



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis
inversa para concentrar una corriente enriquecida en
compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de
extractos hidroalcohólicos de alperujo

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Aldegheri , Fausto

Tutor/a: Vincent Vela, Maria Cinta

Cotutor/a: Alvarez Blanco, Silvia

Cotutor/a: Sánchez Arévalo, Carmen

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

RESUMEN

En el proceso de producción del aceite de oliva virgen, uno de los métodos más empleados en España es la centrifugación de 2 fases, ya que tiene un menor consumo de agua y energía, y favorece la estabilidad química del aceite de oliva producido. Sin embargo, en este proceso se genera el alperujo, un residuo semisólido con un alto contenido de compuestos fenólicos, que son productos de alto valor añadido en las industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas por sus propiedades antioxidantes y beneficios en la salud humana. Al mismo tiempo, la recuperación de dichos compuestos elimina el carácter fitotóxico del alperujo, lo cual soluciona un problema en el tratamiento de este residuo y reduce su impacto medioambiental.

De esta manera, se propone un estudio del proceso de recuperación de los compuestos fenólicos presentes en el alperujo mediante tecnología de separación por membranas. Esto implica una extracción sólido-líquido asistida por ultrasonidos (UAE) empleando como disolvente etanol/agua 50:50 (v/v), seguida de etapas consecutivas de ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, para purificar, fraccionar y concentrar los polifenoles extraídos.

En el presente trabajo, se realiza también un diseño de la planta industrial de ósmosis inversa, a partir de datos experimentales propios y estudios previos realizados para el tratamiento de 120 m³ de extracto por día. La membrana seleccionada para este proceso es FilmTec™ NF90-400/34i (Dupont) y se selecciona un factor de reducción de volumen (VRF) de 10, asumiendo una densidad de flujo de permeado constante de 15.3 L·h⁻¹·m⁻². Se alimenta a la planta de ósmosis inversa un volumen diario de 76.8 m³. El área total de membrana requerida es de 211.76 m², y se emplean 6 módulos en serie en un tubo de presión. En el rechazo se obtiene una corriente enriquecida en compuestos fenólicos de 1039.29 mg/L, mientras que en el permeado la concentración es de 26.59 mg/L. Al mismo tiempo, se realiza un estudio económico para analizar la viabilidad económica, requiriendo una inversión inicial de 1.651.974,10 €. Los costes totales de explotación son de 5.483.544,89 €, los ingresos totales de 6.580.825,85 € y el beneficio económico neto del proyecto es de 866.851,96 € al año. A partir de estos valores, el período de recuperación de la inversión inicial es de 2 años.

Palabras Clave: compuestos fenólicos, alperujo, separación por membranas, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa

RESUM

En el procés de producció de l'oli d'oliva verge, un dels mètodes més emprats a Espanya és la centrifugació de 2 fases, ja que té un menor consum d'aigua i energia, i afavoreix l'estabilitat química de l'oli d'oliva produït. No obstant això, en aquest procés es genera l'alperuix, un residu semisòlid amb un alt contingut de compostos fenòlics, que resulten ser productes de gran valor afegit en les indústries alimentàries, cosmètiques i farmacèutiques per les seues propietats antioxidants i beneficis per a la salut humana. Al mateix temps, la recuperació d'aquests compostos elimina el caràcter fitotòxic de l'alperuix, la qual cosa soluciona un problema en el tractament d'aquest residu i redueix el seu impacte mediambiental.

D'aquesta manera, es proposa un estudi del procés de recuperació dels compostos fenòlics presents en l'alperuix mitjançant tecnologia de separació per membranes. Això implica una extracció sòlid-liquida assistida per ultrasons (UAE) emprant com a solvent etanol/aigua 50:50 (v/v), seguida d'etapes consecutives d'ultrafiltració, nanofiltració i òsmosi inversa, per a purificar, fraccionar i concentrar els polifenols extrets.

En el present treball, es realitza també un disseny de la planta industrial d'òsmosi inversa, a partir de dades experimentals pròpies i estudis previs realitzats per al tractament de 120 m³ d'extracte per dia. La membrana seleccionada per a aquest procés és FilmTec™ NF90-400/34i (Dupont) i es tria un factor de reducció de volum (VRF) de 10, assumint una densitat de flux de permeat constant de 15.3 L·h⁻¹·m⁻². S'alimenta a la planta d'òsmosi inversa un volum diari de 76.8 m³. L'àrea total de membrana requerida és de 211.76 m², i s'utilitzen 6 mòduls en sèrie en un tub de pressió. En el rebuig s'obté un corrent enriquit en compostos fenòlics de 1039.29 mg/L, mentre que en el permeat la concentració és de 26.59 mg/L. Al mateix temps, es realitza un estudi econòmic per a analitzar la viabilitat econòmica, requerint una inversió inicial de 1.651.974,10 €. Els costos totals d'explotació són de 5.483.544,89 €, els ingressos totals de 6.580.825,85 € i el benefici econòmic net del projecte és de 866.851,96 € a l'any. A partir d'aquests valors, el període de recuperació de la inversió inicial es de 2 anys.

Paraules clau: compostos fenòlics, alperuix, separació per membranes, ultrafiltració, nanofiltració, òsmosi inversa

ABSTRACT

In the process of producing extra virgin olive oil, one of the most used methods in Spain is two-phase centrifugation, as it has lower water and energy consumption and promotes the chemical stability of the produced olive oil. However, this process generates olive pomace (or *alperujo*), a semisolid residue with a high content of phenolic compounds, which are high-value products in the food, cosmetic, and pharmaceutical industries due to their antioxidant properties and benefits for human health. At the same time, the recovery of these compounds eliminates the phytotoxic nature of *alperujo*, thus solving a problem in the treatment of this residue and reducing its environmental impact.

Therefore, a study of the recovery process of phenolic compounds in olive pomace using membrane separation technology is proposed. This involves solid-liquid extraction assisted by ultrasound (UAE) using a 50:50 (v/v) ethanol/water solvent, followed by consecutive stages of ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis to purify, fractionate, and concentrate the extracted polyphenols.

In this work, a design of the reverse osmosis industrial plant is also carried out based on the experimental data and previous studies conducted for the treatment of 120 m³ of extract per day. The selected membrane for this process is FilmTec™ NF90-400/34i (Dupont), and a volume reduction factor (VRF) of 10 is selected, assuming a constant permeate flux of 15.3 L·h⁻¹·m⁻². A daily volume of 76.8 m³ is fed into the reverse osmosis plant. The total membrane area required is 211.76 m², and six modules are installed in series in a pressure tube. In the retentate stream, an enriched stream of phenolic compounds with a concentration of 1039.29 mg/L is obtained, while the concentration in the permeate is 26.59 mg/L. At the same time, an economic study is conducted to analyze the economic viability, requiring an initial investment of 1.651.974,10 €. The total operating costs are 5.483.544,89 €, total revenues are 6.580.825,85 €, and the net economic profit of the project is 866.851,96 € per year. Based on these values, the payback period of the initial investment is estimated to be 2 years.

Keywords: phenolic compounds, olive pomace, membrane separation, ultrafiltration, nanofiltration, reverse osmosis

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto
- Planos

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN	1
1.1. Justificación académica	2
1.2. Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	2
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	4
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	5
3.1. La industria del aceite de oliva	5
3.1.1. Sector olivícola en España	5
3.1.2. Materia prima	6
3.1.3. Proceso productivo del aceite de oliva virgen	8
3.1.4. Características y tipos de aceite de oliva	12
3.1.5. Residuos	14
3.1.6. Compuestos fenólicos	16
3.2. Extracción sólido-líquido	18
3.3. Tecnología de separación por membranas	20
3.3.1. Conceptos teóricos	20
3.3.2. Parámetros característicos	22
3.3.3. Tipos de membranas y módulos	23
3.3.4. Ensuciamiento de las membranas	25
3.3.5. Ósmosis Inversa	26
3.3.6. Aplicaciones de la tecnología de membranas	27

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	29
4.1. Obtención de la corriente de alimento	29
4.1.1. Extracción sólido-líquido asistida por ultrasonidos (UAE).....	29
4.1.2. Centrifugación	30
4.1.3. Filtración a vacío.....	31
4.2. Ultrafiltración	31
4.2.1. Acondicionamiento y compactación	33
4.2.2. Permeabilidad inicial del disolvente.....	33
4.2.3. Ensayos con extracto obtenido	34
4.3. Nanofiltración.....	34
4.4. Ósmosis inversa.....	35
4.5. Limpieza de membranas	35
4.6. Caracterización de muestras	36
4.6.1. Color	36
4.6.2. Sólidos totales	36
4.6.3. Fenoles totales: método Folin-Ciocalteu.....	37
4.6.4. Carbohidratos totales: método Antrona.....	37
4.6.5. Determinación del pH y conductividad	38
4.6.6. Determinación de perfil fenólico.....	38
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	39
5.1. Caracterización de corriente de extracto hidroalcohólico de alperujo.....	39
5.2. Ultrafiltración	40
5.2.1. Membrana UF010104.....	40
5.2.2. Membrana UP005	43
5.2.3. Elección de membrana	47
5.3. Nanofiltración.....	47
5.3.1. Compactación y permeabilidad.....	47
5.3.2. Ensayo con extracto hidroalcohólico de alperujo	48
5.3.3. Análisis de los rechazos a los distintos compuestos	49
5.4. Ósmosis Inversa.....	50
5.4.1. Compactación y permeabilidad.....	50

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

5.4.2. Ensayo con extracto hidroalcohólico de alperujo	51
5.4.3. Análisis de los rechazos a los distintos compuestos	52
CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA LA CONCENTRACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS.....	54
6.1. Descripción de la planta de ósmosis inversa (OI).....	54
6.2. Corriente de alimentación.....	57
6.3. Instalación de la planta industrial	57
6.3.1. Diseño y dimensionado de la planta OI.....	58
6.3.2. Depósitos principales	60
6.3.3. Conducciones	60
6.3.4. Proceso de limpieza.....	62
6.3.5. Bombas.....	64
CAPÍTULO 7. ESTUDIO ECONÓMICO	69
7.1. Costes de explotación	69
7.1.1. Costes variables.....	69
7.1.2. Costes fijos.....	73
7.1.3. Costes totales	73
7.2. Ingresos de explotación.....	74
7.3. Beneficios totales	75
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES	77
CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA.....	79
ANEXO I: CÁLCULOS DE DIMENSIONADO	85
1. Cálculos de pérdidas de carga.....	85
1.1. Pérdidas de carga en tuberías ($h_{f-tuberías}$).....	85
1.2. Pérdidas de carga locales ($h_{f-locales}$)	86
1.3. Pérdidas de carga totales	87
2. Concentraciones finales en el rechazo y permeado	87
ANEXO II: FICHAS TÉCNICAS DE MEMBRANA Y EQUIPOS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema global del proceso integrado de purificación y concentración de compuestos fenólicos a partir del extracto hidroalcohólico del alperujo. Fuente: elaboración propia	1
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de obtención del aceite de oliva virgen y extra virgen. Fuente: elaboración propia	8
Figura 3. Diagrama de bloques del sistema discontinuo para la obtención del aceite de oliva virgen/extra	10
Figura 4. Diagrama de bloques de sistema continuo por centrifugación a dos fases para la obtención de aceite de oliva virgen/extra virgen. Fuente: elaboración propia	11
Figura 5. Diagrama de bloques de sistema continuo por centrifugación a tres fases para la obtención de aceite de oliva virgen/extra virgen. Fuente: elaboración propia	12
Figura 6. Clasificación resumida de los compuestos fenólicos. Fuente: (Pérez Jiménez, 2019)	17
Figura 7. Estructura de los compuestos fenólicos presentes en la aceituna. Fuente: (Rubio Senent, 2011).....	18
Figura 8. Esquema de separación por membranas con flujo tangencial	20
Figura 9. Esquema de tubo de presión con módulos de membrana en serie.....	24
Figura 10. Construcción de membrana con enrollamiento en espiral. Fuente: (Dupont, 2023)	24
Figura 11. Disposiciones generales de módulos de membranas en plantas de ósmosis inversa: en serie (arriba), en paralelo (medio), o multietapa (abajo). Fuente. (Dupont, 2023).....	25
Figura 12. Esquema de principio de ósmosis inversa. Adaptado de (Salinas-Rodríguez et al., 2021) ..	26
Figura 13. Equipo de extracción sólido-líquido: baño de ultrasonidos y palas rotatorias	30
Figura 14. Equipo de extracción en funcionamiento	30
Figura 15. Centrífuga Sigma 6-16KS	31
Figura 16. Planta de ultrafiltración (Orelis, Francia)	32
Figura 17. Tanque encamisado de planta de ultrafiltración (Orelis, Francia) (izquierda) y módulo de membranas Rayflow para la planta de ultrafiltración (derecha)	33
Figura 18. Instalación de la planta de nanofiltración en el laboratorio	35
Figura 19. Cromatograma del extracto de alperujo obtenido por UAE, en etanol/agua 50:50 (v/v), a 40 °C. Fuente: (Sánchez-Arévalo et al., 2022)	40
Figura 20. Diagrama de flujo de la planta de ósmosis inversa para la concentración de compuestos fenólicos. Fuente: elaboración propia.....	55
Figura 21. Diagrama de flujo de la planta con indicadores de conducciones y bombas	61
Figura 22. Ábaco de Moody. Fuente: (Moody, 1944)	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Producción de aceite de oliva en el mundo, UE y España en las campañas de 2018/2019 a 2021/2022. Fuente: (MERCASA, 2022)	5
Tabla 2. Producción española de aceite de oliva por Comunidades Autónomas para la campaña 2021/2022. Adaptado de: (MAPA, 2022)	6
Tabla 3. Composición del aceite de oliva extra virgen. Adaptado de: (Jimenez-Lopez et al., 2020)	13
Tabla 4. Clasificación de aceites de oliva según su acidez libre máxima. Adaptado de: (IOC, 2023)....	14
Tabla 5. Composición del alperujo. Adaptado de: (Morillo-Pérez et al., 2009)	15
Tabla 6. Procesos de separación por membranas.....	22
Tabla 7. Procesos de separación por membranas en operaciones de presión. Adaptado de (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018)	22
Tabla 8. Especificaciones de las membranas empleadas	32
Tabla 9. Caracterización del extracto hidroalcohólico del alperujo	39
Tabla 10. Concentraciones en la corriente de alimentación de OI.	57
Tabla 11. Especificaciones de la membrana NF90 400/34i. Fuente: (Dupont, 2020)	57
Tabla 12. Condiciones de operación en la planta de ósmosis inversa	59
Tabla 13. Dimensionado de depósitos principales.....	60
Tabla 14. Dimensionado de tuberías de la planta industrial.....	62
Tabla 15. Volumen muerto de las conducciones	62
Tabla 16. Dimensionado de tanques y depósitos de la planta industrial.....	64
Tabla 17. Especificaciones de las bombas seleccionadas para el diseño de la instalación.....	68
Tabla 18. Costes variables de consumo anual de etanol y agua en la planta industrial de ósmosis inversa 70	
Tabla 19. Costes variables de energía en la instalación de ósmosis inversa.....	72
Tabla 20. Costes variables de mano de obra en la instalación de ósmosis inversa	73
Tabla 21. Coste total de la instalación de la planta de ósmosis inversa	74
Tabla 22. Costes de explotación anuales para la instalación completa	75
Tabla 23. Cálculos de pérdida de carga en tuberías.....	86
Tabla 24. Pérdidas de carga locales en la instalación.....	86
Tabla 25. Pérdidas de carga totales de cada tubería en la instalación	87

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Compactación de la membrana UF010104 a 2.2 bar y 1.8 m/s.....	41
Gráfica 2. Permeabilidad de la membrana UF010104 en etanol/agua 50:50 (v/v)	41
Gráfica 3. Ensayo de ultrafiltración de extracto con la membrana UF010104 en etanol/agua 50:50 (v/v) a 2.2 bar y 1.8 m/s.....	42
Gráfica 4. Rechazos obtenidos con la membrana UF0101104 para a) color, sólidos totales, azúcares, y b) fenoles totales.....	43
Gráfica 5. Compactación de la membrana UP005	44
Gráfica 6. Permeabilidad inicial de la membrana UP005 en etanol/agua 50:50 (v/v).....	44
Gráfica 7. Ensayo de ultrafiltración con la membrana UP005	45
Gráfica 8. Caracterizaciones del ensayo de ultrafiltración con la membrana UP005 para a) color, sólidos totales, azúcares y b) fenoles totales	45
Gráfica 9. Rechazos del perfil fenólico en el permeado de ultrafiltración con la membrana UP005 a un factor de reducción de volumen de 2	46
Gráfica 10. Compactación de la membrana NF270 a 22 bar y 1 m/s con etanol/agua 50:50 (v/v).....	47
Gráfica 11. Permeabilidad de la membrana NF270 en etanol/agua 50:50 (v/v)	48
Gráfica 12. Ensayo de nanofiltración con la membrana NF270 a 15.5 bar y 1 m/s	48
Gráfica 13. Rechazos del proceso de nanofiltración con la membrana NF270 para color, sólidos y azúcares totales.....	49
Gráfica 14. Rechazos individuales de los compuestos fenólicos y componentes orgánicos, obtenidos del proceso de nanofiltración con la membrana NF270	50
Gráfica 15. Compactación de la membrana NF90 a 22 bar y 1 m/s.....	51
Gráfica 16. Permeabilidad de la membrana NF90 en etanol/agua 50:50 (v/v)	51
Gráfica 17. Ensayo de ósmosis inversa con la membrana NF90, a 20 bar y 1 m/s, empleando como alimento el permeado de la nanofiltración.....	52
Gráfica 18. Rechazos de la ósmosis inversa con la membrana NF90 para los parámetros de color, fenoles y azúcares totales	53

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	PRESUPUESTO DE LABORATORIO	1
2.1.	Cuadro de precios N.º 1: Mano de obra	1
2.2.	Cuadro de precios N.º 2: Material Fungible.....	1
2.3.	Cuadro de precios N.º 3: Material amortizable	2
3.	PRESUPUESTO DE ESCALA INDUSTRIAL.....	4
3.1.	Cuadro de precios N.º 4: Mano de obra industrial	4
3.2.	Cuadro de precios N.º 5: Equipos principales.....	4
3.3.	Cuadro de precios N.º 6: Equipos auxiliares	5
4.	PRESUPUESTO GENERAL	6

ÍNDICE DE TABLAS DEL PRESUPUESTO

Tabla 1.	Cuadro de precios de mano de obra en laboratorio	1
Tabla 2.	Cuadro de precios de material fungible en el estudio experimental	2
Tabla 3.	Cuadro de precios de material amortizable en el estudio de laboratorio	3
Tabla 4.	Cuadro de precios de mano de obra industrial	4
Tabla 5.	Cuadro de precios de materiales y equipos principales en la planta industrial	4
Tabla 6.	Cuadro de precios de equipos auxiliares en la instalación de la planta industrial	5
Tabla 7.	Presupuesto general del proyecto.....	6

ÍNDICE DE PLANOS

1.	Diagrama de flujo de planta industrial de ósmosis inversa	1
2.	Diagrama de flujo con indicaciones de tuberías y bombas	2

MEMORIA DESCRIPTIVA

CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se hace un estudio completo de valorización y recuperación de los compuestos fenólicos presentes en el residuo denominado alperujo, generado en una de las etapas de la producción industrial del aceite de oliva. Dicho estudio se resume en la Figura 1, partiendo de una corriente de extracto hidroalcohólico de alperujo que es sometida a etapas consecutivas de ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. En las corrientes de permeado de las dos primeras etapas se recuperan en mayor proporción los compuestos fenólicos, mientras que en la etapa de ósmosis inversa se recupera el disolvente en la corriente de permeado a la vez que se obtiene un concentrado de compuestos fenólicos en la corriente de rechazo. La corriente de rechazo en la ultrafiltración consiste principalmente en materia orgánica como sólidos totales y azúcares, y en la etapa de nanofiltración se realiza un fraccionamiento de los compuestos fenólicos, siendo los de mayor peso molecular rechazados por la membrana.

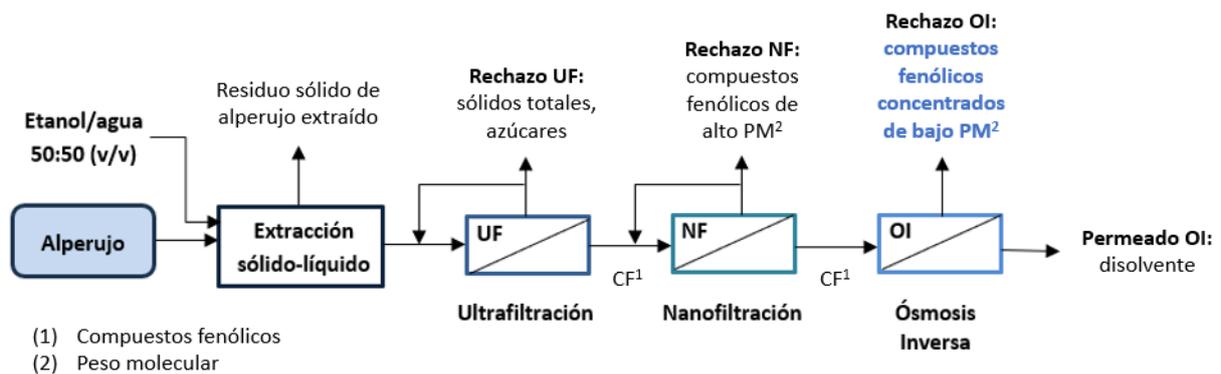


Figura 1. Esquema global del proceso integrado de purificación y concentración de compuestos fenólicos a partir del extracto hidroalcohólico del alperujo. Fuente: elaboración propia

En el proceso productivo del aceite de oliva, se generan una gran cantidad de residuos que son desperdiciados y con un alto impacto negativo en el medioambiente debido a su fitotoxicidad. En la actualidad, la importancia de impulsar y aplicar procesos más sostenibles en la industria ha crecido notoriamente, sobre todo de cara a medidas socioeconómicas establecidas como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y la Agenda 2030. Es por ello por lo que se busca un sistema productivo orientado hacia una economía circular, en la cual los residuos generados son valorizados e introducidos nuevamente en el ciclo productivo, obteniendo así un mayor aprovechamiento de los recursos y un menor volumen de residuos totales vertidos.

El alperujo es el principal residuo que se genera durante la centrifugación en dos fases en el proceso de producción del aceite de oliva virgen, y se caracteriza por ser un semisólido con un alto contenido de compuestos fenólicos. Dichos compuestos tienen un gran interés con un alto valor añadido en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria, debido principalmente a sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, pero al mismo tiempo le otorgan el carácter fitotóxico al alperujo que obliga a que sea pretratado como residuo.

Por este motivo, en este proyecto se propone un método alternativo para la valorización del alperujo, que implica la extracción y purificación de los compuestos fenólicos mediante tecnología de separación por membranas. Las etapas sucesivas de ultrafiltración y nanofiltración permiten, en mayor medida, purificar los polifenoles y separarlos del resto de materia orgánica presente en el alperujo, como sólidos y azúcares, mientras que la última etapa de ósmosis inversa favorece la concentración de la corriente rica en los compuestos de interés.

1.1. JUSTIFICACIÓN ACADÉMICA

El Trabajo Final de Grado aquí expuesto permite finalizar los estudios de Grado en Ingeniería Química en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial (ETSII) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). En el marco de realización del presente TFG, se han realizado prácticas curriculares como estudiante de Grado dentro del grupo de investigación Prometeo en el Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM).

Dicho TFG tienen una estrecha relación con los conceptos abarcados en el Grado ya que, por un lado, se basa en el tratamiento de un residuo del proceso de obtención del aceite de oliva, el cual fue estudiado previamente en la asignatura Procesos Industriales en Ingeniería Química. Por otro lado, los procesos de ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa forman parte de la tecnología de separación por membranas. Los conceptos vistos en las asignaturas Análisis y Simulación de Procesos, y Operaciones de Separación, permiten comprender el fundamento de la separación por membranas y la extracción sólido-líquido de los compuestos fenólicos presentes en el alperujo, respectivamente. Las técnicas empleadas en el laboratorio para el análisis de datos están relacionadas con los contenidos vistos en las asignaturas de Experimentación en Análisis Químico, Experimentación en Ingeniería Química (I, II, III) y Análisis y Determinación Estructural en Química Orgánica.

De esta manera, no solamente se han adquirido competencias técnicas sino también se han reforzado las competencias transversales que aporta el Grado, como la aplicación y pensamiento práctico, el análisis y resolución de problemas, la responsabilidad ética, medioambiental y profesional, y el pensamiento crítico. A su vez, la participación dentro del grupo de investigación en ISIRYM ha permitido desarrollar una formación profesional en el área de investigación y desarrollo, y en concreto, conocer las aplicaciones y los avances de la tecnología de separación por membranas.

1.2. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

De esta manera, el aprovechamiento de residuos como materia prima para la obtención de nuevos recursos de alto valor añadido contribuyen en gran parte a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2023), siguiendo en particular con los siguientes objetivos:

- ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico:
Una de las metas de este objetivo implica la mejora progresiva de la producción y el consumo de los recursos del planeta, con el fin de obtener un mayor crecimiento económico sin perjudicar al medioambiente. Por ende, el aprovechamiento del alperujo como residuo del proceso productivo del aceite de oliva genera nuevos subproductos de alto valor añadido que aumentan el beneficio económico y a la vez, evita el peligro fitotóxico que supone el alperujo en caso de vertido.
- ODS 9 – Industria, innovación e infraestructuras
Una de las metas que impulsa la Agenda 2030 es promocionar el área de investigación y desarrollo en la industria con el fin de obtener procesos industriales más sostenibles, con un menor consumo energético y la menor cantidad de recursos materiales empleados. Mediante el aumento de la investigación científica y la mejora tecnológica, es posible modernizar la infraestructura y favorecer la sostenibilidad en la industria . Por este motivo, el estudio experimental y la labor de investigación desarrollados para el presente trabajo han permitido proponer el diseño de una planta industrial capaz de valorizar el residuo generado de la producción de aceite de oliva virgen, siendo este uno de los procesos productivos más importantes en la industria española.
- ODS 12 – Producción y consumo responsables:
La reducción de los desechos generados y la implementación de las técnicas más sostenibles en la industria son parte de los objetivos que se plantean en la Agenda 2030. Es por ello por lo que el uso del alperujo como materia prima para la obtención de compuestos fenólicos disminuye el volumen de residuos generados en la industria del aceite de oliva.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Grado es estudiar un proceso integrado de separación por tecnología de membranas para la purificación y concentración de una corriente enriquecida en compuestos fenólicos a partir de un extracto hidroalcohólico del alperujo. Dicho extracto es sometido a un proceso de ultrafiltración, seguido de una etapa de nanofiltración y finalmente tratado mediante ósmosis inversa. Al mismo tiempo, se buscará diseñar una planta industrial de la etapa de ósmosis inversa para el tratamiento del alimento en cuestión.

De esta manera, los objetivos específicos a cumplir son los siguientes:

- Realizar una extracción sólido-líquido del alperujo empleando una disolución de etanol/agua 50% (v/v) como disolvente, con el fin de obtener un extracto rico en compuestos fenólicos.
- Estudiar el proceso de ultrafiltración del extracto con dos membranas comerciales diferentes (UF010104 y UP005) con el fin de seleccionar la mejor opción para la purificación de los polifenoles.
- Purificar y fraccionar los compuestos fenólicos mediante una etapa de nanofiltración utilizando la membrana NF270 seleccionada por estudios previos (Sánchez-Arévalo et al., 2022).
- Concentrar la corriente ya purificada en compuestos fenólicos mediante una etapa de ósmosis inversa y diseñar dicha sección de la planta industrial para tratar 76.8 m³/día de una corriente de permeado de una planta de nanofiltración, partiendo de 120 m³/día de extracto.
- Caracterizar las corrientes de permeado y rechazo de cada etapa de separación para evaluar los porcentajes de rechazo de materia orgánica y polifenoles presentes durante todo el proceso.

CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES

3.1. LA INDUSTRIA DEL ACEITE DE OLIVA

3.1.1. Sector olivícola en España

La industria del aceite de oliva en España es uno de los más importantes sectores en la economía agroalimentaria del país. Gracias a la combinación de la tradición olivarera arraigada y a una industria altamente tecnológica y profesional, España se sitúa como líder mundial en términos de superficie cultivada, producción y comercio exterior de aceite de oliva, destacando por la alta calidad de sus aceites. Concretamente, la producción española representa el 70% de la producción en la Unión Europea y el 45% a nivel mundial según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 2022). El clima mediterráneo, de veranos cálidos y secos, ofrece las perfectas condiciones para el cultivo y crecimiento de olivos. En la Tabla 1 se comparan los valores de producción de aceite de oliva en el mundo, en la Unión Europea y en España, para las campañas de 2018/2019 a 2021/2022, obtenidos a partir de datos recopilados del Consejo Olivícola Internacional, la Comisión Europea y el MAPA.

Tabla 1. Producción de aceite de oliva en el mundo, UE y España en las campañas de 2018/2019 a 2021/2022. Fuente: (MERCASA, 2022)

Producción de aceite de oliva (miles de toneladas)				
	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022
Mundo	3304	3266.5	3010	3098.5
UE	2263.6	1920	2052.0	2177
España	1793.5	1125.7	1390.0	1488.5

Este sector también tiene un impacto significativo en España en cuanto a aspectos sociales, ambientales y territoriales. Más de 350.000 agricultores se dedican al cultivo del olivar, mientras que la industria del aceite de oliva mantiene alrededor de 15.000 empleos y genera más de 32 millones de jornales por campaña (MAPA, 2022). Es de destacar que más del 80% de la superficie destinada a cultivos en España es dedicada exclusivamente al olivo (L. Fernández-Lobato et al, 2021).

A su vez, dentro de España, la producción de aceite de oliva por Comunidades Autónomas para la campaña 2021/2022 se resume en la Tabla 2. Andalucía es la comunidad con la mayor producción de aceite de oliva, siendo las provincias de Jaén y Córdoba en las que se genera el 64% de todo el aceite de oliva anual en el territorio (Extenda, 2017). A esta comunidad autónoma le siguen Castilla-La

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

Mancha, Extremadura, Cataluña y la Comunidad Valenciana, situándose la Comunidad Valenciana entre los cinco productores más grandes en España.

Tabla 2. Producción española de aceite de oliva por Comunidades Autónomas para la campaña 2021/2022. Adaptado de: (MAPA, 2022)

Comunidad Autónoma	Producción (miles de toneladas)
Andalucía	1152.4
Castilla-La Mancha	127.4
Extremadura	104.2
Cataluña	39
Comunidad Valenciana	22.4
Aragón	19.4
Murcia	10.3
Navarra	5.7
Madrid	3
La Rioja	2
Castilla y León	1.6
Baleares	0.69
Otras CCAA	1
TOTAL España	1488.5

En la Comunidad Valenciana, el olivar ocupa cerca de 94.000 hectáreas, siendo el tercer cultivo con mayor superficie, con una producción de 134.136 toneladas, y su mayor parte destinada a la producción de aceite de oliva (Olimerca, 2022). Esta región también se caracteriza por tener la mayor concentración de olivos milenarios, llamados así por su larga longevidad, lo que la hace muy atractiva para los turistas interesados en el oleoturismo. Considerando las provincias dentro de la Comunidad Valenciana, Castellón posee la mayor superficie de olivar (32743 ha), seguida de Valencia (32197 ha) y Alicante (29013 ha).

3.1.2. Materia prima

El fruto del olivo (*Olea europaea*), más conocido como aceituna, es una drupa de tamaño generalmente pequeño y ovalado, y se compone principalmente de tres tipos de tejidos: el endocarpio (hueso), que protege la semilla; el mesocarpio (pulpa), que conforma la parte comestible del fruto donde se

acumula el aceite; y el exocarpo (piel), que sirve como protección externa del fruto (Campo & Rapoport, 2008).

Las aceitunas tienen una composición promedio en peso de 50% en agua, 22% en aceite y 19.1% en carbohidratos, siendo la fracción restante repartida como proteínas, celulosa, componentes inorgánicos y compuestos fenólicos, los cuales representan entre un 1-3% (Hussain et al., 2021).

Las aceitunas abarcan una amplia gama de colores y tonalidades, yendo de verdes a rojizos y negros al estar maduras, así como también presentan una variedad de aromas y contenido en aceite. La maduración completa del fruto se efectúa durante los meses de noviembre a enero, y el clima mediterráneo brinda las condiciones óptimas para su cultivo.

España, siendo uno de los mayores productores de aceite de oliva en el mundo, también cuenta con una gran diversidad de especies de olivas, las cuales están bien adaptadas al clima y suelo del país. Dependiendo del fin que tienen, las aceitunas se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Aceituna de mesa:** son las principales aceitunas para el consumo directo, escogidas con el grado de maduración adecuado y elaboradas para tener una buena conservación. Las variedades Manzanilla de Sevilla y Gordal son algunas de las empleadas como aceituna de mesa.
- **Aceituna de almazara:** son aquellas variedades utilizadas para la producción del aceite de oliva, como la Cornicabra, Picual y Arbequina.
- **Aceituna de doble aptitud:** se componen de aquellas variedades que sirven tanto de mesa como de almazara. Una de las variedades de aceituna más comunes con estos fines es la Hojiblanca.

Considerando únicamente en España, existen más de 200 variedades de aceitunas que se cultivan, siendo cada una de características y propiedades particulares (Aceites de Oliva de España, 2022). A continuación, se describen algunas de estas variedades:

- **Arbequina:** es típica de la región de Cataluña y del Alto Aragón, siendo originaria de la localidad de Arbeca, aunque ahora se cultiva en gran parte del territorio español. Es una de las variedades con mayor porcentaje de extracción de aceite, siendo entorno al 20,5% de aceite, por lo que es apreciada por su productividad y rendimiento graso (ASOLIVA, 2016).
- **Picual:** esta variedad es la más prevalente tanto en España como en el mundo, existiendo aproximadamente 900,000 hectáreas dedicadas a su cultivo, concentradas principalmente en Jaén, Córdoba y Granada (Aceites de Oliva de España, 2022). Su nombre proviene de la forma distintiva en pico que presenta el fruto, y es una de las variedades con mayor producción de aceite por su alto rendimiento graso, alcanzando valores de hasta 27%. Además, el aceite obtenido presenta una gran estabilidad frente a la oxidación y altas temperaturas, principalmente debido a su elevado contenido en polifenoles, ácido oleico monoinsaturado y ácido linoleico (ASOLIVA, 2016).
- **Cornicabra:** las olivas de esta variedad son cultivadas principalmente en la región central de España, abarcando las provincias de Toledo y Ciudad Real, en Castilla-La Mancha. Al igual que la variedad Picual, el aceite que se obtiene es muy estable por su alto contenido en ácidos

oleicos. El nombre de esta variedad proviene de la forma curvada característica del fruto, semejante a un cuerno.

- **Hojiblanca**: es una de las variedades más cultivadas en Andalucía, extendiéndose por las provincias de Sevilla, Córdoba, Málaga y Granada. Se caracterizan por el color blanco-grisáceo de sus hojas, que le dan el nombre a la variedad, y también por su doble funcionalidad para producción de aceite y consumo como aceituna de mesa. Sin embargo, en comparación con otras variedades, el rendimiento en aceite es menor, entorno al 18%, y la estabilidad frente a la oxidación no es particularmente buena (ASOLIVA, 2016).

De todas las variedades de olivos cultivadas en España, solamente seis son autóctonas de la Comunidad Valenciana: Villalonga, Blanqueta, Farga, Serrana de Espadán, Changlot Real y Alfarara (Olimerca, 2022). La variedad Villalonga es la más extendida en la región, siendo originaria del sur de Valencia y reconocida incluso fuera de España, y da lugar a la producción de un aceite de buena calidad, con matices dulces y afrutados.

3.1.3. Proceso productivo del aceite de oliva virgen

El proceso productivo del aceite de oliva involucra varias etapas, desde la recogida de las aceitunas hasta la obtención final del aceite. La planta en donde se realiza este proceso se denomina almazara, y la campaña olivícola suele darse entre los meses de octubre y febrero, dependiendo de la región y el tipo de olivo cultivado. En el esquema de la Figura 2, se resume el procedimiento inicial en la producción del aceite de oliva virgen.

