas secundarias serán:

$$h_{\text{secundarias}} = 0,016 + 0,32 + 0,019 = 0,36 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = \frac{1.700.000}{1000 \cdot 9,81} + 6 + 0,27 + 0,36 = 179,92 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde D2 es de 100 m³/día. Como la planta opera durante 6,083 horas al día, el caudal por hora será de 16,44 m³/h.

Bomba B3

Esta bomba impulsa el producto de limpieza desde el depósito D3 hasta las membranas. En primer lugar, se calcula la altura de la bomba con la ecuación de Bernoulli

$$H_B = \frac{P_I - P_A}{\rho \cdot g} + z_I - z_A + h_{p\acute{e}rdidas}$$

Donde se realizan las siguientes consideraciones:

- Presión = 1bar
- Se desprecia la cota de aspiración al ser un circuito cerrado

Las pérdidas primarias en el tramo 3 se calculan a partir de:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 45*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 45. Datos para el tramo 3. Fuente: Elaboración propia.

Tramos NF	Diámetro teórico (mm)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)	Velocidad de circulación (m/s)
Tramo 3	150	150	168,3	3,6	161,1	15	1,37

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,37 \cdot 0,150}{1 \cdot 10^{-3}} = 205500$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f .

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,150} = 1,3 \cdot 10^{-5}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricción $f = 0,014$

Por lo que las pérdidas primarias en el tramo 3:

$$h_{primarias} = \frac{0,014 \cdot 15 \cdot 1,37^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,150} = 0,13 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias en el tramo 3 se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En este tramo, se pueden observar 2 válvulas y 6 codos, por lo que:

Tabla 46. Cálculo de las pérdidas secundarias para la bomba B3. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	$h_{\text{secundarias}}$
Válvulas	2	0,131	1,37	0,025
Codos	7	0,750	1,37	0,5
Uniones en T	1	0,300	1,37	0,029

Por lo que las pérdidas secundarias serán:

$$h_{\text{secundarias}} = 0,025 + 0,5 + 0,029 = 0,55 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = \frac{100.000}{1000 \cdot 9,81} + 0,13 + 0,55 = 10,87 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde D3 hasta las membranas es de 100 m³/día. Como el producto de limpieza se suministra durante 1 hora al día, el caudal por hora será de 100 m³/h.

Bomba B4

La bomba B4 es la encargada de impulsar el rechazo de la nanofiltración hasta el depósito D4.

Por tanto, aplicando Bernoulli entre la salida de las membranas y la entrada al tanque de almacenamiento:

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + H_B = \frac{P_I}{\rho \cdot g} + z_I + \frac{v_I^2}{2 \cdot g} + h_{\text{pérdidas}}$$

En este caso, las presiones y las velocidades a la salida de las membranas y a la entrada de los depósitos son las mismas.

Las cotas son:

$$\begin{aligned} z_A &= 6 \text{ m} \\ z_I &= 10 \text{ m} \end{aligned}$$

Las pérdidas primarias en el tramo 4 se calculan a partir de:

$$h_{\text{primarias}} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la Tabla 47, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 47. Datos para el tramo 4. Fuente: Elaboración propia.

Tramos NF	Diámetro teórico (mm)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)	Velocidad de circulación (m/s)
Tramo 4	56	65	76,1	1,6	72,9	20	0,89

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,89 \cdot 0,065}{1 \cdot 10^{-3}} = 57850$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f . Para ambos tramos:

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,065} = 3,07 \cdot 10^{-5}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricción $f = 0,019$

Por lo que las pérdidas primarias en el tramo 4:

$$h_{primarias} = \frac{0,019 \cdot 20 \cdot 0,89^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,065} = 0,24 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias en el tramo 4 se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En el tramo 4, se pueden observar 1 válvula, 2 codos y 1 unión en T, por lo que:

Tabla 48. Cálculo de las pérdidas para la bomba B4. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	$h_{secundarias}$
Válvulas	1	0,131	0,89	0,005
Codos	2	0,750	0,89	0,06
Uniones en T	1	0,300	0,89	0,012

Por lo que las pérdidas secundarias totales serán:

$$h_{secundarias} = 0,005 + 0,06 + 0,012 = 0,077 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = 4 + 0,24 + 0,077 = 4,32 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde las membranas hasta el depósito D4 es de 80 m³/día = 13,15 m³/h.

Bomba B5

La bomba B5 es la encargada de la recirculación del producto de limpieza.

Por tanto, aplicando Bernoulli entre la salida de las membranas y la entrada al tanque de almacenamiento del producto de limpieza:

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + H_B = \frac{P_I}{\rho \cdot g} + z_I + \frac{v_I^2}{2 \cdot g} + h_{pérdidas}$$

En este caso, las presiones y las velocidades a la salida de las membranas y a la entrada del depósito es la misma.

Las cotas son:

$$z_A = 0 \text{ m}$$

$$z_I = 15 \text{ m}$$

En este caso el producto de limpieza pasa por diferentes tramos de tuberías. Las pérdidas primarias se calculan a partir de:

$$h_{\text{primarias}} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 49*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 49. Datos para la tubería 5 perteneciente al tramo 6 y para la tubería 8 perteneciente al tramo 1. Fuente: Elaboración propia.

Tuberías NF	Diámetro teórico (mm)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)	Longitud (m)	Velocidad de circulación (m/s)
Tramo 2	62	65	76,1	1,6	72,9	2	1,1
Tramo 3	150	150	168,3	3,6	161,1	40	1,37
Tramo 4	56	65	76,1	1,6	72,9	3	0,89
Tramo 5	19,7	20	26,9	1,2	24,5	10	0,75
Tramo 6	41	50	60,3	1,6	57,1	4	1,26
Tramo 7	9,8	10	17,2	1,2	14,8	14	0,75
Tramo 8	14	15	21,3	1,2	18,9	4	1,66
Tramo 10	44	50	60,3	1,2	57,9	4	0,87

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re_{T2} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,1 \cdot 0,065}{1 \cdot 10^{-3}} = 71500$$

$$Re_{T3} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,37 \cdot 0,150}{1 \cdot 10^{-3}} = 205500$$

$$Re_{T4} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,89 \cdot 0,056}{1 \cdot 10^{-3}} = 49840$$

$$Re_{T5} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,75 \cdot 0,02}{1 \cdot 10^{-3}} = 15000$$

$$Re_{T6} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,26 \cdot 0,05}{1 \cdot 10^{-3}} = 63000$$

$$Re_{T7} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,75 \cdot 0,01}{1 \cdot 10^{-3}} = 7500$$

$$Re_{T8} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,66 \cdot 0,015}{1 \cdot 10^{-3}} = 24900$$

$$Re_{T10} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,87 \cdot 0,05}{1 \cdot 10^{-3}} = 43500$$

Como en todos los tramos se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f .

$$\varepsilon_{RT2} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,065} = 3,07 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,150} = 1,33 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT4} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,056} = 3,57 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT5} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,02} = 1 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{RT6} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,05} = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT7} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,001} = 2 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{RT8} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,015} = 1,33 \cdot 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{RT10} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,05} = 4 \cdot 10^{-5}$$

Con lo que se obtienen los siguientes factores de fricción para los diferentes tramos:

$$f_2 = 0,019$$

$$f_3 = 0,014$$

$$f_4 = 0,019$$

$$f_5 = 0,025$$

$$f_6 = 0,019$$

$$f_7 = 0,034$$

$$f_8 = 0,025$$

$$f_{10} = 0,021$$

Por lo que las pérdidas primarias en los diferentes tramos:

$$h_{primariasT2} = \frac{0,019 \cdot 2 \cdot 1,1^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,065} = 0,036 \text{ m}$$

$$h_{primarias} = \frac{0,014 \cdot 40 \cdot 1,37^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,150} = 0,36 \text{ m}$$

$$h_{primariasT} = \frac{0,019 \cdot 3 \cdot 0,89^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,056} = 0,041 \text{ m}$$

$$h_{primariasT5} = \frac{0,025 \cdot 10 \cdot 0,75^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,02} = 0,36 \text{ m}$$

$$h_{primarias} = \frac{0,019 \cdot 4 \cdot 1,26^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 0,12 \text{ m}$$

$$h_{primariasT7} = \frac{0,034 \cdot 14 \cdot 0,75^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,01} = 1,36 \text{ m}$$

$$h_{primariasT8} = \frac{0,025 \cdot 4 \cdot 1,66^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,015} = 0,94 \text{ m}$$

$$h_{primariasT10} = \frac{0,021 \cdot 4 \cdot 0,87^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 0,065 \text{ m}$$

Las pérdidas primarias totales serán:

$$h_{primarias} = 0,036 + 0,36 + 0,041 + 0,36 + 0,12 + 1,36 + 0,94 + 0,065 = 3,28 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{un} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

La parte del tramo 2 por el que circula el producto de limpieza recirculado contiene 2 codos, por lo que:

Tabla 50. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 2 para la bomba B5. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 2				
Componente	Cantidad	K	v	h _{secundarias}
Codos	2	0,750	1,1	0,093

En el tramo 3 se observan 6 codos, 3 válvulas y 3 uniones en T.

Tabla 51. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 3 para la bomba B5. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 3				
Componente	Cantidad	K	v	h _{secundarias}
Válvulas	3	0,131	1,37	0,038
Codos	6	0,750	1,37	0,43
Uniones en T	3	0,300	1,37	0,086

La parte del tramo 4 por la que circula el producto de limpieza recirculado contiene 1 codo y 1 unión en T, por lo que:

Tabla 52. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 4 para la bomba B5. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 4				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	1	0,750	0,89	0,03
Uniones en T	1	0,300	0,89	0,012

En la parte del tramo 5 por la que circula el producto de limpieza no hay pérdidas secundarias.

En el tramo 6 se pueden observar 4 codos

Tabla 53. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 6 para la bomba B5. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 6				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	4	0,750	1,26	0,24

En el tramo 7 hay 4 codos.

Tabla 54. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 7 para la bomba B5. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 7				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	4	0,750	0,75	0,086

En el tramo 8 hay 2 uniones en T.

Tabla 55. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 8 para la bomba B5. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 8				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Uniones en T	2	0,300	1,66	0,084

En el tramo 10 no hay pérdidas secundarias.

Por lo que las pérdidas secundarias totales serán:

$$h_{secundarias} = 0,093 + 0,038 + 0,43 + 0,086 + 0,03 + 0,012 + 0,24 + 0,086 + 0,084 = 1,1 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = 15 + 3,28 + 1,1 = 19,38 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba B5 es de 100 m³/día. Como el producto de limpieza se suministra durante 1 hora al día, el caudal por hora será de 100 m³/h.

2. Diseño de la etapa de ósmosis inversa

Cálculo de caudales y selección de membrana

Los datos para la realización de estos cálculos se obtienen del ensayo a escala de laboratorio realizado por Syed (2017)

El factor de reducción de volumen que se alcanza es igual a 6. Con este valor y el valor del caudal de alimentación, se obtiene el caudal de rechazo:

$$FRV = \frac{Q_A}{Q_R} \rightarrow 6 = \frac{80}{Q_R} \rightarrow Q_R = \frac{80}{6} = 13,33 \text{ m}^3/\text{día}$$

Entonces, mediante un balance es posible obtener el caudal de permeado de la ósmosis inversa:

$$Q_P = Q_A - Q_R = 80 - 13,33 = 66,67 \text{ m}^3/\text{día}$$

Se considera que el tiempo de operación de esta etapa son 8h incluyendo la etapa de limpieza que tiene una duración total de 50min. Por tanto, la duración de la ósmosis inversa es de 7h 10min (7,17 h). Por tanto, el caudal de permeado finalmente será:

$$Q_P = 66,67 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{7,17 \text{ h}} = 9,29 \text{ m}^3/\text{h}$$

La conversión total del sistema se calculará como:

$$YT = \frac{Q_P}{Q_A} = \frac{66,67}{80} = 0,833 = 83,34\%$$

Con el objetivo de calcular el área de membrana, se obtiene la densidad de flujo de permeado J_p como:

$$J_p = L_p \cdot \Delta P = 0,25 \cdot 50 = 12,5 \frac{L}{h \cdot \text{m}^2} = 0,0125 \frac{\text{m}^3}{h \cdot \text{m}^2}$$

Con los datos que se han obtenido, puede finalmente obtenerse el área total de la instalación de membranas de ósmosis inversa de la siguiente forma:

$$J_p = \frac{Q_P}{A_T} \rightarrow A_T = \frac{Q_P}{J_p} = \frac{9,29}{0,0125} = 743,2 \text{ m}^2$$

Se ha seleccionado del catálogo comercial la membrana SW30HR con arrollamiento en espiral.

Las características técnicas de dicha membrana se resumen en la *Tabla 56*.

Tabla 56. Características técnicas de la membrana SW30HR Fuente: Elaboración propia a partir del catálogo de FilmTec.