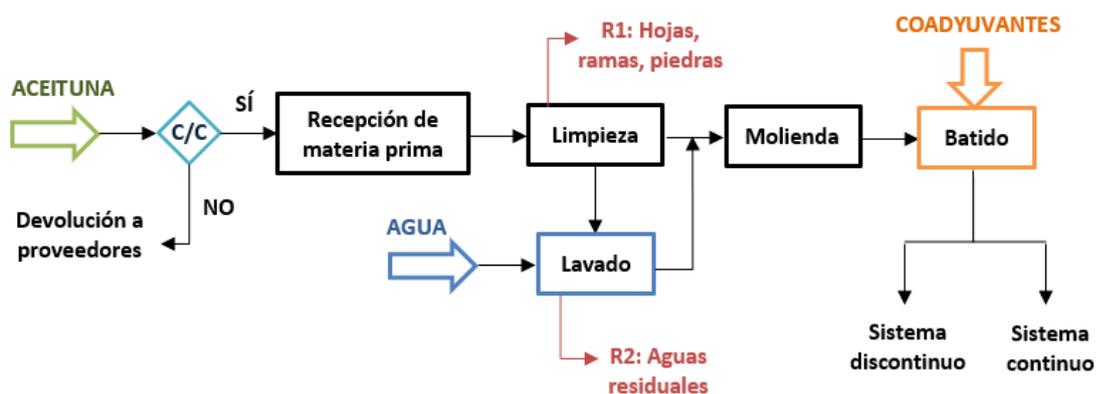


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de obtención del aceite de oliva virgen y extra virgen. Fuente: elaboración propia

Existen dos métodos para la recolección de las aceitunas: la recogida manual, en la cual los recolectores retiran las aceitunas de los árboles utilizando peines especiales o simplemente sacudiendo las ramas; y la recogida mecanizada, utilizando máquinas vibradoras o paraguas vibratorios que sacuden los árboles, haciendo que las aceitunas caigan en redes colocadas en el suelo. Este último método es más eficiente en olivares de mayor tamaño y permite una recolección más rápida. A su vez, también se puede tratar de una recolección de aceitunas del suelo o directamente del árbol, lo cual afecta al proceso en el tratamiento posterior.

Una vez recogidas, las aceitunas son transportadas a la almazara, en donde se llevará a cabo la extracción del aceite de oliva. Las aceitunas son depositadas en una tolva subterránea y se les hace un control de calidad para garantizar las condiciones de la materia prima. De esta manera, son luego transportadas mediante una cinta hacia una etapa de limpieza mediante un sistema de ventiladores, seguido de sistemas vibratorios y de cribado con el fin de eliminar los restos sólidos más grandes, como hojas, piedras y ramas. En el caso de emplear aceitunas recogidas del suelo, es importante también una etapa de lavado con agua, de la cual se generan residuos líquidos.

A continuación, las aceitunas lavadas se trituran para romper la pulpa y liberar el aceite contenido en ellas. Tradicionalmente, esto se hacía mediante molinos de piedra que trituraban las aceitunas formando una pasta, pero hoy en día también se emplean molinos metálicos. Es así como se consigue obtener una pasta semisólida, con los restos vegetales de la aceituna y una fase líquida compuesta principalmente por aceite y agua.

Para favorecer la extracción y separación del aceite disperso en la pasta triturada, se emplean batidoras, ya sean de eje horizontal o vertical, junto a la adición de coadyuvantes. Es importante tener en cuenta la temperatura y que el sistema esté regulado entorno a los 35 °C.

Luego de la etapa de batido, existen dos tipos de sistemas que se pueden emplear: el sistema discontinuo o tradicional, y el sistema continuo, el cual a su vez se puede clasificar según si se realiza con centrifugación de dos o tres fases. Los avances tecnológicos han permitido una mayor eficiencia y control en los procesos de extracción, pero los métodos tradicionales todavía se utilizan en algunas áreas para producir aceites de oliva de alta calidad y sabor distintivo.

3.1.3.1. Sistema discontinuo

El método tradicional de obtención del aceite de oliva consiste en el prensado como sistema discontinuo, en el cual la pasta de aceitunas batida se coloca en capazos de esparto o en capachos, que son discos redondos filtrantes hechos de fibras naturales. Estos capachos se apilan y se someten a presión para extraer el aceite. La presión ejercida por la prensa hidráulica comprime los capachos y permite que el mosto oleoso fluya mientras que los residuos sólidos (orujo) se retienen. De esta manera, la fracción líquida obtenida pasa por una etapa de filtración mediante filtros prensa, y se deposita en decantadores en serie, separando así un residuo líquido (alpechín). Finalmente, el aceite se almacena en recipientes adecuados para preservar su calidad hasta su envasado y distribución. Cabe aclarar la importancia del control de la calidad del aceite de oliva obtenido de acuerdo con el nivel de acidez libre que contiene: si dicho parámetro se encuentra por debajo de los valores establecidos (véase apartado 3.1.4), el esquema continúa hacia la comercialización del producto final, mientras que,

en caso contrario, el aceite obtenido no es apto para consumo y requiere un proceso de refinado. El proceso productivo para el sistema discontinuo de producción de aceite de oliva virgen se resume en la Figura 3

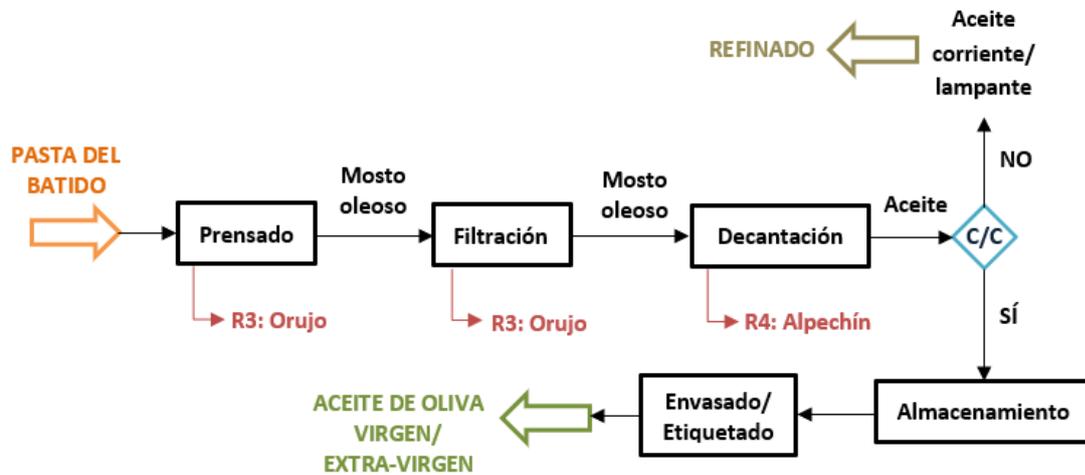


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema discontinuo para la obtención del aceite de oliva virgen/extra virgen. Fuente: elaboración propia

3.1.3.2. Sistema continuo

El método continuo de separación por centrifugación implica la introducción directa de la masa batida en una centrífuga horizontal, que permite separar las fracciones sólidas y líquidas de acuerdo con su densidad. Sin embargo, la fuerza centrífuga generada no permite la liberación de las gotas de aceite atrapadas dentro de los microgeles formados durante el proceso, por lo que es necesario agregar agua durante el batido para modificar las características de estos microgeles y convertirlos en aceite (García de la Fuente, 2011). Dependiendo de las salidas de la centrífuga, se distinguen dos sistemas: el de tres fases, en el que se separan el orujo, el alpechín y el aceite; y el de dos fases, que produce aceite y una mezcla de orujo con las fracciones acuosas, denominado alperujo. En ambos sistemas de centrifugación, el aceite extraído posee partículas en suspensión y cierta cantidad de agua, las cuales se eliminan normalmente con una subsiguiente etapa de centrifugación vertical. Finalmente, al igual que en el sistema discontinuo de prensado, el aceite que cumpla con el control de calidad pasa a ser almacenado y envasado para su comercialización. Los esquemas de los sistemas continuos se pueden ver en las Figuras 4 y 5.

El sistema de centrifugación a tres fases fue el primero que sustituyó en gran medida al método tradicional por prensado, debido a sus grandes ventajas como la automatización del proceso, la calidad del aceite, e incluso la reducción del área y mano de obra necesaria en la almazara (García de la Fuente, 2011). Sin embargo, en este tipo de centrifugación es necesaria la adición de agua para el correcto funcionamiento de la centrífuga, lo cual implica un mayor consumo de agua y energía. Al mismo tiempo, se genera un gran volumen de alpechín como residuo líquido que conlleva problemas medioambientales en el medio acuático por su alto contenido en materia orgánica, por lo que requiere un mayor coste para su tratamiento posterior.

Por estos motivos, se desarrolló el método de centrifugación a dos fases, conocido también como “ecológico”, ya que reduce el consumo de agua y energía con respecto al de tres fases, generando menos cantidad de efluentes perjudiciales. Además del beneficio económico y medioambiental, la centrifugación a dos fases produce un aceite de oliva con una mayor concentración de compuestos fenólicos, lo cual aumenta la estabilidad durante su almacenamiento. De esta manera, la mayoría de las almazaras en España produce el aceite de oliva extra virgen mediante este sistema. Sin embargo, el residuo semisólido generado (alperujo) tiene un alto porcentaje de humedad y debe ser tratado de forma adecuada para disminuir su impacto ambiental, además de presentar mayores dificultades en cuanto a su almacenamiento y transporte.

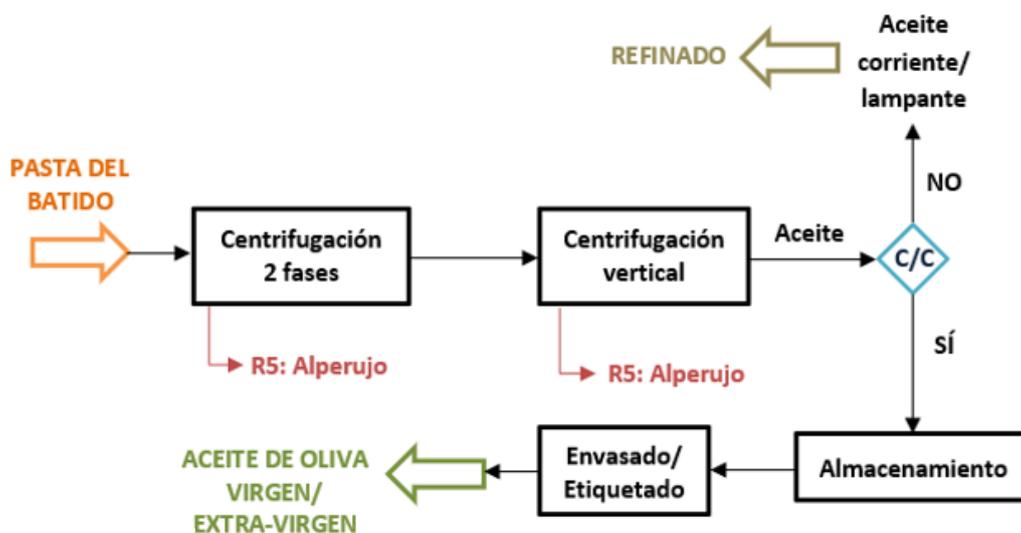


Figura 4. Diagrama de bloques de sistema continuo por centrifugación a dos fases para la obtención de aceite de oliva virgen/extra virgen. Fuente: elaboración propia

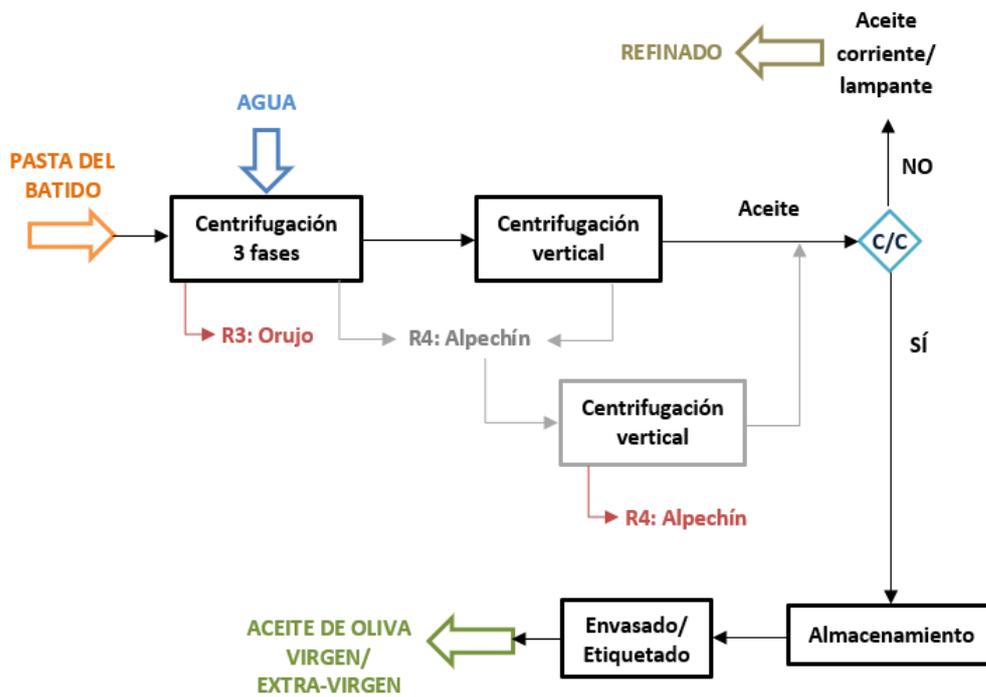


Figura 5. Diagrama de bloques de sistema continuo por centrifugación a tres fases para la obtención de aceite de oliva virgen/extra virgen. Fuente: elaboración propia

3.1.4. Características y tipos de aceite de oliva

El aceite de oliva se compone principalmente de triglicéridos y ácidos grasos libres, entre un 97 y 99%, con un alto contenido en ácidos grasos monoinsaturados (MUFA), como el ácido oleico, y otros ácidos poliinsaturados (PUFA), como el ácido linoleico (Jimenez-Lopez et al., 2020). Esto le atribuye al aceite de oliva los beneficios que tiene ante la prevención de enfermedades cardiovasculares, reduciendo los niveles de lipoproteínas de baja densidad (LDL), asociadas al colesterol “malo” que se acumula en las paredes arteriales (Guo et al., 2018).

Los componentes minoritarios de la fracción restante (1-3%) del aceite de oliva, caracterizados como el residuo insaponificable, abarcan compuestos bioactivos como polifenoles, en particular hidroxitirosol y sus derivados (oleuropeína y tirosol), y tocoferoles. Sin embargo, también se pueden encontrar compuestos como escualeno, colorantes y pigmentos naturales, que además otorgan las propiedades organolépticas específicas del aceite según la variedad de olivos. La composición y concentración de algunos de los componentes del aceite de oliva extra virgen se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición del aceite de oliva extra virgen. Adaptado de: (Jimenez-Lopez et al., 2020)

COMPONENTES	TIPO	CONCENTRACIÓN
LÍPIDOS (% p/p)	Ácido oleico	63.1-79.7
	Ácido palmítico	9.4-19.5
	Ácido palmitoleico	0.6-3.2
	Ácido esteárico	1.4-3.0
	Ácido linoleico	6.6-14.8
	Ácido α -linoleico	0.46-0.69
	MUFA	65.2-80.8
	PUFA	7.0-15.5
	Diacilgliceroles	1-2.8
TOCOFEROLES (mg/kg)	α -tocoferol	10.2-208
	β -tocoferol	0.75-1.05
	γ -tocoferol	0.7-2.1
CARBOHIDRATOS (mg/kg)	Escualeno	200-8260
PIGMENTOS (mg/kg)	Clorofilas	0.15-61.96
	Carotenoides	0.53-31.51
	β -caroteno	0.15-0.67
PIGMENTOS (mg/kg)	Luteína	0.65-3.60
OTROS (mg/kg)	Compuestos fenólicos	213-450
	β -sitosterol	530.2-2638.6

Existen diversos tipos de aceite de oliva se puede clasificar según el procedimiento de obtención y la acidez libre presente. De acuerdo con el Consejo Oleícola Internacional (IOC, 2023), los aceites de oliva vírgenes se caracterizan por elaborarse por medios mecánicos o físicos, como los descritos en la sección 3.1.3, sin ningún tipo de tratamiento adicional que pueda alterar la composición del aceite. En la Tabla 4, se resumen las variedades de los aceites de oliva vírgenes aptos para el consumo según su acidez libre máxima, expresada en ácido oleico. Los aceites de oliva corriente y lampante no son aptos para el consumo, y requieren de tratamientos de refinado por medio de extracción con disolventes. Es justo este parámetro el cual se emplea como control de calidad para garantizar la obtención de aceite de oliva extra-virgen y virgen en los procesos descritos previamente (sección 3.1.3.). Dentro de los

aceites de oliva refinados, los aceites suaves e intensos se producen como proporción de la mezcla de aceites vírgenes y refinados.

Tabla 4. Clasificación de aceites de oliva según su acidez libre máxima. Adaptado de: (IOC, 2023)

TIPOS DE ACEITE DE OLIVA	CLASIFICACIÓN	ACIDEZ LIBRE (g ácido oleico/100 g aceite)
VÍRGENES	Extra-virgen	0.8
	Virgen	2
	Corriente	3.3
	Lampante	>3.3
REFINADOS	Suave	1.5
	Intenso	1.5
	Orujo de oliva	1.5

La industria del aceite de oliva en España debe comprometerse con la adherencia a las regulaciones establecidas para cumplir con la máxima calidad. El Consejo Olivícola Internacional es uno de los organismos responsables que brinda una colección de normas y métodos para el análisis químico de los aceites de oliva. Los avances tecnológicos en estos análisis han mejorado significativamente el control de la calidad y la autenticidad de los aceites de oliva comercializados.

3.1.5. Residuos

Como se ha descrito previamente, en el proceso productivo del aceite de oliva se generan una variedad de residuos que deben ser adecuadamente tratados según su naturaleza. Además de las aguas residuales de lavado y los restos provenientes de la recepción de la materia prima, en todos los sistemas de producción descritos existen una serie de residuos orgánicos líquidos y sólidos. En el sistema discontinuo por prensado y continuo con centrifugación a tres fases se generan el orujo y el alpechín. En el caso de la centrifugación a dos fases, el residuo mayoritario es el alperujo, del cual se hará mayor hincapié en el presente trabajo.

3.1.5.1. Orujo

El orujo es una fracción sólida normalmente utilizada para la posterior extracción del aceite mediante disolventes orgánicos, elaborando así un aceite de orujo refinado, de menor calidad que los aceites de oliva correspondientes. Este residuo está compuesto mayormente de huesos molidos, pulpa, piel y agua, así como también restos de aceite no separado, y se caracteriza por tener una elevada concentración de lignina, con un bajo contenido en proteínas (García de la Fuente, 2011).

3.1.5.2. Alpechín

El alpechín se compone esencialmente de las aguas del fruto del olivo y del lavado durante la elaboración del aceite de oliva. Su composición es variable dependiendo de la variedad y madurez de la oliva, así como también de las condiciones de cultivo y almacenamiento, pero se caracteriza por ser un efluente con un alto contenido de materia orgánica, como ácidos grasos y polifenoles, que perjudican al medioambiente por su fitotoxicidad, aunque, por otro lado, los compuestos fenólicos le otorgan propiedades antimicrobianas al alpechín. A su vez, tiene un pH ligeramente ácido (entre 3 y 6), una elevada conductividad eléctrica y niveles altos en nitrógeno, fósforo y minerales como potasio, calcio, hierro y magnesio (García de la Fuente, 2011).

3.1.5.2. Alperujo

El alperujo consiste en un residuo semisólido de elevada humedad que, como se menciona previamente, proviene de la centrifugación en dos fases. Tiene un contenido en agua alrededor del 65%, con un pH ligeramente ácido y una alta concentración de materia orgánica, en particular de lignina, celulosa y hemicelulosa, así como también niveles elevados de lípidos, carbohidratos y compuestos fenólicos (García de la Fuente, 2011). En la Tabla 5, se detallan las características del alperujo en cuanto a composición y concentración.

Tabla 5. Composición del alperujo. Adaptado de: (Morillo-Pérez et al., 2009)

Parámetro	Concentración promedio
Humedad (% p/p)	62.16
pH (agua)	5.48
Conductividad (dS/m)	2.99
Materia orgánica (%)	90.66
Ratio C/N	44.99
Nitrógeno total (g/kg)	11.99
P (g/kg)	0.97
K (g/kg)	18.73
Ca (g/kg)	5.08
Mg (g/kg)	1.03
Na (g/kg)	0.67
Fe (mg/kg)	1107.80
Cu (mg/kg)	41.20
Mn (mg/kg)	25.80
Zn (mg/kg)	19.60
Lignina (%)^(*)	38.82
Hemicelulosa (%)^(*)	29.70

Parámetro	Concentración promedio
Celulosa (%) ^(*)	23.47
Lípidos (%) ^(*)	11.01
Proteínas (%) ^(*)	6.95
Carbohidratos (%) ^(*)	12.32
Fenoles (%) ^(*)	1.36

(*) % p/p de materia orgánica total

Al igual que el alpechín, el alperujo presenta un carácter fitotóxico y antimicrobiano que aumenta su impacto ambiental negativamente. Existen diferentes métodos para la valorización del alperujo en la actualidad, como por ejemplo tratamientos biológicos de biorremediación y compostaje (Morillo-Pérez et al., 2009), el aprovechamiento energético para obtención de biocombustibles y la alimentación animal (García de la Fuente, 2011). Una de las alternativas más atractivas es la recuperación de los compuestos fenólicos presentes en el alperujo, debido principalmente a su alto valor añadido en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica. La separación por tecnología de membranas es una de las técnicas fisicoquímicas más empleadas para la purificación de macromoléculas y micromoléculas en residuos agrícolas industriales. De esta manera, la valorización del alperujo contribuye con el modelo de la economía circular, favoreciendo tanto el crecimiento socioeconómico como el cuidado medioambiental (Tapia-Quirós et al., 2022).

3.1.6. Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos, también conocidos como polifenoles, son un grupo diverso de compuestos químicos orgánicos que se caracterizan por tener al menos una estructura de anillo fenólico. Se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza en diversas plantas, incluyendo frutas, verduras, granos, hierbas y especias. Los compuestos fenólicos desempeñan un papel esencial en los mecanismos de defensa de las plantas, actuando como antioxidantes y brindando protección contra el estrés ambiental, como la radiación UV y los patógenos.

Dependiendo del número de anillos fenólicos y los grupos funcionales presentes, los compuestos fenólicos se dividen en varias clases y subclases diferentes. Los principales grupos de polifenoles incluyen ácidos fenólicos, estilbenos, lignanos, alcoholes fenólicos y flavonoides, que se pueden resumir en la Figura 6.

Los tipos específicos y las concentraciones de compuestos fenólicos varían según la fuente vegetal y su etapa de crecimiento, así como factores como el clima, las condiciones del suelo y los métodos de

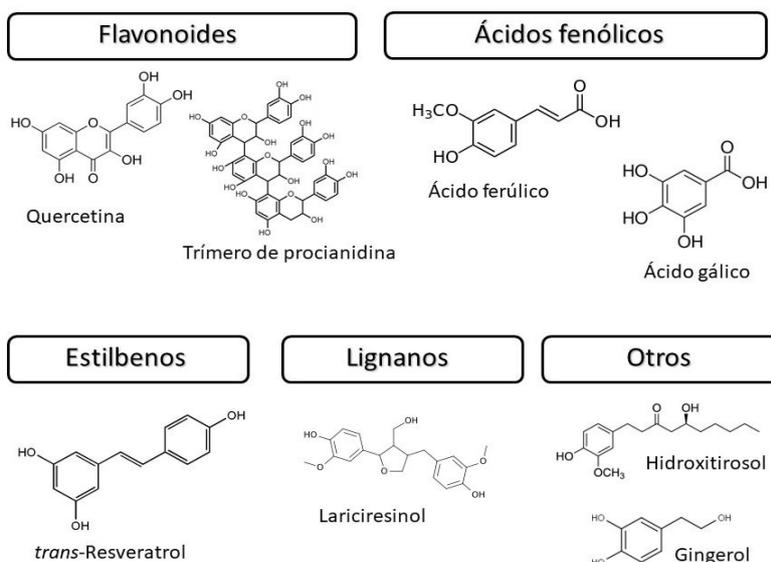


Figura 6. Clasificación resumida de los compuestos fenólicos. Fuente: (Pérez Jiménez, 2019)

procesamiento. Estos compuestos exhiben una variedad de actividades biológicas y son de gran interés debido a sus posibles beneficios para la salud. Se les reconoce por sus propiedades antioxidantes, que ayudan a neutralizar los radicales libres dañinos en el cuerpo, reduciendo el estrés oxidativo y previniendo el daño a las células y tejidos. Además, los polifenoles tienen efectos antiinflamatorios, antimicrobianos, anticancerígenos y promotores de la salud cardiovascular (Cvejić Hogervorst Jelena, 2018).

Debido a sus propiedades bioactivas, los compuestos fenólicos han despertado interés por sus posibles aplicaciones en alimentos funcionales, suplementos dietéticos y medicina natural. La investigación continúa explorando los diversos beneficios para la salud y los posibles usos terapéuticos de estos compuestos. Por estos motivos, los polifenoles resultan de interés principalmente para las industrias cosméticas, farmacéuticas y alimentarias. En la Figura 7, se detallan las estructuras químicas de los compuestos fenólicos presentes en la fracción minoritaria de la oliva.

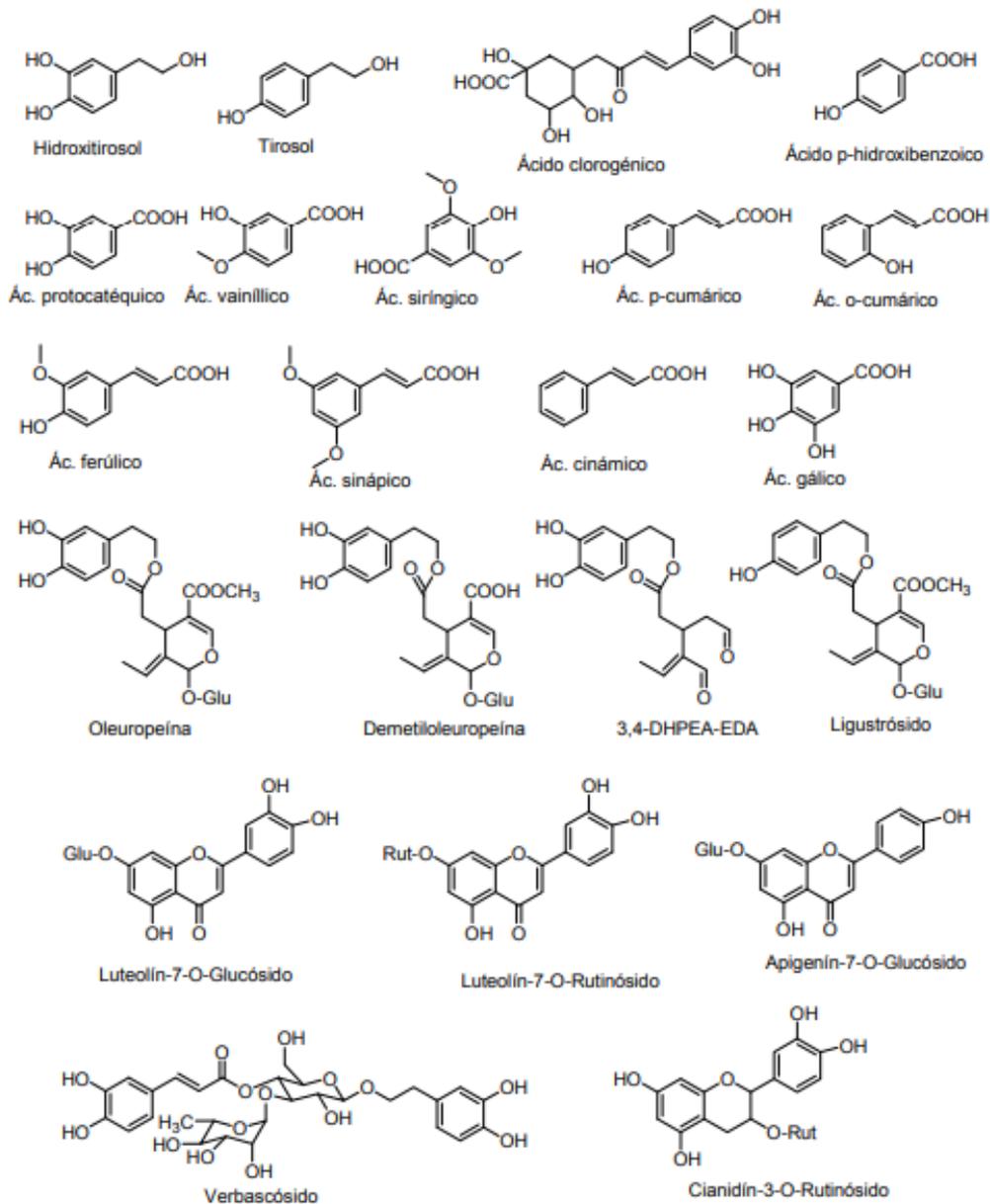


Figura 7. Estructura de los compuestos fenólicos presentes en la aceituna. Fuente: (Rubio Senent, 2011)

3.2. EXTRACCIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO

La extracción sólido-líquido es una técnica de separación que consiste en el tratamiento de un sólido que contiene uno o varios compuestos de interés que sean solubles en un cierto disolvente. Este proceso se basa en la transferencia de materia de un soluto sólido a un medio líquido, y, por ende, existen diferentes factores que pueden condicionarlo, como la temperatura, los equipos de extracción, y la naturaleza de los compuestos a tratar.

Esta técnica es ampliamente utilizada para la recuperación de compuestos fenólicos de materiales y residuos vegetales, incluyendo en la industria oleícola. Los métodos convencionales implican la

extracción por medios mecánicos, agitación y calentamiento, empleando disolventes polares, como por ejemplo agua, etanol o mezclas hidroalcohólicas, que sean afines a los polifenoles. Sin embargo, estos métodos suelen tener ciertas limitaciones, como la degradación de los compuestos de interés a altas temperaturas y tiempos largos de extracción.

Existen otros métodos no convencionales que son explorados para la separación de compuestos de alto valor añadido a partir de residuos de la industria agroalimentaria. La extracción asistida por ultrasonidos (UAE) es una de las técnicas más prometedoras debido a su bajo consumo energético, con menores temperaturas de trabajo y tiempos de extracción, así como también requiere una menor cantidad de disolvente y aumenta la eficiencia de extracción. Este método se basa en emplear ondas de sonido de alta frecuencia para producir el fenómeno de cavitación en el disolvente, mejorando la transferencia de masa entre la matriz sólida y el medio líquido. De esta manera, la implosión de las burbujas de cavitación genera turbulencias moleculares que rompen las paredes celulares de las células vegetales, facilitando la liberación y difusión de los compuestos fenólicos. Es importante destacar la alta reproducibilidad y el potencial de escalado que tiene la técnica, así como también su aplicabilidad para diversos residuos vegetales.

Se ha realizado previamente un estudio de la extracción de compuestos fenólicos de residuos sólidos de alcachofa (Rabelo et al., 2016) obteniendo un alto rendimiento de extracción con mezclas de etanol y agua (50-75%), siendo el extracto luego concentrado por nanofiltración. Otro estudio compara la extracción convencional con la asistida por ultrasonidos para la recuperación de flavonoides de residuos sólidos de pomelo (García-Castello et al., 2015), y se obtuvo un aumento del 50% del contenido fenólico total y un 66% de la actividad antioxidante. En un estudio sobre la extracción de componentes bioactivos del alperujo (Sánchez-Arévalo et al., 2022), se optimizó el proceso de extracción mediante un baño de ultrasonidos utilizando como disolvente una mezcla de etanol/agua 50:50 (v/v) a una temperatura de 40°C. Aplicando una etapa de ultrafiltración al extracto obtenido, los compuestos bioactivos fueron recuperados en el permeado, reduciendo así el contenido de materia orgánica y la fitotoxicidad del alperujo.

Por otro lado, también se emplean otros métodos alternativos, como la extracción asistida por microondas (MAE), que se basa en la aplicación de las mismas para calentar el disolvente de manera uniforme y rápida, penetrando en los poros de la matriz sólida. La energía de microondas afecta a las moléculas por conducción iónica y rotación de dipolos, generando fricción que resulta en el calentamiento del disolvente (Lopez-Avila, 2000). La selección de los disolventes para este método de extracción es crucial ya que deben tener la capacidad de absorción de microondas, ligada con el momento dipolar del disolvente: cuanto mayor sea la polaridad de la molécula, más rápido absorberá las microondas. La recuperación de compuestos fenólicos mediante MAE suele ser más elevada que con los métodos convencionales, y con una mejor reproducibilidad considerando un menor coeficiente de variación (Lopez-Avila, 2000), aunque también es cierto que las altas temperaturas alcanzadas pueden degradar los polifenoles. Un estudio más reciente (Azaroual et al., 2021) implementó esta técnica para optimizar la extracción de compuestos fenólicos simples de la piel y semillas de uvas, logrando unas condiciones óptimas con una disolución 1:50 en 65% v/v de metanol en agua, a 500 W y máxima velocidad de agitación (100% con un equipo de microondas Ethos 1600), durante 5 minutos.

Otra técnica interesante de extracción aprovecha el uso de fluidos supercríticos (generalmente, dióxido de carbono) como disolvente. Esto no solamente permite reducir la cantidad de disolvente líquido en la extracción, sino que no requiere una etapa de evaporación para la recuperación del compuesto de interés, al encontrarse el disolvente en fase gaseosa a temperatura ambiente y presión atmosférica. A pesar de su baja toxicidad como único disolvente, es habitual que el fluido supercrítico sea acompañado de un codisolvente para favorecer la extracción. Se realizó un estudio de la extracción de hidroxitirosol, tirosol y oleuropeína en residuos de hojas de olivo y alperujo por medio de disolventes eutécticos (*Deep Eutectic Solvents*) seguida de una reextracción con CO₂ supercrítico como purificación (Plaza et al., 2020), dando como resultado rendimientos de extracción entre 7.3 y 11.4 veces más grandes que con disolventes convencionales.

3.3. TECNOLOGÍA DE SEPARACIÓN POR MEMBRANAS

3.3.1. Conceptos teóricos

La técnica de separación por membranas es una operación que se basa en el paso de uno o varios solutos a través de una membrana semipermeable, que actúa como barrera selectiva que restringe el paso de otros compuestos, gracias a la acción de una fuerza impulsora (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018). La Figura 8 describe el mecanismo de separación, en el cual la membrana recibe una corriente de alimentación que se separa en dos fases, el permeado y el rechazo. La corriente de permeado se compone de aquellas sustancias que atraviesan los poros de la membrana, mientras que en el rechazo se retienen el resto de los compuestos.