Características técnicas	Valores
Área activa de la membrana	35 m ²
Longitud de la membrana	1016 mm
Espesor del espaciador	28 mil

A partir del área total (A_T) y del área activa de la membrana (A_m), puede obtenerse el número de módulos necesarios:

$$N^{\circ}módulos = \frac{A_T}{A_m} = \frac{743,2}{35} = 21,23 \approx 22 \text{ módulos}$$

A continuación, se obtendrá el caudal de alimentación de cada uno de los módulos de la misma manera que para la nanofiltración, por lo que:

$$b = \frac{A_m}{2 \cdot L} = \frac{35}{2 \cdot 1,016} = 17,22 \text{ m}$$

Considerando la porosidad del espaciador como 0,89 (un valor promedio para el módulo de arrollamiento en espiral), ya se puede obtener la superficie transversal del módulo

$$S_{trans} = 7,11 \cdot 10^{-4} \cdot 17,22 \cdot 0,89 = 0,0109 \text{ m}^2$$

Y por último ya puede obtenerse el caudal de alimentación de cada uno de los módulos:

$$Q_m = 0,14 \cdot 0,0109 = 0,0015 \text{ m}^3/s$$

Sabiendo que opera durante 7,17h al día:

$$0,0015 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{7,17 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 38,72 \text{ m}^3/\text{día}$$

Por lo que el número de módulos a colocar en paralelo será:

$$N_{paralelo} = \frac{Q_A}{Q_m} = \frac{80}{38,72} \approx 2$$

La opción más económica y con la que se obtendrá el rendimiento óptimo será la utilización de una configuración piramidal en la que las membranas se encuentran en serie dentro de los correspondientes tubos de presión. Para ello, se calcula el número de tubos de presión necesarios si se van a colocar 8 membranas en serie dentro de cada uno de ellos:

$$N = \frac{N^{\circ}módulos}{N^{\circ}membranas \text{ en serie}} = \frac{22}{8} = 2,75 \approx 3 \text{ módulos}$$

Entonces, se colocarán 2 tubos de presión en paralelo con 8 membranas en serie en su interior, seguidos de 1 tubo de presión en serie con 6 membranas en serie en su interior.

Se recalcula el caudal de entrada a cada módulo:

$$Q'_m = \frac{Q_A}{N_{paralelo}} = \frac{80}{2} = 40 \text{ m}^3/\text{día} = 0,0015 \text{ m}^3/s$$

Se calcula la nueva velocidad tangencial para comprobar que se encuentre entre los valores típicos de 0,06m/s y 0,2m/s:

$$v_{tangencial} = \frac{Q'_m}{S_{trans}} = \frac{0,0015}{0,0109} = 0,14 \text{ m/s}$$

Siendo esta velocidad tangencial superior a la mínima (0,03 m/s) para módulos enrollados en espiral.

El caudal de permeado de cada una de las membranas será igual a:

$$Q_{pm} = J_p \cdot A_m = 0,0125 \cdot 35 = 0,4375 \frac{m^3}{h} = 3,14 m^3/día$$

Si se toman 8 membranas en serie para los tubos de presión en paralelo:

$$Q_{p1} = N \cdot Q_{pm} = 8 \cdot 3,14 = 25,12 \frac{m^3}{día} = 0,00097 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{R1} = Q'_m - Q_{p1} = 40 - 25,12 = 14,88 \frac{m^3}{día} = 0,00058 \frac{m^3}{s}$$

Se comprueba que la velocidad tangencial a la salida de los tubos de presión en paralelo se encuentra dentro del rango de valores típicos:

$$v_{tangencial} = \frac{Q_{R1}}{S_{trans}} = \frac{0,00058 m^3/s}{0,014 m^2} = 0,041 m/s$$

Finalmente, se calculará la velocidad tangencial a la salida del último tubo de presión.

El caudal de alimentación del último tubo de presión es de:

$$Q_{A3} = 2 \cdot 14,88 = 29,76 \frac{m^3}{día} = 0,0012 \frac{m^3}{s}$$

El caudal de permeado del último tubo de presión es de:

$$Q_{p3} = N \cdot Q_{pm} = 6 \cdot 3,14 = 18,84 \frac{m^3}{día} = 0,00073 \frac{m^3}{s}$$

El caudal de rechazo del último tubo de presión será:

$$Q_{R3} = Q_{A3} - Q_{p3} = 29,76 - 18,84 = 10,92 \frac{m^3}{día} = 0,00042 \frac{m^3}{s}$$

Por lo que finalmente, el caudal de permeado total será

$$Q_{PT} = 25,12 + 25,12 + 18,84 = 69,08 \frac{m^3}{día}$$

Se comprueba que la velocidad tangencial a la salida del último tubo de presión se encuentra dentro del rango de valores típicos:

$$v_{tangencial} = \frac{Q_{R3}}{S_{trans}} = \frac{0,00042 m^3/s}{0,014 m^2} = 0,0302 m/s$$

Como esta velocidad tangencial es superior a la mínima (0,03 m/s) para módulos enrollados en espiral y por tanto se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente, se concluye que la distribución mencionada es viable.

Cálculo del volumen de los depósitos

Se realizará de la misma manera que para la nanofiltración.

- D1: depósito de almacenamiento de agua de red.
El caudal de agua de red que se utilizará para la limpieza será el mismo con el que se alimenta la ósmosis inversa, es decir de 80 m³/día, pero el tiempo que dura este aclarado no es el mismo tiempo que dura el tratamiento de la OI, ya que, el tiempo

de aclarado solamente dura 20 min, es decir, 0,33 h. Entonces, el volumen del depósito se calculará en relación a este tiempo.

El volumen del depósito será:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = 80 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1 \text{ día}}{7,17h} = 11,16 \frac{m^3}{h}$$

$$V = Q \cdot t = 11,16 \frac{m^3}{h} \cdot 0,33h = 3,68m^3$$

Ampliando un 20% su capacidad:

$$V_{D1} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{3,68}{0,8} = 4,6m^3$$

- D2: depósito de alimentación de la ósmosis inversa cargado con el permeado de la nanofiltración. Conociendo el caudal de entrada a la ósmosis inversa, que es de 80 m³/día, que en este caso coincide con el volumen del depósito, 80 m³. Ampliando un 20% su capacidad:

$$V_{D11} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{80}{0,8} = 100m^3$$

- D3: depósito de almacenamiento cargado con el producto de limpieza, NaOH. El cálculo se realiza de manera análoga al cálculo realizado en la nanofiltración para el depósito del producto de limpieza. En la *Tabla 57* pueden observarse los resultados del volumen muerto para cada tramo.

Tabla 57. Volumen muerto para cada tramo de tubería en la ósmosis inversa. Fuente: Elaboración propia.

Tramo	Radio (mm)	Longitud (m)	Volumen muerto (m ³)
Tramo 2	28,15	4	0,0099
Tramo 3	103,55	30	1,01
Tramo 4	22,55	4	0,0064
Tramo 5	19,6	4	0,0048
Tramo 7	22,55	7	0,011
Tramo 10	12,25	6	0,0028
Tramo 11	28,15	2	0,005

El volumen muerto total de las tuberías será:

$$V_T = 1,05m^3 = 1050 L$$

En segundo lugar, el volumen muerto de las membranas se calcula mediante:

$$V = V_{módulo} \cdot N$$

Siendo N el número de membranas.

El volumen de cada módulo se calcula mediante:

$$V_{\text{módulo}} = S_{\text{trans}} \cdot L_{\text{módulo}}$$

La superficie transversal se calcula mediante:

$$S_{\text{trans}} = h \cdot b \cdot \varepsilon$$

Siendo:

h el espesor del espaciador

ε la porosidad del espaciador

Y pudiendo calcular b como:

$$b = \frac{A}{2 \cdot L} = \frac{35}{2 \cdot 1,016} = 17,22 \text{ m}$$

Por lo que:

$$S_{\text{trans}} = 7,11 \cdot 10^{-4} \cdot 17,22 \cdot 0,89 = 0,011 \text{ m}^2$$

El volumen del módulo será:

$$V_{\text{módulo}} = 0,011 \cdot 1,016 = 0,011 \text{ m}^3 = 11 \text{ L}$$

Finalmente:

$$V = 11 \cdot 22 = 242 \text{ L}$$

Sumando el volumen muerto de las tuberías y el volumen muerto de las membranas, se obtendrá el volumen del depósito de limpieza:

$$V_{D3} = 1050 + 242 = 1292 \text{ L}$$

El volumen del depósito D3 será el doble del volumen muerto total, por lo que será de 2584 L.

Ampliando un 20% su capacidad:

$$V = \frac{2584}{0,8} = 3230 \text{ L} = 3,23 \text{ m}^3$$

- D4: depósito de recogida del permeado de la ósmosis inversa. El volumen de permeado que se obtiene son 69,08 m³/día, que en este caso coincide con el volumen del depósito. Si se amplía un 20% su capacidad:

$$V_{D14} = \frac{V_{\text{teórico}}}{0,8} = \frac{69,08}{0,8} = 86,35 \text{ m}^3$$

- D5: depósito de recogida del rechazo de la ósmosis inversa. El volumen de rechazo obtenido son 10,92 m³/día, que en este caso coincide con el volumen del depósito. Ampliando un 20% su capacidad:

$$V_{D13} = \frac{V_{\text{teórico}}}{0,8} = \frac{10,92}{0,8} = 13,65 \text{ m}^3$$

- D6: depósito de recogida del rechazo de agua de red. Como se ha utilizado el mismo caudal de alimentación, el caudal de rechazo de agua será de 10,92 m³/día. pero el tiempo que dura este aclarado no es el mismo tiempo que dura el tratamiento, como se ha explicado anteriormente, la duración del aclarado en la OI es de 0,33 h, por lo que el volumen del depósito será:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = 10,92 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1 día}{7,17h} = 1,52 \frac{m^3}{h}$$

$$V = Q \cdot t = 1,52 \frac{m^3}{h} \cdot 0,33h = 0,5m^3$$

Ampliando un 20% su capacidad:

$$V_{D1} = \frac{V_{teórico}}{0,8} = \frac{0,5}{0,8} = 0,63m^3 = 630 L$$

Cálculo de los diámetros de las tuberías

El cálculo de los diámetros de las tuberías se realizará de la misma manera que en la nanofiltración. Se utilizará el mismo catálogo.

1) Tramo 1: es la tubería de alimentación de agua de red al sistema de membranas. Teniendo en cuenta que el caudal que circula por esta tubería es de 80 m³/día y que el tiempo que se suministra agua de red para la limpieza es de 0,33 h:

$$Q = 80m^3/día = 242,42 m^3/h = 0,067 m^3/s$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,067}{\pi \cdot 1,5}} = 0,24 m$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 250mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 273mm. Se escoge un espesor de 6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 273 - 2 \cdot 6 = 261 mm$$

Recalculando la velocidad:

$$0,261 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,067}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,25 m/s$$

2) Tramo 2: tubería de alimentación del permeado de la nanofiltración al sistema de membranas.

El caudal que circula por esta tubería es de 80 m³/día:

$$Q = 80m^3/día = 11,15 m^3/h = 0,003 m^3/s$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,003}{\pi \cdot 1,5}} = 0,05 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es el mismo, 50mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 60,3mm. Se escoge un espesor de 2mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 60,3 - 2 \cdot 2 = 56,3 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0563 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,003}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,2 \text{ m/s}$$

3) Tramo 3: tubería de alimentación y recirculación del producto de limpieza.

El caudal que circula por esta tubería es de 80 m³/día, como el producto de limpieza sólo se suministra durante 30 min, el caudal será:

$$Q = 80 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 160 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,044 \text{ m}^3/\text{s}$$

Por lo que el diámetro:

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,044}{\pi \cdot 1,5}} = 0,19 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 200mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 219,1mm. Se escoge un espesor de 6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 219,1 - 2 \cdot 6 = 207,1 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,2071 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,044}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,3 \text{ m/s}$$

4) Tramo 4: tuberías de entrada individuales a los tubos de presión de la primera etapa.

El caudal que circula por esta tubería es de 40 m³/día.

$$Q = 40 \text{ m}^3/\text{día} = 5,58 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0015}{\pi \cdot 1,5}} = 0,035 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es el mismo: 40mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 48,3mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 48,3 - 2 \cdot 1,6 = 45,1 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0451 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0015}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,94 \text{ m/s}$$

5) Tramo 5: tuberías de salida individuales del permeado de cada tubo de presión de la primera etapa.

El caudal de rechazo de cada tubo de presión es de 25,12 m³/día, como la planta opera 7,17h al día, el caudal será:

$$Q = 25,12 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 3,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00097 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00097}{\pi \cdot 1,5}} = 0,029 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 32mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 42,4mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 42,4 - 2 \cdot 1,6 = 39,2 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0392 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00097}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,8 \text{ m/s}$$

6) Tramo 6: tuberías de salida individuales del rechazo de cada tubo de presión de la primera etapa.

El caudal que circula por esta tubería es de 14,88 m³/día, por lo que:

$$Q = 14,88 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 2,08 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00058 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00058}{\pi \cdot 1,5}} = 0,022 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 25mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 33,7mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 33,7 - 2 \cdot 1,6 = 30,5 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0305 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00058}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,8 \text{ m/s}$$

7) Tramo 7: tubería de salida común del permeado de la primera etapa.