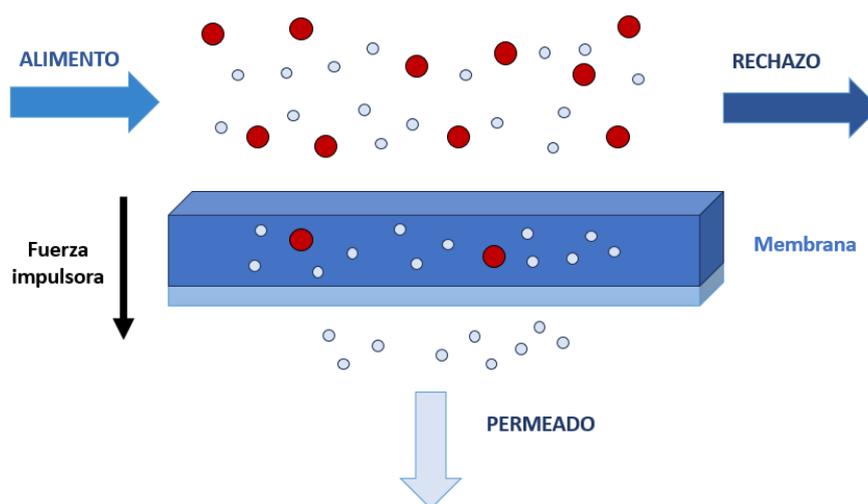


Figura 8. Esquema de separación por membranas con flujo tangencial

Si se compara la filtración convencional con la obtenida por membranas, el flujo de la corriente de alimentación en este último caso es tangencial, lo cual reduce la capa de torta formada en la barrera selectiva. Si el flujo es perpendicular, esta capa se acumula sobre el medio filtrante, reduciendo la velocidad de filtrado y requiriendo una mayor fuerza aplicada. Además, la separación por membranas tiene grandes ventajas como el bajo coste operativo, condiciones suaves de temperatura, el funcionamiento en continuo y el bajo impacto medioambiental, así como también la practicidad de los equipos modulares compactos en cuanto a cambios de escala y dimensionados. Sin embargo, las principales desventajas de los procesos de membranas se deben a su ensuciamiento y sensibilidad frente al ataque químico, lo cual reduce la permeabilidad y posiblemente la vida útil de las membranas.

Existen ciertas características generales que las membranas deben cumplir para que la separación de los compuestos de interés sea efectiva (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018). La selectividad describe el nivel de rechazo de la membrana hacia ciertos compuestos, iones o partículas, y se puede determinar mediante el coeficiente de rechazo, calculado con la Ecuación 1, donde C_P y C_A corresponden con la concentración de un determinado soluto en el permeado y la alimentación, respectivamente:

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_P}{C_A}\right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

La permeabilidad de una membrana permite caracterizar su productividad a través de la densidad de flujo de permeado (J), definido como el cociente entre el caudal de permeado (Q_P) que atraviesa la membrana y el área. Esto también se puede definir con la fuerza impulsora (X) empleada en el proceso, siendo proporcional a la densidad del flujo de permeado, como lo demuestra la Ecuación 2:

$$J = \frac{Q_P}{\text{Área}} = -A \cdot \frac{dX}{dx} \quad \text{Ecuación 2}$$

El término A es un coeficiente fenomenológico, mientras que el término x se corresponde con el espesor de la membrana. La permeabilidad también depende de factores como el tamaño y distribución de los poros en la membrana, así como también de la velocidad de la corriente de entrada de alimentación al sistema. Es importante también conocer la estabilidad que tienen las membranas a nivel químico, térmico y mecánico para garantizar un correcto funcionamiento y una separación más adecuada.

La fuerza impulsora puede deberse a diferencias de presión, concentración o potencial eléctrico, permitiendo así clasificar distintos tipos de separación, como se resume en la Tabla 6. Existen otros procesos de separación por membranas que emplean fases gaseosas, como la pervaporación o la separación de gases. En ambos casos, la fuerza impulsora es la presión parcial de gas, siendo la diferencia principal que, en la pervaporación, la alimentación es líquida y el permeado, gaseoso.

Tabla 6. Procesos de separación por membranas

PROCESO	FUERZA IMPULSORA
Microfiltración (MF) Ultrafiltración (UF) Nanofiltración (NF) Ósmosis Inversa (OI)	$\Delta P / \Delta x$
Diálisis	$\Delta c / \Delta x$
Electrodiálisis	$\Delta E / \Delta x$

Considerando los procesos en los que la fuerza impulsora es la diferencia de presión o presión transmembranal (TMP), se pueden resumir sus condiciones y características en la Tabla 7:

Tabla 7. Procesos de separación por membranas en operaciones de presión. Adaptado de (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018)

TECNOLOGÍA DE MEMBRANA	TAMAÑO DE PORO (μm)	PRESIÓN DE TRABAJO (bar)	J ($\text{L h}^{-1} \text{m}^{-2}$)
MF	0.1 – 10	0.5 – 2	> 200
UF	0.005 – 0.05	0.5 – 7	5 – 200
NF	0.0005 – 0.005	5 – 20	5 – 80
OI	< 0.001	10 – 80	5 – 50

3.3.2. Parámetros característicos

Existen una serie de parámetros característicos que definen las condiciones de operación de separación, dando lugar a una caracterización del proceso completo en cuanto a la selectividad y efectividad.

- Umbral de corte molecular (MWCO): se define como el peso molecular equivalente de los solutos que son rechazados en un 90% por la membrana. Su unidad de medida es el Dalton (Da) y su valor viene especificado para cada membrana.
- Densidad de flujo (o flux) del permeado (J): es el cociente entre el caudal de permeado y el área activa de la membrana

- Rechazo: es una medida de la selectividad del proceso para retener un cierto compuesto y se calcula mediante la Ecuación 3, siendo C_P y C_R la concentración en el permeado y rechazo, respectivamente.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_P}{C_R}\right) \cdot 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

- Conversión: es el porcentaje del caudal permeado frente al caudal de alimento al sistema
- Factor de reducción de volumen (VRF): se define en la Ecuación 4 como el cociente en el caudal de alimento (Q_A) con respecto al del rechazo (Q_R), y sirve como indicador para procesos de separación a concentración, como los propuestos en este trabajo (véase Capítulo 4)

$$VRF = \frac{Q_A}{Q_R} \quad \text{Ecuación 4}$$

- Factor de concentración: es la relación entre la concentración de un soluto en el rechazo con respecto al alimento

3.3.3. Tipos de membranas y módulos

La clasificación de las membranas se puede deber a diferentes factores como la naturaleza química, la estructura de la sección transversal y la geometría (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018).

Con respecto a su naturaleza, las membranas se pueden clasificar en orgánicas, basadas en polímeros como poliimidas, polisulfonas y ésteres de celulosa, y en inorgánicas, las cuales se diferencian en metálicas, de vidrio y cerámicas. Las membranas inorgánicas poseen una mayor estabilidad química, mecánica y térmica que las orgánicas, pero se caracterizan por ser más frágiles y costosas.

Si se tiene en cuenta la estructura de la membrana, se pueden clasificar en membranas simétricas, con una estructura de poro isotrópica, o asimétricas, las cuales a su vez pueden ser integrales o compuestas. Estas últimas se diferencian por tener una capa activa por donde permean los compuestos correspondientes, que se encuentra separada de la capa soporte de la membrana.

La configuración de las membranas puede ser plana, tubular (con un diámetro superior a 2 mm) o capilar (con diámetros interior entre 0.025 y 2 mm). Estas membranas se colocan en módulos que se adaptan a su configuración, actuando como soporte ya sea en forma de placas y marcos planos, como también en tubos con arrollamientos en espiral. Estos últimos son los más empleados en la industria debido a su mayor relación de superficie/volumen, favoreciendo el área de contacto entre el alimento y la membrana. En la Figura 9, se dispone de un esquema de un tubo de presión en donde se colocan los módulos de membranas para una instalación industrial. En general, estos tubos pueden almacenar entre 6 y 8 elementos o módulos cada uno en una instalación completa.

Las membranas con arrollamiento en espiral consisten en un tubo en el cual circula la alimentación por el espaciador entre cada membrana, dando lugar al paso del permeado a través de un tubo colector

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

central. Cada módulo se encuentra separado mediante juntas tóricas, que evitan que se mezclen las corrientes de rechazos de cada uno de ellos en el tubo de presión. En la Figura 10, se dispone de un esquema del tubo con la membrana enrollada. Existe una dependencia entre el espesor del espaciador y el área de membrana, ya que cuanto menor sea dicho espesor, mayor será el plegamiento de la membrana enrollada y, por tanto, el área total de membrana se incrementa. Sin embargo, también es cierto que un menor espesor implica un ensuciamiento más rápido de la membrana en las mismas condiciones de circulación de alimento.

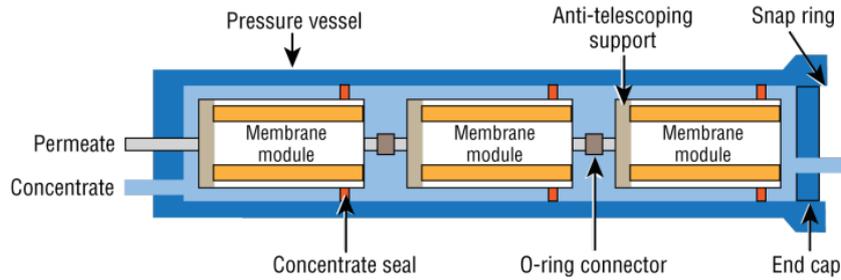


Figura 9. Esquema de tubo de presión con módulos de membrana en serie

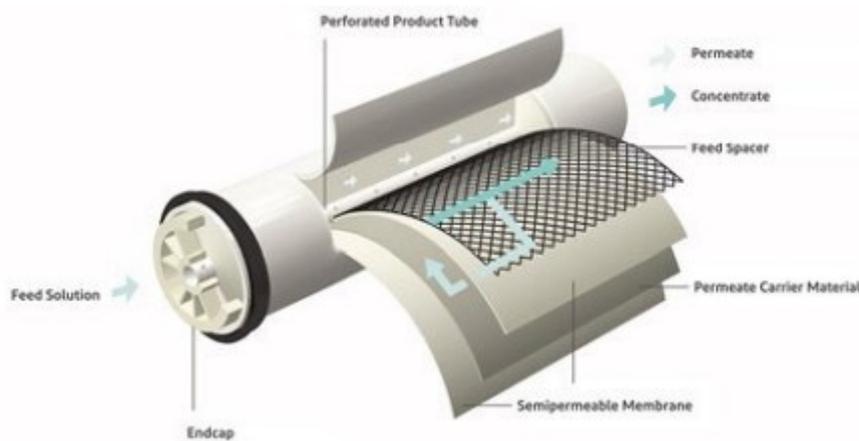


Figura 10. Construcción de membrana con enrollamiento en espiral. Fuente: (Dupont, 2023)

La disposición de los módulos puede variar con conexiones en serie, en paralelo o una combinación de ambos (esquema piramidal). Las conexiones en serie son útiles cuando el rendimiento del permeado obtenido en un solo módulo no es suficiente, ya que el rechazo del primer módulo actúa como el alimento del siguiente, reuniendo todos los permeados por una conexión. En el caso de las conexiones en paralelo, el número de módulos depende de la capacidad del sistema y la velocidad tangencial establecida, mientras que la configuración piramidal combina las características de los anteriores tipos de conexiones. En la Figura 11, se muestran los esquemas de conexiones mencionados.

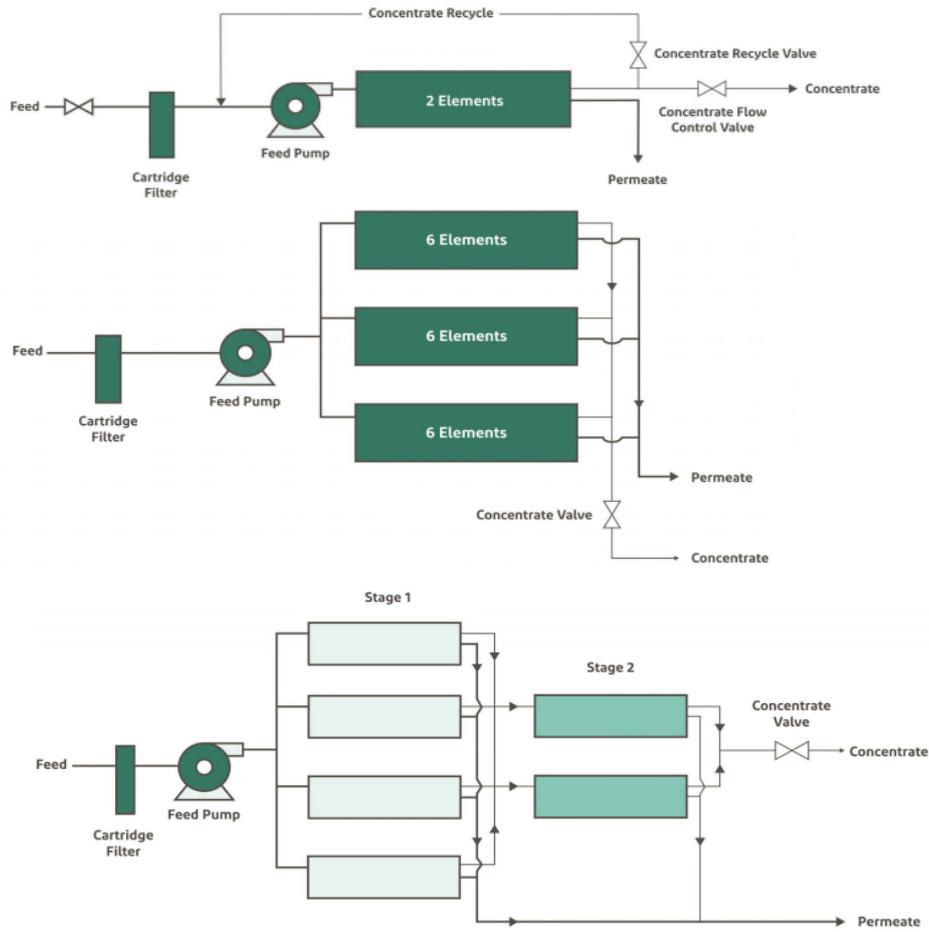


Figura 11. Disposiciones generales de módulos de membranas en plantas de ósmosis inversa: en serie (arriba), en paralelo (medio), o multietapa (abajo). Fuente. (Dupont, 2023)

3.3.4.

Ensuciamiento de las membranas

Como se mencionó previamente, la principal desventaja de la separación por membrana es el ensuciamiento, el cual se puede deber a diversos motivos (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018):

- Las fuertes interacciones del soluto con la capa activa de la membrana pueden favorecer fenómenos de adsorción de las moléculas, impidiendo el paso del soluto como permeado
- Si el tamaño molecular del soluto es similar al de los poros de la membrana, esto provoca que los poros sean bloqueados, disminuyendo la densidad de flujo de permeado
- La formación de una “capa gel”, como producto de una red entre las macromoléculas de soluto y el disolvente, aumenta el ensuciamiento de la membrana. Al mismo tiempo, el fenómeno de polarización por concentración se basa en la acumulación de solutos en la superficie de la membrana, el cual genera un gradiente de concentración en sentido opuesto a la densidad de flujo de permeado.
- Es posible también la formación de depósitos en la superficie o interior de la membrana, ya sea por precipitación o deposición de sólidos en suspensión

3.3.5. Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa es uno de los procesos más finos de filtración disponibles, siendo aquel de mayor gradiente de presión dentro de la tecnología de separación por membranas. La membrana, en este caso, actúa como una barrera para todas las sales disueltas y moléculas inorgánicas, así como las moléculas orgánicas. Por otro lado, las moléculas de agua pasan libremente a través de la membrana creando un flujo de producto purificado. La eliminación de las sales disueltas suele ser del 95%, e incluso superior al 99%, dependiendo de factores como el tipo de membrana, la composición del agua de alimentación, la temperatura y el diseño del sistema.

En el proceso de ósmosis directa, el disolvente pasa naturalmente de una región de baja concentración de solutos a través de la membrana hasta una región de alta concentración de solutos. La fuerza impulsora en este caso es el gradiente de concentración que se forma por las diferencias en las concentraciones de soluto, generando así una diferencia de presión osmótica que provoca el paso del disolvente a la disolución más concentrada. Si se aplica suficiente presión externa, es posible vencer el flujo natural del disolvente, dando como lugar al proceso de ósmosis inversa (Ahuchaougu, 2018), el cual es capaz de separar el disolvente de una corriente a través de una membrana semipermeable desde una región de mayor concentración a una de menor concentración de solutos. En la Figura 12, se comparan en esquemas los procesos de ósmosis directa e inversa. La presión osmótica también se puede definir como la mínima presión necesaria para que sea posible este proceso. El resultado de esto es el paso de disolvente prácticamente puro a través de los poros de la membrana como permeado, mientras que, en el rechazo, los solutos son concentrados y retenidos en el lado presurizado de la membrana.

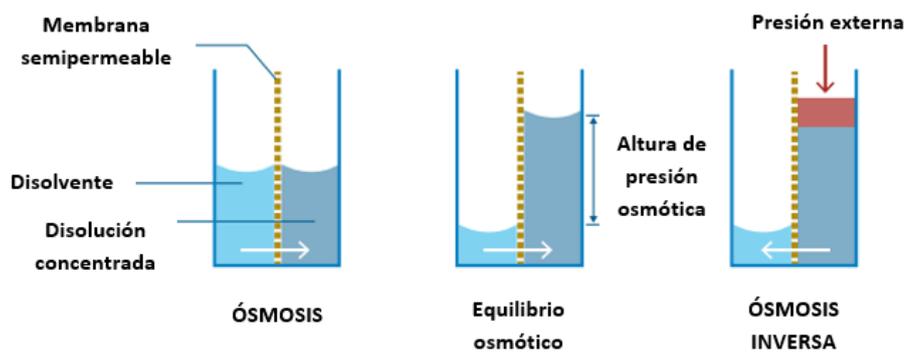


Figura 12. Esquema de principio de ósmosis inversa. Adaptado de (Salinas-Rodríguez et al., 2021)

Las aplicaciones de la ósmosis inversa son variadas, como la desalinización del agua de mar o salobre, la recuperación de aguas residuales, el procesamiento de alimentos y bebidas, las separaciones biomédicas, la purificación del agua potable doméstica y del agua de proceso industrial. Al mismo tiempo, la ósmosis inversa es empleada en la producción de agua ultrapura para la industria de semiconductores, la industria energética y aplicaciones médicas o en laboratorios. Las presiones

transmembranales para la ósmosis inversa suelen oscilar desde 5 bar para agua salobre hasta más de 84 bar para agua de mar (Dupont, 2023).

Las principales ventajas que tiene la ósmosis inversa frente a otros procesos de separación es el bajo coste operativo energético y la simplicidad en el diseño industrial. A su vez, el hecho de que los sistemas sean modulares también otorga una mayor flexibilidad en la construcción de las plantas. Los sistemas de ósmosis inversa también permiten operar a temperatura ambiente, reduciendo los problemas derivados de la formación de cales y corrosión (Ahuchaougu, 2018), y se evitan temperaturas de trabajo que puedan degradar los compuestos en la corriente de alimento a concentrar, como los polifenoles en el presente estudio. Sin embargo, al igual que con el resto de los procesos de separación por membranas, la gran desventaja de la ósmosis inversa es el ensuciamiento de la membrana, lo cual reduce la densidad de flujo de permeado y es aún más perjudicial conforme se emplean membranas de menor tamaño de poro. Por este motivo, los sistemas de limpieza son una parte importante en el diseño de plantas de ósmosis inversa para un correcto mantenimiento de las membranas y de las condiciones del proceso.

3.3.6. Aplicaciones de la tecnología de membranas

La separación por membranas tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria química que se pueden basar en la purificación de compuestos de interés, eliminando las impurezas ya sea en el permeado o rechazo; el fraccionamiento de una mezcla en diferentes componentes buscados; y la concentración por medio de la eliminación del disolvente en el permeado (Álvarez Blanco & Mendoza Roca, 2018).

En este estudio, se emplean las etapas de ultrafiltración y nanofiltración a modo de purificación y fraccionamiento, respectivamente, con el fin de aumentar la selectividad del proceso de recuperación de compuestos fenólicos. La última etapa de ósmosis inversa sirve para la concentración de los polifenoles ya purificados, eliminando gran parte del disolvente empleado.

Algunas de las aplicaciones técnicas de las tecnologías de separación por membranas son las siguientes:

- Ultrafiltración (UF): se emplea en el tratamiento terciario de la depuración de aguas residuales, para la eliminación de proteínas, carbohidratos e incluso agentes patógenos como virus y bacterias. La UF también se utiliza en la concentración y fraccionamiento de proteínas en la industria láctea, y tiene la finalidad de eliminar la mayor cantidad de materia orgánica en el proceso de estudio de recuperación de polifenoles a partir del extracto de alperujo.
- Nanofiltración (NF): este proceso es utilizado en la purificación y tratamiento de aguas, como la eliminación de pesticidas, metales pesados y nitratos. Dado que retiene sales e iones divalentes como Ca²⁺ y Mg²⁺, la nanofiltración permite el ablandamiento de aguas y reduce la formación de carbonatos en medios acuosos. En el presente estudio, la etapa de nanofiltración sirve también como un proceso de fraccionamiento de la gran variedad de compuestos fenólicos presentes en el alperujo, con grupos funcionales diversos y pesos moleculares amplios.

- Ósmosis inversa (OI): su principal uso es en la desalación de agua de mar, aunque también tienen otras aplicaciones industriales para la concentración de solutos y eliminación de contaminantes. Como se ha mencionado previamente, la etapa de ósmosis inversa busca concentrar la disolución de compuestos fenólicos ya purificada y fraccionada, con el fin de obtener un producto final capaz de ser comercializado.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. OBTENCIÓN DE LA CORRIENTE DE ALIMENTO

La separación y purificación de los compuestos fenólicos propuesta en el presente trabajo se realiza a partir de muestras de alperujo obtenidas de la campaña 2021/2022 de la almazara San Isidro Cooperativa (Segorbe, Castellón), la cual funciona en sistema continuo de centrifugación a dos fases. El alperujo se conserva herméticamente cerrado y en refrigeración en torno a 4-5 ° C con el fin de evitar su descomposición por agentes externos, ya sean oxidación con el aire o proliferación de microorganismos.

La metodología empleada se basa en una extracción sólido-líquido asistida por ultrasonidos, la cual fue previamente optimizada (Sánchez-Arévalo et al., 2022), seguida de etapas de centrifugación y filtración para eliminar posibles restos vegetales del extracto antes de iniciar los ensayos de separación con membranas. El extracto preparado, que sirve como alimento al proceso de ultrafiltración (véase apartado 4.2.), es almacenado en garrafas para su posterior uso a una temperatura de 5° C.

4.1.1. Extracción sólido-líquido asistida por ultrasonidos (UAE)

Para obtener la corriente de alimento necesaria en el tratamiento con membranas, se preparó un total de 8 L de extracto a dilución 1:10 empleando como muestra sólida el alperujo de la almazara y como disolvente una mezcla de etanol y agua al 50% v/v. El equipo principal que se utiliza para la extracción es un baño de ultrasonidos de modelo Elmasonic P 70 H de marca Elma, como se puede ver en la Figura 13. Las condiciones de extracción son: frecuencia de 37 kHz a máxima potencia (100%), tiempo de extracción de 45 minutos, y temperatura de 40 °C.

Debido a la capacidad total limitada del baño, se ha realizado todo el proceso por duplicado, preparando en cada caso 4 L de extracto al pesar 400 gramos de alperujo y mezclar 2 L de agua destilada con 2 L de etanol. Con el fin de regular la temperatura, se decidió colocar un refrigerante en espiral, conectado a un balo de refrigeración, dentro del baño de ultrasonidos. Al mismo tiempo, se incorporan dos palas rotatorias para favorecer la agitación en la extracción, permitiendo la liberación de polifenoles de la pared celular en las células de los residuos vegetales. La velocidad de agitación de las palas fue en torno a 200 rpm, procurando la formación de remolinos dentro del baño. En la Figura 14, se puede ver una representación del equipo completo en funcionamiento.

Pasados los 45 minutos de la extracción, se hace una filtración previa mediante un colador para eliminar los restos sólidos de mayor tamaño antes de la siguiente etapa de centrifugación.



Figura 13. Equipo de extracción sólido-líquido: baño de ultrasonidos y palas rotatorias



Figura 14. Equipo de extracción en funcionamiento

4.1.2. Centrifugación

El extracto filtrado se trasvasa a contenedores aptos para la centrifuga equipada, de modelo Sigma 6-16KS, como se puede ver en la Figura 15. Las condiciones empleadas son: un tiempo de centrifugación de 6 min, velocidad de 9600 rpm, temperatura de 24 °C y con velocidad de subida y bajada de 9 y 6, respectivamente. La velocidad de rotación de las condiciones es la máxima permitida por el equipo, pero idealmente se buscaría una velocidad de 10000 rpm.



Figura 15. Centrífuga Sigma 6-16KS

4.1.3. Filtración a vacío

Debido a la presencia de partículas en suspensión, después de la etapa de centrifugación, se decidió realizar una filtración a vacío, utilizando una bomba conectada a un Kitasato con un embudo Buchner. La bomba de vacío es de modelo Laboport (KNF) con filtros de celulosa de 60 μm .

4.2. ULTRAFILTRACIÓN

El proceso de ultrafiltración se lleva a cabo en una planta de flujo cruzado (Orelis Environment, Salindres, Francia), empleando un módulo de metacrilato para membranas planas y de modelo Rayflow (Orelis Environment, Salindres, Francia). En las Figuras 16 y 17, se pueden observar la planta y el módulo respectivamente. Dicho módulo actúa con dos membranas en serie, recogiendo permeado por cada membrana y recirculando la corriente de rechazo al tanque de alimentación de la planta. La planta tiene tres válvulas principales, como se observa en la Figura 17 a la izquierda: la primera es utilizada para el vaciado y limpieza del tanque, la segunda permite realizar un purgado del fluido que queda en la planta, y la tercera sirve para recircular el rechazo de las membranas al tanque, así como también controlar la presión transmembranal. El tanque encamisado de la planta está conectado a un baño termostático con sistema de refrigeración, el cual permite regular a la temperatura deseada. El permeado de cada membrana es recolectado en un único vaso de precipitados con una balanza de precisión (Kern, Alemania) conectada a un ordenador para la adquisición de datos de la diferencia de pesada (Δm). Sabiendo dicho valor, así como también el tiempo transcurrido (t) y la densidad de la mezcla empleada (ρ_{mezcla}), es posible calcular la densidad de flujo de permeado mediante la Ecuación 5, siendo Q_p el caudal de permeado, A el área de membrana, y TMP la presión transmembranal:

$$J_p \left(\frac{L}{h \cdot m^2 \cdot bar} \right) = \frac{\Delta m}{\rho_{mezcla} \cdot A \cdot t \cdot TMP} = \frac{Q_p}{A \cdot TMP} \quad \text{Ecuación 5}$$

Se han realizado este proceso de ultrafiltración con dos membranas comerciales diferentes (UF010104 y UP005), con el fin de comparar sus beneficios y desventajas, por lo que fue necesario preparar 8 L de extracto para cada ensayo. En la Tabla 8, se resumen las características de las membranas utilizadas en este estudio para cada etapa de separación.

Tabla 8. Especificaciones de las membranas empleadas

Membrana	Material	Proveedor	MWCO ⁽¹⁾ (kDa)	Proceso
UF010104	Polimérico	SolSep BV	20 ⁽²⁾	UF
UP005	PES ⁽³⁾	Microdyn Nadir	5	UF
NF270	Poliamida	Dupont	0.3-0.4	NF
NF90	Poliamida	Dupont	0.2	OI

- (1) Umbral de peso molecular (Molecular-weight cut off)
- (2) En hexano
- (3) Polietersulfona hidrofílica



Figura 16. Planta de ultrafiltración (Orelis, Francia)



Figura 17. Tanque encamisado de planta de ultrafiltración (Orelis, Francia) (izquierda) y módulo de membranas Rayflow para la planta de ultrafiltración (derecha)

4.2.1. Acondicionamiento y compactación

Para colocar las membranas en el módulo, es necesario dejarlas sumergidas por dos horas en el disolvente empleado para el extracto obtenido previamente, es decir, una disolución de etanol y agua al 50% v/v. Este paso sirve como acondicionamiento de las membranas para hidratarlas y retirar conservantes propios de fabricación. Una vez hidratadas, se disponen las membranas en el módulo, con la cara activa del lado donde circula el disolvente y se cierra fuertemente para evitar posibles fugas.

A continuación, se procede a realizar una compactación de las membranas con el disolvente empleado a una presión transmembranal de 2.2 bar. Este paso sirve para obtener una estructura estable de la membrana durante los posteriores ensayos de permeabilidad y con el extracto. Es importante mencionar que la presión de trabajo es superior a la cual se trabaja en los ensayos con la muestra de extracto, siendo de 2 bar.

4.2.2. Permeabilidad inicial del disolvente

Antes de iniciar los ensayos con el extracto obtenido previamente, es necesario caracterizar la membrana a emplear, es decir, determinar la permeabilidad inicial al disolvente utilizado. Para ello, se mide la densidad de flujo permeado (J_p) a diferentes presiones transmembranales (TMP), siendo el rango de estudio de 0.75 – 2 bar para la membrana UF010104, y 1 – 2.5 bar para la membrana UP005. La permeabilidad hidráulica (L_p), se calcula mediante la Ecuación 6, con las correspondientes unidades:

$$L_p = \frac{J_p}{TMP}$$
$$L_p \left(\frac{L}{h \cdot m^2 \cdot bar} \right), J_p \left(\frac{L}{h \cdot m^2} \right), TMP (bar)$$

Ecuación 6

4.2.3. Ensayos con extracto obtenido

A continuación, el tratamiento del extracto se realizó a una presión de 2 bar con la membrana UF010104 y 2,5 bar para la membrana UP005 (en ambos casos, menores a la presión de compactación), con una velocidad tangencial del flujo de 1,8 m/s y una temperatura de 25 °C. El ensayo es bajo concentración, es decir, recolectando el permeado y recirculando el rechazo a la planta, hasta obtener al menos un factor de reducción de volumen (VRF) de 2. Con el fin de caracterizar el ensayo, se tomaron muestras de permeado y rechazo a valores de VRF intermedios entre 1.1 y 2,5.

Si la duración de estos ensayos requiere más de un día, es necesario parar la planta de ultrafiltración, guardar el extracto y limpiar la planta de ultrafiltración con disolvente de etanol: agua 50% v/v, guardando el disolvente para reutilizar en posteriores limpiezas. Esto permite mejorar la sostenibilidad de los ensayos, reduciendo costes en el consumo de disolvente. Dependiendo del ensuciamiento de las membranas, también se ha recurrido a hacer limpiezas con una disolución de P3-Ultrasil 110 al 1% v/v (véase apartado 4.5).

4.3. NANOFILTRACIÓN

El permeado obtenido en la ultrafiltración es tratado en una planta de nanofiltración de flujo cruzado, equipado con un módulo de acero inoxidable diseñado para la planta (Santafé-Moros, González-Zafrilla et al., 2010). El área de membrana en el módulo es de 72 cm² y se empleó una membrana NF270 (Microdyn Nadir) para este proceso. La planta funciona con una bomba de desplazamiento positivo (Cat Pumps SCP1231) alimentada con un tanque adaptado de 10 litros, y posee dos manómetros, a la entrada y a la salida del módulo, con el fin de medir la presión transmembranal, controlada mediante una válvula de aguja. El sistema es monitorizado mediante un panel de control Simatic HMI (Siemens), en el cual se determinan los valores de presión y flujo. Se recolecta el permeado y se calcula la densidad de flujo de la misma manera que en el ensayo de ultrafiltración.

Similar al proceso de ultrafiltración, la membrana requiere un acondicionamiento en remojo con el disolvente 24 horas antes de iniciar los ensayos en la planta. A continuación, se realizó una etapa de compactación a una TMP de 22 bar, con una velocidad de flujo cruzado de 1 m·s⁻¹ hasta que se observó un flujo de permeado estable. La permeabilidad hidráulica fue calculada de la misma manera que en el ensayo de ultrafiltración, en un rango de 5 – 20 bar a 1 m·s⁻¹ y 25 °C.

De esta manera, el extracto ultrafiltrado fue nanofiltrado a 15.5 bar y 1 m·s⁻¹, utilizando la planta en modo de concentración, similar a la etapa anterior. Muestras de tanto el rechazo como el permeado fueron recolectadas a diferentes valores de VRF entre 1.1 y 2.0 para su posterior caracterización. Este ensayo fue completado en un día, por lo que no fue necesario ningún tipo de limpieza intermedia de la membrana. En la Figura 18, se puede ver la instalación de la planta de nanofiltración empleada.

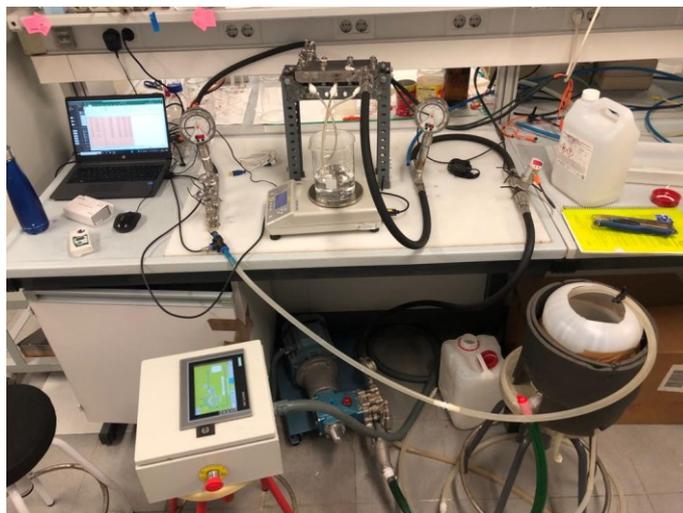


Figura 18. Instalación de la planta de nanofiltración en el laboratorio

4.4. ÓSMOSIS INVERSA

El permeado obtenido anteriormente en la etapa de nanofiltración es tratado como el alimento para el proceso de ósmosis inversa, que sirve como purificación de los compuestos fenólicos separados en los previos ensayos. La planta de tratamiento es la misma que la empleada para la nanofiltración (apartado 4.3.), pero en este caso, se utilizó la membrana NF90 en el proceso.

Al igual que en las etapas anteriores, los ensayos de acondicionamiento, compactación y permeabilidad son necesarios antes de tratar el permeado nanofiltrado. La membrana NF90 fue dejada en remojo por 24 horas en el disolvente de trabajo, y luego compactada a una presión de 22 bar y velocidad de flujo cruzado de 1 m·s⁻¹. La permeabilidad del disolvente fue estudiada bajo las mismas condiciones que la etapa de nanofiltración.

El ensayo de ósmosis inversa con el permeado nanofiltrado obtenido fue llevado a cabo a una TMP de 20 bar y velocidad de flujo de 1 m·s⁻¹, empleando la misma metodología para la recolección de muestras de las corrientes de rechazo y permeado a valores de VRF de 1.05 y 1.1.

4.5. LIMPIEZA DE MEMBRANAS

En el ensayo de ultrafiltración con la membrana UP005, se decidió realizar una limpieza intermedia de la membrana para eliminar posibles restos que redujeran considerablemente el flujo permeado y así acelerar el proceso. Para ello, en primer lugar, se realiza un enjuague con una disolución de etanol al

50% v/v, con la planta en funcionamiento sin recircular, y luego del vaciado del tanque, se preparan 5 L de una disolución de detergente P3-Ultrasil 110 (Ecolab S.L., España) al 1% v/v en el disolvente empleado, la cual será el alimento de la planta. Las condiciones de limpieza fueron a 35 °C, sin aplicación de presión, y con recirculación del rechazo, durando un total de 30 minutos.

A continuación, se recupera la disolución del detergente y se realiza un enjuague de la planta con agua de red, a entrada constante mediante una manguera y sin recircular. La disolución de detergente tiene un carácter básico (pH aproximado a 8). Por lo tanto, para eliminar los restos de burbujas de detergente en la membrana y las conducciones, se mide el pH de muestras recolectadas a la salida de la planta y se compara con la del agua de red. Una vez ambos valores son iguales, se para el proceso de limpieza, y se realiza un ensayo de permeabilidad para comprobar que se recuperan las propiedades de la membrana inicialmente.

4.6. CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

4.6.1. Color

El color es una característica de interés en procesos industriales ya que, por ejemplo, permite ver de forma cualitativa el ensuciamiento de las corrientes de vertido y se busca idealmente que los residuos sean incoloros. En el presente trabajo, el color de las corrientes de rechazo y permeado permite aportar información sobre el funcionamiento de la separación por membranas.

Se ha determinado el color de las muestras tomadas siguiendo la norma ISO 7887:2011, método B (UNE, 2012), a partir de la Ecuación 7. Se mide la absorbancia de la muestra a 436 nm, 525 nm y 620 nm, y se calcula el valor final.

$$Color = \frac{A_{436}^2 + A_{525}^2 + A_{620}^2}{A_{436} + A_{525} + A_{620}} \quad \text{Ecuación 7}$$

4.6.2. Sólidos totales

Para la determinación de sólidos totales, se mide un volumen conocido de muestra y se deja evaporar en un vaso de precipitados dentro de una estufa por 24 horas a un mínimo de 100 °C. A continuación, se coloca el vaso dentro de un desecador para eliminar la humedad remanente al retirar del horno. Luego se debe pesar el sólido remanente en una balanza de precisión (Kern, Alemania) y calcular los sólidos totales (mg sólidos/mL de muestra) por diferencia de pesada, de acuerdo con la Ecuación 8. Es importante mencionar que se realiza este protocolo para las muestras de rechazo y permeado obtenidas en los ensayos, con el fin de obtener el porcentaje de rechazo de sólidos totales del proceso global y para cada VRF medido.

$$SST \left(\frac{mg}{mL} \right) = \frac{W_{inicial} - W_{final}}{V_{muestra}} \quad \text{Ecuación 8}$$

4.6.3. Fenoles totales: método Folin-Ciocalteu

El método Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965) sirve para cuantificar los fenoles totales en una determinada muestra. En este ensayo, se emplea el reactivo de Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich), que consiste en una mezcla de wolframato sódico y molibdato sódico en ácido fosfórico, y su reacción con los polifenoles en medio básico da lugar a la formación de un complejo de color azul, capaz de ser determinado por espectrofotometría a una longitud de onda de 765 nm. La reacción sigue un mecanismo de tipo redox, en el cual los polifenoles se oxidan mientras que el reactivo de Folin se ve reducido.

Para llevar a cabo el ensayo, se añaden 6,8 mL de agua destilada en tubos de ensayo y 0,2 mL de la muestra, ya sea como posible dilución o no. A continuación, se añaden 0,5 mL del reactivo de Folin y se agitan los tubos en el baño de ultrasonidos por 3 min. Se utiliza una disolución de Na₂CO₃ al 20% m/v para iniciar la reacción, añadiendo 1 mL en cada tubo. Se deja que la reacción se complete por una hora en ausencia de luz, para luego medir la absorbancia a 765 nm. Es importante mencionar que se requiere una recta de calibrado para determinar la concentración de fenoles totales, y para ello se utilizan patrones de ácido gálico en EtOH 50% v/v, obteniendo el contenido total de fenoles como mg de ácido gálico equivalente/L. El espectrofotómetro empleado para medir la absorbancia es de modelo Hach DR600.

4.6.4. Carbohidratos totales: método Antrona

El método de la antrona se utiliza para la cuantificación de carbohidratos totales, ya sean libres o unidos a proteínas o lípidos. El reactivo que se utiliza es una disolución 0,2% m/v de antrona en ácido sulfúrico 96%, y su interacción con los azúcares dan lugar a la formación de un complejo de color azul-verde, que puede ser determinado por espectrofotometría a 625 nm. La reacción consiste inicialmente en una hidrólisis de las uniones glicosídicas para producir monosacáridos, mediante el ácido sulfúrico concentrado. El ácido también cataliza la deshidratación de los monosacáridos, formando furfurales o hidroxifurfurales, que luego condensan con dos moléculas de antrona para formar el complejo azul-verde.

El protocolo para realizar este ensayo, basado en estudios previos (Dreywood, 1946; Ludwig & Goldberg, 1956), consiste en hacer reaccionar 1 mL de la muestra, a dilución conveniente, con 2 mL del reactivo preparado con antrona. Para favorecer la homogeneidad de la mezcla en los tubos, se utiliza un agitador Vortex de modelo Heidolph REAX top. Los tubos de ensayo se colocan en un baño a 100 °C por 14 min. A continuación, se dejan enfriar en hielo por 5 min, y se mide la absorbancia a 625 nm, con el mismo espectrofotómetro empleado para el método de Folin. En este caso, para la recta de calibrado se emplea como patrón una disolución de glucosa en EtOH al 50% v/v.

4.6.5. Determinación del pH y conductividad

Se emplea el pHímetro de modelo GLP 21+ de la marca Crison, mientras que el conductímetro utilizado es de modelo GLP31+, también de la misma marca. Las sondas de cada equipo son lavadas y secadas adecuadamente con agua destilada.

4.6.6. Determinación de perfil fenólico

Además de la determinación de los fenoles totales en las muestras, también es interesante analizar los compuestos fenólicos presentes y su porcentaje de rechazo específico en cada ensayo y corriente obtenida. Para ello, se emplea un cromatógrafo de líquidos asociado a un espectrómetro de masas (LC-MS), con una interfase de tipo electrospray (ESI). Las muestras son previamente filtradas usando filtros de 0.2 µm, y separadas mediante un equipo LC 1290 Infinity II (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). Este equipo este acoplado a un analizador de masas 6546 cuadrupolo-tiempo-de-vuelo (qToF), en modo polaridad negativa (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). El método utilizado para el análisis fue previamente optimizado (Sánchez-Arévalo et al., 2022), con una columna Zorbax Extend C18 de dimensiones 4.6 x 100 mm, 1.8 µm (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA), y fase móvil A y B de agua ultrapura (Direct-Q® 3UV system, Merck Millipore, USA) y acetonitrilo acidificadas con 0.1% y 0.5% de ácido acético, respectivamente, para mejorar el gradiente de polaridad en la separación. Las muestras son cuantificadas mediante calibración externa con patrones de ácido cítrico, tirosol, ácido cafeico (VWR International, USA), hidroxitirosol, ácido p-cumárico, oleuropeína y decarboximetil-oleuropeína aglicona y ácido hidroxioctadecanoico (Sigma Aldrich, USA), preparados en un rango entre 0.1 – 100 mg·L⁻¹. De esta manera, se calcula el porcentaje de rechazo de cada compuesto fenólico, obteniendo así el perfil fenólico.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZACIÓN DE CORRIENTE DE EXTRACTO HIDROALCOHÓLICO DE ALPERUJO

El extracto de alperujo fue obtenido mediante ultrasonidos (UAE) en una disolución de etanol/agua 50% (v/v), como fue descrito previamente. Antes de ser empleado como alimento a la planta de ultrafiltración, se decidió caracterizar la muestra, dando como resultado los valores recogidos promedios junto a su desviación en la Tabla 9.

Tabla 9. Caracterización del extracto hidroalcohólico del alperujo

<i>Parámetro</i>	<i>Concentración</i>
<i>Contenido fenólico total (mg/L)</i>	737 ± 6
<i>Contenido en azúcares totales (mg/L)</i>	663 ± 18
<i>Sólidos totales (mg/mL)</i>	7.78 ± 0.02
<i>Color</i>	2.3 ± 0.1
<i>pH</i>	5.9 ± 0.2
<i>Conductividad eléctrica (μS/cm)</i>	679 ± 30

Los compuestos fenólicos, los cuales resultan de interés en el presente trabajo, tienen una concentración apreciable en la matriz del extracto. Además, esto coincide con estudios previos en los que la concentración óptima resulta ser en las condiciones realizadas, obteniendo valores más elevados en comparación con ensayos realizados en agua como disolvente (Sánchez-Arévalo et al., 2023). Sin embargo, aunque se podrían emplear otros disolventes para aislar los compuestos fenólicos, como N,N-dimetilformamida (DMF) o tetrahidrofurano (THF), el uso de agua y etanol proponen alternativas más sostenibles y biocompatibles con buena eficiencia de extracción.

En otro estudio de los mismos autores (Sánchez-Arévalo et al., 2022), se identifican las familias de los compuestos presentes en el extracto de alperujo y se cuantifican mediante cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS). Las familias químicas identificadas fueron: ácidos orgánicos, fenoles simples, ácidos fenólicos y aldehídos, flavonoides, lignina, ácidos triterpénicos, derivados de ácidos grasos y en mayor proporción, secoiridoides. El cromatograma del extracto obtenido por UAE a 40°C, 40 min y en etanol/agua 50% (v/v) se puede ver en la Figura 19. La concentración de secoiridoides fue la más elevada, entorno a los 3800 mg/kg, mientras que los fenoles simples y flavonoides se encontraban en valores cercanos a los 500 y 800 mg/kg, respectivamente.

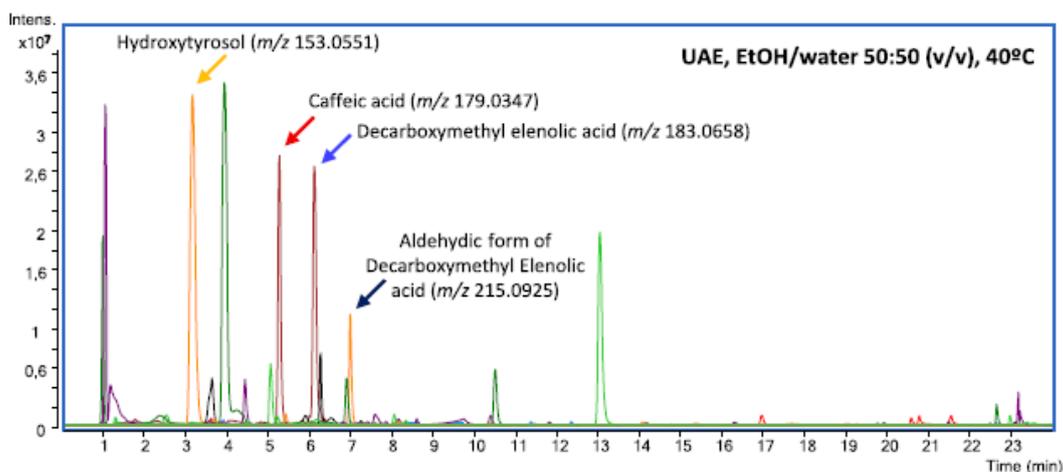


Figura 19. Cromatograma del extracto de alperujo obtenido por UAE, en etanol/agua 50:50 (v/v), a 40 °C.
Fuente: (Sánchez-Arévalo et al., 2022).

En cuanto a los carbohidratos totales, se puede ver que es comparable al contenido fenólico presente, lo cual es esperable para un residuo como el alperujo, de alto nivel de materia orgánica. Debido a esto, es común utilizar los procesos de separación de membranas como método de purificación y fraccionamiento de las familias de los compuestos de interés.

El coeficiente de color calculado del extracto se debe a su aspecto marrón opaco, y el pH obtenido, ligeramente ácido, es consistente con sus características mencionadas previamente (apartado 3.1.5.2.). La conductividad eléctrica del extracto es menor a la obtenida en extractos acuosos debido a la baja conductividad del etanol, entorno a los 0.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Personnaa et al.).

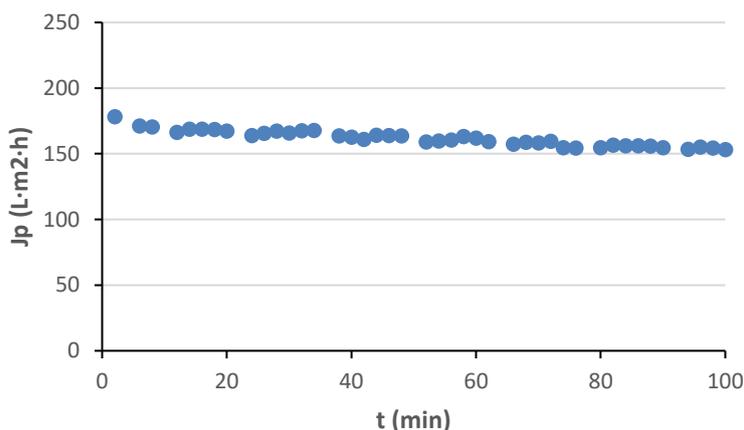
5.2. ULTRAFILTRACIÓN

Como se ha descrito previamente, en los ensayos de ultrafiltración se ha medido variación de la densidad del flujo de permeado con respecto al tiempo. Por ende, dado que el modo de trabajo de la planta fue a concentración, el tiempo transcurrido es proporcional al factor de reducción de volumen (VRF), brindando un resultado más interesante de analizar en los procesos de separación por membranas. A continuación, se detallan los resultados obtenidos para las dos membranas estudiadas en la etapa de ultrafiltración.

5.2.1. Membrana UF010104

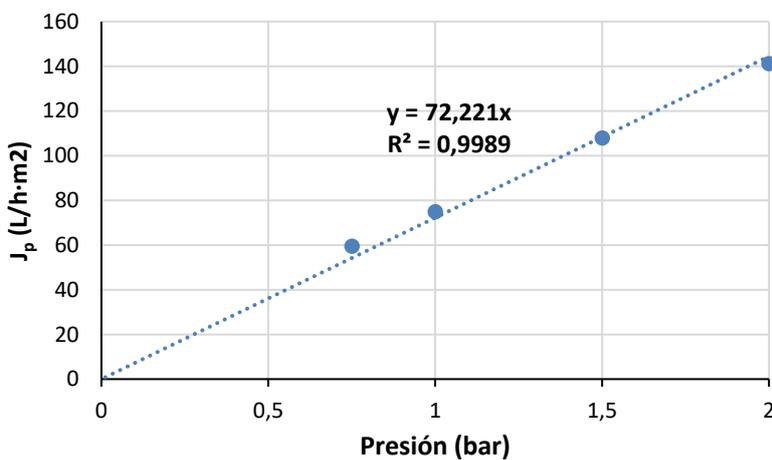
5.2.1.1. Compactación y permeabilidad

La compactación de la membrana UF010104 a una TMP de 2.2 bar y velocidad tangencial de 1.8 m/s se demuestra en la Gráfica 1. Se observa que el flujo de permeado se estabiliza a un valor promedio de 154.7 L·h⁻¹·m⁻² pasados 100 minutos de ensayo.



Gráfica 1. Compactación de la membrana UF010104 a 2.2 bar y 1.8 m/s

En la Gráfica 2, se representan los valores de flujo de permeado frente a TMP para calcular la permeabilidad de la membrana en el disolvente. De esta manera, teniendo en cuenta la Ecuación 6 y realizando un ajuste lineal, de la pendiente de la recta se obtiene un valor de permeabilidad de 72.2 L·h⁻¹·m⁻²·bar⁻¹ con un coeficiente R² de 0.999. Es importante destacar que la distribución de los poros en las membranas laminares no es homogénea con cada recorte, por lo que existe variabilidad en los datos experimentales frente a datos de especificaciones. En este caso, de acuerdo con la hoja de especificaciones del proveedor, la membrana posee una permeabilidad al etanol de 100 L·h⁻¹·m⁻²·bar⁻¹, siendo un 38.5% superior a la obtenida para la mezcla de etanol/agua 50:50 v/v.

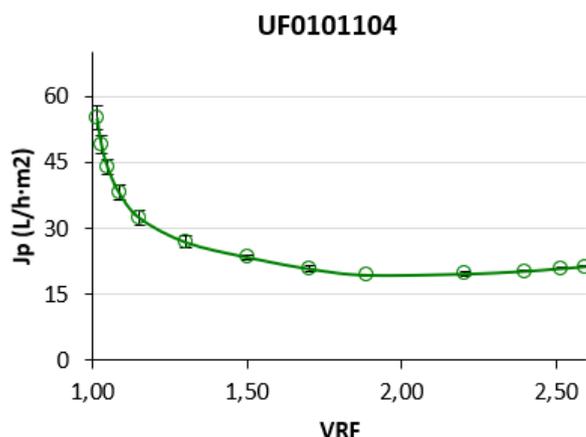


Gráfica 2. Permeabilidad de la membrana UF010104 en etanol/agua 50:50 (v/v)

5.2.1.2. Ensayo con extracto hidroalcohólico de alperujo

El ensayo con el extracto hidroalcohólico dio como resultado los datos de la Gráfica 3, para una presión transmembranal de 2 bar y velocidad tangencial de 1.8 m/s a 25 °C. Se puede ver cómo disminuye el flujo de permeado conforme aumenta el factor de reducción de volumen, viéndose este efecto más

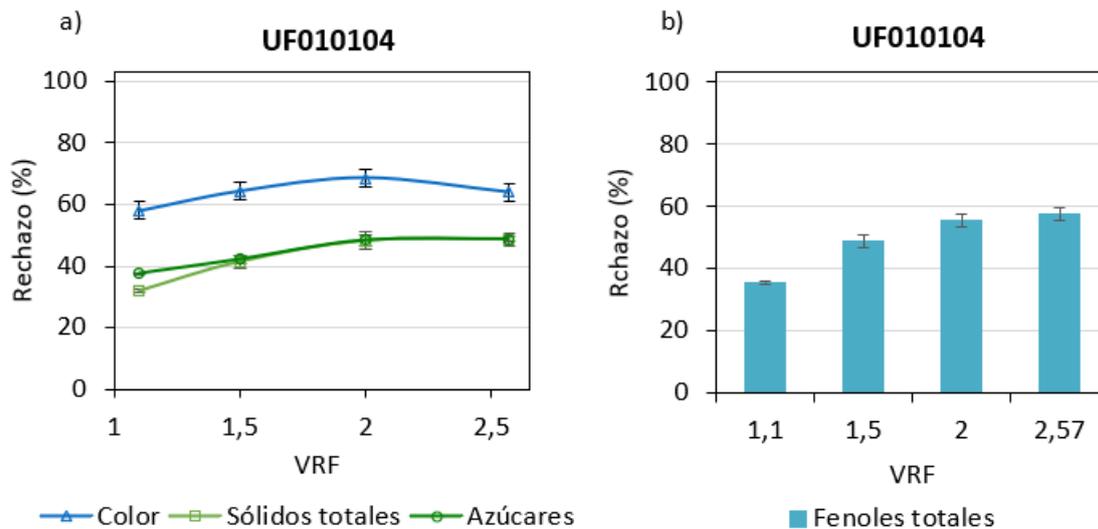
pronunciado al inicio del ensayo, principalmente debido al ensuciamiento inicial de la membrana y la formación de una capa con los sólidos rechazados. A partir del valor de VRF de 1.7, se estabiliza el flujo de permeado en torno a $20.4 \pm 0.7 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$.



Gráfica 3. Ensayo de ultrafiltración de extracto con la membrana UF0101104 en etanol/agua 50:50 (v/v) a 2.2 bar y 1.8 m/s

5.2.1.3. Análisis de los rechazos a los distintos compuestos

El objetivo principal de la etapa de ultrafiltración es la eliminación de la mayor cantidad de materia orgánica total, así como permitir el paso de los compuestos fenólicos al permeado a modo de purificación. En la Gráfica 4, se representan los porcentajes de rechazo al color, sólidos totales, fenoles y carbohidratos para la membrana UF0101104. En todos los parámetros caracterizados, el rechazo aumenta conforme se incrementa el VRF, lo cual es esperable ya que aumenta la concentración por polarización. Cuando el flujo de permeado llega a un estado estacionario, los porcentajes de rechazo se vuelven más similares, como se observa para los valores de VRF 2 y 2.5. El rechazo al color es el más predominante, pero la selectividad de separación entre sólidos totales y compuestos fenólicos no resulta ser muy considerable, teniendo un rechazo máximo de sólidos menor del 50%. Por este motivo, se decide realizar los mismos ensayos con la membrana UP005, que presenta un menor corte molecular, favoreciendo al rechazo de mayor contenido de materia orgánica.



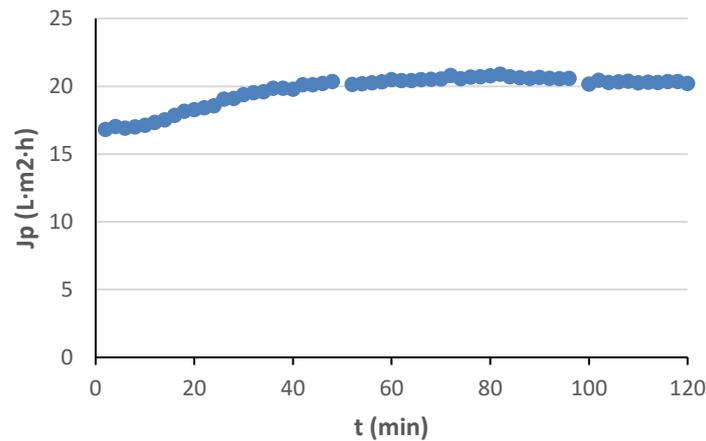
Gráfica 4. Rechazos obtenidos con la membrana UF0101104 para a) color, sólidos totales, azúcares, y b) fenoles totales

5.2.2. Membrana UP005

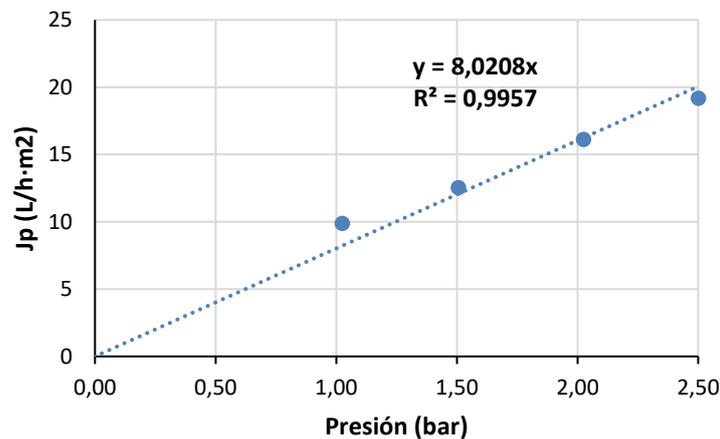
5.2.2.1. Compactación y permeabilidad

La compactación de la membrana UP005 a 2.65 bar y 1.8 m/s presenta ciertas diferencias en comparación a la membrana UF010104, como se puede ver en la Gráfica 5. Por un lado, el flujo de permeado es notoriamente inferior, estabilizándose a los 100 minutos del ensayo en un valor de 20.4 L·h⁻¹·m⁻², lo cual se debe al menor tamaño de poro de la membrana. A su vez, se observa que, al principio del ensayo, el flujo aumenta gradualmente hasta alcanzar el estado estacionario. Esto se puede deber al hinchamiento o *swelling* de la membrana en el disolvente, lo cual resulta de la interacción entre la mezcla de etanol y agua con la matriz polimérica de la membrana. En membranas densas, la lenta difusión de las moléculas del disolvente en las cadenas poliméricas puede dar un efecto de volumen libre (Yaqian, 2022; Izák et al., 2007), aumentando en este caso el flujo de permeado.

Con respecto a la permeabilidad, en la Gráfica 6 se obtiene un ajuste lineal de los valores de flujo con respecto a la presión transmembranal, siendo de 8.02 L·h⁻¹·m⁻²·bar⁻¹ con un coeficiente R² de 0.996.



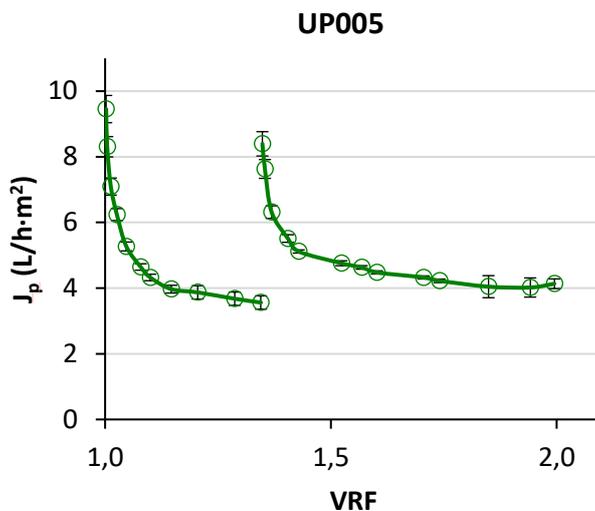
Gráfica 5. Compactación de la membrana UP005



Gráfica 6. Permeabilidad inicial de la membrana UP005 en etanol/agua 50:50 (v/v)

5.2.2.2. Ensayo con extracto hidroalcohólico de alperujo

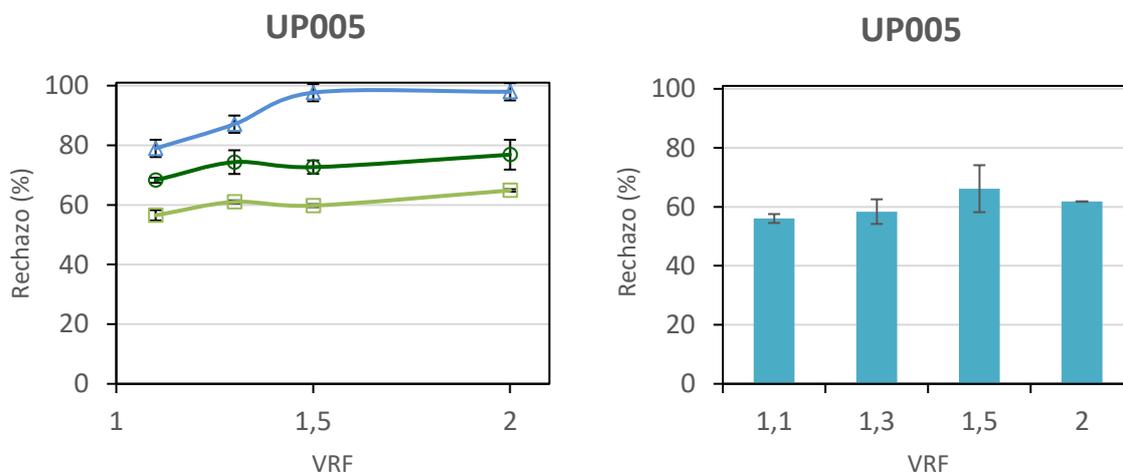
En la Gráfica 7, se recogen los datos de flujo de permeado con respecto al VRF para el ensayo realizado con el extracto del alperujo empleando la membrana UP005. Tal como se esperaba, el flujo de permeado es significativamente menor, a causa del menor corte molecular de la membrana (Tabla 8), haciendo que el ensayo completo no haya podido ser realizado en el mismo día. Por lo tanto, al alcanzar un valor de VRF de 1.35, la membrana fue limpiada y el proceso se continuó al siguiente día (véase apartado 4.5.), recuperando un 70% de la permeabilidad inicial de la membrana UP005, lo cual es inferior al mínimo requerido para considerar la limpieza como efectiva (90%). Debido a esto, el flujo de permeado solamente se recuperó hasta un valor de $8.4 \pm 0.4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. A continuación, el flujo disminuyó de forma pronunciada por el ensuciamiento de la membrana hasta alcanzar un valor estacionario de $4.0 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ a partir de un VRF de 1.8, que se mantuvo hasta el final del proceso.



Gráfica 7. Ensayo de ultrafiltración con la membrana UP005

5.2.2.3. Análisis de los rechazos a los distintos compuestos

En la Gráfica 8, se representan los porcentajes de rechazo al color, sólidos totales, fenoles y carbohidratos para la membrana UP005. En todos los parámetros caracterizados, al igual que con la membrana UF010104, el rechazo aumenta conforme se incrementa el VRF, con algunas variaciones debido principalmente al error experimental. El rechazo al color es el más elevado, alcanzando valores del 98% para un VRF de 2.5. Como resultado del menor tamaño de poro de la membrana, todos los porcentajes de rechazo obtenidos son más elevados en comparación con la membrana UF010104. Los valores de rechazo fueron del $64.9 \pm 0.4\%$ y $77 \pm 5\%$, para sólidos y azúcares totales, respectivamente. Estos altos valores de rechazo favorecen la selectividad del proceso de separación, eliminando una mayor cantidad de materia orgánica con esta membrana.

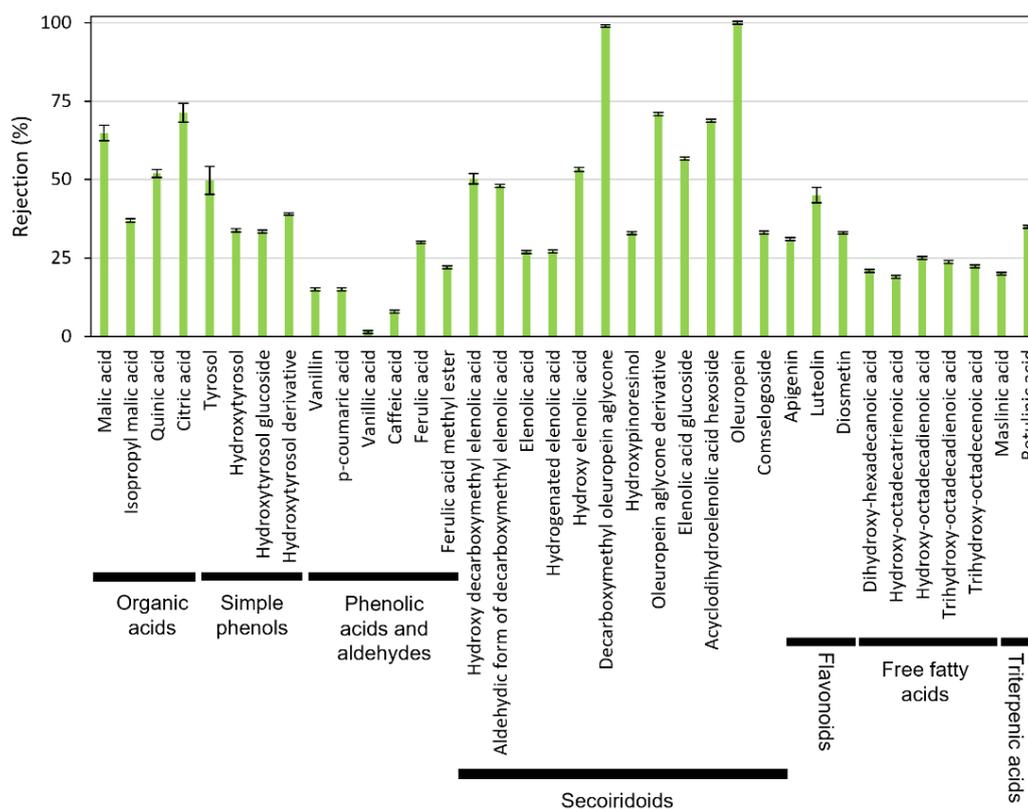


Gráfica 8. Caracterizaciones del ensayo de ultrafiltración con la membrana UP005 para a) color, sólidos totales, azúcares y b) fenoles totales

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

En la determinación del perfil fenólico luego de la etapa de ultrafiltración con la membrana UP005 (Gráfica 9), se identificaron un total de 36 compuestos orgánicos, pertenecientes a la fracción minoritaria del olivo, con un total de 8 familias químicas diferentes: ácidos orgánicos, fenoles simples, ácidos fenólicos y aldehídos, secoiridoides, ligninas, flavonoides, ácidos triterpénicos y ácidos grasos libres. Una gran porción de los compuestos fenólicos del extracto del alperujo es recuperada en el permeado, aunque los ácidos orgánicos (ácidos quínico, cítrico, málico e isopropilmálico) y ácidos grasos libres (ácidos trihidroxi-octadecadienoico, trihidroxi-octadecenoico, dihidroxi-hexadecanoico, hidroxioctadecatrienoico y hidroxioctadecadienoico) reducen la pureza de los compuestos de interés. Dentro de la familia de los secoiridoides, los valores de rechazo de los compuestos fenólicos son más elevados comparados con el resto, en particular la oleuropeína y sus derivados, alcanzando prácticamente el 100%. El ácido vanílico y el ácido cafeico fueron los compuestos fenólicos con menor rechazo a la membrana UP005, seguidos de la vainillina y ácido p-cumárico.

Teniendo en cuenta todos los compuestos analizados, los ácidos grasos y triterpenos tienen bajos valores de rechazo en el proceso de ultrafiltración que deben ser considerados como no deseados para la purificación de los polifenoles en la corriente de permeado obtenida. Los compuestos fenólicos de alto peso molecular son también rechazados en altas proporciones por lo que se busca una mayor purificación y fraccionamiento mediante la etapa consecutiva de nanofiltración.



Gráfica 9. Rechazos del perfil fenólico en el permeado de ultrafiltración con la membrana UP005 a un factor de reducción de volumen de 2

5.2.3. Elección de membrana

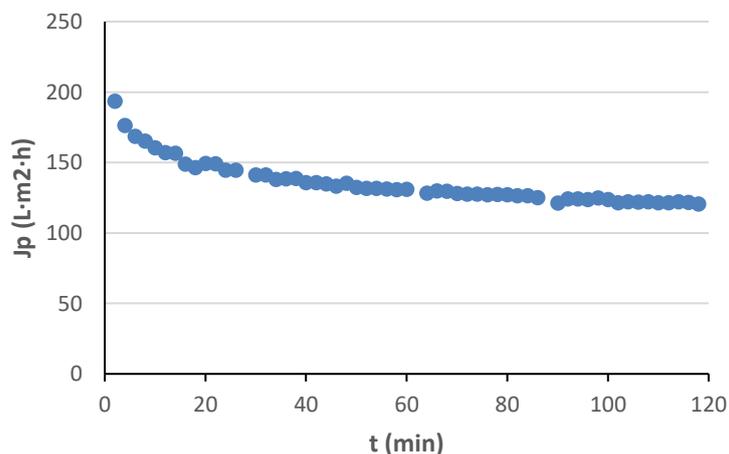
Teniendo en cuenta todo lo expuesto anteriormente, la membrana UP005 presenta una mayor purificación de los compuestos fenólicos, obteniendo rechazos de sólidos y azúcares totales más elevados en comparación a la membrana UF010104. La selectividad frente a la separación de los compuestos fenólicos se toma como factor determinante para la selección de la membrana, por ende, el permeado obtenido con la membrana UP005 se emplea como alimento para la etapa de nanofiltración. Sin embargo, el bajo flujo de permeado obtenido con la membrana UP005 puede suponer un inconveniente en la eficiencia del proceso de ultrafiltración. La membrana UF010104 tiene una gran ventaja si se considera la velocidad del proceso, con un flujo de permeado 5 veces mayor y valores de rechazos relativamente aceptables.

5.3. NANOFILTRACIÓN

En el ensayo de nanofiltración, se empleó el permeado de la membrana UP005 como alimento a la planta, midiendo la variación del flujo de permeado con respecto al factor de reducción de volumen para la membrana NF270. El análisis de los resultados es análogo a los obtenidos en el ensayo de ultrafiltración.

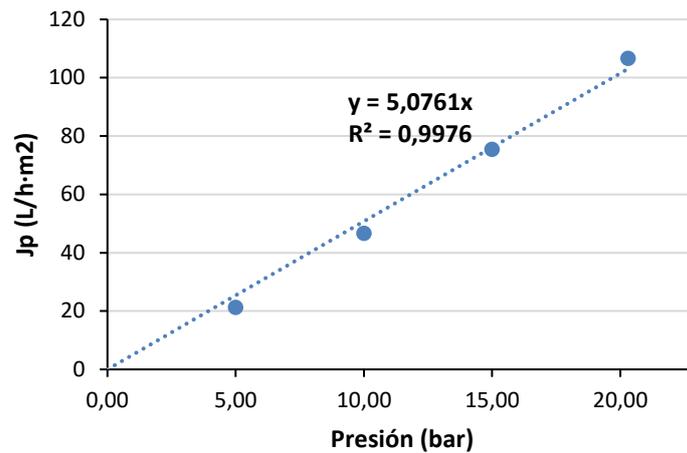
5.3.1. Compactación y permeabilidad

En la Gráfica 10, se representa el flujo de permeado frente al tiempo para la compactación de la membrana NF270. Al igual que en la ultrafiltración, el descenso rápido inicial del flujo se debe a la formación de la torta en la membrana hasta alcanzar un estado estacionario transcurridos 100 minutos del ensayo con un valor del flujo de permeado de 122 L·h⁻¹·m⁻².