El caudal que circula por esta tubería será la suma de los caudales de permeado individuales de cada tubo de presión de la primera etapa, por lo que:

$$Q = 25,12 \frac{m^3}{día} \cdot 2 = 50,24 \frac{m^3}{día} = 7 \frac{m^3}{h} = 0,0019 \frac{m^3}{s}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0019}{\pi \cdot 1,5}} = 0,04 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es el mismo, de 40mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 48,3mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 48,3 - 2 \cdot 1,6 = 45,1 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0451 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0019}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,19 \text{ m/s}$$

8) Tramo 8: tubería de salida común del rechazo de la primera etapa.

El caudal que circula por esta tubería será la suma de los caudales de rechazo de cada tubo de presión, por lo que:

$$Q = 14,88 \frac{m^3}{día} \cdot 2 = 29,76 \frac{m^3}{día} = 4,15 \frac{m^3}{h} = 0,0012 \frac{m^3}{s}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0012}{\pi \cdot 1,5}} = 0,032 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es el mismo, de 32mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 42,4mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 42,4 - 2 \cdot 1,6 = 39,2 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0392 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0012}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1 \text{ m/s}$$

9) Tramo 9: tubería de salida del permeado de la segunda etapa.

Este caudal es de 18,84 m³/día, por lo que:

$$Q = 18,84 \frac{m^3}{día} = 2,63 \frac{m^3}{h} = 0,00073 \frac{m^3}{s}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00073}{\pi \cdot 1,5}} = 0,024 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 25mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 33,7mm. Se escoge un espesor de 1,6mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 25 - 2 \cdot 1,6 = 21,8 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0218 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00073}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,95 \text{ m/s}$$

10) Tramo 10: tubería de salida del rechazo de la segunda etapa.

Este caudal es de 10,92m³/día, por lo que:

$$Q = 10,92 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 1,52 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,00042 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00042}{\pi \cdot 1,5}} = 0,019 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 20mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 26,9mm. Se escoge un espesor de 1,2mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 26,9 - 2 \cdot 1,2 = 24,5 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0245 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00042}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 0,89 \text{ m/s}$$

11) Tramo 11: tubería común del permeado de las dos etapas.

Este caudal será la suma de los caudales de permeado de cada etapa, por lo que:

$$Q = 25,12 \cdot 2 + 18,84 = 69,08 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 9,63 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,0027 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$D_{teórico} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0027}{\pi \cdot 1,5}} = 0,048 \text{ m}$$

El DN se obtiene del catálogo comercial y es el inmediatamente superior al obtenido, en este caso es de 50mm. El diámetro exterior se obtiene también del catálogo comercial y este es de 60,3mm. Se escoge un espesor de 2mm. Por lo que el diámetro interior será:

$$D_{interior} = D_{exterior} - 2 \cdot \text{espesor} = 60,3 - 2 \cdot 2 = 56,3 \text{ mm}$$

Recalculando la velocidad:

$$0,0563 = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0027}{\pi \cdot v}} \rightarrow v = 1,08 \text{ m/s}$$

Cálculo de las bombas

Las bombas se seleccionarán en función del caudal que han de proporcionar y de la altura que deben aportar. Por lo que para cada bomba se calcularán estos dos parámetros.

Bomba B1

Esta bomba es la encargada de impulsar el agua de red desde el depósito D1 para la realización del proceso de limpieza.

En primer lugar, se calcula la altura de la bomba con la ecuación de Bernoulli

$$H_B = \frac{P_I - P_A}{\rho \cdot g} + z_I - z_A + h_{p\acute{e}rdidas}$$

Donde se realizan las siguientes consideraciones:

- Presión = 1bar
- Se desprecia la cota de aspiración al ser un circuito cerrado

Las pérdidas primarias en las diferentes partes del tramo 1 se calculan a partir de:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 58*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 58. Datos para el tramo 1. Fuente: Elaboración propia.

Tramos OI	Ø teórico (mm)	Ø nominal (mm)	Ø exterior (mm)	Espesor (mm)	Ø interior (mm)	Longitud (m)	v (m/s)
Tramo 1	240	250	273	6	261	17	1,25

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,25 \cdot 0,250}{1 \cdot 10^{-3}} = 312500$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f.

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,250} = 8 \cdot 10^{-6}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricción $f = 0,014$

Por lo que las pérdidas primarias en el tramo 1 son:

$$h_{primarias} = \frac{0,014 \cdot 17 \cdot 1,25^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,250} = 0,076 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{\text{secundarias}} = h_{\text{uniones}} + h_{\text{codos}} + h_{\text{válvulas}}$$

$$h_{\text{uniones}} = h_{\text{codos}} = h_{\text{válvulas}} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En este tramo, se pueden observar 3 válvulas, 8 codos y 1 unión en T, por lo que:

Tabla 59. Cálculo de las pérdidas secundarias para la bomba B1. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	h _{secundarias}
Válvulas	3	0,131	1,25	0,031
Codos	8	0,750	1,25	0,48
Uniones en T	1	0,3	1,25	0,024

Por lo que las pérdidas secundarias serán:

$$h_{\text{secundarias}} = 0,031 + 0,48 + 0,024 = 0,535 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = \frac{100.000}{1000 \cdot 9,81} + 0,076 + 0,535 = 10,8 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde D1 se ha calculado anteriormente y es de 242,42m³/h

Bomba B2

Esta bomba impulsa el permeado obtenido en la nanofiltración previa desde el depósito D2 hasta las membranas de OI. En primer lugar, se calcula el diferencial de presión, que es la presión necesaria que debe proporcionar la bomba para que las membranas produzcan las corrientes que se desean.

La presión en el punto de impulsión será la misma que en la entrada a las membranas, por lo que:

$$P_I = p_e$$

La pérdida de presión en cada membrana se obtiene del catálogo y es de 1 bar. Por lo que, al haber 14 membranas en serie, la pérdida de presión total será de 14 bar.

La presión en el punto de aspiración:

$$P_A = 0 \text{ bar}$$

Por lo que respecta a las cotas:

$$z_A = 0 \text{ m}$$

$$z_I = 7 \text{ m}$$

La presión transmembranal son 50 bar, por lo que:

$$P_I = TPM + \frac{\Delta P}{2} = 50 + \frac{14}{2} = 57 \text{ bar}$$

$$p_S = p_e - \Delta P = 57 - 14 = 43 \text{ bar}$$

Por último, queda el cálculo de las pérdidas. En cuanto a las pérdidas primarias:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 60*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 60. Datos para el tramo 2. Fuente: Elaboración propia.

Tramos OI	Ø teórico (mm)	Ø nominal (mm)	Ø exterior (mm)	Espesor (mm)	Ø interior (mm)	Longitud (m)	v (m/s)
Tramo 2	50	50	60,3	2	56,3	15	1,2

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,2 \cdot 0,05}{1 \cdot 10^{-3}} = 60000$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f .

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,05} = 4 \cdot 10^{-5}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricción $f = 0,019$

Por lo que las pérdidas primarias en el tramo 2 son:

$$h_{primarias} = \frac{0,019 \cdot 15 \cdot 1,2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 0,42 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias en se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En este tramo, se pueden observar 2 válvulas, 9 codos y 1 unión en T, por lo que:

Tabla 61. Cálculo de las pérdidas secundarias para la bomba B1. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	$h_{secundarias}$
Válvulas	2	0,131	1,2	0,02
Codos	9	0,750	1,2	0,5
Uniones en T	1	0,3	1,2	0,022

Por lo que las pérdidas secundarias serán:

$$h_{secundarias} = 0,02 + 0,5 + 0,022 = 0,542 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = \frac{5.700.000}{1000 \cdot 9,81} + 7 + 0,42 + 0,542 = 589 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde D2 es de $80 \text{ m}^3/\text{día} = 11,16 \text{ m}^3/\text{h}$.

Bomba B3

La bomba B3 es la encargada de impulsar el producto de limpieza desde el depósito D3. En primer lugar, se calcula la altura de la bomba con la ecuación de Bernoulli

$$H_B = \frac{P_I - P_A}{\rho \cdot g} + z_I - z_A + h_{p\acute{e}rdidas}$$

Donde se realizan las siguientes consideraciones:

- Presión = 1bar
- $z_A = 0$; $z_I = 2$.

Las pérdidas primarias se calculan a partir de:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 62*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 62. Datos para el tramo 3. Fuente: Elaboración propia.

Tramos OI	Ø teórico (mm)	Ø nominal (mm)	Ø exterior (mm)	Espesor (mm)	Ø interior (mm)	Longitud (m)	v (m/s)
Tramo 3	190	200	219,1	6	207,1	15	1,3

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,3 \cdot 0,2}{1 \cdot 10^{-3}} = 260000$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f.

$$\varepsilon_R = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,2} = 1 \cdot 10^{-5}$$

Con lo que se obtiene un factor de fricción $f = 0,014$

Por lo que las pérdidas primarias en la parte del tramo 3 donde está ubicada la bomba B3:

$$h_{primarias} = \frac{0,014 \cdot 15 \cdot 1,3^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,2} = 0,09 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En este tramo, se pueden observar 3 válvulas, 7 codos y 1 unión en T, por lo que:

Tabla 63. Cálculo de las pérdidas secundarias para la bomba B3. Fuente: Elaboración propia.

Componente	Cantidad	K	v	h _{secundarias}
Válvulas	3	0,131	1,3	0,034
Codos	7	0,750	1,3	0,45
Uniones en T	1	0,3	1,3	0,026

Por lo que las pérdidas secundarias serán:

$$h_{secundarias} = 0,034 + 0,45 + 0,026 = 0,51 \text{ m}$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

$$H_B = \frac{100.000}{1000 \cdot 9,81} + 2 + 0,09 + 0,51 = 12,79 \text{ m}$$

Y el caudal que suministra la bomba desde D3 se ha calculado anteriormente y es de 160 m³/h.

Bomba B4

La bomba B4 es la encargada de la recirculación del producto de limpieza.

Por tanto, aplicando Bernoulli entre la salida de las membranas y la entrada al tanque de almacenamiento del producto de limpieza:

$$\frac{P_A}{\rho \cdot g} + z_A + \frac{v_A^2}{2 \cdot g} + H_B = \frac{P_I}{\rho \cdot g} + z_I + \frac{v_I^2}{2 \cdot g} + h_{pérdidas}$$

En este caso, las presiones y las velocidades a la salida de las membranas y a la entrada del depósito es la misma.

Las cotas son:

$$z_A = 0 \text{ m}$$

$$z_I = 10 \text{ m}$$

Las pérdidas primarias se calculan a partir de:

$$h_{primarias} = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

En la *Tabla 64*, pueden observarse algunos de los datos requeridos.

Tabla 64. Datos para los diferentes tramos por los que pasa el producto de limpieza recirculado.
Fuente: Elaboración propia.

Tramos OI	Ø teórico (mm)	Ø nominal (mm)	Ø exterior (mm)	Espesor (mm)	Ø interior (mm)	Longitud (m)	v (m/s)
Tramo 2	50	50	60,3	2	56,3	4	1,2
Tramo 3	190	200	219,1	6	207,1	35	1,3
Tramo 4	35	40	48,3	1,6	45,1	4	0,94
Tramo 5	29	32	42,4	1,6	39,2	4	0,8
Tramo 7	40	40	48,3	1,6	45,1	7	1,19
Tramo 8	32	32	42,4	1,6	39,2	4	1
Tramo 10	19	20	26,9	1,2	24,5	2	0,89

Por otra parte, el factor de fricción f se calcula a partir de:

$$Re_{T2} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,2 \cdot 0,05}{1 \cdot 10^{-3}} = 60000$$

$$Re_{T3} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,3 \cdot 0,2}{1 \cdot 10^{-3}} = 260000$$

$$Re_{T4} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,94 \cdot 0,04}{1 \cdot 10^{-3}} = 37600$$

$$Re_{T5} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,8 \cdot 0,032}{1 \cdot 10^{-3}} = 25600$$

$$Re_{T7} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1,19 \cdot 0,04}{1 \cdot 10^{-3}} = 47600$$

$$Re_{T8} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1 \cdot 0,032}{1 \cdot 10^{-3}} = 32000$$

$$Re_{T10} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 0,89 \cdot 0,02}{1 \cdot 10^{-3}} = 17800$$

Como se trata de flujo turbulento ($Re > 4000$), se debe calcular la rugosidad relativa y con ello entrar al ábaco de Moody para obtener f .

$$\varepsilon_{RT} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,05} = 4 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT3} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,2} = 1 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT4} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,04} = 5 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,032} = 6,25 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT7} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,04} = 5 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT8} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,032} = 6,25 \cdot 10^{-5}$$

$$\varepsilon_{RT10} = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0,000002}{0,02} = 1 \cdot 10^{-4}$$

Con lo que se obtienen los siguientes factores de fricción:

$$f_{T2} = 0,02$$

$$f_{T3} = 0,014$$

$$f_{T4} = 0,023$$

$$f_{T5} = 0,024$$

$$f_{T7} = 0,021$$

$$f_{T8} = 0,022$$

$$f_{T10} = 0,027$$

Por lo que las pérdidas primarias:

$$h_{primariasT2} = \frac{0,02 \cdot 4 \cdot 1,2^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,05} = 0,12 \text{ m}$$

$$h_{primariasT3} = 0,21$$

$$h_{primariasT4} = 0,10$$

$$h_{primariasT5} = 0,098$$

$$h_{primariasT7} = 0,27$$

$$h_{primariasT} = 0,14$$

$$h_{primariasT3} = 0,11$$

Por lo que las pérdidas primarias totales serán:

$$h_{primarias} = 1,044$$

Las pérdidas secundarias se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$h_{secundarias} = h_{uniones} + h_{codos} + h_{válvulas}$$

$$h_{uniones} = h_{codos} = h_{válvulas} = \frac{K \cdot v^2}{2 \cdot g}$$

En la parte del tramo 2 por la que se recircula el producto de limpieza hay 2 codos, por lo que:

Tabla 65. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 2 para la bomba B4. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 2				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	2	0,750	1,2	0,11

En el tramo 3 por el que pasa el producto de limpieza recirculado hay 5 codos, 3 válvulas y 4 uniones en T

Tabla 66. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 3 para la bomba B4. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 3				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	5	0,750	1,3	0,32
Válvulas	3	0,131	1,3	0,033
Uniones en T	4	0,300	1,3	0,10

En el tramo 4 no se observa ningún elemento, por lo que no habrá pérdidas secundarias.