Gráfica 10. Compactación de la membrana NF270 a 22 bar y 1 m/s con etanol/agua 50:50 (v/v)

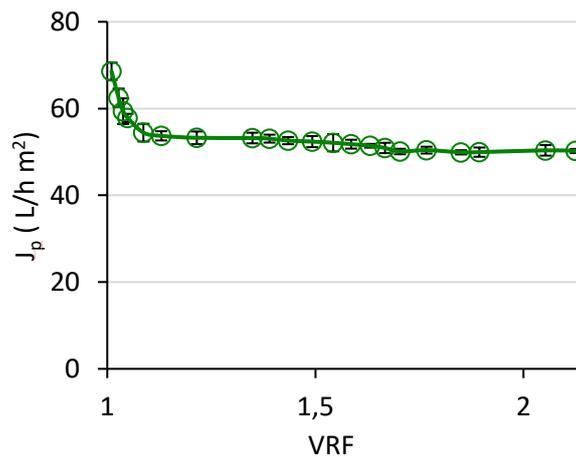
Por otro lado, en la Gráfica 11 se representa la recta de permeabilidad del disolvente para la membrana NF270, dando un valor de 5.08 L·h⁻¹·m⁻²·bar⁻¹ con un coeficiente R² de 0.998. Se puede observar que, para membranas más densas, de menor corte molecular, la permeabilidad inicial es menor ya que el tamaño de los poros de la matriz polimérica es más pequeño, dificultando más el paso a través de la membrana.



Gráfica 11. Permeabilidad de la membrana NF270 en etanol/agua 50:50 (v/v)

5.3.2. Ensayo con extracto hidroalcohólico de alperujo

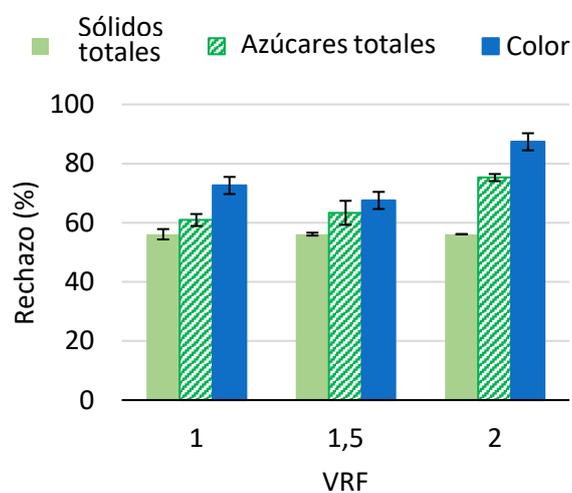
En la Gráfica 12, se recogen los datos de flujo de permeado con respecto al VRF para el ensayo de nanofiltración utilizando el permeado de la etapa de ultrafiltración como alimento. Al igual que en un previo estudio realizado con la misma membrana (Sánchez-Arévalo et al., 2023), los valores de flujo de permeado son elevados, siendo uno de los motivos por los cuales se seleccionó esta membrana. Hasta alcanzar un valor de VRF de 1.13, el flujo disminuyó de forma gradual, habiendo poca diferencia entre el flujo inicial y estacionario, principalmente porque el ensuciamiento de la membrana en este proceso es mucho menor en comparación con la ultrafiltración, proceso en el cual se eliminó gran parte de los sólidos totales. Luego, el flujo se mantuvo prácticamente constante para un valor de $50.2 \pm 0.2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ hasta el final del proceso.



Gráfica 12. Ensayo de nanofiltración con la membrana NF270 a 15.5 bar y 1 m/s

5.3.3. Análisis de los rechazos a los distintos compuestos

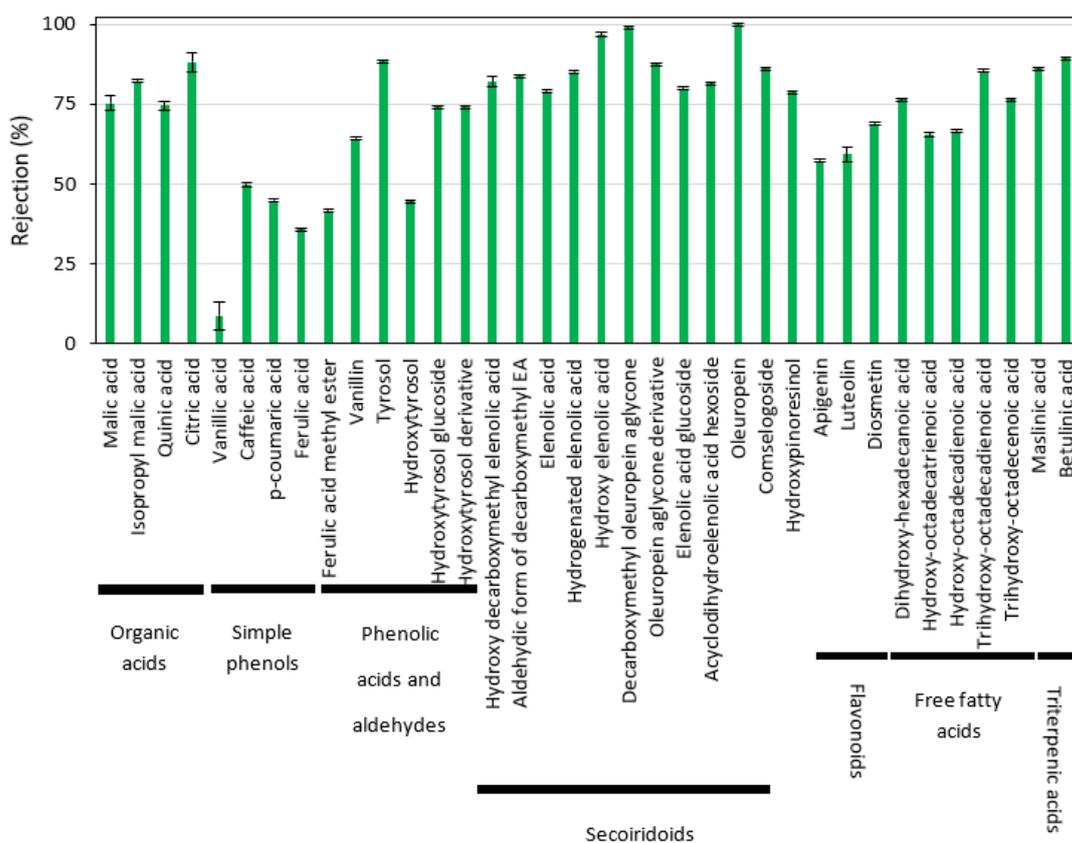
En la Gráfica 13, se representan los rechazos para los parámetros de color, sólidos y azúcares totales. Estos valores definen el contenido eliminado de materia orgánica que se busca separar de los compuestos fenólicos en el permeado. Por un lado, el rechazo del color ha sido el más favorable, alcanzando un valor de $87 \pm 3\%$ a un VRF de 2, y obteniendo un permeado transparente del proceso de nanofiltración. A su vez, el rechazo de los sólidos totales se mantiene aproximadamente constante durante el proceso, con un valor superior al 50% a cualquier VRF analizado, mientras que los azúcares totales son rechazados en mayor medida al aumentar el VRF, llegando hasta un valor de rechazo del $75 \pm 1\%$. Esto resulta de gran interés en el proceso integrado de recuperación de polifenoles, ya que las similitudes en estructura y peso molecular entre algunos carbohidratos y compuestos fenólicos suelen disminuir la selectividad en los métodos actuales de separación por membranas.



Gráfica 13. Rechazos del proceso de nanofiltración con la membrana NF270 para color, sólidos y azúcares totales

Para entender la selectividad del proceso, se determina el porcentaje de rechazo individual de cada compuesto fenólico, como se observa en la Gráfica 14. Dentro del perfil fenólico, la familia de fenoles simples, así como también algunos compuestos de los ácidos fenólicos y aldehídos, como el hidroxitirosol, son rechazados en menos del 50%, permitiendo así el fraccionamiento de los compuestos fenólicos para una recuperación eficiente de aquellos con menor peso molecular. Entrando en mayor detalle, el ácido vanílico, ácido ferúlico e hidroxitirosol presentan rechazos del $8.8 \pm 0.5\%$, $35.7 \pm 0.5\%$ y $43.6 \pm 0.6\%$, respectivamente, siendo este último compuesto de gran interés por su alta capacidad antioxidante y antiinflamatoria, aprovechada en la industria alimenticia y farmacéutica como suplemento (Quirós-Fernández et al., 2022; Bender et al., 2023).

Al mismo tiempo, los ácidos orgánicos y triterpenos presentan rechazos iguales o superiores al 75%, contribuyendo a la separación de materia orgánica no deseada. Dado el alto peso molecular de la mayoría de los compuestos de las familias de secoiridoides, ligninas y flavonoides, es esperable su alto porcentaje de rechazo obtenido. Es por este motivo que el rechazo obtenido en el proceso de nanofiltración posee una gran parte de compuestos fenólicos de alto peso molecular ya concentrados, aunque la pureza de esta corriente no sea tan buena como la del permeado.



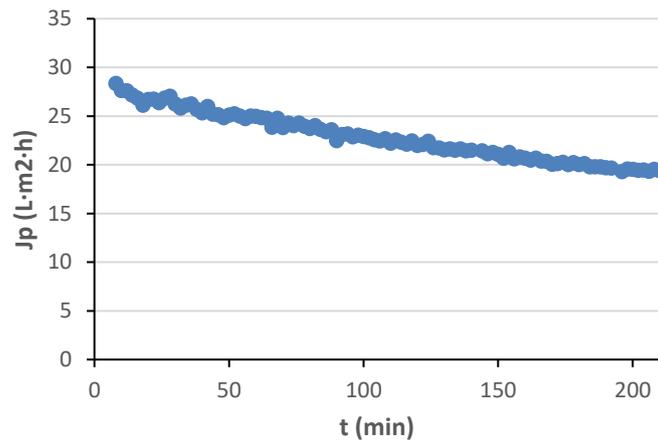
Gráfica 14. Rechazos individuales de los compuestos fenólicos y componentes orgánicos, obtenidos del proceso de nanofiltración con la membrana NF270

5.4. ÓSMOSIS INVERSA

Finalmente, en el proceso de ósmosis inversa, se emplea como alimento la corriente de permeado obtenida por nanofiltración, utilizando la membrana NF90. El objetivo principal de esta etapa es la concentración de los compuestos fenólicos en el rechazo, permitiendo mayoritariamente el paso del disolvente a través de la membrana. Dada la cantidad de muestra tratada, sólo se caracterizaron muestras para valores de VRF de 1.05 y 1.1, de manera análoga a los ensayos anteriores. La densidad de flujo de permeado fue constante durante todo el ensayo, que fue completado en el mismo día. Por tanto, no fue necesario realizar limpiezas intermedias de la membrana en este proceso.

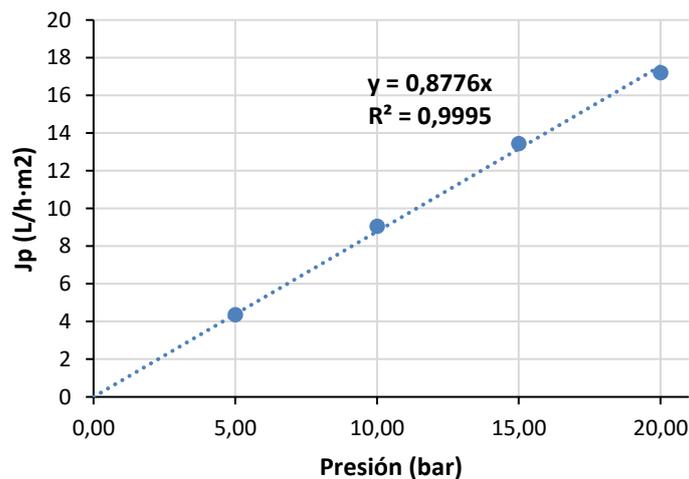
5.4.1. Compactación y permeabilidad

Como se puede ver en la Gráfica 15, la compactación de la membrana NF90 requirió el doble de tiempo en alcanzar un valor estable de densidad de flujo de permeado en comparación con el resto de las membranas, obteniendo un valor de 19.5 L·h⁻¹·m⁻² transcurridos 200 minutos del ensayo.



Gráfica 15. Compactación de la membrana NF90 a 22 bar y 1 m/s

Seguido de esto, el estudio de la permeabilidad de la membrana frente al disolvente empleado se resume con los valores de densidad de flujo con respecto a la presión transmembranal en la Gráfica 16. La permeabilidad de la membrana NF90 para una mezcla etanol/agua 50:50 (v/v) fue de 0.87 L·h⁻¹·m⁻²·bar⁻¹ con un coeficiente R² de 0.999.

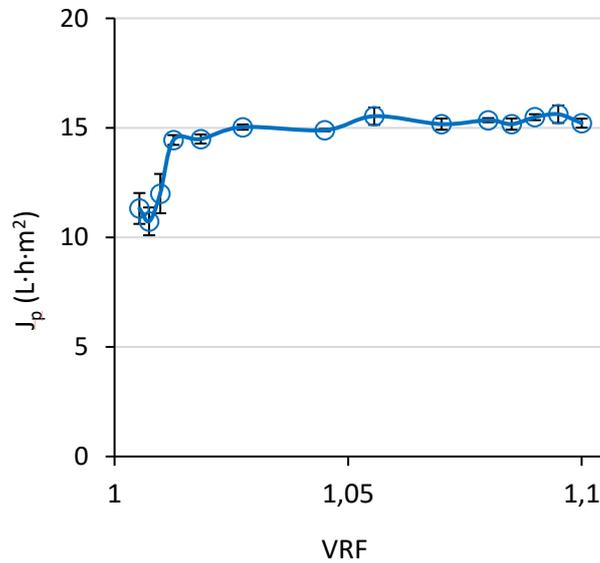


Gráfica 16. Permeabilidad de la membrana NF90 en etanol/agua 50:50 (v/v)

5.4.2. Ensayo con extracto hidroalcohólico de alperujo

Una vez caracterizada la membrana, se procedió al ensayo de ósmosis inversa con la membrana NF90. Dicha membrana, aunque posee un corte molecular intermedio para usos entre nanofiltración y ósmosis inversa, resulta útil de cara al rechazo de los compuestos fenólicos por su tamaño reducido de poro (Tapia-Quirós et al., 2022), exhibiendo altos valores de densidad de flujo que aceleran el proceso. Como se observa en la Gráfica 17, la densidad del flujo de permeado incrementó en los momentos inicial del ensayo, hasta alcanzar un VRF de 1.02 y lograr un valor estable de 15.3 ± 0.3 L·h⁻¹·m⁻² hasta el final del proceso. Al igual que sucedía con la compactación de la membrana UP005, el

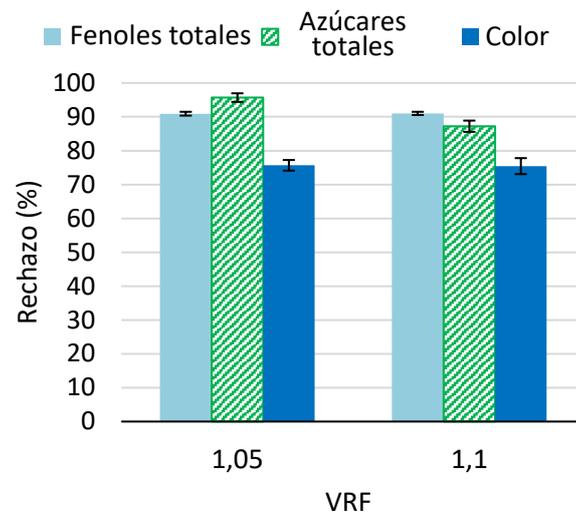
aumento inicial de la densidad del flujo se puede deber al hinchamiento de la membrana a causa de la interacción entre el polímero que la compone y el disolvente de etanol/agua. Las cadenas poliméricas, debido a estas interacciones, son capaces de distanciarse e incrementar el tamaño de poro en la membrana, permitiendo así un aumento de la densidad de flujo de permeado.



Gráfica 17. Ensayo de ósmosis inversa con la membrana NF90, a 20 bar y 1 m/s, empleando como alimento el permeado de la nanofiltración

5.4.3. Análisis de los rechazos a los distintos compuestos

En la Gráfica 18, se recogen los valores de rechazo de los compuestos fenólicos totales, los azúcares totales y el color. Como se puede ver, se obtuvieron valores más elevados de rechazo para los polifenoles, con más de 90% de estos compuestos retenidos y concentrados, luego de haber pasado por las etapas de purificación y fraccionamiento en la ultrafiltración y nanofiltración. En este proceso, a diferencia de la ultrafiltración y nanofiltración, el rechazo al color no es el más predominante, ya que el alimento para la etapa de ósmosis inversa es ya claro y transparente, y su contenido en sólidos totales es prácticamente despreciable. Para un VRF de 1.1, el rechazo de azúcares es levemente menor que para los compuestos fenólicos, favoreciendo aún más la pureza de la corriente de permeado. Además, cabe mencionar que la corriente de permeado, siendo mayoritariamente una mezcla de etanol y agua, se puede reutilizar en el proceso integrado para la limpieza de las membranas.



Gráfica 18. Rechazos de la ósmosis inversa con la membrana NF90 para los parámetros de color, fenoles y azúcares totales

CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA PARA LA CONCENTRACIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS

En el siguiente capítulo, se diseñará una planta industrial de ósmosis inversa empleando como alimento el permeado obtenido de la etapa de nanofiltración. Este diseño involucra únicamente el último paso de un proceso integrado de la extracción, purificación y concentración de los compuestos fenólicos presentes en un extracto hidroalcohólico de alperujo. El diseño y estudio económico de las etapas previas desde la extracción hasta la nanofiltración se basarán en estudios previos realizados en el mismo grupo de investigación (Casas Roncero, 2021; Rojo-Adalid, 2021; Sáez Montesinos, 2022).

La planta industrial completa está diseñada para operar durante los períodos de mayor actividad de producción de aceite de oliva en las almazaras, permitiendo así un tratamiento más rápido y efectivo del alperujo. Partiendo de un tratamiento de 12 toneladas diarias de alperujo, con una extracción sólido-líquido a dilución 1:10 (p/v) empleando como disolvente una mezcla etanol/agua 50:50 (v/v), se obtiene un caudal volumétrico inicial de extracto de 120 m³/día. A partir de los datos obtenidos en estudios previos y el escalado adecuado, se estima que la planta de ósmosis inversa es alimentada con una corriente de permeado de la etapa de nanofiltración de 76.8 m³ por día. La membrana por emplear en este proceso es de la casa comercial Dupont, modelo Filmtech NF90 400/34i. Se considera a su vez que la planta opera durante las 24 horas en la semana laboral de 5 días por un período total de 3 meses, dada la estacionalidad de la producción de aceite de oliva virgen y la obtención de alperujo como materia prima.

Los catálogos y fichas técnicas de la membrana y los equipos seleccionados para el dimensionado de la planta se recogen en el Anexo II.

6.1. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE ÓSMOSIS INVERSA (OI)

Tal como se ha descrito previamente y representado en la Figura 1, el proceso integrado del tratamiento del alperujo, obtenido como residuo de la elaboración del aceite de oliva por centrifugación a dos fases, involucra etapas sucesivas de extracción, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa con el fin de purificar y concentrar los compuestos fenólicos presentes, así como también reducir la fitotoxicidad del alperujo. En este Trabajo Final de Grado, se realiza una propuesta para el diseño de la etapa final de concentración de ósmosis inversa con operación en continuo. En la Figura 20 (y en el documento de Planos), se representa el diagrama de flujo del diseño propuesto de la instalación de la planta de ósmosis inversa, partiendo de la corriente de permeado de la etapa de nanofiltración y obteniendo una corriente enriquecida de polifenoles como rechazo del proceso de ósmosis inversa.

Este sistema continuo comienza con el almacenamiento en el tanque T4 del permeado obtenido de la etapa anterior de nanofiltración habiendo fraccionado los compuestos fenólicos del extracto hidroalcohólico ya ultrafiltrado. Esta corriente es impulsada y regulada hacia el tubo de presión donde se colocan los módulos de la membrana para el proceso de ósmosis inversa. De esta manera, se colocan manómetros a la entrada y las salidas del sistema de membranas con el fin de determinar la presión transmembranal durante el proceso. Por la corriente de rechazo, se recuperan los compuestos fenólicos concentrados, los cuales son impulsados y almacenados en el tanque T6. En cambio, en el tanque T7 se recolecta el permeado, compuesto por el disolvente de la corriente de alimento, el cual es una mezcla de etanol/agua 50:50 (v/v), aunque esta proporción puede variar por la interacción del etanol con la membrana.

Dado que una de las principales desventajas de los procesos de separación por membranas es el ensuciamiento de estas, es necesario diseñar un sistema de limpieza de los equipos. Por este motivo, se coloca una válvula de tres vías en la tubería de la corriente de rechazo para separar la recuperación de los compuestos fenólicos del protocolo de limpieza, y también se añade un sistema de dosificación del disolvente por medio de la alimentación de etanol desde el tanque T1 hasta el tanque T2, donde se adiciona agua osmotizada hasta obtener la dilución requerida. El circuito de limpieza consiste principalmente en un tanque con etanol/agua 50:50 (v/v) para el aclarado de la planta (T3); un tanque con un intercambiador de calor para la disolución de limpieza (T9) en las mismas condiciones realizadas experimentalmente en este Trabajo (detergente P3 Ultrasil 110 al 1% (v/v) a 35 °C); y un tanque de efluentes residuales que no se recirculan en el sistema (T8). Se opta por realizar un ciclo de limpieza por día, que consiste en un primer aclarado con disolvente de 15 minutos, seguido de la circulación de la disolución de limpieza por 1 hora, y finalmente un segundo aclarado del mismo tiempo que el primero, resultando en una duración total de limpieza de la planta de 1 hora y 30 minutos. El funcionamiento de cada etapa del ciclo se controla mediante la apertura y cierre de las válvulas de tres vías correspondientes.

El primer aclarado de la planta se realiza con el disolvente del segundo aclarado del ciclo de limpieza anteriormente recirculado. De este aclarado, se genera un residuo líquido no reutilizable que no se debe recircular al sistema, por lo cual es recolectado en el tanque de efluentes residuales (T8). A continuación, se introduce la disolución de limpieza en el circuito con el tanque T9 en modo de recirculación, ya que dicha disolución se puede aprovechar para posteriores usos. Finalmente, la segunda etapa de aclarado consiste en la alimentación de una corriente fresca de disolvente, pero también se aprovecha el permeado obtenido de la ósmosis inversa en el tanque T7, que es impulsado mediante una bomba hasta el tanque T3, permitiendo así reducir la cantidad de disolvente empleado por limpieza. De este segundo aclarado, al ser una corriente más limpia, se reutiliza el disolvente y es recirculado al tanque T3 para el próximo ciclo de limpieza.

Además de la limpieza de las membranas, se favorece la limpieza de todo el circuito y se dispone de un cabezal rotatorio, con boquillas rociadoras, a la entrada del tanque de alimento proveniente de la nanofiltración (T4) para llegar a las paredes de este fácilmente.

6.2. CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN

La corriente de alimentación a tratar en la planta de ósmosis inversa consiste en el permeado de la etapa previa de nanofiltración, la cual a su vez proviene de una ultrafiltración del extracto hidroalcohólico del alperujo. Basándose en estudios previos de la etapa de ultrafiltración (Rojo-Adalid, 2021), y realizando un escalado del proceso de nanofiltración para un factor de reducción de volumen VRF de 5 (Sáez Montesinos, 2022), se obtiene un caudal de alimentación de 3.6 m³/h, y si se considera un tiempo de operación de 21.3 horas por día, esto equivale a 76.8 m³ diarios a tratar en la planta de ósmosis inversa.

La composición de la corriente de entrada, en cuanto a polifenoles, carbohidratos y sólidos totales, se resume en la Tabla 10, a partir de los datos experimentales obtenidos (véase apartado 5).

Tabla 10. Concentraciones en la corriente de alimentación de OI.

<i>Parámetro</i>	<i>Concentración</i>
<i>Contenido fenólico total (mg/L)</i>	127.86
<i>Contenido en azúcares totales (mg/L)</i>	83.57
<i>Sólidos totales (mg/mL)</i>	1.32

6.3. INSTALACIÓN DE LA PLANTA INDUSTRIAL

En el estudio experimental de ósmosis inversa, se ha empleado la membrana NF90 (Dupont) en un módulo plano en el marco de investigación en una pequeña escala. Sin embargo, a escala industrial se utilizan membranas con arrollamiento en espiral debido a su mayor eficiencia y superficie de contacto durante los procesos de separación, lo cual reduce el espacio físico que ocupan. Las condiciones de operación a definir en la planta son una presión transmembranal de 20 bar y un factor VRF de 10, con un caudal de alimentación de 76.8 m³/día. La membrana por emplear en este proceso es de la casa comercial Dupont, modelo Filmtech NF90 400/34i y sus especificaciones se resumen en la Tabla 11. La ficha técnica de la membrana se recoge en el Anexo II, junto a los catálogos de equipos de diseño de la planta.

Tabla 11. Especificaciones de la membrana NF90 400/34i. Fuente: (Dupont, 2020)

<i>Parámetro</i>	
<i>Área activa (m²)</i>	37
<i>Espesor de espaciador (mil)</i>	34
<i>Longitud (m)</i>	1.02
<i>Máxima temperatura de operación (°C)</i>	45
<i>Máxima presión de operación (bar)</i>	41

Parámetro	
<i>Rango pH (continuo)</i>	2-11
<i>Caída de presión por módulo (bar)</i>	1

6.3.1. Diseño y dimensionado de la planta OI

Para diseñar la planta de ósmosis inversa, es necesario determinar el área total de la membrana NF90-400/34i que se debe instalar. Las condiciones de operación son: una presión transmembranal de 20 bar y un factor VRF de 10. El área total se calcula a partir del caudal de permeado (Q_P) y la densidad de flujo de permeado (J_P), como se ve en la Ecuación 9.

$$A_T = \frac{Q_P}{J_P} \quad \text{Ecuación 9}$$

La densidad de flujo de permeado es considerada constante para este proceso, de acuerdo con lo obtenido experimentalmente en la Gráfica 17. Esto es consistente con los resultados obtenidos en un estudio previo de recuperación de flavanoles en extractos hidroalcohólicos de orujo de uva (Crespo et al., 2017). En dicho estudio, en la etapa final de ósmosis inversa, la densidad de flujo de permeado se mantiene estable por 3 horas, hasta alcanzar el factor de reducción de volumen deseado de 10. Dada la similitud de las condiciones de trabajo, se decide por simplificar la determinación de la densidad de flujo de permeado.

El caudal de permeado teórico (Q_P) se puede calcular a partir de la ecuación 4, sabiendo que el caudal de rechazo (Q_R) es la diferencia entre el de alimentación (Q_F) y el permeado, obteniendo un valor de caudal de permeado de 3.24 m³/h. El tiempo de operación inicialmente se establece en 21.3 horas, de acuerdo con uno de los estudios anteriores (Rojo-Adalid, 2021).

$$VRF = 10 = \frac{76.8 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}}{Q_R} \quad Q_R = 7.68 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$$

$$Q_P = Q_F - Q_R = 69.12 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} = 3.24 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Por lo tanto, el área total de membrana necesaria para el proceso es de 211.7 m², y sabiendo que el área activa (A_{activa}) de la membrana comercial NF90 es de 37 m², se obtiene el número de módulos (N_m) requeridos en la instalación del tubo de presión:

$$A_T = \frac{3.24 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}}{0.0153 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}} = 211.76 \text{ m}^2$$

$$N_m = \frac{A_T}{A_{\text{activa}}} = \frac{211.76 \text{ m}^2}{37 \text{ m}^2} = 5.72 \approx 6$$

Dado que se redondea a 6 módulos de membranas, se recalculan los valores de área total, caudal de permeado y tiempo de operación (t):

$$A_{T-real} = N_m \cdot A_{activa} = 222 \text{ m}^2$$

$$Q_{P-real} = J_p \cdot A_{T-real} = 3.4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$t_{real} = \frac{t \cdot Q_p}{Q_{P-real}} = 20.32 \text{ h}$$

Con respecto a la disposición de los módulos, se opta por una configuración en serie en una única etapa mediante un tubo de presión. Para ello, es necesario verificar los valores de presión a la entrada y la salida en el rechazo del sistema, empleando la Ecuación 10:

$$TMP = \frac{P_F + P_R}{2} - P_p \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde TMP es la presión transmembranal, P_F la presión a la entrada de alimentación, P_R la presión a la salida en el rechazo y P_p la presión a la salida en el permeado. Esta última suele ser considerada 0 en términos de presión manométrica, y la caída de presión de cada módulo es de 1 bar, de acuerdo con las especificaciones del proveedor. Por lo tanto, se puede despejar la presión necesaria a la entrada y salida del sistema, sabiendo que la TMP para el proceso de estudio es de 20 bar. De esta manera, se obtiene que, con una configuración en serie, la presión necesaria a aportar a la entrada de alimentación es de 23 bar, con una salida en el rechazo a 17 bar.

$$20 \text{ bar} = \frac{P_F + (P_F - 6 \cdot 1 \text{ bar})}{2}$$

$$P_F = 23 \text{ bar} \quad P_R = 17 \text{ bar}$$

Los valores de caudales y condiciones de diseño para el sistema de membranas NF90-400/34i para la ósmosis inversa se resumen en la Tabla 12. Las concentraciones de compuestos fenólicos en las corrientes de rechazo y permeado son calculadas en el Anexo I, siendo de 1039.29 mg/L y 26.59 mg/L, respectivamente.

Tabla 12. Condiciones de operación en la planta de ósmosis inversa

Parámetro	Valor
Caudal de alimentación (m ³ /d)	76.8
Caudal de permeado (m ³ /d)	69.0
Caudal de rechazo (m ³ /d)	7.8
Nº módulos	6
Tiempo de operación (h)	20.30
Tiempo de limpieza (h)	1.50

6.3.2. Depósitos principales

Para el diseño de los depósitos de alimentación (T4), permeado (T7) y rechazo (T6), se decide emplear los caudales calculados previamente y un margen de seguridad del 20%, como se puede ver en la Ecuación 11, donde V_{Dt} y V_{Dr} son los volúmenes de depósitos teórico y real, respectivamente. Los diámetros se definen del catálogo correspondiente a depósitos de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV), de la casa comercial Dimasa Grupo, y las dimensiones se calculan mediante la Ecuación 12, donde D y h son el diámetro y altura del depósito, respectivamente.

$$V_{Dr} = V_{Dt} \cdot 1.2 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$V_{Dr} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot h \quad \text{Ecuación 12}$$

Con respecto a los tanques de dosificación de disolvente (T1 y T2), se opta por emplear tanques del mismo tamaño que la alimentación, ya que pueden ser utilizados para la limpieza de la planta de ósmosis inversa pero también como alimento en la etapa de extracción y limpieza de otros módulos en la planta integrada en etapas de ultrafiltración o nanofiltración. De esta manera, las dimensiones de los mencionados tanques se resumen en la Tabla 13:

Tabla 13. Dimensionado de depósitos principales

Tanques	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)
T1 - Dosificación EtOH	76.80	92.16	4	7.3
T2 - Dosificación EtOH:agua	76.80	92.16	4	7.3
T4 - Alimentación	76.80	92.16	4	7.3
T6 - Rechazo	7.80	9.36	2	3.0
T7 - Permeado	69.00	82.80	4	6.6

Por otro lado, los tanques de limpieza y aclarado T3, T8 y T9 se diseñan en base al volumen muerto total de la planta, estableciendo como criterio que el volumen del tanque de limpieza sea al menos el doble que el de volumen muerto. Esto se calcula en el apartado de circuito de limpieza (6.3.4).

6.3.3. Conducciones

Para el diseño de las conducciones de la planta industrial, es necesario conocer el caudal que circula en cada una de ellas. Por ello, en la Ecuación 13 se calcula el caudal de entrada (Q_m) del sistema de membranas, siendo v la velocidad tangencial (establecida a 1 m/s) y el área transversal efectiva (A_{ef}):

$$Q_m = v \cdot A_{ef} \quad \text{Ecuación 13}$$

El área transversal efectiva se calcula con la Ecuación 14, a partir del espesor del espaciador del módulo (h), la porosidad (ϵ), y la anchura de la membrana (b). Los dos primeros son datos de especificaciones de la membrana en concreto, siendo el espesor de 0.86361 mm y la porosidad de 0.89. La anchura se

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

obtiene a partir del área activa (A_a) y la longitud larga de la membrana (L), como se ve en la Ecuación 15.

$$A_{ef} = b \cdot h \cdot \varepsilon \quad \text{Ecuación 14}$$

$$b = \frac{A_a}{2 \cdot L} \quad \text{Ecuación 15}$$

De esta manera, se obtiene una anchura de 18.21 m, un área transversal efectiva de 0.014 m² y, por ende, un caudal de entrada de 0.014 m³/s. Con el caudal de permeado, se puede obtener el caudal del rechazo que circula por la tubería T2, siendo de 0.01306 m³/s el caudal de permeado y 0.000944 m³/s el caudal de rechazo.

En la Figura 21, se detallan los identificadores para las conducciones y las bombas en la planta industrial, los cuales se ven en mayor detalle en el documento de Planos.