En el tramo 5 se observan 4 codos, por lo que:

Tabla 67. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 5 para la bomba B4. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 5				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	4	0,750	0,94	0,14

En el tramo 7 se observan 3 codos, por lo que:

Tabla 68. Cálculo de las pérdidas secundarias en el tramo 7 para la bomba B4. Fuente: Elaboración propia.

TRAMO 7				
Componente	Cantidad	K	v	h_{secundarias}
Codos	3	0,750	1,19	0,16

En la parte del tramo 8 por la que pasa el producto de limpieza recirculado no se observa ningún elemento, por lo que no habrá pérdidas secundarias.

En la parte del tramo 10 por la que pasa el producto de limpieza recirculado no se observa ningún elemento, por lo que no habrá pérdidas secundarias.

Por lo que las pérdidas secundarias totales serán:

$$h_{secundarias} = 0,863m$$

Finalmente, la altura de la bomba será:

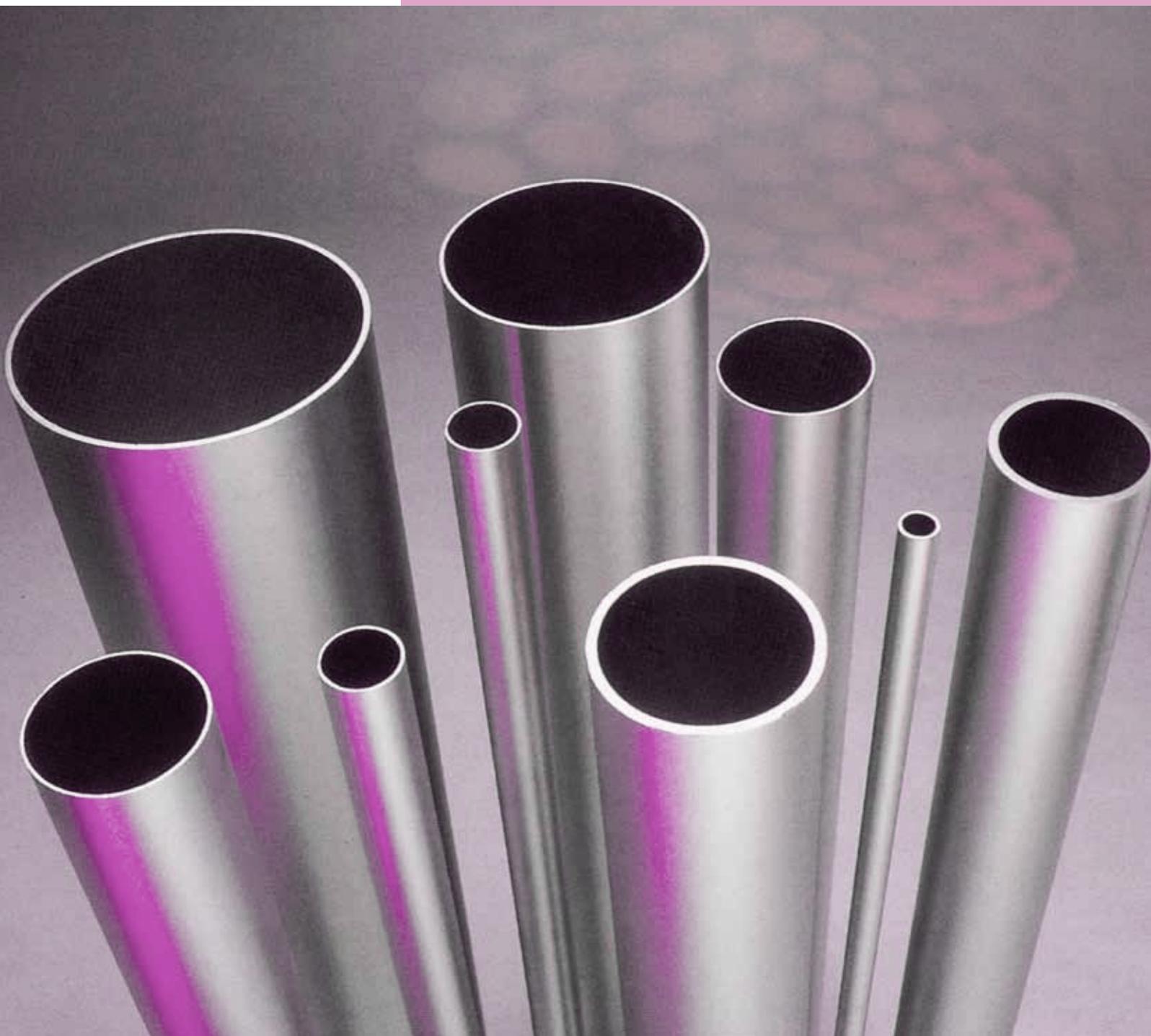
$$H_B = 10 + 1,044 + 0,863 = 11,9 m$$

Y el caudal que suministra la bomba es de 80 m³/día, pero como el producto de limpieza solamente actúa durante 0,5 h:

$$Q = 80 \frac{m^3}{día} \cdot \frac{1 día}{0,5 h} = 160 \frac{m^3}{h}$$

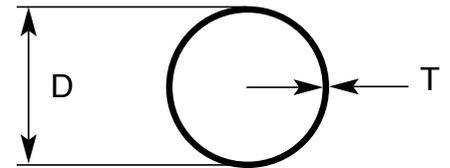
ANEXO II. Catálogos comerciales de los equipos.

Gama ISO de acero inoxidable





Tubos soldados según ISO-1127



Diámetro nominal		Diámetro ext. mm	Espesor mm												
DN	Pulg.		0,80	1	1,2	1,6	2	2,5	2,6	3	3,2	3,6	4	5	6
		Peso en kg/m													
10	3/8"	17,2	0,329	0,406	0,481	0,625	0,761	0,920	0,951	1,067					
15	1/2"	21,3	0,411	0,508	0,604	0,789	0,967	1,177	1,217	1,375					
20	3/4"	26,9	0,523	0,649	0,772	1,014	1,247	1,527	1,582	1,795					
25	1"	33,7	0,659	0,819	0,977	1,286	1,588	1,953	2,025	2,306	2,444				
32	1 1/4"	42,4		1,037	1,238	1,536	2,023	2,498	2,591	2,960	3,141	3,498	3,846		
40	1 1/2"	48,3		1,184	1,415	1,758	2,319	2,867	2,975	3,403	3,614	4,029	4,437		
50	2"	60,3		1,485	1,776	2,209	2,920	3,618	3,757	4,304	4,575	5,111	5,639	6,924	
65	2 1/2"	76,1		1,881	2,251	2,802	3,711	4,607	4,785	5,491	5,841	6,535	7,222	8,902	
80	3"	88,9			2,635	3,283	3,498	5,409	5,618	6,453	6,867	7,689	8,504	10,504	
90	3 1/2"	101,6				3,760	4,006	4,988	6,445	7,407	7,885	8,834	9,776	12,094	
100	4"	114,3				4,237	4,515	5,624	7,272	8,361	8,902	9,979	11,048	13,684	16,271
125	5"	139,7				5,533	6,896	8,589	8,926	10,269	10,937	12,269	13,592	16,864	20,087
150	6"	168,3				6,679	8,328	10,379	10,788	12,417	13,229	14,847	16,456	20,445	24,384
200	8"	219,1					10,872	13,559	14,095	16,233	17,300	19,426	21,544	26,805	32,016
250	10"	273					13,572	16,933	17,604	20,282	21,619	24,285	26,943	33,554	40,114
300	12"	323,9					16,121	20,120	20,918	24,106	25,697	28,873	32,041	39,926	47,761
350	14"	355,6					17,708	22,104	22,982	26,487	28,237	31,731	35,216	43,895	52,524
400	16"	406,4					20,252	25,284	26,289	30,303	32,308	36,310	40,304	50,255	60,156
450	18"	457,2					22,759	28,462	29,594	34,000	36,320	40,82	45,320	56,612	67,784
500	20"	508					25,338	31,642	32,901	37,933	40,446	45,465	50,477	62,971	75,416
600	24"	609,6								45,565	48,586	54,623	60,635	75,691	90,679
700	28"	711,2											70,828	88,411	105,942
800	32"	812,8											81,004	101,136	121,206
900	36"	914,4											91,180	113,850	136,470
1000	40"	1016											101,335	126,597	151,733

Composición química: Ver página 8

Características mecánicas: Ver página 9

Calidad del material: AISI 304/304L, 316/316L, duplex

Acabados: Ver página 13

Tolerancias: Ver página 33

Normas de fabricación: EN 10217-7

EN 10296-2

Longitud de suministro: 6.000 mm.

Otros largos, espesores, calidades o características especiales bajo pedido especial (consultar).



DEPÓSITOS DE SUPERFICIE



DEPÓSITOS

DEPÓSITOS ENTERRADOS

DEPÓSITOS DE SUPERFICIE

DEPÓSITOS PLUVIALES

DEPÓSITOS ANTI INCENDIOS

DEPÓSITOS ESPECIALES



DEPÓSITOS DE SUPERFICIE



DEPÓSITO HORIZONTAL

REFERENCIA	VOLUMEN	Ø	LONGITUD
	litros		
DHST-005-2000	5000	2000	2100
DHST-006-2000	6000	2000	2350
DHST-008-2000	8000	2000	3000
DHST-010-2250	10000	2250	3100
DHST-010-2500	10000	2500	2650
DHST-012-2250	12000	2250	3600
DHST-012-2500	12000	2500	3050
DHST-015-2500	15000	2500	3650
DHST-020-2500	20000	2500	4650
DHST-025-2500	25000	2500	5700
DHST-030-2500	30000	2500	6700
DHST-040-2500	40000	2500	8750
DHST-050-2500	50000	2500	10800
DHST-050-3000	50000	3000	7600
DHST-060-3000	60000	3000	9000
DHST-060-3400	60000	3400	7350
DHST-070-3000	70000	3000	10400
DHST-070-3400	70000	3400	8450
DHST-080-3000	80000	3000	11800
DHST-080-3400	80000	3400	9550
DHST-100-4000	100000	4000	8700
DHST-150-4000	150000	4000	12700



DEPÓSITO VERTICAL CERRADO

REFERENCIA	VOLUMEN	Ø	ALTURA
	litros		
DVST-004-1600	4000	1600	2200
DVST-004-1800	4000	1800	1800
DVST-005-2000	5000	2000	1850
DVST-006-2000	6000	2000	2150
DVST-008-2000	8000	2000	2800
DVST-010-2250	10000	2250	2800
DVST-010-2500	10000	2500	2350
DVST-012-2250	12000	2250	3300
DVST-012-2500	12000	2500	2750
DVST-015-2250	15000	2250	4050
DVST-015-2500	15000	2500	3350
DVST-020-2250	20000	2250	5300
DVST-020-2500	20000	2500	4400
DVST-025-2500	25000	2500	5400
DVST-030-2500	30000	2500	6400
DVST-040-3000	40000	3000	5900
DVST-040-3400	40000	3400	4800
DVST-050-3000	50000	3000	7350
DVST-050-3400	50000	3400	5900
DVST-060-3400	60000	3400	7000
DVST-070-4000	70000	4000	5950
DVST-080-4000	80000	4000	6750
DVST-090-4000	90000	4000	7550
DVST-100-4000	100000	4000	8350
DVST-150-4000	150000	4000	12350

DEPÓSITO VERTICAL ABIERTO

REFERENCIA	VOLUMEN	Ø	ALTURA
	litros		
DVSO-004-1600	4000	1600	2100
DVSO-004-1800	4000	1800	1700
DVSO-005-2000	5000	2000	1700
DVSO-006-2000	6000	2000	2000
DVSO-008-2000	8000	2000	2650
DVSO-010-2250	10000	2250	2600
DVSO-010-2500	10000	2500	2150
DVSO-015-2250	15000	2250	3900
DVSO-015-2500	15000	2500	3015
DVSO-020-2250	20000	2250	5150
DVSO-020-2500	20000	2500	4200
DVSO-025-2500	25000	2500	5200
DVSO-030-2500	30000	2500	6250
DVSO-040-3000	40000	3000	5750
DVSO-040-3400	40000	3400	4500
DVSO-050-3400	50000	3400	5600
DVSO-050-4000	50000	4000	4100