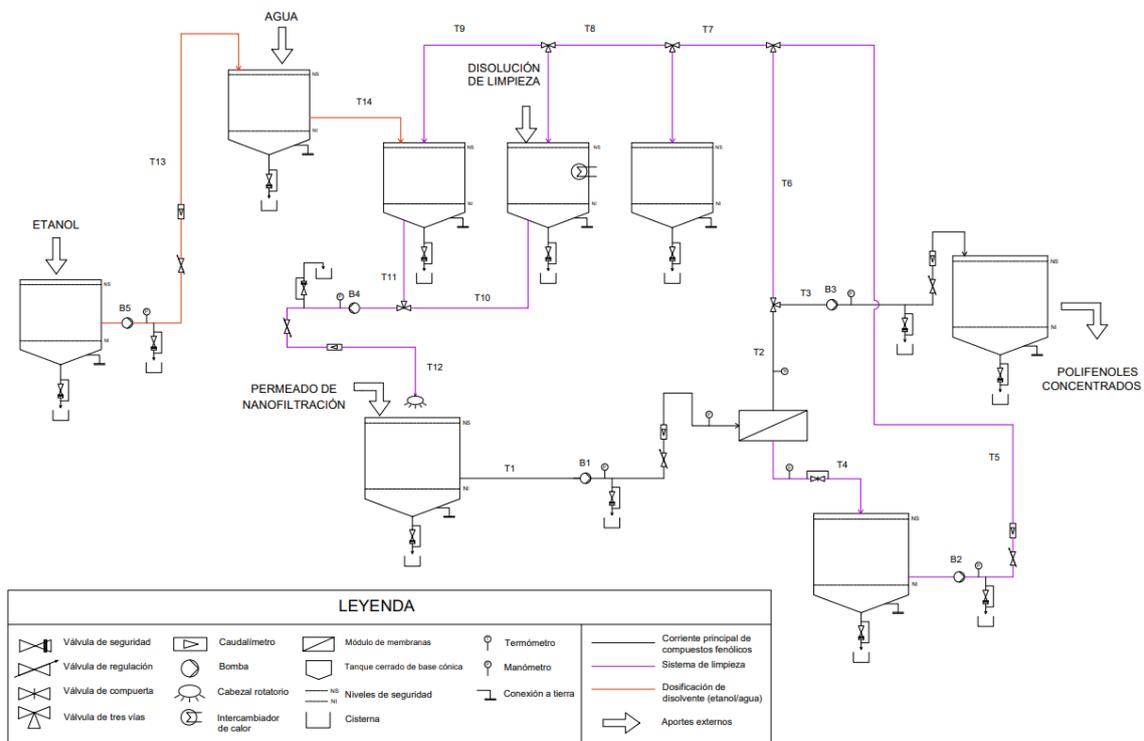


Figura 21. Diagrama de flujo de la planta con indicadores de conducciones y bombas

A modo de resumen, en la Tabla 14 se especifican los caudales y dimensiones de las tuberías de la planta industrial. Estos se obtienen a partir de balances de materia y criterios establecidos para la circulación en la limpieza del circuito. Las longitudes de las tuberías son establecidas de acuerdo con un criterio de escalado en el diagrama de flujo para la distribución en planta del sistema en cuestión. Los diámetros teóricos se calculan a partir de la Ecuación 16, donde Q es el caudal de la tubería y v la velocidad del fluido.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot g}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Tabla 14. Dimensionado de tuberías de la planta industrial

Tubería	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)	D teórico (mm)	Longitud (m)	DN	D exterior (mm)	Espesor (mm)	D interior (mm)
T1	1	0.01400	133.55	8	150	168.3	6	156.3
T2	1	0.00094	34.68	2	40	48.3	6	36.3
T3	1	0.00094	34.68	3	40	48.3	6	36.3
T4	1	0.01306	128.96	1.5	150	168.3	5	158.3
T5	1	0.01306	128.96	6	150	168.3	5	158.3
T6	1	0.01306	128.98	4.5	150	168.3	6	156.3
T7	1	0.02612	182.40	1.5	200	219.1	6	207.1
T8	1	0.02612	182.40	1.5	200	219.1	6	207.1
T9	1	0.02612	182.40	2	200	219.1	6	207.1
T10	1	0.02612	182.40	4	200	219.1	6	207.1
T11	1	0.04012	226.06	3	250	273	5	263.0
T12	1	0.06623	290.47	6	300	323.9	5	313.9
T13	1	0.01400	133.55	5	150	168.3	6	156.3
T14	1	0.01400	133.55	3	150	168.3	6	156.3

6.3.4. Proceso de limpieza

Como se menciona anteriormente, para el diseño de los depósitos de limpieza se debe calcular el volumen muerto en las tuberías del circuito de limpieza y en las membranas, ya que el ciclo de limpieza funciona mediante un circuito cerrado. A partir de la Ecuación 17, se calculan los volúmenes muertos en las tuberías del circuito de limpieza, donde D es el diámetro de la tubería y L la longitud. Los volúmenes muertos de cada tubería se resumen en la Tabla 15. De esta manera, el volumen total muerto de las conducciones de limpieza es de 1.32 m³.

$$V_{m-tub} = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \quad \text{Ecuación 17}$$

Tabla 15. Volumen muerto de las conducciones

Tubería	Longitud (m)	D interior (mm)	Volumen (m ³)
T1	8	156.3	0.1534
T2	2	36.3	0.0021
T3	3	36.3	0.0031
T4	1.5	158.3	0.0295
T5	6	158.3	0.1180
T6	4.5	156.3	0.0863

Tubería	Longitud (m)	D interior (mm)	Volumen (m ³)
T7	1.5	207.1	0.0505
T8	1.5	207.1	0.0505
T9	2	207.1	0.0673
T10	4	207.1	0.1347
T11	3	263.0	0.1629
T12	6	313.9	0.4641
T13	5	156.3	0.0959
T14	3	156.3	0.0575

En cuanto al volumen muerto correspondiente al sistema de membranas, se calcula mediante la Ecuación 18, a partir del área transversal efectiva (0.014 m²) y la longitud de la membrana (1.016 m). Dado que se emplean 6 módulos, el volumen total será de 0.085 m³.

$$V_{m-membranas} = A_{ef} \cdot L \cdot N^{\circ}_{módulos} \quad \text{Ecuación 18}$$

A su vez, el volumen empleado de disolución de limpieza para el tanque de alimentación (T4) se establece como un 10% de su volumen total, debido a la acción del cabezal rotatorio, y, por tanto, se requiere de al menos 7.68 m³. El volumen muerto de las bombas y válvulas se considera despreciable a fines de estos cálculos. En conclusión, mediante la Ecuación 19, se obtiene el volumen muerto total como la suma de los volúmenes anteriores:

$$V_{m-total} = V_{m-tuberías} + V_{m-membranas} + V_{m-T4} = 9.1 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 19}$$

Por lo tanto, tomando como criterio de diseño el doble del volumen muerto, el volumen total teórico del depósito de disolución de limpieza es de 18.2 m³. Para los tanques de aclarado (T3) y almacenamiento de efluentes residuales (T8), se tiene en cuenta la duración de la etapa de aclarado y el caudal con el cual son alimentados, además del margen de seguridad del 20%. De esta manera, con la Ecuación 20, se obtienen los volúmenes teóricos de los depósitos T3 y T8, donde Q es el caudal volumétrico y t_{acl} el tiempo de aclarado, establecido en 15 minutos, siendo de 23.51 m³ para ambos.

$$V_{D-T3/T8} = Q \cdot t_{acl} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$V_{D-T3/T8} = 0.02612 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 900 \text{ s} = 23.51 \text{ m}^3$$

A modo de resumen, en la Tabla 16 se muestran los volúmenes y las dimensiones de todos los tanques en la planta industrial, empleando el catálogo correspondiente para los diámetros comerciales.

Tabla 16. Dimensionado de tanques y depósitos de la planta industrial

Tanques	Volumen teórico (m ³)	Volumen real (m ³)	Diámetro (m)	Altura (m)
T1 - Dosificación EtOH	76.80	92.16	4	7.3
T2 - Dosificación EtOH:agua	76.80	92.16	4	7.3
T3 - Aclarado	23.51	28.21	4	2.2
T4 - Alimentación	76.80	92.16	4	7.3
T6 - Rechazo	7.80	9.36	2	3.0
T7 - Permeado	69.00	82.80	4	6.6
T8 - Efluentes residuales	23.51	28.21	4	2.2
T9 - Disolución de limpieza	18.20	21.84	4	1.7

6.3.5. Bombas

Una vez obtenidos los caudales y la presión necesaria a la entrada del tubo de membranas, se pueden diseñar las bombas instaladas en la planta industrial. Para ello, se deben calcular las pérdidas de carga en las conducciones ($h_{f-tuberías}$) así como también las pérdidas locales ($h_{f-local}$), debido a válvulas y codos, y considerar la pérdida de carga en los módulos instalados, siendo esta última de 1 bar por elemento en serie, de acuerdo con las especificaciones del proveedor (Dupont, 2020).

La pérdida de carga en las tuberías se calcula mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 21), donde f es el coeficiente de fricción, L la longitud de la tubería, Q el caudal volumétrico, g la constante gravitacional y D el diámetro interior de la tubería.

$$h_{f-tubería} = \frac{8 \cdot f \cdot L \cdot Q^2}{g \cdot D^5 \cdot \pi^2} \text{ Ecuación 21}$$

El coeficiente de fricción se obtiene a partir del cálculo del número de Reynolds (ecuación 22), donde ρ es la densidad del fluido, Q el caudal volumétrico, D el diámetro de la tubería y μ la viscosidad dinámica del fluido.

$$Re = \frac{4 \cdot \rho \cdot Q}{\mu \cdot D \cdot \pi} \text{ Ecuación 22}$$

Dado que se trata con disoluciones de etanol en agua al 50% v/v, los datos de densidad y viscosidad fueron obtenidos de fuentes experimentales modeladas, con valores de 925 kg/m³ (The Engineering Toolbox, 2019) y 0.0025 Pa·s (Binglong Zhang et al, 2019) a 25 °C. En cambio, para la circulación de la disolución de limpieza, dado que la temperatura es de 35 °C y que se encuentra lo suficientemente diluida para considerarse como agua, los valores de densidad y viscosidad dinámica son 994.08 kg/m³ y 0.000720 Pa·s (VAXA Software, 2023). El cálculo detallado de las pérdidas de carga de las tuberías se describe en el Anexo I

Con respecto a las pérdidas de carga locales, éstas se deben principalmente a las válvulas y los codos de 90° presentes en la instalación y se calculan mediante la Ecuación 23.

$$h_{f-local} = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde k es el coeficiente adimensional que depende de parámetros adicionales, como el elemento hidráulico, rugosidad relativa, número de Reynolds y relaciones geométricas (Pirobloc, 2019). Para los codos de 90° de radio corto, se toma un valor de k igual a 0.9, mientras que para una válvula de compuerta abierta el valor de k equivale a 0.2. En el caso de las válvulas de tres vías, el paso perpendicular del fluido se asemeja al comportamiento de los codos, mientras que el paso recto no supone una pérdida de carga. Estas consideraciones se basan en las especificaciones consultadas (Pirobloc, 2019) y estudios de diseño previos de plantas de separación por membranas (Rojo-Adalid, 2021). Los cálculos de las pérdidas de carga locales se detallan en el Anexo I. Sumando ambos tipos de pérdidas de carga en cada tubería da lugar a la pérdida de carga total, también calculada en dicho Anexo.

De esta manera, se pueden calcular las alturas que deben aportar las bombas al sistema, planteando para cada una el teorema de Bernoulli, como se describe en la Ecuación 24 de forma general:

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + H_B = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{f-tubería} + h_{f-local} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde H_B significa la altura aportada por la bomba, mientras que los subíndices 0 y 1 representan la entrada y salida de la sección estudiada, respectivamente. El término z representa la cota, p es la presión, γ es el peso específico (equivalente a la densidad por la constante gravitacional), y v es la velocidad del flujo. A continuación, se aplicará esta ecuación para cada bomba de la instalación.

Bomba B1:

Esta bomba se encuentra a la salida del tanque de alimentación e impulsa el fluido hasta el tubo de presión, el cual requiere una presión transmembranal (TMP) de 20 bar en el proceso de ósmosis inversa, como fue mencionado previamente. La altura que debe aportar la bomba se obtiene a partir de la Ecuación 25, de la cual se pueden simplificar los términos cinéticos y las cotas de aspiración e impulsión, que se asumen iguales, hasta obtener la Ecuación 26.

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + H_{B1} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{f-T1} + h_{f-T1-local} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$H_{B1} = \frac{p_1 - p_0}{\gamma} + h_{f-total} \quad \text{Ecuación 26}$$

Se considera una presión de aspiración igual a cero y la presión de impulsión de 23 bar, la cual fue calculada previamente mediante la TMP y la pérdida de carga de los módulos de membrana, siendo la presión a la entrada de los módulos. Por lo tanto, la altura requerida para la bomba es de 253.68 m.c.f., para un caudal de 0.014 m³/s.

$$H_{B1} = \frac{2.3 \cdot 10^6 \text{ Pa}}{925 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0.2137 \text{ m} = 253.68 \text{ mcf}$$

$$Q_{B1} = 0.014 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Empleando el catálogo comercial de la casa Grundfos, se selecciona la bomba centrífuga multietapa vertical de modelo CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE.

Bomba B2:

La bomba B2 sirve para impulsar el caudal de permeado obtenido en el proceso hasta el circuito de limpieza, con el fin de realizar un primer aclarado de la membrana en el ciclo y reutilizar parte del disolvente eliminado para concentrar los compuestos fenólicos. Por lo tanto, aplicando la ecuación de Bernoulli entre el tanque T7 y T3, y partiendo de la base del primer tanque hasta la parte superior del segundo, se asume que las presiones y velocidades son iguales, y la diferencia de cotas será la altura del tanque T3. Sumando las pérdidas de carga para las tuberías T5, T7, T8 y T9, la altura requerida de la bomba es de 2.55 m.c.f. para un caudal de 0.01306 m³/s.

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + H_{B2} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{f\text{-}totales\text{-}T5,7,8,9}$$

$$H_{B2} = \Delta z + h_{f\text{-}totales\text{-}T5,7,8,9} = 2.2 \text{ m} + 0.3549 \text{ m}$$

$$H_{B2} = 2.55 \text{ mcf}$$

$$Q_{B2} = 0.01306 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Del mismo catálogo, se selecciona una bomba de modelo NB 65-125/121 AAF2AESBQQEEW3, la cual es centrífuga de voluta, no autocebante y de una etapa.

Bomba B3:

La bomba B3 sirve para trasegar el caudal de rechazo del tubo de presión, el cual se compone de la corriente de compuestos fenólicos concentrada (producto deseado), hasta el tanque de almacenamiento T6. Dicha corriente debe pasar por la tubería T2 y con la válvula de 3 vías circular por la tubería T3. Asumiendo las presiones y velocidades iguales, solo se tienen en cuenta la diferencia de cotas y las pérdidas de carga totales, dando como resultado una altura de bomba de 3.3552 m.c.f. con un caudal de 9.44·10⁻⁴ m³/s.

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + H_{B3} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{f\text{-}totales\text{-}T5,7,8,9}$$

$$H_{B3} = \Delta z + h_{f\text{-}totales\text{-}T2,3} = 3 \text{ m} + 0.3552 \text{ m}$$

$$H_{B3} = 3.3552 \text{ mcf}$$

$$Q_{B3} = 9.44 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con estos parámetros, la bomba seleccionada en el catálogo de Grundfos es de modelo MTR 3-2/2 A-W-A-HUUV.

Bomba B4:

La bomba B4 permite impulsar el disolvente de aclarado y la disolución de limpieza hacia el tanque de alimentación, donde luego el fluido es trasegado a toda la planta durante los ciclos de limpieza. Para calcular la altura que debe aportar esta bomba se aplica el teorema de Bernoulli entre el depósito de aclarado T3 y el depósito de alimentación T4. Para la limpieza de la membrana no se opta por la aplicación de presión adicional en el tubo, con el fin de reducir los costes energéticos de las bombas. Siendo las presiones y las velocidades iguales entre la salida del tanque de aclarado y la entrada al tanque de alimentación, sólo se tienen en cuenta la diferencia de cotas y la pérdida de carga total entre las tuberías T11 y T12. De esta manera, se obtiene una altura necesaria de la bomba de 7.5025 m.c.f. para un caudal de 0.06623 m³/s.

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + H_{B4} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{f\text{-}totales\text{-}T11,12}$$

$$H_{B4} = \Delta z + h_{f\text{-}totales\text{-}T11,12} = 7.3 \text{ m} + 0.2025 \text{ m}$$

$$H_{B4} = 7.5025 \text{ mcf}$$

$$Q_{B4} = 0.06623 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Por ello, se selecciona la bomba NB 125-200/196-180 BAF2AESBQQEMW3, la cual es una bomba centrífuga de voluta, no autocebante y de una única etapa.

Bomba B5:

Esta bomba se encarga de trasegar el caudal necesario de etanol desde el tanque de almacenamiento (T1) hasta el tanque de mezclado con agua (T2). Para ello, hace falta tener en cuenta las cotas de los tanques y las pérdidas de carga en la tubería 13, ya que las presiones y las velocidades se asumen como similares en esta sección. De esta forma, la altura necesaria que tiene que aportar la bomba es de 7.4565 m.c.f. para un caudal de 0.014 m³/s.

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2 \cdot g} + H_{B5} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_{f\text{-}totales\text{-}T11,12}$$

$$H_{B5} = \Delta z + h_{f\text{-}totales\text{-}T13} = 7.3 \text{ m} + 0.1565 \text{ m}$$

$$H_{B4} = 7.4565 \text{ mcf}$$

$$Q_{B4} = 0.014 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con estos parámetros, se selecciona la bomba de modelo MTR 45-2/1-1 A-F-A-HUUV, de la marca Grundfos, siendo una bomba centrífuga multietapa, sumergible y autocebante para instalación vertical en tanques.

En la Tabla 17, se resumen las características principales de las bombas seleccionadas.

Tabla 17. Especificaciones de las bombas seleccionadas para el diseño de la instalación

BOMBAS	B1	B2	B3	B4	B5
Modelo	CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE	NB 65-125/121 AAF2AESBQ QEEW3	MTR 3-2/2 A-W-A-HUUV	NB 125-200/196-180 BAF2AESBQ QEMW3	MTR 45-2/1-1 A-F-A-HUUV
Velocidad (rpm)	2978	1440	2873	1465	2902
Caudal (m ³ /h)	51.73	50.37	4.274	256.5	56.91
Altura (m)	267.2	2.91	5.31	8.69	9.51
Presión máxima de trabajo (bar)	40	16	25	16	25
Potencia nominal (kW)	75	0.55	0.37	7.5	3

CAPÍTULO 7. ESTUDIO ECONÓMICO

En este capítulo, se procede a la realización del estudio económico del diseño de la planta de ósmosis inversa para la concentración de los compuestos fenólicos provenientes de una etapa previa de nanofiltración. El estudio económico permite analizar los gastos de inversión, los costes de explotación y los ingresos que trae aparejado el proyecto, dando así una idea de los beneficios y la viabilidad económica.

Dada la estacionalidad de la producción de alperujo por la operatividad en las almazaras, se ha mencionado que el período anual en el cual la planta está activa es de 3 meses que, considerando los meses laborales como 20 días (5 días por semana), equivalen a 60 días al año. La corriente de alimentación a la planta de ósmosis inversa, que consiste en el extracto ya nanofiltrado, es de 76.8 m³ diarios, por lo cual se tratarán un total de 4608 m³ anuales.

7.1. COSTES DE EXPLOTACIÓN

Los costes de explotación para el diseño e instalación de la planta industrial de ósmosis inversa se clasifican en costes variables, que involucran el consumo de energía, disolventes, disoluciones de limpieza, recambio de membranas y mano de obra contratada; y los costes fijos, relacionados con la amortización de la planta industrial.

7.1.1. Costes variables

7.1.1.1. Disolvente

El disolvente empleado en la planta industrial consiste en una mezcla de etanol/agua 50:50 (v/v). Este disolvente es empleado para la etapa de extracción de los compuestos fenólicos en el alperujo, así como también es necesario para las correspondientes limpiezas en las etapas de ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

La dosificación de la mezcla hidroalcohólica al circuito de limpieza se hace a partir de un tanque de almacenamiento (T3), el cual es alimentado por otro tanque donde se prepara la mezcla (T2). En este tanque, se alimenta el etanol, almacenado en un depósito principal (T1), y el agua de red de forma continua, asegurando que la proporción de ambos sea la adecuada. Como se mencionó previamente en el Capítulo 6, el aclarado de la planta se realiza con el permeado recuperado de la planta de ósmosis inversa, obteniendo un volumen diario de 69.1 m³. Este volumen se puede alimentar al tanque T3 (de 23.51 m³ sin el margen de seguridad), desde donde se hace trasegar el disolvente a la planta. De esta manera, se decide que un 70% del volumen de aclarado esté constituido por el permeado obtenido por ósmosis inversa, mientras que el 30% restante corresponde a corriente fresca. Esta proporción se

basa en un criterio de diseño conservador del uso del permeado como limpieza, ya que aunque se genera una gran cantidad de permeado, la composición no será exactamente una mezcla de etanol:agua 50:50 (v/v), debido a las diferencias de permeabilidad entre el agua y el etanol. Dado que el agua permeará más fácilmente por la membrana que el etanol, la proporción del disolvente será más diluída y, por tanto, requiere de un suministro adecuado y regulado de corriente fresca para mantener las condiciones de operación de la membrana. Sin embargo, también es cierto que se busca reducir el consumo de etanol tanto por motivos económicos como medioambientales, por lo que una reducción del 70% en el consumo de disolvente fresco baja drásticamente los costes de explotación y la generación de efluentes residuales.

Para el primer aclarado de la planta se emplea el disolvente resultante del segundo aclarado del ciclo de limpieza anterior, siendo este efluente eliminado como residuo. En el segundo aclarado se utiliza la mezcla de permeado de la OI y corriente fresca propuesta, que luego se recirculada al tanque T3 para el próximo ciclo. El segundo aclarado es la etapa más crítica en la limpieza, ya que, luego de ella, comienza nuevamente el ciclo de producción de la planta.

Por lo tanto, el consumo de disolvente diario para el aclarado de la planta será el 30% del volumen en el tanque de aclarado, es decir, 7.05 m³. Extrapolando a los 60 días de funcionamiento de la planta, el consumo anual de disolvente será de 423.18 m³, el cual consiste en un 50% de etanol v/v.

Considerando la disolución de limpieza con P3-Ultrasil 110 al 1% v/v, se decide reutilizarla durante una jornada semanal de 5 días laborales. El volumen de disolución en el tanque es de 18.20 m³, por lo cual se necesitan 18.02 m³ de agua pura para el consumo semanal. Anualmente, se requiere un total de 216.24 m³ de agua de red para la limpieza de la planta. El coste del etanol es de 798.97 €/m³ (Chemanalyst, 2023), mientras que el agua de red con usos industriales tiene un precio unitario de 0.57 €/m³ (EPSAR, 2023) con una cuota de consumo de 4.071,50 €/año si se considera un calibre de contador superior a 80 mm.

De esta forma, en la Tabla 18 se obtiene el coste variable por consumo anual de etanol y agua en la planta industrial. Como se puede ver, el uso de etanol para la limpieza de la planta supone un coste más elevado, si se compara con emplear únicamente agua como disolvente.

Tabla 18. Costes variables de consumo anual de etanol y agua en la planta industrial de ósmosis inversa

Efluente	Volumen total (m ³)	Coste etanol (€/año)	Coste agua (€/año)	Coste total (€/año)
Aclarado	423,18	169.054,06	120,56	169.178,90
Disolución de limpieza	216,24	----	123,26	123,26
			TOTAL	169.302,16

Por otro lado, como se aclara al principio del Capítulo, para la determinación del beneficio total con todas las etapas diseñadas, es necesario escalar el proceso con las etapas de extracción, ultrafiltración y ósmosis inversa empleando como disolvente la mezcla hidroalcohólica. Considerando que el volumen necesario para la extracción y ultrafiltración es de 12240 m³ (Rojo-Adalid, 2021) y para la nanofiltración es de 354.83 m³ (Sáez Montesinos, 2022), y si se calcula su coste para la disolución de

etanol en agua al 50% v/v, se obtiene un valor adicional de 5.035.035,18 € anuales en el proceso global. De esta manera, el coste total de consumo anual de disolvente asciende a 5.204.337,34 €.

7.1.1.2. Detergente P3 Ultrasil 110

La limpieza de la membrana y las conducciones de la planta se hace a partir de una disolución al 1% v/v de P3-Ultrasil 110 en agua osmotizada. El ciclo de limpieza se realiza con recirculación cerrada y la disolución es reutilizada durante 5 días laborales. El volumen que se almacena en el tanque durante este plazo es de 18.20 m³, por lo que es posible calcular la cantidad de P3-Ultrasil diaria necesaria ($V_{Ultrasil}$) mediante la Ecuación 27, donde V_T es el volumen de líquido en el tanque de limpieza y $C_{Ultrasil}$ la concentración del detergente.

$$V_{Ultrasil-i} = V_{T9} \cdot C_{Ultrasil-i}$$
$$V_{Ultrasil-i} = 18.2 \text{ m}^3 \cdot 1 \frac{\text{m}^3 \text{ Ultrasil}}{100 \text{ m}^3} = 0.182 \text{ m}^3 \quad \text{Ecuación 27}$$

Dado que el volumen muerto del circuito de limpieza diluye la concentración del detergente en el tanque cuando comienza el siguiente ciclo, se debe adicionar al final de cada día la cantidad equivalente para mantener la concentración de P3-Ultrasil 110 constante en el proceso. Por lo tanto, empleando la misma ecuación, y sabiendo que el volumen muerto es de 9.1 m³, se obtiene el volumen adicional diario del detergente:

$$V_{Ultrasil-adicional} = 9.1 \text{ m}^3 \cdot 1 \frac{\text{m}^3 \text{ Ultrasil}}{100 \text{ m}^3} = 0.091 \text{ m}^3$$

De esta manera, sumando ambas cantidades, se obtiene un volumen diario de detergente consumido de 0.273 m³, que equivalen a un volumen de 16.38 m³ al año. El precio unitario del P3-Ultrasil 110 es de 3,41 €/kg, y sabiendo que la densidad promedio es de 1.16 kg/L según las especificaciones (ECOLAB, 2016), se obtiene un coste de consumo de detergente de limpieza de 64.79 € anuales.

$$C_{P3-Ultrasil110} = 16.38 \text{ m}^3 \cdot 1.16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3.41 \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 64.79 \text{ €}$$

7.1.1.3. Reposición de membranas

Debido a la degradación de las membranas con el tiempo, se debe considerar el coste de reemplazo, de forma que con dicha reposición la instalación sea capaz de mantener las condiciones de producción en cuanto a la densidad de flujo de permeado y rendimiento del proceso. El recambio de membranas es un gasto de explotación, al igual que los productos de limpieza, el agua consumida y la energía eléctrica requerida en la planta. La vida útil promedio de las membranas de nanofiltración y ósmosis inversa se encuentra entre los 5 y 6 años, y dado que la membrana NF90 empleada tiene características intermedias para ambos procesos, se tomará un valor medio de 5.5 años. Dado que la planta se encuentra operativa 3 meses al año, estas membranas tendrán una duración estimada de 22 años.

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

En el tubo de presión de la planta de ósmosis inversa se colocan un total de 6 módulos de membranas, y cada módulo tiene un valor de 784.04 €, por lo tanto, el valor total de los módulos es de 4704.24 €. Si se consideran al menos dos módulos de repuesto, como criterio de seguridad frente a fallos o daños en la planta, el coste total asciende a 6272,32 €. Así, el coste de reposición de las membranas será de 285,11 € anuales.

7.1.1.4. Energía

El consumo energético de la planta industrial se debe principalmente a las bombas instaladas y al intercambiador de calor del depósito de disolución de limpieza. El precio neto de la electricidad para uso industrial es de 0,201 €/kWh (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2023). En la Tabla 19, se resumen los costes para cada equipo de acuerdo con su potencial nominal y tiempo de operación definidos previamente.

Tabla 19. Costes variables de energía en la instalación de ósmosis inversa

Equipo	Potencia (kW)	Tiempo de operación (h)	Coste (€/día)	Coste total (€/año)
Bomba B1	75	20,32	306,32	18.379,44
Bomba B2	0,55	20,32	2,25	134,78
Bomba B3	0,37	20,32	1,51	90,67
Bomba B4	7,5	1,50	2,26	135,68
Bomba B5	3	1,50	0,90	54,27
Intercambiador de calor	10,41	1,50	3,14	188,32
TOTAL				18.983,16

7.1.1.5. Mantenimiento y reparaciones

El coste de mantenimiento implica los gastos en la conservación y cuidado de los equipos de la planta industrial. Además de aumentar la duración de la instalación, el correcto mantenimiento procura la máxima eficiencia en su funcionamiento. Si se considera un criterio conservador del 10% del valor de los equipos y maquinarias como coste de mantenimiento anual, se obtiene un gasto de 16778.84 €. Sin embargo, dado que los equipos se emplean durante 3 meses al año, el coste anual de mantenimiento será de 4.184,71 €.

7.1.1.5. Mano de obra

Para la contratación de la mano de obra de la planta, se tiene en cuenta la cantidad de tareas y procesos llevados a cabo en la instalación. Dado que los principales procesos son el tratamiento de concentración de ósmosis inversa y la limpieza de la planta, se decide contratar un ingeniero químico que sea capaz de dirigir y planificar todo el proceso, así como también dos operarios de planta que lo asistan en la puesta en marcha y funcionamiento de la instalación a lo largo de la jornada diaria. También se contrata a un operario de mantenimiento que asegure las condiciones óptimas de los equipos y maquinaria instalada, así como también a un empleado que facilite las tareas administrativas y de organización en la planta. En la Tabla 20, se resumen los costes totales para la mano de obra contratada, teniendo en cuenta que la jornada diaria es de 8 horas de trabajo, 5 días a la semana y que se trabajan 60 días por año. Los datos de salario bruto son obtenidos de una base de datos con valores promedio en España (Indeed, 2023).

Tabla 20. Costes variables de mano de obra en la instalación de ósmosis inversa

Mano de obra	N.º contratados	Sueldo (€/h)	Coste total (€/año)
Ingeniero químico	1	22,50	10.800,00
Operario de planta	2	10,33	4.958,40
Operario de mantenimiento	1	10,05	4.824,00
Auxiliar administrativo	1	9,20	4.416,00
TOTAL			24.998,40

7.1.2. Costes fijos

Los costes fijos de la instalación se basan principalmente en la amortización de la inversión propuesta, que incluye en general los costes de equipos, construcción, servicios de ingeniería, desarrollo del proyecto y demás factores. A modo de simplificación, se considera el período máximo de amortización general para instalaciones industriales de 20 años (Agencia Tributaria, 2023), y el presupuesto de ejecución por contrata (PEC) como inversión total, calculado en el documento de Presupuesto. De esta manera, en la ecuación 28 se obtiene el coste fijo anual para la planta industrial, siendo de 14.561,38 €.

$$C_f = \frac{PEC}{A} = \frac{291.227,61 \text{ €}}{20 \text{ años}} = 14.561,38 \text{ €/año} \quad \text{Ecuación 28}$$

7.1.3. Costes totales

Considerando los costes variables y fijos, en la Tabla 21 se resumen los costes de explotación anuales, dando lugar a un coste total anual de 228923.70 € para la instalación de la planta de ósmosis inversa.

Tabla 21. Coste total de la instalación de la planta de ósmosis inversa

Tipo de coste	Clasificación	Coste anual (€/año)
Variable	Disolvente	169.302,16
	Detergente de limpieza	64,79
	Reposición de membranas	285,11
	Energía	18.983,16
	Mantenimiento	4.184,71
	Mano de obra	24.998,40
Fijo	Amortización	14.561,38
TOTAL		232.379,70

7.2. INGRESOS DE EXPLOTACIÓN

El ingreso principal de la planta industrial diseñada es la producción de una corriente enriquecida de compuestos fenólicos, en particular de aquellos de bajo peso molecular como el hidroxitirosol, tirosol y ácido vanílico. Por este motivo, se selecciona el suplemento alimenticio comercial Hidroxitirosol Plus+ de la marca Granatum Plus+ (Granatum Plus, 2023), el cual se produce a base de extracto de olivo cultivado en España. El precio de venta al público del paquete de 60 cápsulas de este suplemento es de 29 €, y cada cápsula tiene un contenido de 25 mg de hidroxitirosol.

De esta manera, calculando el precio (P) de polifenoles en el suplemento, se obtiene un valor de 19.33 € por gramo, y tomando como criterio que el precio de venta al fabricante sea el 70% del precio de venta al público, se obtiene un precio final de 13.53 € por gramo.

$$P = \frac{29 \text{ €}}{60 \text{ cápsulas}} \cdot \frac{1 \text{ cápsula}}{0.025 \text{ g}} = 19.33 \text{ € / g}$$

$$P_f = 19.33 \text{ € / g} \cdot 0.7 = 13.53 \text{ € / g}$$

Sabiendo que la concentración de la corriente de rechazo es de 1039.29 g/m³ y que se producen 7.8 m³ al día, se calcula la cantidad producida de compuestos fenólicos (m), siendo de 486.39 kg/año.

$$m = 1039.29 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \cdot 7.8 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot 60 \text{ días} = 486387.72 \text{ g / año} = 486.39 \text{ kg / año}$$

Por lo tanto, el ingreso de explotación de la instalación industrial es de 6.580.825,85 € al año.

$$I = 486387.72 \frac{\text{g}}{\text{año}} \cdot 13.53 \frac{\text{€}}{\text{g}} = 6.580.825,85 \text{ € / año}$$

7.3. BENEFICIOS TOTALES

Con el fin de calcular los beneficios totales de producción de la corriente concentrada de compuestos fenólicos, es necesario considerar todas las etapas previas de extracción, ultrafiltración y nanofiltración, y añadir sus costes de explotación al calculado para la instalación de la planta de ósmosis inversa. Teniendo en cuenta que en los estudios previos la extracción del alperujo se realiza en medio únicamente acuoso, en el diseño de la planta se adicionó un sistema de alimentación de la mezcla de etanol y agua 50:50 (v/v) para abastecer a todo el proceso integrado de recuperación de polifenoles. El coste de disolvente para las etapas de extracción, ultrafiltración y nanofiltración fue calculado previamente como 5.035.035,18 € anuales, lo cual se adicionará como coste de explotación complementario, y se eliminará la contribución de los costes de explotación de disolvente de los estudios económicos previos.

Las etapas de extracción y ultrafiltración se basan en el estudio de Trabajo de Fin de Grado de Carmen Rojo-Adalid, titulado como “Diseño de un proceso de ultrafiltración combinado con evaporación para recuperar polifenoles de un extracto acuoso de alperujo de 120 toneladas/día”. El coste total de explotación necesario para el presente trabajo no requiere del proceso de evaporación ni el de consumo de agua, por lo cual el coste considerado será de 169.800,32 €. Por otro lado, para saber el coste de explotación de la etapa de nanofiltración, se hace uso del Trabajo Fin de Grado de Ana Sáez Montesinos, titulado “Evaluación de un proceso de nanofiltración para purificar los compuestos fenólicos presentes en el alperujo, tras su extracción y pretratamiento”. A partir de su estudio económico, el coste de explotación total, restando la contribución del consumo de agua, es de 46.329,69 €. De esta manera, el coste de explotación total (C_T) se calcula con la Ecuación 29, siendo C_{E-UF} los costes por extracción y ultrafiltración, C_{NF} los costes de nanofiltración, C_{OI} los costes para la ósmosis inversa y C_D el coste equivalente del disolvente empleado en las etapas previas a la ósmosis inversa.

$$C_T = C_{E-UF} + C_{NF} + C_{OI} + C_D \quad \text{Ecuación 29}$$

En la Tabla 22, se resumen los costes de cada etapa en el proceso global de recuperación de compuestos fenólicos, adicionando el coste de disolvente en las etapas previas a la ósmosis inversa. El coste de explotación total anual para toda la instalación es de 5.483.544,89 €.

Tabla 22. Costes de explotación anuales para la instalación completa

Tipo de coste	Coste anual (€/año)
Coste E-UF	169.800,32
Coste NF	46.329,69
Coste OI	232.379,70
Coste Disolvente previo	5.035.035,18
TOTAL	5.483.544,89

El beneficio bruto anual (B_B) se calcula con la Ecuación 30, a partir de los ingresos (I_T) y costes de explotación calculados anteriormente. De esta manera, se obtiene un beneficio bruto de 1.100.736,96 € anuales.

$$B_B = I_T - C_T \quad \text{Ecuación 30}$$

$$B_B = 6.580.825,85 \text{ €} - 5.483.544,89 \text{ €} = 1.097.280,96 \text{ € / año}$$

El beneficio neto anual se obtiene considerando el IVA del 21% (Ecuación 31), siendo de 866.851,96 €.

$$B_N = B_B \cdot (1 - 0.21) \quad \text{Ecuación 31}$$

$$B_N = 866.851,96 \text{ € / año}$$

Finalmente, es posible calcular el período de la recuperación de la inversión inicial (t_r) mediante la Ecuación 32, sabiendo los presupuestos de inversión (I_{inicial}) para cada etapa. Para la extracción se tiene un presupuesto de inversión inicial de 553.496,83 €, mientras que para la ultrafiltración este valor es de 613.748,02 €, al eliminar la contribución del evaporador en el estudio correspondiente (Rojo-Adalid, 2021). El presupuesto de inversión para la nanofiltración es de 118.248,42 € anuales (Sáez Montesinos, 2022), mientras que para la ósmosis inversa es de 366.480,83 € (calculado en el documento Presupuesto).