DEPÓSITO VERTICAL CERRADO CON PIES

REFERENCIA	VOLUMEN	Ø	ALTURA
	litros		
DVSP-005-2000	5000	2000	2450
DVSP-008-2000	8000	2000	3400
DVSP-010-2500	10000	2500	3000
DVSP-012-2500	12000	2500	3400
DVSP-015-2500	15000	2500	4020
DVSP-020-2500	20000	2500	5050
DVSP-025-2500	25000	2500	6060
DVSP-030-2500	30000	2500	7080
DVSP-040-3000	40000	3000	6550
DVSP-050-3000	50000	3000	7950



Equipamiento estándar

- 2 Bridas DN 50, EN 1092-1 FF en PRFV
- Venteo en PVC 110
- Boca de hombre en PP
- Orejas de elevación
- Barrera química: resina Isoftálica
- Refuerzo mecánico: resina Ortoftálica
- Diseño según UNE 13121
- Color a escoger por el cliente (carta RAL)
- Pintura exterior poliuretano (resistente a UV)

Equipamiento opcional

- Diferentes dimensiones en altura y diámetro
- Otras resinas y fibras en función del pH, temperatura, etc.
- Bridas y bocas de hombre adicionales
- Accesorios: Sensores (de nivel, temperatura, etc.), alarmas, panel de control eléctrico,...
- Otros códigos de diseño: ASME,...
- Cálculos de sismo y viento

DEPÓSITOS

DEPÓSITOS ENTERRADOS

DEPÓSITOS DE SUPERFICIE

DEPÓSITOS PLUVIALES

DEPÓSITOS ANTI INCENDIOS

DEPÓSITOS ESPECIALES



Product Data Sheet

FilmTec™ NF270-400/34i Element

Description

Ideal for: utility managers and operators dealing with surface and groundwater and seeking a technology that removes a high percentage of total organic carbon (TOC) and trihalomethan (THM) precursors while having a medium to high salt passage and medium hardness passage.



The FilmTec™ NF270-400/34i Element:

- Provides organic removal with partial softening in order to maintain a minimum level of hardness for organoleptic properties and preservation of distribution networks
- Delivers high productivity, cleanability and low energy consumption due to its high active area and wide cleaning pH range (1-12) tolerance
- Includes iLEC™ interlocking end caps, reducing system operating costs and the risk of o-ring leaks that can cause poor water quality

Product Type

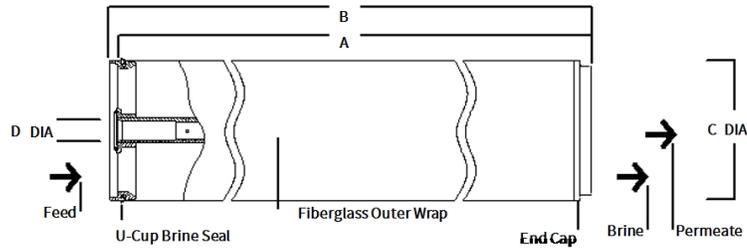
Spiral-wound element with polypiperazine thin-film composite membrane

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer	Permeate Flow Rate		Typical Stabilized	Minimum Salt
	(ft ²)	(m ²)	Thickness (mil)	(GPD)	(m ³ /d)	Salt Rejection (%)	Rejection (%)
NF270-400/34i	400	37	34-LDP	12,500	47	>97.0	97.0

1. Permeate flow and salt passage based on the following test conditions: 2,000 mg/l MgSO₄, 70 psi (4.8 bar), 77°F (25°C) and 15% recovery.
2. Flow rates for individual elements may vary but will be no more than ± 15%.
3. Stabilized salt rejection is generally achieved within 24-48 hours of continuous use; depending upon feedwater characteristics and operating conditions.
4. Sales specifications may vary as design revisions take place.
5. Active area guaranteed ± 3%. Active area as stated by DuPont Water Solutions is not comparable to nominal membrane area often stated by some manufacturers.

Element Dimensions



Dimensions – inches (mm)								1 inch = 25.4 mm	
	A		B		C		D		
FilmTec™ Element	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	(in.)	(mm)	
NF270-400/34i	40.0	1,016	40.5	1,029	7.9	201	1.125 ID	29 ID	

1. Refer to [FilmTec™ Design Guidelines for multiple-element systems of 8-inch elements](#) (Form No. 45-D01695-en).
2. Element to fit nominal 8-inch (203-mm) I.D. pressure vessel.
3. Individual elements with iLEC™ endcaps measure 40.5 inches (1,029 mm) in length (B). The net length (A) of the elements when connected is 40.0 inches (1,016 mm).

Operating and Cleaning Limits

Maximum Operating Temperature ^a	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure	600 psig (41 bar)
Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
pH Range	
Continuous Operation ^a	3 - 10
Short-Term Cleaning (30 min.) ^b	1 - 12
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance ^c	< 0.1 ppm

- a. Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).
- b. Refer to [FilmTec™ Cleaning Guidelines](#) (Form No. 45-D01696-en).
- c. Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, DuPont Water Solutions recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to [Dechlorinating Feedwater](#) (Form No. 45-D01569-en) for more information.

Additional Important Information

- Before use or storage, review these additional resources for important information:
- [Usage Guidelines for FilmTec™ 8" Elements](#) (Form No. 45-D01706-en)
 - [Start-Up Sequence](#) (Form No. 45-D01609-en)

Product Stewardship

DuPont has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with DuPont products—from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

DuPont strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of DuPont products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that DuPont products are not used in ways for which they are not intended or tested. DuPont personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. DuPont product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of DuPont products. Current safety data sheets are available from DuPont.

Please be aware of the following:

- The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.

Regulatory Note

This product may be subject to drinking water application restrictions in some countries; please check the application status before use and sale.

Have a question? Contact us at:

www.dupont.com/water/contact-us

All information set forth herein is for informational purposes only. This information is general information and may differ from that based on actual conditions. Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where DuPont is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Please note that physical properties may vary depending on certain conditions and while operating conditions stated in this document are intended to lengthen product lifespan and/or improve product performance, it will ultimately depend on actual circumstances and is in no event a guarantee of achieving any specific results. DuPont assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "DuPont" or the "Company" mean the DuPont legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED. No freedom from infringement of any patent or trademark owned by DuPont or others is to be inferred.

© 2022 DuPont. DuPont™, the DuPont Oval Logo, and all trademarks and service marks denoted with ™, SM or ® are owned by affiliates of DuPont de Nemours Inc., unless otherwise noted.





Product Data Sheet

FilmTec™ SW30HR-380 Element

High Rejection, Seawater Reverse Osmosis Membranes

Description

FilmTec™ SW30HR-380 Elements are a premium-grade seawater reverse osmosis element featuring both high active area and high salt rejection to offer the best long-term economics for seawater desalination systems.

- FilmTec™ SW30HR-380 delivers high boron rejection to help customers meet World Health Organization (WHO) and other drinking water standards.
- FilmTec™ SW30HR-380 Elements deliver high performance over their operating lifetime without the use of oxidative posttreatments like many competitive products. This is one reason why FilmTec™ Elements are more durable and may be cleaned more effectively over a wider pH range than other RO elements.
- Automated, precision fabrication with a greater number of shorter membrane leaves, reduces the overall effect of fouling and maximizes membrane efficiency.

Product Type

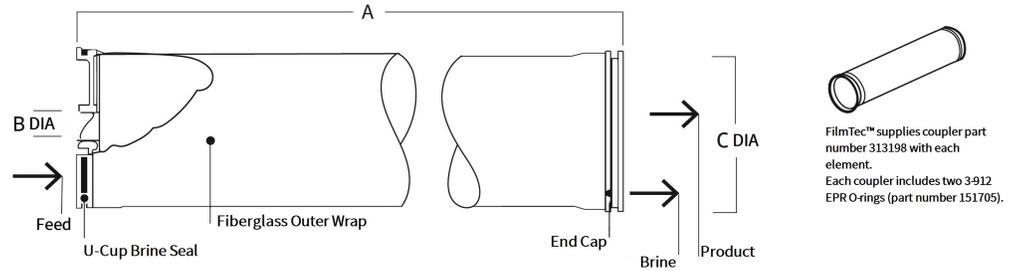
Spiral-wound element with polyamide thin-film composite membrane

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness	Permeate Flowrate		Typical Stabilized Salt Rejection
	(ft ²)	(m ²)	(mil)	(gpd)	(m ³ /d)	(%)
SW30HR-380	380	35	28	6,900	24.6	99.7

1. Permeate flow and salt rejection based on the following test conditions: 32,000 ppm NaCl, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary ± 15%.
3. Minimum Salt Rejection is 99.65%.
4. Stabilized salt rejection is generally achieved within 24 – 48 hours of continuous use, depending upon feedwater characteristics and operating conditions.
5. Product specifications may vary slightly as improvements are implemented.

Element Dimensions



FilmTec™ Element	Dimensions – inches (mm)				1 inch = 25.4 mm	
	A		B		C	
	(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
SW30HR-380	40.0	1,016	1.125 ID	29 ID	7.9	201

1. Refer to [FilmTec™ Design Guidelines for multiple-element systems of 8-inch elements](#) (Form No. 45-D01695-en).
2. Element to fit nominal 8-inch (203-mm) I.D. pressure vessel.

Operating and Cleaning Limits

Maximum Operating Temperature ^{a, b}	113°F (45°C)
Maximum Operating Pressure ^b	1,000 psig (69 bar)
Maximum Element Pressure Drop	15 psig (1.0 bar)
pH Range	
Continuous Operation ^a	2 – 11
Short-term Cleaning (30 min) ^c	1 – 13
Maximum Feed Silt Density Index (SDI)	SDI 5
Free Chlorine Tolerance ^d	< 0.1 ppm

- a. Maximum temperature for continuous operation above pH 10 is 95°F (35°C).
- b. Consult your DuPont representative for advice on applications above 95°F (35°C). Refer to [FilmTec™ Elements Operating Limits](#) (Form No. 45-D00691-en) for warranty-voiding conditions and additional information.
- c. Refer to guidelines in [FilmTec™ Cleaning Guidelines](#) (Form No. 45-D01696-en) for more information.
- d. Under certain conditions, the presence of free chlorine and other oxidizing agents will cause premature membrane failure. Since oxidation damage is not covered under warranty, DuPont Water Solutions recommends removing residual free chlorine by pretreatment prior to membrane exposure. Please refer to [Dechlorinating Feedwater](#) (Form No. 45-D01569-en) for more information.

Additional Important Information

- Before use or storage, review these additional resources for important information:
- [Usage Guidelines for FilmTec™ 8" Elements](#) (Form No. 45-D01706-en)
 - [Start-Up Sequence](#) (Form No. 45-D01609-en)
 - [Storage and Shipping of New FilmTec™ Elements](#) (Form No. 45-D01633-en)

Product Stewardship

DuPont has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our product stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our product stewardship program rests with each and every individual involved with DuPont products—from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

Customer Notice

DuPont strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of DuPont products from the standpoint of human health and environmental quality to ensure that DuPont products are not used in ways for which they are not intended or tested. DuPont personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. DuPont product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of DuPont products. Current safety data sheets are available from DuPont.

Please be aware of the following:

- The use of this product in and of itself does not necessarily guarantee the removal of cysts and pathogens from water. Effective cyst and pathogen reduction is dependent on the complete system design and on the operation and maintenance of the system.
- Permeate obtained from the first hour of operation should be discarded.

Regulatory Note

This product may be subject to drinking water application restrictions in some countries; please check the application status before use and sale.

Have a question? Contact us at:

www.dupont.com/water/contact-us

All information set forth herein is for informational purposes only. This information is general information and may differ from that based on actual conditions. Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where DuPont is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Please note that physical properties may vary depending on certain conditions and while operating conditions stated in this document are intended to lengthen product lifespan and/or improve product performance, it will ultimately depend on actual circumstances and is in no event a guarantee of achieving any specific results. DuPont assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "DuPont" or the "Company" mean the DuPont legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED. No freedom from infringement of any patent or trademark owned by DuPont or others is to be inferred.

© 2022 DuPont. DuPont™, the DuPont Oval Logo, and all trademarks and service marks denoted with ™, ℠ or ® are owned by affiliates of DuPont de Nemours Inc., unless otherwise noted.



ANEXO III. Ficha de seguridad P3 Ultrasil 115.

P3-ultrasil 115

SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificador del producto

Nombre del producto : P3-ultrasil 115
Código del producto : 114602E
Uso de la sustancia/mezcla : Detergente
Tipo de sustancia : Mezcla

Reservado exclusivamente a usuarios profesionales.

Información del producto en dilución : No hay disponible información en dilución.

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Producto de limpieza en Procesos alimentarios; Limpieza in-situ
Restricciones recomendadas del uso : Reservado para uso industrial y profesional.

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : ECOLAB HISPANO-PORTUGUESA S.L.
Avenida Del Baix Llobregat 3-5
Sant Joan Despí, Barcelona España 08970
902 475 480
atencion.cliente.es@ecolab.com

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de emergencia : +34 93 475 89 65 (L-J 8-13h, 14-17h; V 8-15h) Servicio 24/7 para emergencias químicas a través de este número
Número de teléfono del Centre de Informació de Envenenamiento : +34 91 562 04 20(24h/365 días), Únicamente para respuesta sanitaria en caso de urgencia
Fecha de emisión/revisión : 19.11.2014
Versión : 1.2

SECCIÓN 2: Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Clasificación (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Corrosión cutáneas , Categoría 1A H314

Clasificación (67/548/CEE, 1999/45/CE)

C; CORROSIVO R35

El texto completo de las frases R mencionadas en esta Sección, se indica en la Sección 16.
Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

P3-ultrasil 115

2.2 Elementos de la etiqueta

Etiquetado (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Pictogramas de peligro :



Palabra de advertencia : Peligro

Indicación de peligro : H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia :

Prevención:
P280 Llevar guantes/ gafas/ máscara de protección.

Intervención:
P303 + P361 + P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o ducharse.
P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando.
P310 Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA o a un médico.

Componentes determinantes del peligro para el etiquetado:

Hidróxido de potasio
hidróxido de sodio

2.3 Otros peligros

Ninguna conocida.

SECCIÓN 3: Composición/información sobre los componentes

3.2 Mezclas

Componentes peligrosos

Nombre químico	No. CAS No. CE REACH No.	Clasificación (67/548/CEE)	Clasificación (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)	Concentración [%]
Hidróxido de potasio	1310-58-3 215-181-3 01-2119487136-33	C; R22-R35	Toxicidad aguda Categoría 4; H302 Corrosión cutáneas Categoría 1A; H314	>= 10 - < 20
hidróxido de sodio	1310-73-2 215-185-5 01-2119457892-27	C; R35	Corrosión cutáneas Categoría 1A; H314	>= 10 - < 20
Etilendiaminotetraacetato	64-02-8 200-573-9	Xn; R22-R41	La clasificación se ha modificado debido a los datos	>= 5 - < 10

P3-ultrasil 115

	01-2119486762-27		de prueba.Toxicidad agudaCategoría 4; H302 Lesiones oculares gravesCategoría 1; H318	
Alquilsulfonato secundario	68188-18-1 269-144-1 01-2119517577-32	Xi; R22- R36/38	Toxicidad agudaCategoría 4; H302 Irritación cutáneasCategoría 2; H315 Irritación ocularCategoría 2; H319	>= 0.5 - < 1

El texto completo de las frases R mencionadas en esta Sección, se indica en la Sección 16.
Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

SECCIÓN 4: Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

- En caso de contacto con los ojos : Enjuagar inmediatamente con abundante agua, también debajo de los párpados, al menos durante 15 minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando. Consultar inmediatamente un médico.
- En caso de contacto con la piel : Lavar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos. Utilícese un jabón neutro, si está disponible. Lavar la ropa antes de reutilizarla. Limpiar a fondo los zapatos antes de reutilizarlos. Consultar inmediatamente un médico.
- Si es tragado : Enjuague la boca con agua. No provocar el vómito Nunca debe administrarse nada por la boca a una persona inconsciente. Consultar inmediatamente un médico.
- Si es inhalado : Llevar al aire libre. Tratar sintomáticamente. Consultar un médico si los síntomas aparecen.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Consulte la sección 11 para obtener información más detallada sobre los efectos en la salud y sus síntomas.

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Tratamiento : Tratar sintomáticamente.

SECCIÓN 5: Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

- Medios de extinción apropiados : Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores.
- Medios de extinción no apropiados : Ninguna conocida.

Anexo IV. Ficha de seguridad NaOH.

Ficha de Datos de Seguridad
Según Reglamento (CE) 1907/2006



1687 Sodio Hidróxido lentejas

1. Identificación de la sustancia/preparado y de la sociedad o empresa

1.1 Identificación de la sustancia o del preparado

Denominación:
Sodio Hidróxido lentejas

Sinónimo:
Sosa Cáustica

Nº de Registro REACH: 01-2119457892-27-XXXX

1.2 Uso de la sustancia o preparado:

Usos: para usos de laboratorio, análisis, investigación y química fina.

1.3 Identificación de la sociedad o empresa:

PANREAC QUIMICA S.L.U.
C/Garraf 2
Polígono Pla de la Bruguera
E-08211 Castellar del Vallès
(Barcelona) España
Tel. (+34) 937 489 400
e-mail: product.safety@panreac.com

1.4 Teléfono de emergencia:

Número único de teléfono para llamadas de urgencia: 112 (UE)
Tel.: (+34) 937 489 499

2. Identificación de los peligros

Clasificación de la sustancia o de la mezcla.

Clasificación Reglamento (CE) nº 1272/2008.

Corr. cut. 1A

Pictogramas de peligrosidad



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H314 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves.

Consejos de prudencia

P260 No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol.
P264 Lavarse...concienzudamente tras la manipulación.
P280 Llevar guantes/prendas/gafas/máscara de protección.
P301+P330+P331 EN CASO DE INGESTIÓN: Enjuagarse la boca. NO provocar el vómito.
P303+P361+P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitarse inmediatamente las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua o

ducharse.

P501 Eliminar el contenido/el recipiente segun Directive 94/62/CE o 2008/98/CE.

Clasificación (67/548/CEE o 1999/45/CE).

C Corrosivo

R35

Para más información de las Frases R mencionadas en este epígrafe, vea epígrafe 16.

3. Composición/Información de los componentes

Denominación: Sodio Hidróxido lentejas

Fórmula: NaOH M.= 40,00 CAS [1310-73-2]

Número CE (EINECS): 215-185-5

Número de índice CE: 011-002-00-6

Nº de Registro REACH: 01-2119457892-27-XXXX

4. Primeros auxilios

4.1 Indicaciones generales:

En caso de pérdida del conocimiento nunca dar a beber ni provocar el vómito.

4.2 Inhalación:

Trasladar a la persona al aire libre. En caso de que persista el malestar, pedir atención médica.

4.3 Contacto con la piel:

Lavar abundantemente con agua. Quitarse las ropas contaminadas. En caso de irritación, pedir atención médica.

4.4 Ojos:

Lavar con agua abundante (mínimo durante 15 minutos), manteniendo los párpados abiertos. Pedir inmediatamente atención médica.

4.5 Ingestión:

Beber agua abundante. Evitar el vómito (existe riesgo de perforación). Pedir inmediatamente atención médica. No neutralizar.

5. Medidas de lucha contra incendio

5.1 Medios de extinción adecuados:

Dióxido de carbono (CO₂). Polvo seco. Cubrir con tierra o arena secas.

5.2 Medios de extinción que NO deben utilizarse:

No se conocen

5.3 Riesgos especiales:

Incombustible.

5.4 Equipos de protección:

Ropa y calzado adecuados.

6. Medidas a tomar en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones individuales:

No inhalar el polvo. Evitar el contacto con la piel, los ojos y la ropa.

6.2 Precauciones para la protección del medio ambiente:

Prevenir la contaminación del suelo, aguas y desagües.

PRESUPUESTO

ÍNDICE DE PRESUPUESTO

1. Introducción	1
2. Mano de obra.....	1
3. Materiales y equipos	1
4. Equipos auxiliares.....	4
5. Presupuesto general.....	4

ÍNDICE DE TABLAS PRESUPUESTO

1. <i>Tabla 1. Coste de la mano de obra necesaria para el diseño.</i>	1
2. <i>Tabla 2. Coste de las membranas.</i>	1
3. <i>Tabla 3. Coste de las tuberías.</i>	2
4. <i>Tabla 4. Coste de los accesorios de las tuberías.</i>	3
5. <i>Tabla 5. Coste de las bombas.</i>	3
6. <i>Tabla 6. Coste de los depósitos.</i>	4
7. <i>Tabla 7. Coste de los elementos auxiliares.</i>	4
8. <i>Tabla 8. Presupuesto general.</i>	5

1. Introducción

En este documento se recoge de manera detallada el presupuesto para la inversión inicial necesaria para instalar la planta de purificación y concentración de polifenoles. No se tienen en cuenta los gastos de parcela ni de acondicionamiento del terreno, ya que se instalará en la misma almazara y se considera que tiene las condiciones necesarias.

Se pueden diferenciar los siguientes apartados:

- Cuadro de precios nº1: mano de obra
- Cuadro de precios nº2: materiales y equipos
- Cuadro de precios nº3: equipos auxiliares
- Presupuesto general

2. Mano de obra

Cuadro de precios nº1:

En la *Tabla 1* se muestra el coste de la mano de obra para el diseño y la instalación de la planta. Puede observarse el personal necesario, el salario bruto al mes, la cantidad de horas semanales y el coste total anual.

Tabla 1. Coste de la mano de obra necesaria para el diseño. Fuente: Elaboración propia.

Mano de obra	Número de empleados	Salario bruto (€/mes)	Precio (€/h)	Cantidad (h/año)	Coste total (€/año)
Operario de planta	1	1.642,58	10,26	720	7.387,2
Ingeniero químico	1	2.417,66	15,11	360	5.439,6
TOTAL					12.826,8

3. Materiales y equipos

Cuadro de precios nº2:

En las Tablas 2, 3, 4, 5 y 6 se recogen respectivamente el coste de las membranas, el coste de las tuberías, el coste de los accesorios de las tuberías, el coste de las bombas y el coste de los depósitos.

Tabla 2. Coste de las membranas. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Cantidad (ud.)	Coste unitario (€/ud.)	Coste total (€)
Membrana NF270-400/34i	4	1.163,62	4.654,48
Membrana SW30HR-380	22	1.272,53	27.995,66
Tubo de presión NF	2	5.600,34	11.200,68
Tubo de presión OI	3	14.868,64	44.605,92
TOTAL			88.456,74

Tabla 3. Coste de las tuberías. Fuente: Elaboración propia.

Tuberías	Cantidad (m)	Coste unitario (€/m)	Coste total (€)
Tubería INOX 316 L DN 65	35	19,15	670,25
Tubería INOX 316 L DN 40	19	11,78	223,82
Tubería INOX 316 L DN 32	32	9,43	301,76
Tubería INOX 316 L DN 20	12	6,24	74,88
Tubería INOX 316 L DN 25	8	7,48	59,84
Tubería INOX 316 L DN 50	26	14,73	382,98
Tubería INOX 316 L DN 200	55	81,24	4.468,2
Tubería INOX 316 L DN 150	40	58,95	2.358
Tubería INOX 316 L DN 250	17	112,47	1.911,99
		TOTAL	10.451,72

Tabla 4. Coste de los accesorios de las tuberías. Fuente: Elaboración propia.

Accesorios	Cantidad (Ud.)	Coste unitario (€/ud.)	Coste total (€)
Codo 90° INOX 316 L DN 65	11	20,48	225,28
Codo 90° INOX 316 L DN 40	10	8,44	84,4
Codo 90° INOX 316 L DN 32	11	6,80	74,8
Codo 90° INOX 316 L DN 25	2	5,73	11,46
Codo 90° INOX 316 L DN 50	11	10,31	113,41
Codo 90° INOX 316 L DN 200	17	247	4.199
Codo 90° INOX 316 L DN 150	8	193	1.544
Codo 90° INOX 316 L DN 20	2	4,95	9,9
Codo 90° INOX 316 L DN 250	9	299	2691
Codo 90° INOX 316 L DN 19	2	4,8	9,6
Unión en T INOX 316 L DN 65	2	13,35	26,7
Unión en T INOX 316 L DN 200	6	148,27	889,62
Unión en T INOX 316 L DN 40	1	9,68	9,68
Unión en T INOX 316 L DN 32	3	7,80	23,4
Unión en T INOX 316 L DN 50	2	9,97	19,94
Unión en T INOX 316 L DN 150	5	69,38	346,9
Unión en T INOX 316 L DN 250	1	218,49	218,49
		TOTAL	10.497,58

Tabla 5. Coste de las bombas. Fuente: Elaboración propia.

Bombas	Unidades (ud.)	Coste unitario (€/ud.)	Coste total (€)
NB 100-200/195	2	5.353	10.706
CR 20-14	1	13.861	13.861
NB 32-125/130	1	2.487	2.487
NB 65-125/137	1	4.842	4.842
NB 125-200/219	1	10.886	10.886
NB 32-125.1/100	1	2.478	2.478
VS 19/58	1	13.180,25	13.180,25
NB 100-200/211	1	6.061	6.061
		TOTAL	64.501,25

Tabla 6. Coste de los depósitos. Fuente: Elaboración propia.

Depósitos	Unidades (ud.)	Coste unitario (€/ud.)	Coste total (€)
PRFV 1 m ³ Ø1,12 h1,4	1	550,5	550,5
PRFV 3 m ³ Ø1,74 h1,5	1	954,9	954,9
PRFV 4 m ³ Ø1,6 h2,2	1	1.173,78	1.173,78
PRFV 5 m ³ Ø2 h2,45	1	1.234,78	1.234,78
PRFV 15 m ³ Ø2,5 h3,35	1	2.601,25	2.601,25
PRFV 20 m ³ Ø2,5 h5,05	2	3.468,33	6936,66
PRFV 25 m ³ Ø2,5 h6,06	1	4.335,4	4.335,4
PRFV 90 m ³ Ø4 h7,55	1	15.607,50	15.607,50
PRFV 100 m ³ Ø4 h8,35	2	17.341,67	34.683,34
PRFV 150 m ³ Ø4 h12,32	1	26.012,5	26.012,5
		TOTAL	94.090,61

4. Equipos auxiliares

Cuadro de precios nº3:

En la *Tabla 7* se recogen los precios de los elementos auxiliares necesarios para el diseño de la instalación.