De esta manera, se obtiene un período de recuperación de la inversión inicial de 2 años.

$$t_r = \frac{I_{\text{inicial}}}{B_N} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$t_r = \frac{553.496,83 \text{ €} + 613.748,02 \text{ €} + 118.248,42 \text{ €} + 366.480,83 \text{ €}}{866.851,96 \text{ €}}$$

$$t_r = \frac{1.651.974,10 \text{ €}}{866.851,96 \text{ €}} = 1.9 \text{ años} = 2 \text{ años}$$

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

A continuación, se indican las conclusiones del estudio experimental y diseño realizados en este trabajo:

- El rendimiento de la **extracción sólido-líquido** de los compuestos fenólicos con una mezcla de etanol: agua 50:50 (v/v) es mayor que empleando únicamente agua como disolvente. Se obtuvo una concentración de fenoles totales de 737 mg/L para el extracto hidroalcohólico, mientras que en otros estudios previos ha sido de 270 mg/L para extractos acuosos, por lo cual resulta de interés analizar el proceso global de recuperación de polifenoles con el disolvente propuesto.
- Para la etapa de **ultrafiltración** se seleccionó la membrana UP005, obteniendo una densidad de flujo de permeado de 4.0 L·h⁻¹·m⁻² (presión a 2.65 bar y velocidad tangencial de 1.8 m/s). Este valor es más bajo que el obtenido para la membrana UF010104 (20.4 L·h⁻¹·m⁻²), pero la membrana UP005 fue capaz de eliminar una mayor cantidad de materia orgánica, sólidos y azúcares totales, con rechazos superiores al 60% y 75%, respectivamente. De esta manera, se pudo seleccionar una membrana con mayor selectividad a los compuestos fenólicos, logrando purificar gran parte de la fracción presente en la corriente de extracto.
- En la etapa de **nanofiltración** con la membrana NF270 se obtuvo una densidad de flujo de permeado elevada, en torno a 50.2 L·h⁻¹·m⁻² (presión a 15.5 bar y velocidad tangencial de 1 m/s). El rechazo de sólidos totales se mantuvo prácticamente constante alrededor del 56%, y se obtuvo más del 75% de rechazo a los azúcares, favoreciendo aún más la purificación de los compuestos fenólicos. A su vez, se logró un fraccionamiento de estos compuestos, obteniendo una mayor separación entre los polifenoles de alto peso molecular, que son concentrados en el rechazo, y los de bajo peso molecular, que se obtienen en el permeado.
- En la etapa final de **ósmosis inversa** empleando la membrana NF90 la densidad de flujo de permeado se mantuvo estable en 15.3 L·h⁻¹·m⁻² (presión a 20 bar y velocidad tangencial de 1 m/s) y el rechazo a los compuestos fenólicos fue del 91%. De esta forma, fue posible recuperar los compuestos fenólicos ya purificados en una corriente más concentrada, con un mayor valor añadido.
- A partir del **diseño de la planta de ósmosis inversa**, se logró obtener una producción anual de 486.4 kg de compuestos fenólicos purificados. Se seleccionó la membrana FilmTec™ NF90-400/34i de la casa comercial Dupont. El área total de membrana requerida fue de 211.76 m², con 6 módulos en serie en el tubo de presión. A su vez, el permeado obtenido en el proceso fue aprovechado para la limpieza de los módulos de membranas, mejorando así la sostenibilidad del proceso.
- Mediante el **estudio económico** del proceso integrado de tratamiento de 120 m³/día de extracto hidroalcohólico de alperujo, partiendo desde la extracción hasta la etapa de ósmosis inversa, se obtuvo que es necesaria una inversión inicial de 1.651.974,10 €, con un beneficio

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

neto anual de 869.582,20 €. De esta forma, fue posible conseguir un período de recuperación de la inversión de 2 años, demostrando así la viabilidad económica del proceso.

Finalmente, se puede decir que el tratamiento del alperujo mediante extracción y separación de los polifenoles por tecnología de membranas supone grandes ventajas, no solamente por el interés económico que tienen estos compuestos en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, sino también por el aprovechamiento de los residuos de un proceso productivo tan importante en España como lo es la obtención de aceite de oliva virgen. La contribución a un menor impacto medioambiental, empleando un residuo como materia prima del proceso productivo, favorece a su vez el desarrollo sostenible de procesos industriales a gran escala.

CAPÍTULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Aceites de Oliva de España. (2022). *Varietades de aceituna*. Obtenido de <https://www.aceitesdeolivadeespana.com/la-importancia-de-las-variedades/>
- Agencia Tributaria. (2023). *Tabla de amortización simplificada*. Obtenido de https://sede.agenciatributaria.gob.es/Sede/ayuda/manuales-videos-folletos/manuales-practicos/folleto-actividades-economicas/3-impuesto-sobre-renta-personas-fisicas/3_5-estimacion-directa-simplificada/3_5_4-tabla-amortizacion-simplificada.html
- Ahuchaougu, A. A. (2018). Reverse Osmosis Technology, its Applications and Nano-Enabled. *International Journal of Advanced Research in Chemical Science (IJARCS)*, 5(2), 20-26.
- Álvarez Blanco, S., & Mendoza Roca, J. A. (2018). *Procesos de membrana: generalidades y aplicaciones al ciclo integral del agua*. Instituto Universitario de Investigación ISIRYM, Universidad Politécnica de Valencia.
- ASEMESA. (2019). *La aceituna: variedades, tipos y presentaciones*. Obtenido de <https://asemesa.es/la-aceituna-variedades-tipos-y-presentaciones/>
- ASOLIVA. (2016). (Asociación Española de la Industria y Comercio Exportador de Aceites de Oliva y Aceites de Orujo) Obtenido de <http://www.asoliva.com/elaboracion#>
- Azaroual, L., Liazid, A., El Mansouri, F., Brigui, J., Ruíz-Rodríguez, A., Barbero, G. F., & Palma, M. (2021). Optimization of the Microwave-Assisted Extraction of Simple Phenolic Compounds from Grape Skins and Seeds. *Agronomy*, 11, 1527.
- Bender, C., Candi, I., & Rogel, E. (2023). Efficacy of Hydroxytyrosol-Rich Food Supplements on Reducing Lipid Oxidation in Humans. *Int J Mol Sci*, 5521.
- Binglong Zhang et al. (2019). Effect of temperature and mole fraction on viscosity and thermal conductivity of water and ethanol mixture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 227(042048).
- Campo, M. G., & Rapoport, H. (2008). De la yema de olivo al desarrollo inicial de la aceituna. Descripción de la iniciación floral, floración, cuajado, caída de frutos y endurecimiento del hueso. *Olint*, 400-406.
- Casas Roncero, I. (2021). *Estudio del efecto de las condiciones de operación en un proceso de*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Chemanalyst. (2023). *Ethanol price trends and forecast*. Obtenido de <https://www.chemanalyst.com/Pricing-data/ethanol-13>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A.-G., & Meullemiestre, A. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 540-560.

- Crespo, J. G., Taqui Syed, U., Brazinha, C., & Ricardo-da-Silva, J. M. (2017). Valorisation of grape pomace: Fractionation of bioactive flavan-3-ols by membrane processing. *Separation and Purification Technology*, 172, 404-414.
- Cvejić Hogervorst Jelena, R. G.-D. (2018). Beneficial effects of polyphenols on chronic diseases and ageing. *Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications*, 69-102.
- Dreywood, R. (1946). Qualitative Test for Carbohydrate Material. *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, 18(8), 499.
- Dupont. (2020). *Product Data Sheet: FilmTec™ NF90-400/34i Element*. Obtenido de <https://www.dupont.com/products/filmtecnf9040034i.html>
- Dupont. (2023). *FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes - Technical manual*. Obtenido de <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>
- ECOLAB . (2016). *P3-ultrasil®110*. Obtenido de <https://csaconsultores.com/wp-content/uploads/2017/06/ES-ES-106198E-P3-ULTRASIL-110.pdf>
- EPSAR. (2023). *Canon de saneamiento*. Obtenido de Generalitat Valenciana: <https://www.epsar.gva.es/areas/canon-de-saneamiento/que-es-el-canon-de-saneamiento>
- Extenda. (2017). *Estudio del sector del aceite de oliva de Andalucía*. Obtenido de <https://www.extenda.es/wp-content/uploads/2018/01/ESTUDIO-DEL-ACEITE-DE-OLIVA-EN-ANDALUCIA-2017.pdf>
- García de la Fuente, R. (2011). *Caracterización y uso de compost de alperujo como enmienda orgánica. Evaluación agronómica y medioambiental*. Universitat Politècnica de Valencia.
- García-Castello, E., Rodríguez-Lopez, A., Mayor, L., Ballesteros, R., Conidi, C., & Cassano, A. (2015). Optimization of conventional and ultrasound assisted extraction of flavonoids from grapefruit (*Citrus paradisi* L.) solid wastes. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 1114-1122.
- Granatum Plus. (2023). *Hidroxitirosol Plus+ 60 cápsulas*. Obtenido de <https://granatherapy.com/tienda/hidroxitirosol-plus/>
- Grundfos. (2023). *Bomba CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE*. Obtenido de <https://product-selection.grundfos.com/es/products/cr-cre-cri-crie-crn-crne-crt-crte/crn/crn-95-9-92905833?pumpsystemid=2134634961&tab=variant-sizing-results>
- Grundfos. (2023). *Bomba NB 65-125/121 AAF2AESBQQEEW3*. Obtenido de <https://product-selection.grundfos.com/es/products/nb-nbe-nbe-series-2000/nb/nb-65-125121-97931701?pumpsystemid=2134638732&tab=variant-specifications>
- Guo, Z., Jia, X., Zheng, Z., Lu, X., Zheng, Y., Zheng, B., & Xiao, J. (2018). Chemical composition and nutritional function of olive (*Olea europaea* L.): a review. *Phytochemistry Reviews*, 17, 1091-1110.
- Hussain, S.Z., Naseer, B., Qadri, T., Fatima, T., Bhat, T.A. (2021). Olive (*Olea europaea* L.) - Morphology, Taxonomy, Composition and Health Benefits. En *Fruits Grown in Highland Regions of the Himalayas* (págs. 117-129). Springer.

- Indeed. (2023). *Salarios por sector*. Obtenido de <https://es.indeed.com/career/salaries?from=gnav-title-webapp>
- IOC. (2023). *Denominaciones y definiciones de los aceites de oliva*. Obtenido de <https://www.internationaloliveoil.org/el-mundo-del-olivo/aceite-de-oliva/?lang=es>
- Izák, P., Hovorka, Š., Bartovský, T., Bartovská, L., & Crespo, J. (2007). Swelling of polymeric membranes in room temperature ionic liquids. *Journal of Membrane Science*, 296, 131-138.
- Jimenez-Lopez, C., Carpena, M., Lourenço-Lopes, C., Gallardo-Gomez, M., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., . . . Simal-Gandara, J. (2020). Bioactive Compounds and Quality of Extra Virgin Olive Oil. *Foods*, 9, 8.
- L. Fernández-Lobato et al. (2021). Life cycle assessment of the Spanish virgin olive oil production: A case study for Andalusian region. *Journal of Cleaner Production*, 290(125677). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125677>.
- Lopez-Avila, V. (2000). *Microwave-Assisted Extraction*. Cupertino: Academic Press.
- Lopez-Huertas, E. (2010). Health effects of oleic acid and long chain omega-3 fatty acids (EPA and DHA) enriched milks. A review of intervention studies. *Pharmacological Research*, 61, 200-207.
- Ludwig, T., & Goldberg, H. (1956). The Anthrone method for the determination of carbohydrates in foods and in oral rinsing. *J. Dent. Res*, 35, 90-94.
- MAPA. (2022). *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*. Obtenido de <https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/producciones-agricolas/aceite-oliva-y-aceituna-mesa/aceite.aspx>
- MERCASA. (2022). *Alimentación en España: Producción, Industria, Distribución y Consumo*. Madrid. Obtenido de https://www.mercasa.es/wp-content/uploads/2022/12/AEE_2022_WEB.pdf
- Ministerio de Industria, Energía y Turismo. (2023). *Precio neto de la electricidad para uso doméstico y uso industrial*. Obtenido de MINCOTUR: https://www.mincotur.gob.es/es-es/IndicadoresyEstadisticas/BoletinEstadistico/Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/4_12.pdf
- Moody, L. F. (1944). Friction factors for pipe flow. *Trans. ASME*, 66.
- Morillo-Pérez, J. A., Antizar-Ladislao, B., Monteoliva-Sánchez, M., & Ramos-Cormenzana, A. (2009). Bioremediation and biovalorisation of olive-mill wastes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82(1), 25-39.
- Naciones Unidas. (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Olimerca. (2022). *La riqueza varietal del olivar en la Comunidad Valenciana*. Madrid: Ágora Comunicación y Análisis, S.L. Obtenido de <https://issuu.com/olimerca/docs/olimerca-n40-interior-web?fr=sYzcyNjEyOTg4NjY>
- Pérez Jiménez, J. (2019). Potential of dietary extractable and non-extractable polyphenols in the prevention of cardiometabolic diseases. *Anales RAMN*, 136(03), 298-307.

- Personnaa, Y. R., Slatara, L., Ntarlagiannisa, D., Werkema, D., & Szabo, Z. (s.f.). Electrical signatures of ethanol-liquid mixtures: implications for monitoring biofuels. *U.S. EPA*.
- Pirobloc. (2019). *Cálculo de pérdidas de carga*. Obtenido de <https://www.pirobloc.com/blog-es/calculo-perdidas-carga/>
- Plaza, A., Tapia, X., Yañez, C., Vilches, F., Candia, O., Cabeza, R., & Romero, J. (2020). Obtaining Hydroxytyrosol from Olive Mill Waste Using Deep Eutectic Solvents and Then Supercritical CO₂. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 6273-6284.
- Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59-104.
- Quirós-Fernández, R., López-Plaza, B., Bermejo, L. M., Palma Milla, S., Zangara, A., & Gñomez Candela, C. (2022). Oral Supplement Containing Hydroxytyrosol and Punicalagin Improves Dyslipidemia in an Adult Population without Co-Adjuvant Treatment: A Randomized, Double-Blind, Controlled and Crossover Trial. *Nutrients*, 14(9), 1879.
- Rabelo, R. S., Machado, M. T., Martínez, J., & Hubinger, M. D. (2016). Ultrasound assisted extraction and nanofiltration of phenolic compounds from artichoke solid wastes. *Journal of Food Engineering*, 178, 170-180.
- Rojo-Adalid, C. (2021). *Diseño de un proceso de ultrafiltración combinado con evaporación para recuperar polifenoles de un extracto acuoso de alperujo de 120 toneladas/día*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rubio Senent, F. (2011). *Recuperación de compuestos bioactivos a partir de subproductos del aceite de oliva*. Universidad de Sevilla.
- Ruiz, F. (2014). Estudio económico de la desalación de agua. En *Desalación de agua de mar en planta termosolar de cilindroparábolico de 50 MW*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Sáez Montesinos, A. M. (2022). *Evaluación de un proceso de nanofiltración para purificar los compuestos fenólicos presentes en el alperujo, tras su extracción y pretratamiento mediante ultrafiltración*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Salinas-Rodríguez, S. G., Schippers, J. C., & Kennedy, M. D. (2021). Basic principles of reverse osmosis. En *Seawater Reverse Osmosis Desalination*. IWA Publishing.
- Sánchez-Arévalo, C. M., Croes, T., Van der Bruggen, B., Vincent-Vela, M. 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.
- Sánchez-Arévalo, C. M., Iborra-Clar, A., Vincent-Vela, M. 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. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113742>.

- Sánchez-Arévalo, C. M., Pérez García-Serrano, A., Vincent-Vela, M. C., & Álvarez-Blanco, S. (2023). Combining Ultrafiltration and Nanofiltration to Obtain a Concentrated Extract of Purified Polyphenols from Wet Olive Pomace. *Membranes*, 13, 119.
- Santafé-Moros, A., González-Zafrilla, J., & Valencia, D. (2010). Design of a Flat Membrane Module for Fouling and Permselectivity Studies. *COMSOL Conf. Paris*, 1-7.
- Singleton, V., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. *Am J Enol Vitic*, 16, 144-158.
- Tapia-Quirós, P., Montenegro-Landívar, M., Reig, M., Vecino, X., Saurina, J., Granados, M., & Cortina, J. (2022). Integration of membrane processes for the recovery and separation of polyphenols from winery and olive mill wastes using green solvent-based processing. *Journal of Environmental Management*, 307.
- The Engineering Toolbox. (2019). *Ethanol Water Mixtures - Densities vs. Temperature*. Obtenido de https://www.engineeringtoolbox.com/ethanol-water-mixture-density-d_2162.html
- UNE. (2012). *UNE-EN ISO 7887:2012. Calidad del agua. Examen y determinación del color*. Obtenido de <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049776>
- VAXA Software. (2023). Obtenido de <http://www.vaxasoft.com/indexes.html>
- Yaqian, Z. (2022). Effects of Membrane Swelling: An Overview. *Journal of Membrane Science & Technology*, 12, 290.

ANEXOS

ANEXO I: CÁLCULOS DE DIMENSIONADO

1. CÁLCULOS DE PÉRDIDAS DE CARGA

1.1. Pérdidas de carga en tuberías ($h_{f-tuberías}$)

Como se ha mencionado en la sección de diseño de la planta industrial, para el dimensionado de las bombas es necesario conocer las pérdidas de carga por las conducciones, empleando para ello el número de Reynolds (Re). Si dicho número es menor a 2000, se considera que el flujo es laminar y, por tanto, el coeficiente de fricción se calcula mediante la Ecuación 33:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 33}$$

En cambio, si Re es superior a 4000, entonces el flujo es considerado turbulento y se utiliza el ábaco de Moody, expuesto en la Figura 22. Un parámetro necesario para calcular el factor de fricción es la rugosidad o aspereza relativa (Rug_{rel}), definida como la rugosidad absoluta (ϵ) y el diámetro de la tubería (D). Siendo la rugosidad absoluta para el material de las tuberías seleccionadas (AISI 316L) de 0.002 mm, se calcula la rugosidad absoluta de cada tubería mediante la Ecuación 34:

$$Rug_{rel} = \frac{\epsilon}{D} \quad \text{Ecuación 34}$$

En la Tabla 23, se obtienen los valores de pérdida de carga para cada tramo de tubería de la planta diseñada. Se observa que, para todas las tuberías, el flujo resulta ser turbulento, por lo cual es indispensable el cálculo de la rugosidad relativa.

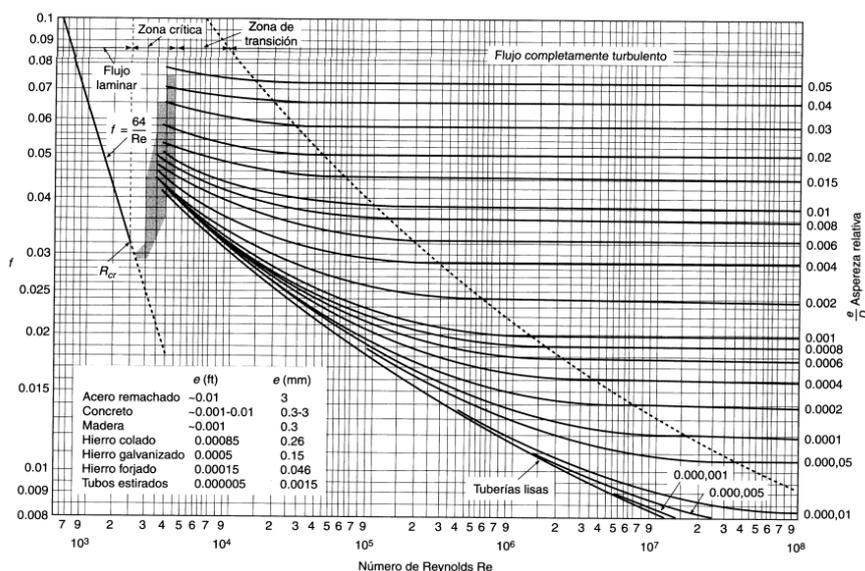


Figura 22. Ábaco de Moody. Fuente: (Moody, 1944)

Tabla 23. Cálculos de pérdida de carga en tuberías

Tubería	Diámetro (mm)	L (m)	Q (m ³ /s)	Re	Rug relativa	f	h _{f-tubería} (m)
T1	156,3	8	0,014	42218,34	1,28E-05	0,02174	0,0302
T2	36,3	2	0,000944	12257,37	5,51E-05	0,02937	0,0687
T3	36,3	3	0,000944	12257,37	5,51E-05	0,02937	0,1030
T4	158,3	1,5	0,013056	38874,18	1,26E-05	0,02215	0,0047
T5	158,3	6	0,013056	38874,18	1,26E-05	0,02215	0,0188
T6	156,3	4,5	0,01306	39383,68	1,28E-05	0,02208	0,0150
T7	207,1	1,5	0,026116	59437,24	9,66E-06	0,02015	0,0045
T8	207,1	1,5	0,026116	59437,24	9,66E-06	0,02015	0,0045
T9	207,1	2	0,026116	59437,24	9,66E-06	0,02015	0,0060
T10	207,1	4	0,026116	59437,24	9,66E-06	0,02015	0,0119
T11	263	3	0,040116	71894,21	7,60E-06	0,01932	0,0061
T12	313,9	6	0,066232	99450,88	6,37E-06	0,01804	0,0129
T13	156,3	5	0,014	42218,34	1,28E-05	0,02174	0,0189
T14	156,3	3	0,014	42218,34	1,28E-05	0,02174	0,0113

1.2. Pérdidas de carga locales (h_{f-locales})

Al igual que con las pérdidas de carga en tuberías, las pérdidas de carga locales o secundarias son necesarias para el diseño de las bombas en la instalación propuesta. Para ello, sabiendo los elementos hidráulicos instalados, y conociendo los coeficientes adimensionales correspondientes, se suman las contribuciones de los elementos de cada tubería. En la Tabla 24, se obtienen las pérdidas de carga locales para cada tubería del sistema.

Tabla 24. Pérdidas de carga locales en la instalación

Tubería	Accesorios	k (adim)	h _{f-local} (mcf)
T1	4 codos	3,6	0,1835
T2	---	---	---
T3	1 válvula de 3 vías y 3 codos	3,6	0,1835
T4	1 válvula de compuerta	0,2	0,0102
T5	4 codos	3,6	0,1835
T6	1 válvula de 3 vías	0,9	0,0459
T7	1 válvula de 3 vías	0,9	0,0459
T8	1 válvula de 3 vías	0,9	0,0459
T9	1 codo	0,9	0,0459
T10	1 codo	0,9	0,0459
T11	1 válvula de 3 vías	0,9	0,0459
T12	3 codos	2,7	0,1376
T13	3 codos	2,7	0,1376
T14	1 codo	0,9	0,0459

1.3. Pérdidas de carga totales

Sabiendo las pérdidas de carga de las tuberías y las correspondientes a las pérdidas locales, se pueden sumar las contribuciones para obtener el valor de pérdida de carga total de cada tubería, lo cual sirve para el diseño de las bombas de la instalación. En la Tabla 25, se resumen estos valores.

Tabla 25. Pérdidas de carga totales de cada tubería en la instalación

Tubería	h _{f-totales} (m)
T1	0,2137
T2	0,0687
T3	0,2865
T4	0,0149
T5	0,2023
T6	0,0609
T7	0,0503
T8	0,0503
T9	0,0518
T10	0,0578
T11	0,0520
T12	0,1505
T13	0,1565
T14	0,0572

2. CONCENTRACIONES FINALES EN EL RECHAZO Y PERMEADO

A pesar de que el proceso de ósmosis inversa se ha llevado a cabo de forma experimental, no se ha alcanzado un factor de reducción de volumen de 10, por lo cual es necesario calcular de manera teórica la concentración final de compuestos fenólicos (como también de carbohidratos totales) a la salida del proceso industrial a diseñar. Para ello, se emplea la Ecuación 35, siendo C_R la concentración en el rechazo, C₀ la concentración en el alimento, VRF el factor de reducción de volumen y R el porcentaje de rechazo. Este último se infiere de los datos experimentales obtenidos previamente (Gráfica 18).

$$C_R = C_0 \cdot VRF^R \quad \text{Ecuación 35}$$

De esta forma, se calcula la concentración de polifenoles en el rechazo, sabiendo que en el alimento la concentración es de 127.86 mg/L, el factor de reducción de volumen es de 10 y el porcentaje de rechazo se asume constante a 91%.

$$C_{R-Ph} = C_{0-Ph} \cdot VRF^{R_{Ph}} = 127.86 \frac{mg}{L} \cdot 10^{0.91} = 1039.29 \frac{mg}{L}$$

La concentración en el permeado se calcula a partir del balance de materia en el sistema de membranas, planteado en la Ecuación 36, siendo V₀, V_R y V_P los volúmenes diarios de alimento, rechazo y permeado, calculados en el Capítulo 6.

$$C_0 \cdot V_0 = C_R \cdot V_R + C_P \cdot V_P \quad \text{Ecuación 36}$$

$$C_{P-ph} = \frac{C_{0-ph} \cdot V_0 - C_{R-ph} \cdot V_R}{V_P} = 26.59 \frac{mg}{L}$$

ANEXO II: FICHAS TÉCNICAS DE MEMBRANA Y
EQUIPOS



Product Data Sheet

FilmTec™ NF90-400/34i Element

Description

Ideal for: utility managers and operators looking for a technology that delivers high quality permeate water while removing specific contaminants such as salts, nitrates, iron, and organic compounds.

The FilmTec™ NF90-400/34i Element:

- Delivers high productivity and cleanability due to its high active area and widest cleaning pH range (1-13) tolerance
- Offers a nanofiltration technology that selectively removes these components, removes color, and operates at low operating pressures
- Including iLEC™ interlocking end caps, reducing system operating costs and the risk of o-ring leaks that can cause poor water quality



Product Type

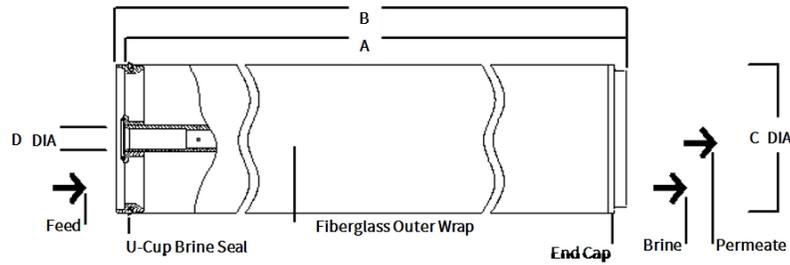
Spiral-wound element with polyamide thin-film composite membrane

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flow Rate		Minimum Salt Rejection (%)
	(ft ²)	(m ²)		(GPD)	(m ³ /d)	
NF90-400/34i	400	37	34-LDP	10,000	38	98.7

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)
NF90-400/34i	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	2 – 11
Short-Term Cleaning (30 min.) ^b	1 – 13
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.
- 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.



Depósitos para el almacenamiento

Depósitos de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV)

- **Gran resistencia química, mecánica y a los agentes de corrosión externos.**
- Su diseño y las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación ofrecen a los depósitos **una fácil limpieza, una alta durabilidad, un nulo mantenimiento y una fácil reparación** ante una rotura.
- El Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio es un buen aislante térmico y eléctrico, al mismo tiempo que hace que los depósitos sean **ligeros y fácilmente transportables.**
- Dependiendo del producto a contener, la concentración y la temperatura, **utilizamos las materias primas más adecuadas** para cada fabricación.
- **Dimasa Grupo** fabrica todos sus depósitos según **las normas de fabricación: UNE EN 13121-3:2010 y RTP1-2011.**
- Para realizar **el cálculo de espesores del tanque**, tenemos en cuenta: **volumen, densidad del producto, sismo, viento, nieve, causas vivas, causas externas y temperatura del producto.**

Con cada proyecto entregamos memoria de cálculo de tanque

Tanques de almacenamiento vertical

Fondo plano de pared simple



Fondo inferior plano y superior tori esférico plano o abierto.

Este tipo de depósito es de bajo coste económico.

Fondo verticales con patas



Depósitos verticales de superficie con fondo inferior tori esférico y superior tori esférico, plano o abierto.

Puede ser presentado con base de pies en acero al carbono, o con faldón de PRFV.

Depósitos horizontales

Para enterrar



Depósitos horizontales para enterrar, fabricados en PRFV con los dos fondos toriesféricos y aros de refuerzo en PRFV.

Estos equipos, pueden estar compartimentados y pueden diseñarse para ser una depuradora compacta con todos sus elementos internos.

De superficie



Dos fondos toriesféricos, aros de refuerzo en PRFV y cunas en PRFV o en acero al carbono.

Estos equipos, pueden estar compartimentados y pueden diseñarse para ser una depuradora compacta con todos sus elementos internos.

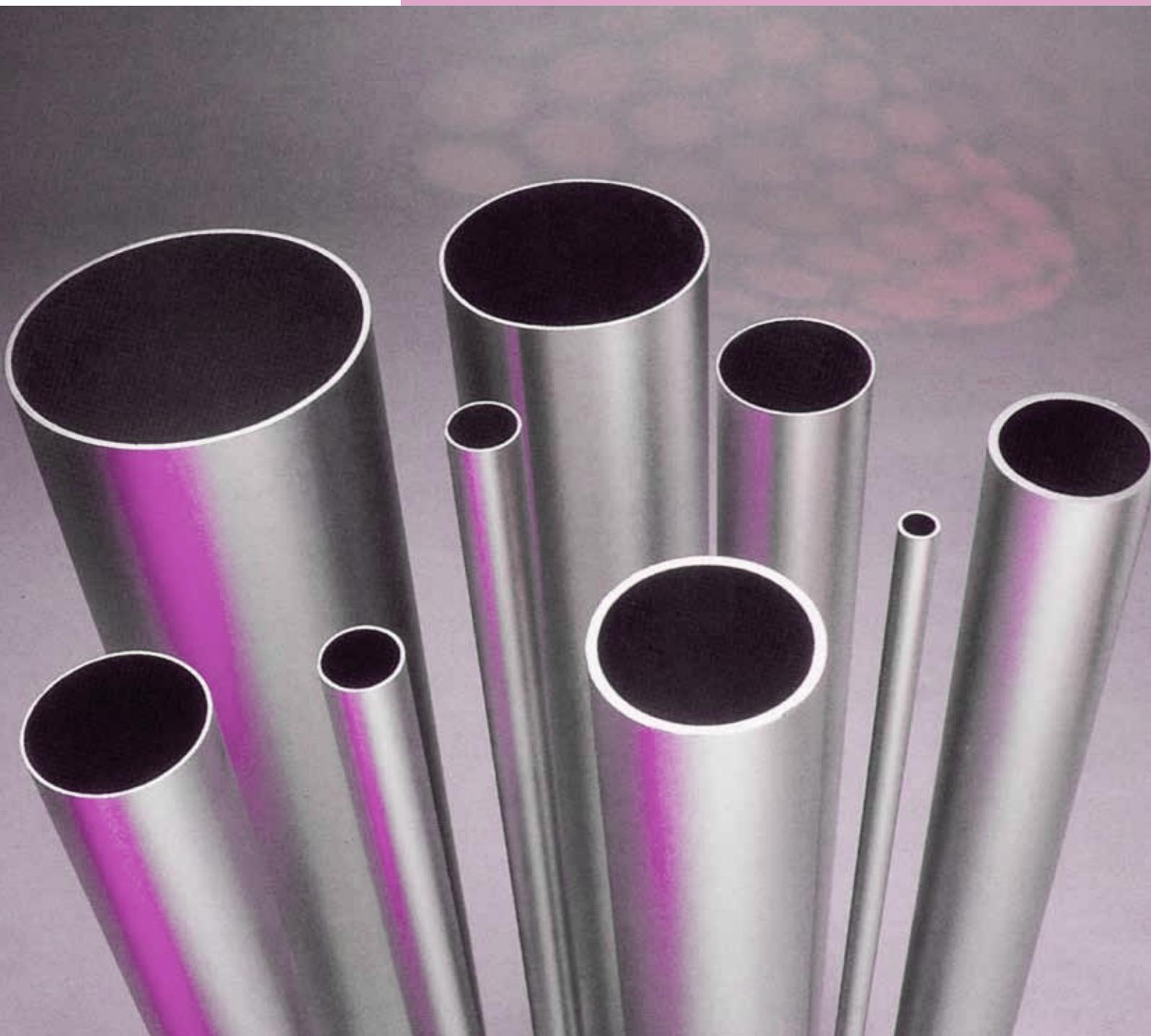
Características Técnicas:

- Capacidad entre 1.000 y 250.000 litros en una sola pieza.
- Diámetros 500, 800, 900, 1000, 1200, 1500, 1800, 2000, 2500, 3000, 3500 y 4000 mm.
- Los diferentes tipos de resina que podemos utilizar son: Ortoftálica, Isoftálica, Bisfenólicas y Vinilester.

Los depósitos de Dimasa grupo pueden ser personalizados con el color que elija el cliente y los accesorios siguientes:

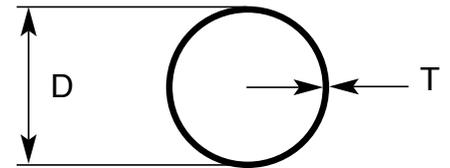
- Boca de hombre inferior / superior Dn-500 PN 0'2, 2'5, 6, 10, atornillada.
- Boca de hombre elíptica con puente, volante y tapadera en Inox. o en PRFV.
- Tubuladuras PRFV Din 2576.
- Anclajes de fijación al suelo.
- Orejas de elevación.
- Sistema de nivel visual en PVC transparente.
- Sistema de nivel visual mediante poleas.
- Detectores de nivel; de mínimo, de máximo y de fuga.
- Cuadro eléctrico con señal luminosa y acústica de fuga o nivel máximo.
- Venteo.
- Soporte de agitador.
- Rompeolas.
- Sistema de trazado eléctrico para mantener la temperatura.
- Serpentes en Inox.
- Soportes para tubería.
- Calorifugado mediante placas de poliuretanos recubierto de PRFV.
- Cunas en PRFV o en acero al carbono.
- Posibilidad de compartimentar en diferentes compartimentos.
- Posibilidad de montaje de diferentes elementos de depuración; difusores, eyectores, bombas, etc...

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

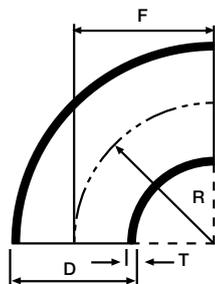
Normas de fabricación: EN 10217-7

EN 10296-2

Longitud de suministro: 6.000 mm.

Otros largos, espesores, calidades o características especiales bajo pedido especial (consultar).





Codos 90° soldados

Accesorios de acero inoxidable para soldar

Diámetro nominal		Diámetro D mm	Radio R=F mm	Espesor T mm	Peso Kg
DN	Pulg.				
15	1/2"	21,3	27	1,6/2	0,03/0,04
20	3/4"	26,9	28	1,6/2	0,05/0,06
25	1"	33,7	38	1,6/2	0,08/0,09
32	1 1/4"	42,4	47	1,6/2	0,12/0,15
40	1 1/2"	48,3	57	1,6/2	0,17/0,21
50	2"	60,3	76	1,6/2	0,29/0,35
65	2 1/2"	76,1	95	1,6/2	0,44/0,55
80	3"	88,9	114	2/3	0,78/1,10
100	4"	114,3	152	2/3	1,35/1,9
125	5"	139,7	190	2/3	2,07/3,1
150	6"	168,3	229	2/3	3,0/4,6
200	8"	219,1	305	2/3	5,2/8,7
250	10"	273	381	2/3	8,2/12,2
300	12"	323,9	457	2/3	11,6/17,4
350	14"	355,6	533,5	3/4	22/24
400	16"	406,4	610	3/4	29/39
450	18"	457,2	686	4	49
500	20"	508	762	4	60,4
600	24"	610	914	4	87,1
700	28"	711,2	1067	4/5	119/148
800	32"	812,8	1219	4/5	156/195
900	36"	914,4	1372	4/5	206/246
1000	40"	1016	1524	4/5	243/304

Radio: Aproximadamente 1,5 veces el diámetro nominal.

Calidad del material: AISI-304 / 304 L / 316 / 316 L, duplex.

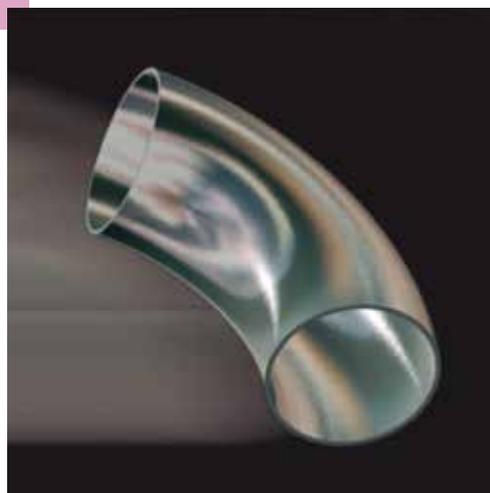
Composición química: Ver página 8.

Características mecánicas: Ver página 9.

Bajo consulta se pueden fabricar en otros espesores.

Tolerancias: Ver página 34.

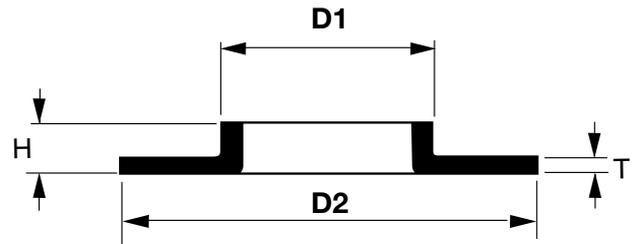
Normas de fabricación: EN 10253-3/EN 10253-4.