Tabla 7. Coste de los elementos auxiliares. Fuente: Elaboración propia.

Elemento	Unidades (ud.)	Coste unitario (€/ud.)	Coste total (€)
Válvula de bola DN65	3	382	1146
Válvula de bola DN50	3	268	804
Válvula de bola DN32	1	197	197
Válvula de bola DN200	11	2.787	30657
Válvula de bola DN150	6	1.586	9516
Válvula de bola DN250	4	3.965	15860
Válvula de bola DN19	2	129	258
Manómetro	10	69,69	696,9
Caudalímetro	10	1.322,53	13.225,3
Indicador de nivel	24	749	17.976
		TOTAL	90.336,2

5. Presupuesto general

Finalmente, en la *Tabla 8* se encuentra el presupuesto general del proyecto.

Tabla 8. Presupuesto general. Fuente: Elaboración propia

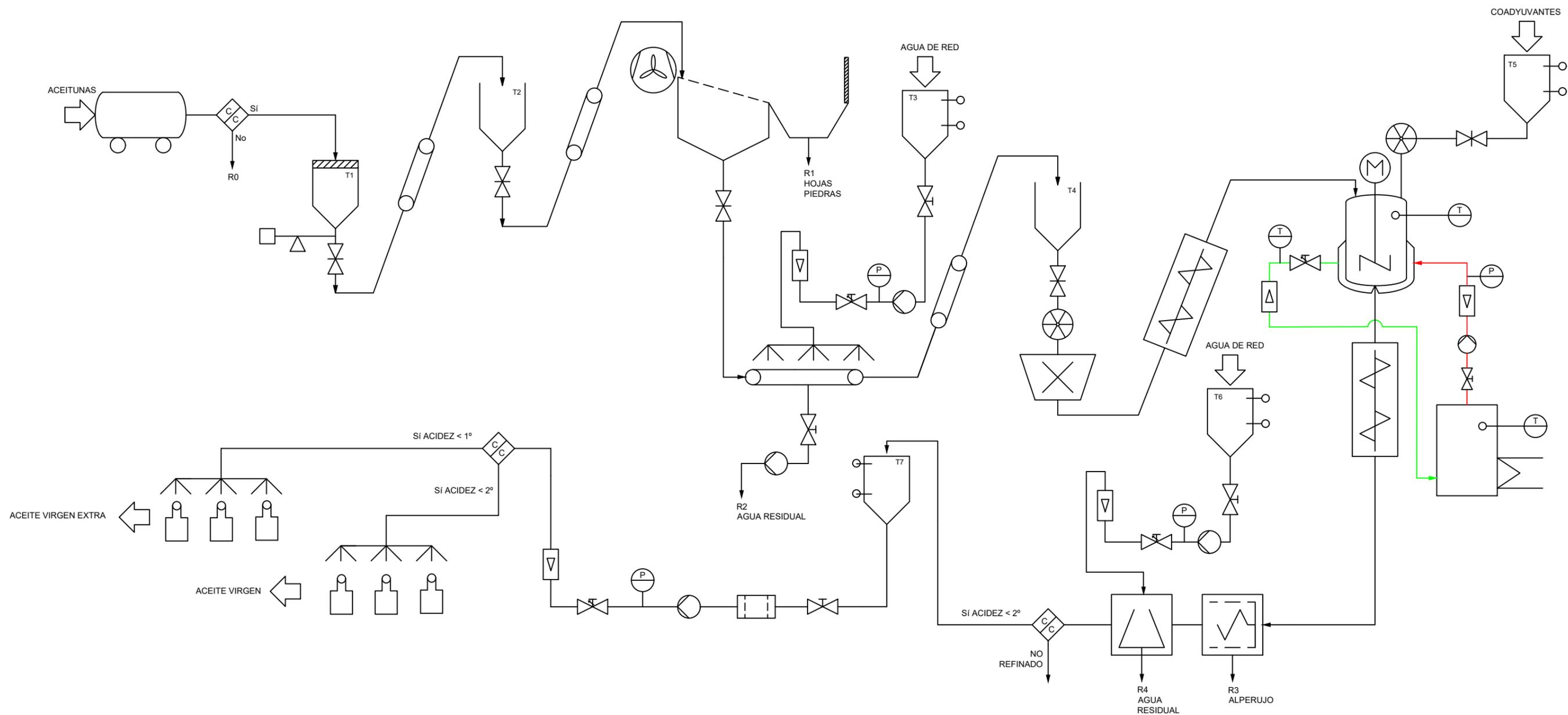
Concepto	Coste
1- Mano de obra	12.826,8
2- Membranas	88.456,74
3- Tuberías	10.451,72
4- Accesorios tuberías	10.497,58
5- Bombas	64.501,25
6- Depósitos	94.090,61
7- Elementos auxiliares	90.336,2
TOTAL	371.160,9
Sistema de control de procesos (15%)	55.674,135
Instalación eléctrica (10%)	37.116,09
Presupuesto de ejecución de material (PEM)	463.951,125
Gastos generales (13%)	60.313,65
Beneficio industrial (6%)	27.837,07
Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)	552.101,85
IVA (21%)	115.941,39
PEC+IVA	668.043,24
Honorarios del proyectista (4%)	26.721,73
PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	694.764,97

El coste de la inversión inicial para la instalación de la planta de purificación y concentración de polifenoles es de **694.764,97€: seiscientos noventa y cuatro mil, setecientos sesenta y cuatro con noventa y siete céntimos.**

PLANOS

ÍNDICE DE LOS PLANOS

1. Diagrama de flujo del proceso de producción del aceite de oliva mediante la centrifugación en 2 fases.....	1
2. Diagrama de flujo de la etapa de nanofiltración.....	2
3. Diagrama de flujo de la etapa de nanofiltración con diferenciación entre tramos de tuberías.....	3
4. Diagrama de flujo de la etapa de ósmosis inversa.....	4
5. Diagrama de flujo de la etapa de ósmosis inversa con diferenciación entre tramos de tuberías.....	5



LEYENDA

T1: Tolva de recepción		Bomba		Tamiz cribado		Ventilador		Mezclador		Filtro de líquido
T2: Tanque de almacenamiento de aceitunas		Caudalímetro		Control de calidad		Válvula de líquidos		Tornillo sin fin		Envasado
T3: Tanque de almacenamiento de agua		Indicador de nivel		Dosificador sólidos		Válvula de sólidos		Centrifuga horizontal		Agitador
T4: Tanque de almacenamiento de aceitunas		Recipiente con calentador eléctrico externo		Trituradora		Válvula de regulación		Centrifuga vertical		Termómetro
T5: Tanque de almacenamiento de coadyuvantes		Condensador		Destilador al vacío		Botella		Tamiz		Manómetro
T6: Tanque de almacenamiento de agua		Intercambiador de calor		Balanza de sólidos		Cinta transportadora		Motor eléctrico		ph-metro
T7: Tanque de almacenamiento de aceite										

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



Proyecto: Diseño de una planta que combina nanofiltración y ósmosis inversa para purificar y concentrar compuestos fenólicos procedentes de extractos hidroalcohólicos del alperujo con un caudal de 100m³/día

Plano: Diagrama de flujo del proceso de producción del aceite de oliva mediante la centrifugación en 2 fases

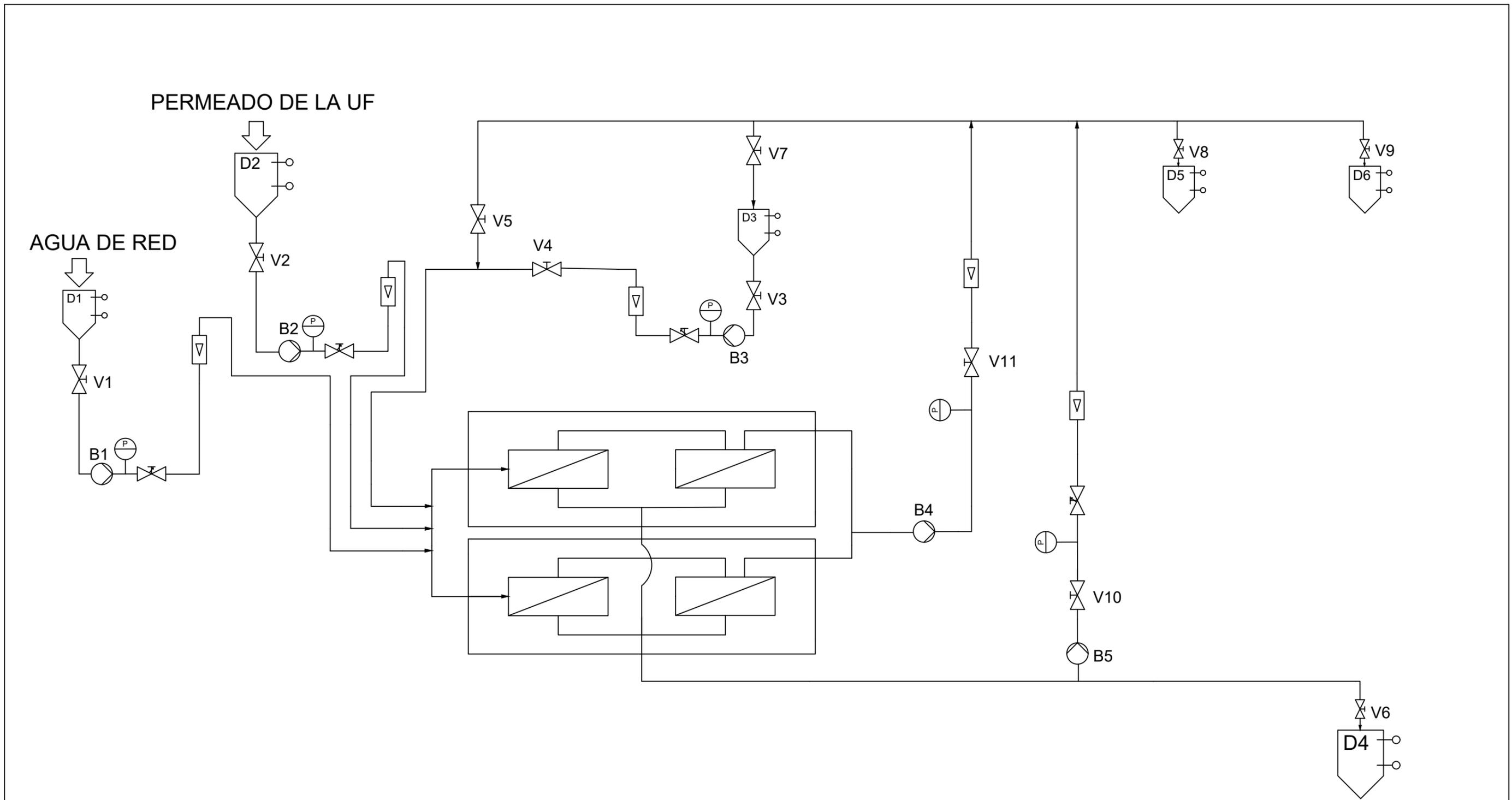
Autor: Estefanía Casañ Liberos

Fecha: Julio 2023

Escala:

Nº Plano:

1



LEYENDA

D1: Depósito de almacenamiento de agua de red
 D2: Depósito de almacenamiento del permeado de la UF
 D3: Depósito de almacenamiento del producto de limpieza
 D5: Depósito de almacenamiento del rechazo de la NF
 D6: Depósito de almacenamiento del rechazo del agua residual de limpieza
 D4: Depósito de almacenamiento del permeado de la NF

	Membrana de NF		Válvula de líquidos
			Válvula de regulación
			Bomba
			Caudalímetro
			Manómetro
			Indicador de nivel

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



Proyecto: Diseño de una planta que combina nanofiltración y ósmosis inversa para purificar y concentrar compuestos fenólicos procedentes de extractos hidroalcohólicos del alperujo con un caudal de 100m³/día

Plano: Diagrama de flujo de la etapa de nanofiltración

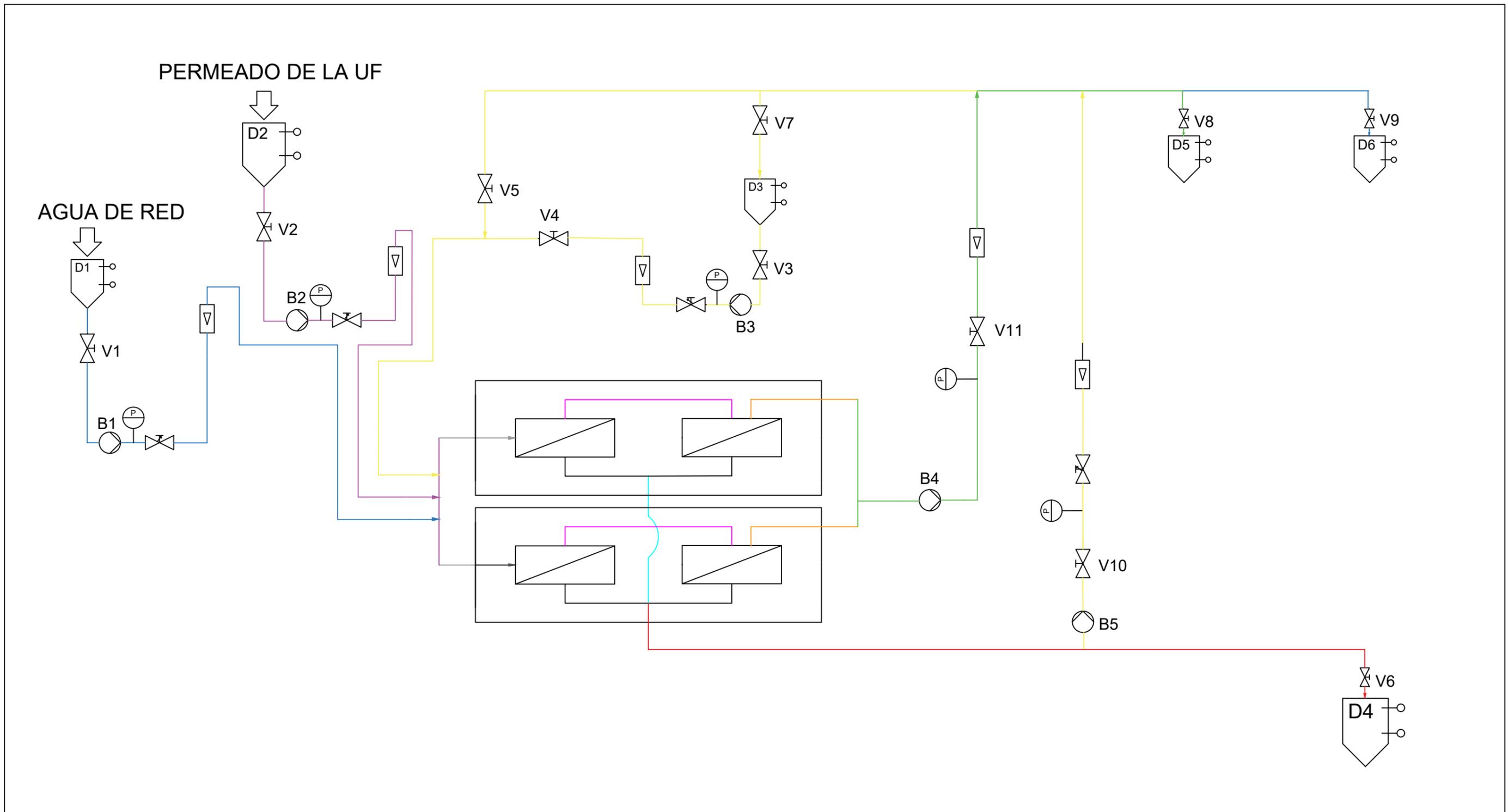
Autor: Estefanía Casañ Liberos

Fecha: Julio 2023

Escala:

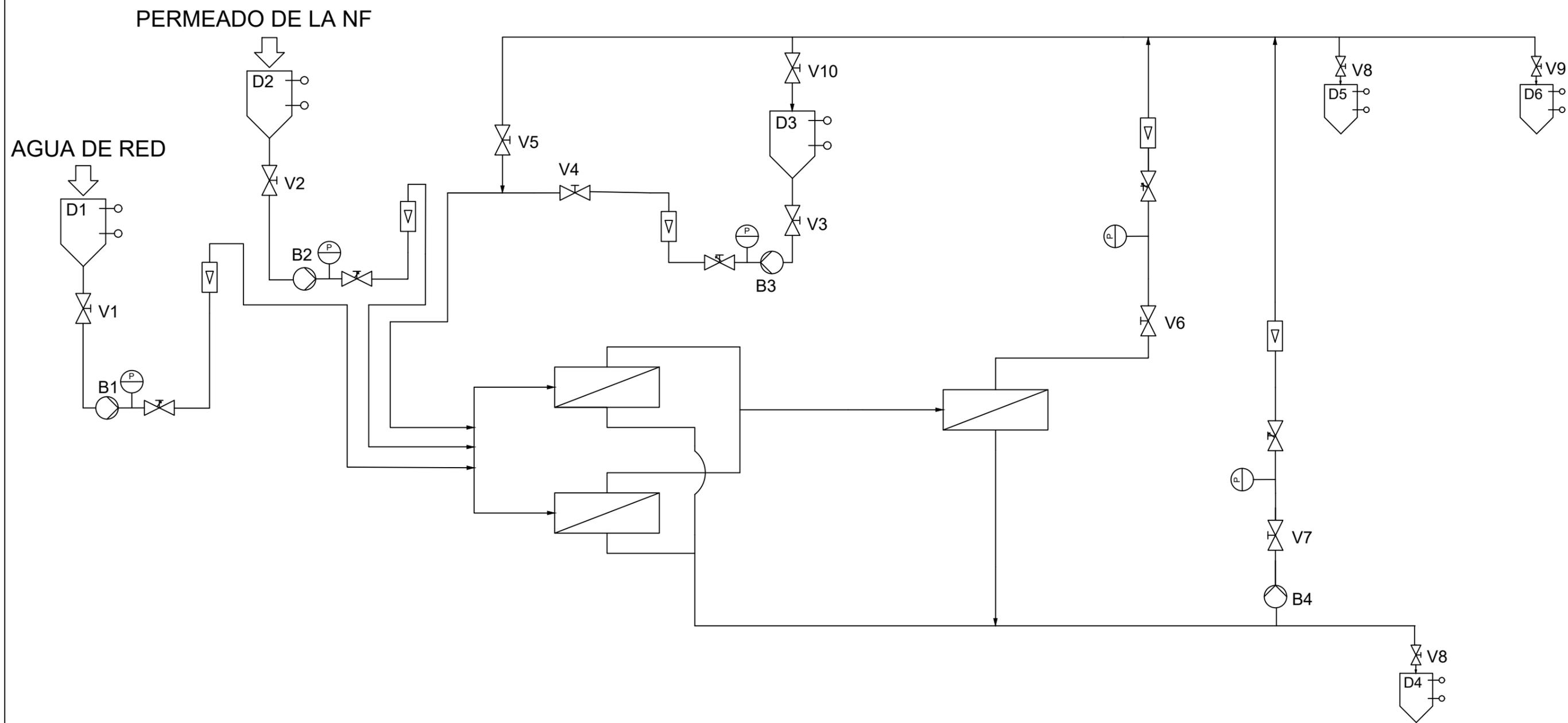
Nº Plano:

2



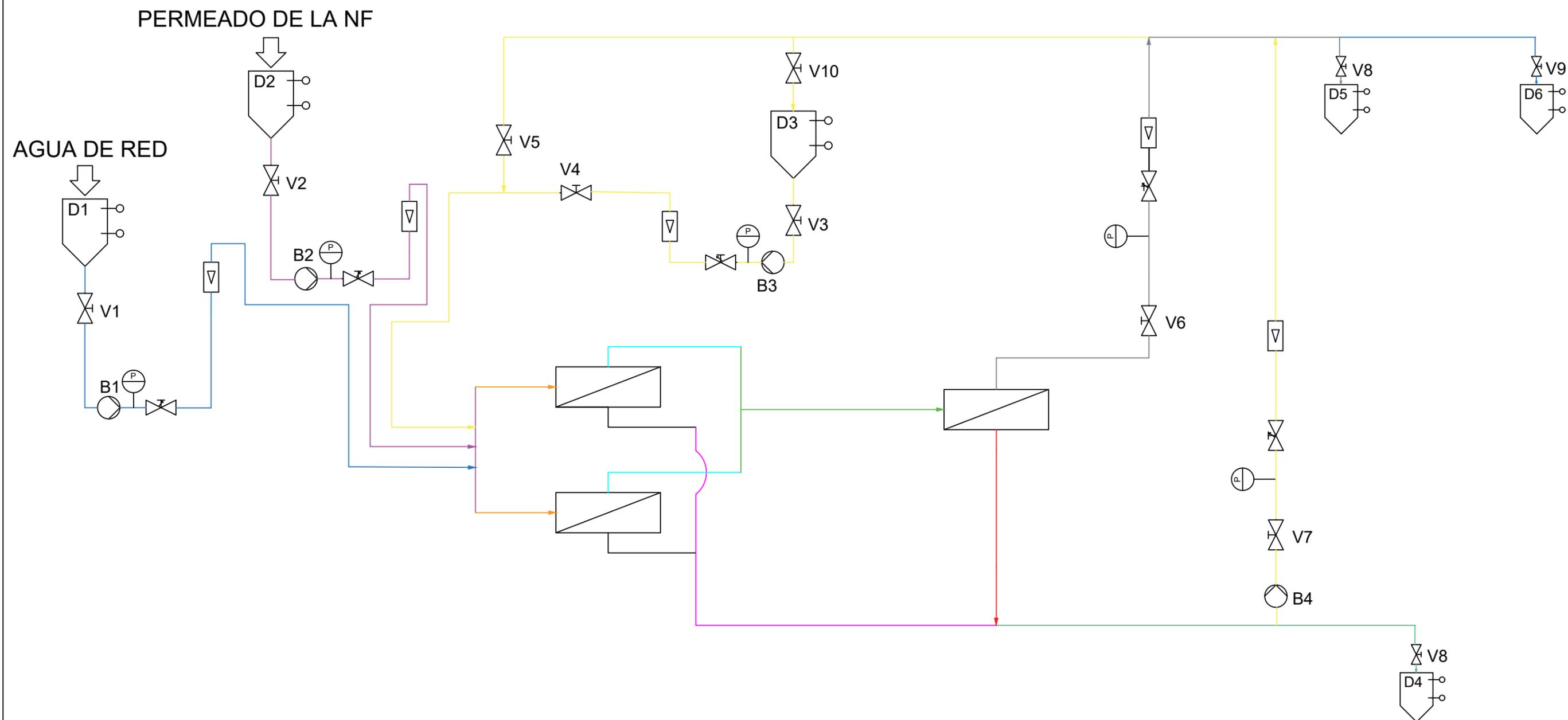
LEYENDA

<p>Tramo 1 (Blue line)</p> <p>Tramo 2 (Purple line)</p> <p>Tramo 3 (Yellow line)</p> <p>Tramo 4 (Red line)</p> <p>Tramo 5 (Green line)</p> <p>Tramo 6 (Magenta line)</p> <p>Tramo 7 (Black line)</p> <p>Tramo 8 (Cyan line)</p> <p>Tramo 9 (Orange line)</p> <p>Tramo 10 (Grey line)</p>	<p>D1: Depósito de almacenamiento de agua de red</p> <p>D2: Depósito de almacenamiento del permeado de la UF</p> <p>D3: Depósito de almacenamiento del producto de limpieza</p> <p>D4: Depósito de almacenamiento del permeado de la NF</p> <p>D5: Depósito de almacenamiento del rechazo de la NF</p> <p>D6: Depósito de almacenamiento del rechazo del agua residual de limpieza</p>	<p>Membrana de NF</p> <p>Válvula de líquidos</p> <p>Válvula de regulación</p> <p>Bomba</p> <p>Caudalímetro</p> <p>Manómetro</p> <p>Indicador de nivel</p>
--	--	---



LEYENDA

D1: Depósito de agua de red		Membrana de OI		Válvula de líquidos
D2: Depósito de almacenamiento del permeado de la NF				Válvula de regulación
D3: Depósito de almacenamiento del producto de limpieza				Bomba
D4: Depósito de almacenamiento del permeado de la OI				Caudalímetro
D5: Depósito de almacenamiento del rechazo de la OI				Manómetro
D6: Depósito de almacenamiento del rechazo del agua residual de limpieza				Indicador de nivel



LEYENDA

- Tramo 1
- Tramo 2
- Tramo 3
- Tramo 4
- Tramo 5
- Tramo 6

- Tramo 7
- Tramo 8
- Tramo 9
- Tramo 10
- Tramo 11

- D1: Depósito de agua de red
- D2: Depósito de almacenamiento del permeado de la NF
- D3: Depósito de almacenamiento del producto de limpieza
- D4: Depósito de almacenamiento del permeado de la OI
- D5: Depósito de almacenamiento del rechazo de la OI
- D6: Depósito de almacenamiento del rechazo del agua residual de limpieza

	Membrana de OI		Válvula de líquidos
			Válvula de regulación
			Bomba
			Caudalímetro
			Manómetro
			Indicador de nivel

TRABAJO FINAL DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA



Proyecto: Diseño de una planta que combina nanofiltración y ósmosis inversa para purificar y concentrar compuestos fenólicos procedentes de extractos hidroalcohólicos del alperujo con un caudal de 100m³/día

Plano: Diagrama de flujo de la etapa de ósmosis inversa con diferenciación entre tamos de tuberías

Autor: Estefanía Casañ Liberos

Fecha: Julio 2023

Escala:

Nº Plano:

5