Collarines

Accesorios de acero inoxidable para soldar



Diámetro nominal		D1 mm	D2 mm	H mm	Peso T=2 Kg	Peso T=3 Kg	Peso T=4 Kg	Peso T=5 Kg
DN	Pulg.							
15	1/2"	21,3	43	6	0,021	0,032		
20	3/4"	26,9	58	8	0,039	0,058	0,077	
25	1"	33,7	68	9	0,051	0,077	0,103	
32	1 1/4"	42,4	78	10	0,067	0,101	0,135	
40	1 1/2"	48,3	88	10	0,082	0,123	0,164	
50	2"	60,3	102	12	0,107	0,161	0,215	
65	2 1/2"	76,1	122	12	0,145	0,217	0,289	
80	3"	88,9	139	12	0,185	0,277	0,369	
100	4"	114,3	158	16	0,214	0,321	0,428	
125	5"	139,7	188	16	0,278	0,417	0,556	
150	6"	168,3	212	17	0,318	0,477	0,637	
200	8"	219,1	270	18	0,472	0,708	0,943	
250	10"	273,0	323	18	0,556	0,835	1,113	
300	12"	323,9	370	19	0,641	0,962	1,282	
350	14"	355,6	430	21	1,012	1,518	2,024	
400	16"	406,4	482	21		1,770	2,360	
450	18"	457,2	532	25		2,087	2,783	
500	20"	508,0	587	27		2,286	3,048	
600	24"	609,6	685	26		2,719	3,625	
700	28"	711,2	800	53		5,04	6,72	8,40
800	32"	812,8	905	63		6,24	8,32	10,40
900	36"	914,4	1005	63		7,20	9,60	12,00
1000	40"	1016,0	1110	63		8,16	10,88	13,60

Calidad del material: AISI-304 / 304 L, 316 / 316 L, duplex.

Composición química: Ver página 8.

Características mecánicas: Ver página 9.

Bajo consulta se pueden fabricar en otros espesores.

Tolerancias: Ver página 34.

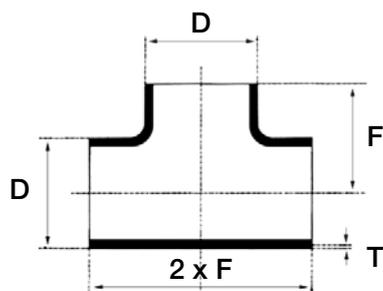
Norma de fabricación: EN 1092-1 Tipo 33.





Tes iguales

Accesorios de acero inoxidable para soldar



Diámetro nominal		D mm	F mm	Peso T=2 Kg	Peso T=3 Kg	Peso T=4 Kg
DN	Pulg.					
15	1/2"	21,3	25,5	0,055		
20	3/4"	26,9	28,5	0,079		
25	1"	33,7	38	0,137	0,215	
32	1 1/4"	42,4	47,5	0,233	0,344	
40	1 1/2"	48,3	57	0,307	0,463	
50	2"	60,3	63,5	0,408	0,612	
65	2 1/2"	76,1	76	0,603	0,941	
80	3"	88,9	85,5	0,860	1,263	
100	4"	114,3	105	1,268	1,981	
125	5"	139,7	124	1,856	2,783	
150	6"	168,3	143	2,984	3,808	
200	8"	219,1	178	4,337	6,505	
250	10"	273,0	216	5,23	7,85	10,47
300	12"	223,9	254	12,35	18,53	24,68
350	14"	355,6	279	14,77	22,16	29,52
400	16"	406,4	305		27,92	37,20
450	18"	457,2	343		35,35	47,10
500	20"	508,0	381		43,64	58,16
600	24"	609,6	432		62,84	83,78
700	28"	711,2	1042		127,35	169,80
800	32"	812,8	1194		167,46	223,28
900	36"	914,4	1346		212,00	282,66
1000	40"	1016,0	1498		261,77	349,03

Calidad del material: AISI-304 / 304 L, 316 / 316 L, duplex.

Composición química: Ver página 8.

Características mecánicas: Ver página 9.

Bajo consulta se pueden fabricar en otros espesores.

Tolerancias: Ver página 34.

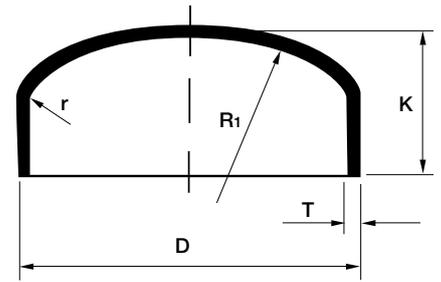
Norma de fabricación: EN 10253-3/EN 10253-4.





Caps

Accesorios de acero inoxidable para soldar



Diámetro nominal		D mm	K mm	Peso T=2 Kg	K mm	Peso T=3 Kg
DN	Pulg.					
15	1/2"	21,3	14,5	0,015	15,5	0,023
20	3/4"	26,9	10,5	0,015	12	0,023
25	1"	33,7	12,5	0,023	14,5	0,035
32	1 1/4"	42,4	17	0,042	18	0,063
40	1 1/2"	48,3	17	0,050	23	0,087
50	2"	60,3	20	0,076	22	0,115
65	2 1/2"	76,1	27	0,131	29	0,196
80	3"	88,9	29	0,166	30	0,249
90	3 1/2"	101,6	26	0,187	27	0,280
100	4"	114,3	32	0,246	32	0,369
125	5"	139,7	35	0,372	36	0,532
150	6"	168,3	40	0,518	43	0,776
200	8"	219,1	50	0,849	51	1,274
250	10"	273	63	1,310	62	1,966
300	12"	323,9	72	1,814	72	2,720
350	14"	355,6			89	3,516
400	16"	406,4			98	4,523
450	18"	457,2			107	5,494
500	20"	508			120	6,558
600	24"	609,6			140	9,232
700	28"	711,2			152	12,900

Radio mayor (R1)= Aproximadamente 0,8 D
Radio pequeño (r)= Aproximadamente 0,15 D

Calidad del material:

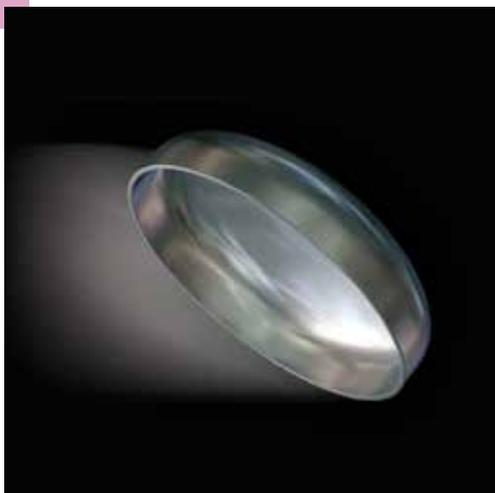
AISI-304 / 304 L, 316 / 316 L, duplex.

Composición química: Ver página 8.

Características mecánicas: Ver página 9.

Tolerancias: Ver página 34.

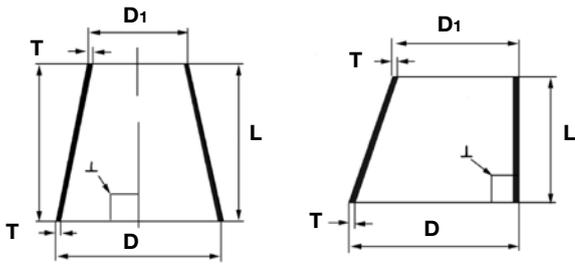
Norma de fabricación: EN 10253-3/EN 10253-4.





Reducciones concéntricas y excéntricas

Accesorios de acero inoxidable para soldar

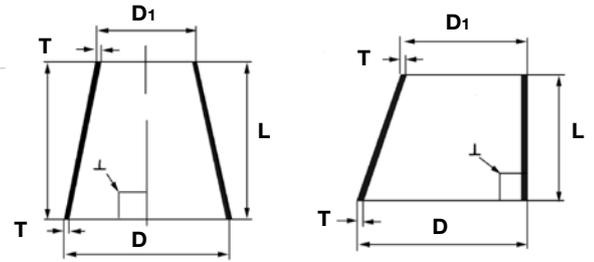


Diámetro nominal		D mm	D ₁ mm	L mm	Peso T=2 Kg	Peso T=3 Kg	Peso T=4 Kg
DN	Pulg.						
20 x 15	3/4" x 1/2"	26,9	21,3	38	0,046		
25 x 15	1" x 1/2"	33,7	21,3	51	0,070	0,106	
25 x 20	1" x 3/4"	33,7	26,9	51	0,078	0,116	
32 x 15	1 1/4" x 1/2"	42,4	21,3	51	0,082	0,122	
32 x 20	1 1/4" x 3/4"	42,4	26,9	51	0,089	0,133	
32 x 25	1 1/4" x 1"	42,4	33,7	51	0,097	0,146	
40 x 15	1 1/2" x 1/2"	48,3	21,3	64	0,112	0,168	
40 x 20	1 1/2" x 3/4"	48,3	26,9	64	0,121	0,181	
40 x 25	1 1/2" x 1"	48,3	33,7	64	0,132	0,198	
40 x 32	1 1/2" x 1 1/4"	48,3	42,4	64	0,146	0,219	
50 x 15	2" x 1/2"	60,3	21,3	76	0,156	0,234	
50 x 20	2" x 3/4"	60,3	26,9	76	0,166	0,250	
50 x 25	2" x 1"	60,3	33,7	76	0,179	0,269	
50 x 32	2" x 1 1/4"	60,3	42,4	76	0,196	0,294	
50 x 40	2" x 1 1/2"	60,3	48,3	76	0,207	0,311	
65 x 20	2 1/2" x 3/4"	76,1	26,9	89	0,230	0,345	
65 x 25	2 1/2" x 1"	76,1	33,7	89	0,245	0,368	
65 x 32	2 1/2" x 1 1/4"	76,1	42,4	89	0,265	0,397	
65 x 40	2 1/2" x 1 1/2"	76,1	48,3	89	0,278	0,417	
65 x 50	2 1/2" x 2"	76,1	60,3	89	0,305	0,457	
80 x 25	3" x 1"	88,9	33,7	89	0,274	0,411	
80 x 32	3" x 1 1/4"	88,9	42,4	89	0,294	0,440	
80 x 40	3" x 1 1/2"	88,9	48,3	89	0,307	0,460	
80 x 50	3" x 2"	88,9	60,3	89	0,334	0,500	
80 x 65	3" x 2 1/2"	88,9	76,1	89	0,369	0,553	
100 x 25	4" x 1"	114,3	33,7	102	0,379	0,569	
100 x 32	4" x 1 1/4"	114,3	42,4	102	0,402	0,602	
100 x 40	4" x 1 1/2"	114,3	48,3	102	0,417	0,625	
100 x 50	4" x 2"	114,3	60,3	102	0,447	0,671	
100 x 65	4" x 2 1/2"	114,3	76,1	102	0,448	0,732	
100 x 80	4" x 3"	114,3	88,9	102	0,521	0,781	
125 x 40	5" x 1 1/2"	139,7	48,3	127	0,600	0,900	
125 x 50	5" x 2"	139,7	60,3	127	0,638	0,957	
125 x 65	5" x 2 1/2"	139,7	76,1	127	0,688	1,033	
125 x 80	5" x 3"	139,7	88,9	127	0,729	1,094	
125 x 100	5" x 4"	139,7	114,3	127	0,810	1,215	
150 x 50	6" x 2"	168,3	60,3	140	0,804	1,206	
150 x 65	6" x 2 1/2"	168,3	76,1	140	0,860	1,289	
150 x 80	6" x 3"	168,3	88,9	140	0,905	1,357	
150 x 100	6" x 4"	168,3	114,3	140	0,994	1,491	
150 x 125	6" x 5"	168,3	139,7	140	1,083	1,625	
200 x 65	8" x 2 1/2"	219,1	76,1	152	1,127	1,691	
200 x 80	8" x 3"	219,1	88,9	152	1,176	1,764	2,352
200 x 100	8" x 4"	219,1	114,3	152	1,273	1,910	2,546
200 x 125	8" x 5"	219,1	139,7	152	1,370	2,055	2,740
200 x 150	8" x 6"	219,1	168,3	152	1,479	2,219	2,958
250 x 80	10" x 3"	273,0	88,9	178	1,618	2,427	3,236
250 x 100	10" x 4"	273,0	114,3	178	1,732	2,598	3,464
250 x 125	10" x 5"	273,0	139,7	178	1,845	2,768	3,691



Reducciones concéntricas y excéntricas

Accesorios de acero inoxidable para soldar



Diámetro nominal		D mm	D ₁ mm	L mm	Peso T=2 Kg	Peso T=3 Kg	Peso T=4 Kg
DN	Pulg.						
250 x 150	10" x 6"	273,0	168,3	178	1,973	2,960	3,946
250 x 200	10" x 8"	273,0	219,1	178	2,200	3,301	4,401
300 x 100	12" x 4"	323,9	114,3	203	2,235	3,352	4,469
300 x 125	12" x 5"	323,9	139,7	203	2,364	3,546	4,728
300 x 150	12" x 6"	323,9	168,3	203	2,510	3,765	5,020
300 x 200	12" x 8"	323,9	219,1	203	2,769	4,153	5,538
300 x 250	12" x 10"	323,9	273,0	203	3,044	4,566	6,088
350 x 125	14" x 5"	355,6	139,7	330	4,106	6,159	8,212
350 x 150	14" x 6"	355,6	168,3	330	4,343	6,514	8,686
350 x 200	14" x 8"	355,6	219,1	330	4,764	7,146	9,528
350 x 250	14" x 10"	355,6	273,0	330	5,211	7,816	10,422
350 x 300	14" x 12"	355,6	323,9	330	5,633	8,449	11,266
400 x 150	16" x 6"	406,4	168,3	356	5,139	7,709	10,279
400 x 200	16" x 8"	406,4	219,1	356	5,594	8,391	11,187
400 x 250	16" x 10"	406,4	273,0	356	6,076	9,114	12,151
400 x 300	16" x 12"	406,4	323,9	356	6,531	9,796	13,062
400 x 350	16" x 14"	406,4	355,6	356	6,814	10,222	13,629
450 x 200	18" x 8"	457,2	219,1	381		9,709	12,945
450 x 250	18" x 10"	457,2	273,0	381		10,483	13,977
450 x 300	18" x 12"	457,2	323,9	381		11,214	14,951
450 x 350	18" x 14"	457,2	355,6	381		11,669	15,558
450 x 400	18" x 16"	457,2	406,4	381		12,398	16,531
500 x 250	20" x 10"	508,0	273,0	508		14,947	19,933
500 x 300	20" x 12"	508,0	323,9	508		15,924	21,232
500 x 350	20" x 14"	508,0	355,6	508		16,531	22,041
500 x 400	20" x 16"	508,0	406,4	508		17,503	23,337
500 x 450	20" x 18"	508,0	457,2	508		18,475	24,634
600 x 300	24" x 12"	609,6	323,9	508		17,869	23,825
600 x 350	24" x 14"	609,6	355,6	508		18,475	24,634
600 x 400	24" x 16"	609,6	406,4	508		19,448	25,930
600 x 450	24" x 18"	609,6	457,2	508		20,420	27,227
600 x 500	24" x 20"	609,6	508,0	508		21,392	28,523
700 x 350	28" x 14"	711,2	355,6	610		24,520	32,694
700 x 400	28" x 16"	711,2	406,4	610		25,688	34,250
700 x 450	28" x 18"	711,2	457,2	610		26,855	35,807
700 x 500	28" x 20"	711,2	508,0	610		28,023	37,364
700 x 600	28" x 24"	711,2	609,6	610		30,358	40,478

Calidad del material: AISI-304 / 304 L, 316 / 316 L, duplex.

Composición química: Ver página 8.

Características mecánicas: Ver página 9.

Bajo consulta se pueden fabricar en otros diámetros y espesores.

Tolerancias: Ver página 34.

Norma de fabricación: EN 10253-3/EN 10253-4.



Tolerancias para tubos soldados ISO y milimétricos

Diámetro y espesor

Norma	Diámetro exterior	TOLERANCIA		
		Diámetro exterior	Espesor	
(OPCIONAL) {	EN-10217-7 EN-10296-2	≤ 168,3 mm > 168,3 mm	± 0,75% (D3) mínimo ± 0,3 mm ± 1% (D2)	± 10% (T3) mínimo ± 0,2 mm
	EN-10217-7	≤ 168,3 mm	± 0,5% (D4) ± 0,1 mm (el mayor)	
	EN-10296-2	≤ 114,3 mm	± 0,5% (D4) ± 0,15 mm (el mayor)	

Longitudes estandar

EN-10217-7 Aleatoria - Si se requiere exacta $L \leq 6000\text{mm} \left\{ \begin{matrix} +5 \\ 0 \end{matrix} \right.$

EN-10296-2 $L = 6000\text{mm} \left\{ \begin{matrix} +100 \\ 0 \end{matrix} \right.$

Otras longitudes bajo pedido especial

Flecha

EN-10217-7 < 3 mm/m ó 0,0015 L

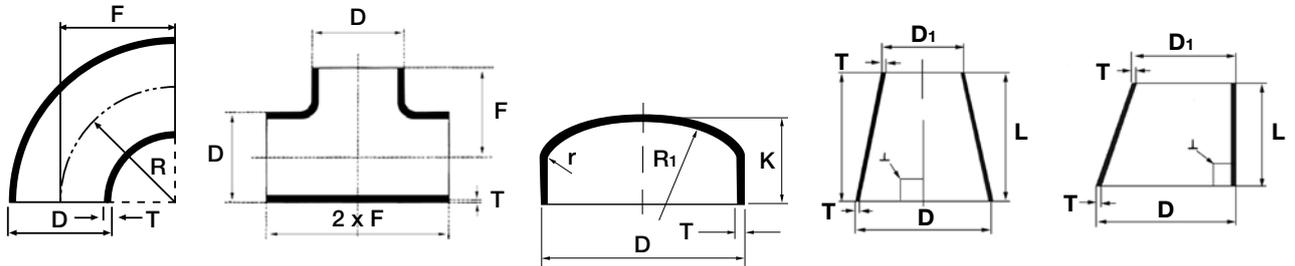
EN-10296-2 Diámetro < 33,7 mm - acuerdo
Diámetro > 33,7 mm - 0,002 L
Opcional: < 0,0015 L

Altura del cordón de soldadura

Norma	Proceso de fabricación	Tolerancia de la soldadura externa (mm)
EN-10217-7 En función del proceso de fabricación	<ul style="list-style-type: none"> • Según sale de soldadura → 0,10T + 0,5 • Rectificado $\varnothing < 114,3$ mm → 0,06T + 0,3 • Rectificado $\varnothing > 114,3$ mm → 0,05T + 0,5 • Soldadura laminada → 0,15 mm 	} $T \leq 8$ mm
	Opcional: el tratamiento de la soldadura interna	
EN-10296-2 En función de los acabados (A), (B) o (C)	(A) Sin eliminar soldaduras interna y externa →	$T \leq 8$ mm: 0,20T + 0,5 mm $T > 8$ mm: T / 3 mm
	(B) Eliminando la externa y sin eliminar la interna →	$\varnothing \leq 114,3$ mm: 0,06T + 0,3 } $T \leq 8$ mm $\varnothing > 114,3$ mm: 0,05T + 0,5 } $T > 8$ mm $\varnothing > 114,3$ mm: T / 6 } $T > 8$ mm
	(C) Laminada interna y externa →	0,15 mm (T ≤ 8 mm)



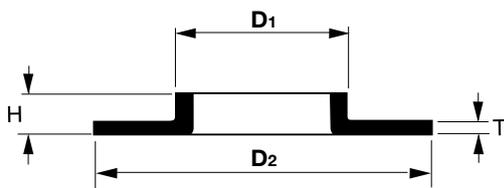
Tolerancias para accesorios de acero inoxidable gama ISO y milimétricos



S/EN 10253-3/4

Diámetro D	Espesor T	Desviación permisible	
		Menos	Más
$D \leq 610$	Todos	-12,5%	+15%
$D > 610$	≤ 10 mm	- 0,35 mm	+15%
	> 10 mm	- 0,50 mm	+15%

D	F-H-L	B	K
$\leq 114,3$	± 2	± 7	± 4
$114,3 \leq D \leq 219,1$	± 2	± 7	± 7
$219,1 \leq D \leq 406,4$	± 5	± 7	± 7
$406,4 \leq D \leq 762$	± 5	± 10	± 7
$762 \leq D \leq 1219$	± 10	± 10	± 10



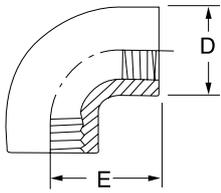
S/EN 1092-1 Tipo 33

Dimensiones (mm)	Tolerancias
Espesor T en el cuello:	
$DN \leq 600$	-12,5% / +15%
$DN > 600$	-0,5 mm / +15%
Espesor en la brida:	
$T \leq 5$ mm	+/- 0,2 mm
Altura H:	
Desde $DN \leq 80$	$\pm 1,5$ mm
Desde $DN > 80$ hasta $DN \leq 250$	± 2 mm
Desde $DN > 250$	± 3 mm
Diámetro en el cuello D_1 :	
$DN \leq 150$	$\pm 0,75\%$ mín. $\pm 0,3$ mm
$DN > 150$	$\pm 1\%$ máx. $\pm 3,0$ mm
Diámetro en la brida D:	
$DN \leq 250$	-1 / +2 mm
$DN > 250$	-1 / +3 mm

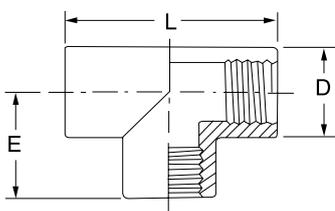


Accesorio roscado de acero inoxidable

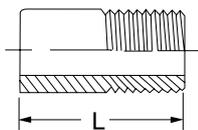
Medidas de fabricación



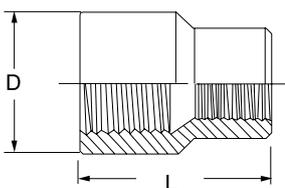
Codo roscado figura 90												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
D	-	19	23	27	33	41	50	56	69	84	98	-
E	-	21	25	28	33	38	45	50	58	70	80	-



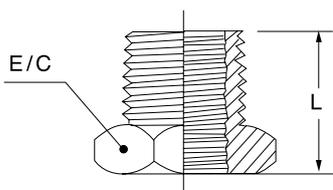
Te roscada figura 130												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	42	50	56	66	76	90	100	116	140	160	-
D	-	19	23	27	33	41	50	56	69	84	98	-
E	-	21	25	28	33	38	45	50	58	70	80	-



Entronque figura 149												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	20	24	25	26	29	32	35	38	42	46	50	55



Reduccion hembra - hembra figura 240												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	24	26	28	30	34	42	45	55	60	70	-
D	-	20	22	28	32	40	50	60	70	85	100	-



Reduccion macho - hembra figura 241												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	15	15	18	20	23	25	30	32	35	38	-
E/C	-	14	17	22	27	36	44	50	65	80	93	-

TOLERANCIAS:

Roscas según ISO 7/1 (EN 10226-1)

Calidad del material: AISI 316 L

Composición química: Ver página 8.

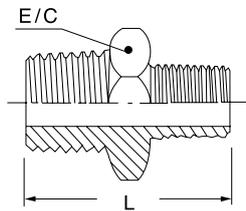
Características mecánicas: Ver página 9.

Bajo consulta se pueden fabricar otras figuras o calidades.

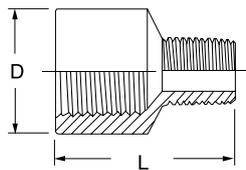


Accesorio roscado de acero inoxidable

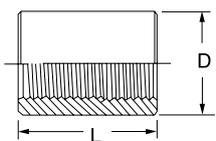
Medidas de fabricación



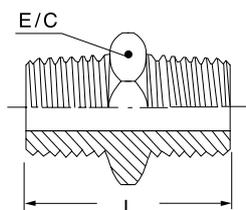
Reduccion macho - macho figura 245												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	25	26	29	33	38	40	45	50	60	62	-
E/C	-	14	17	22	27	36	44	50	65	80	95	-



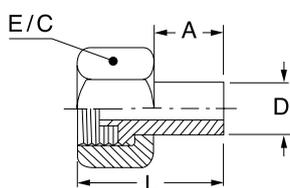
Reduccion hembra - macho figura 246												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	24	26	28	34	35	41	45	55	60	60	-
D	-	20	22	28	32	40	50	60	70	85	100	-



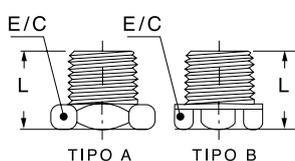
Manguito rosca interior figura 270												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	20	23	24	27	29	32	35	38	42	45	50	55
D	14	18	22	28	35	40	50	55	70	85	100	125



Machon figura 280												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	20	26	28	30	33	38	40	45	50	60	62	72
E/C	11	14	17	22	27	36	44	50	65	80	95	121



Medio enlace figura 287												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	23	26	36	36	41	47	49	55	57	70	-
D	-	8	12	15	20	25	35	41	52	65	77	-
A	-	11	12	20	20	21	25	27	32	33	45	-
E/C	-	17	22	27	32	41	46	55	68	90	100	-



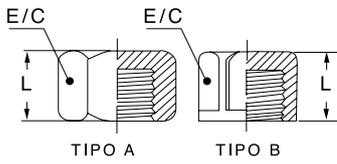
Tapon figura 290												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
	TIPO A										TIPO B	
L	12	15	17	18	21	26	28	30	32	34	38	40
E/C	11	14	17	22	27	36	46	50	65	80	94	116

Roscas según ISO 7/1 (EN 10226-1)

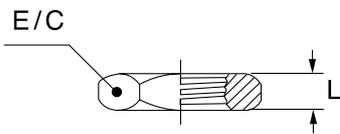


Accesorio roscado de acero inoxidable

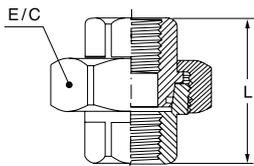
Medidas de fabricación



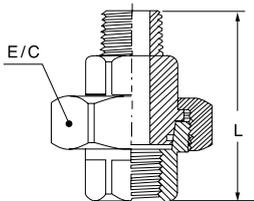
Tapa figura 300												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
	TIPO A								TIPO B			
L	12	12	13	14	16	20	21	22	24	24	25	30
E/C	14	17	22	27	32	41	50	55	68	90	100	127



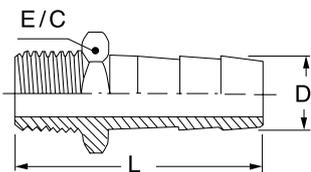
Tuerca figura 312												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	5	6	7	8	8	10	10	10	13	13	-
E/C	-	17	22	27	32	41	50	65	73	90	100	-



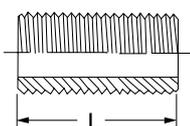
Enlace rosca hembra - hembra figura 340												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	33	37	41	44	49	56	57	62	62	66	-
E/C	-	32	36	41	46	54	67	73	90	106	120	-



Enlace rosca macho - hembra figura 341												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	45	49	53	58	62	73	76	83	87	87	-
E/C	-	32	36	41	46	54	66	73	90	106	120	-



Entronque manguera figura 399												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	38,5	42	47	50	56	65	72	85	97	107	-
D	-	12	15	19	25	30	40	50	60	76	86	-
E/C	-	14	17	22	27	36	46	54	65	85	99	-
399 R		10	12	15	20	25						



Manguito rosca exterior figura 531												
	1/8"	1/4"	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"
L	-	24	25	26	29	32	35	38	42	46	50	55



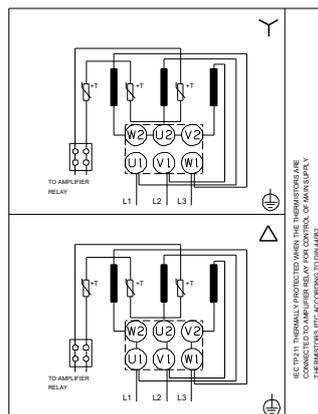
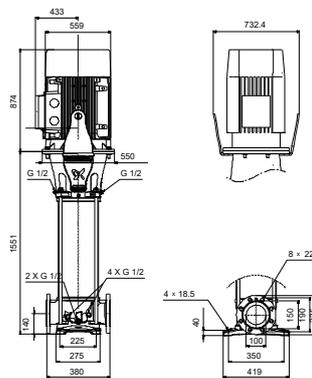
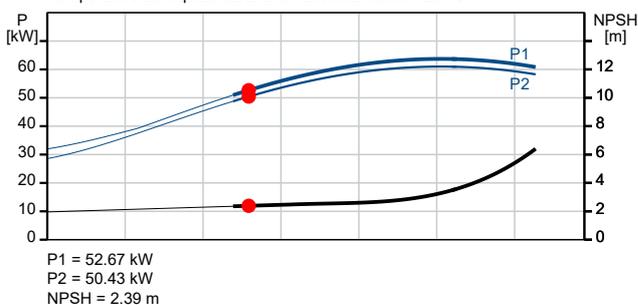
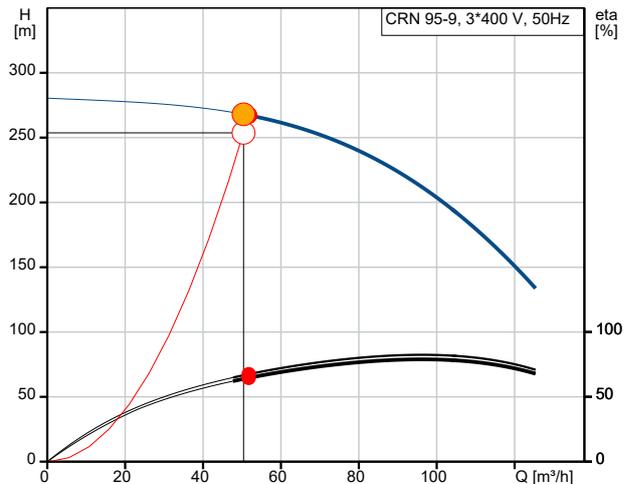
Contar	Descripción
--------	-------------

1	<p>CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE</p>  <p style="text-align: center;">Advierta! la foto puede diferir del actual producto</p> <p>Código: 92905833</p> <p>Bomba centrífuga multietapa para instalación vertical con puertos de aspiración y de descarga al mismo nivel (en línea). Las piezas de la bomba destinadas al contacto con el líquido son de acero inoxidable de alta calidad. El dispositivo regulador del empuje incorporado absorbe las fuerzas axiales hidráulicas, lo que permite el uso de un motor estándar.</p> <p>El cierre mecánico de cartucho de Grundfos garantiza la máxima fiabilidad, permite llevar a cabo la manipulación de forma segura y facilita el acceso y el mantenimiento. Las piezas fungibles del cierre mecánico se encuentran disponibles como kits de mantenimiento y pueden sustituirse sin necesidad de renovar todo el cierre. La transmisión de potencia tiene lugar por medio de un acoplamiento dividido. La conexión de las tuberías se lleva a cabo por medio de bridas DIN.</p> <p>La bomba está equipada con un motor asíncrono de 3 fases, refrigerado por ventilador y montado sobre soportes.</p> <p>Líquido:</p> <p>Líquido bombeado: Etanol</p> <p>Rango de temperatura del líquido: -20 .. 120 °C</p> <p>Concentración: 50 %</p> <p>Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 25 °C</p> <p>Densidad: 903.9 kg/m³</p> <p>Viscosidad cinemática: 0.43 mm²/s</p> <p>Técnico:</p> <p>Velocidad predeterminada: 2978 rpm</p> <p>Caudal real calculado: 51.73 m³/h</p> <p>Altura resultante de la bomba: 267.2 m</p> <p>Orientación de bomba: Vertical</p> <p>Disp. de cierre: Single</p> <p>Código del cierre: HQQE</p> <p>Homologaciones: CE, UKCA, SEPRO</p> <p>Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B</p> <p>Materiales:</p> <p>Base: Stainless steel EN 1.4408 ASTM A351 CF8M</p> <p>Impulsor: Acero inoxidable EN 1.4401 AISI 316</p> <p>Rodamiento: WC/WC</p> <p>Rodamiento de soporte: Graflon</p> <p>Dispositivo de gestión de empuje: SiC/WC</p> <p>Material certificado conforme a: European standards</p> <p>Instalación:</p> <p>Temperatura ambiente máxima: 55 °C</p> <p>Presión de trabajo máxima: 40 bar</p>
---	--



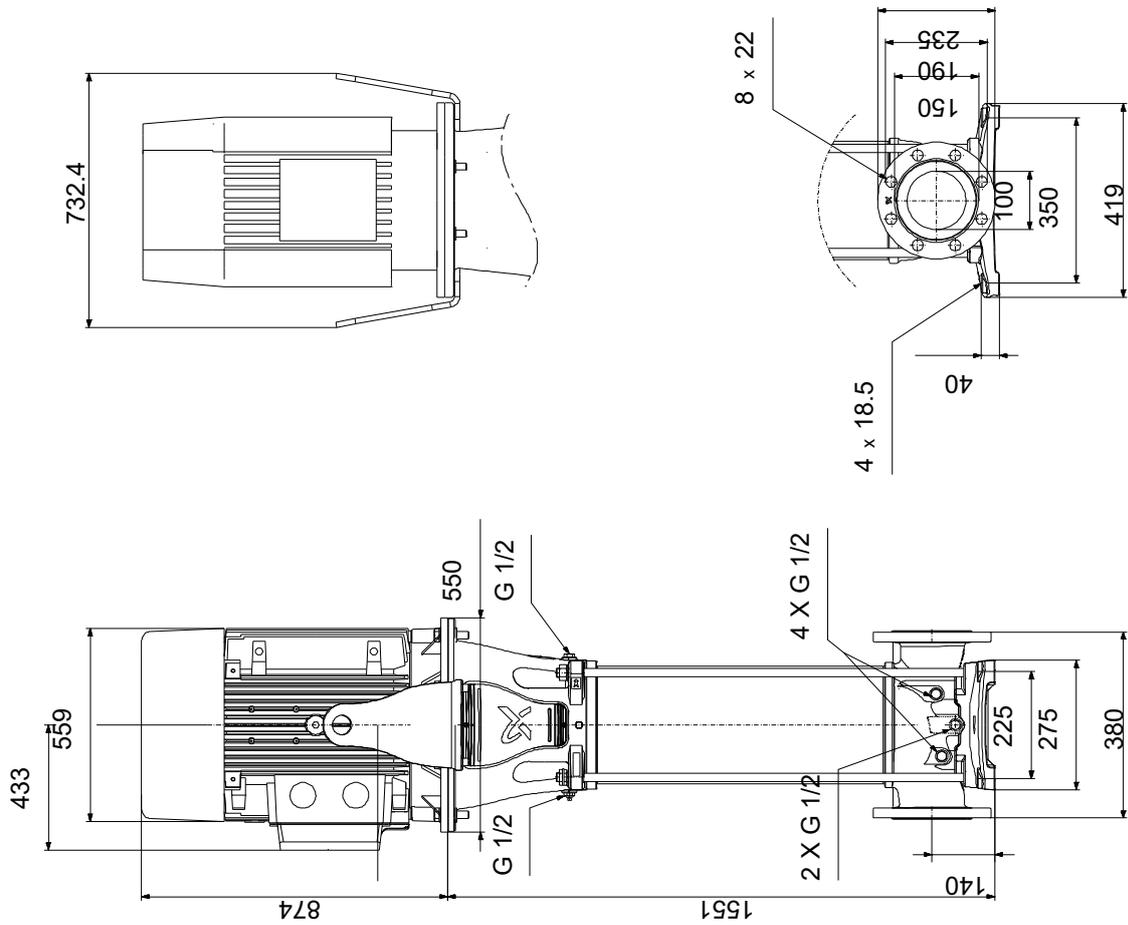
Contar	Descripción
1	<p>Presión máxima a la temp. declarada: 30 bar / 120 °C 40 bar / 80 °C</p> <p>Tipo de conexión: DIN Tamaño de la conexión de entrada: DN 100 Tamaño de la conexión de salida: DN 100 Presión nominal para la conexión: PN 25/40 Tamaño de la brida del motor: FF500</p> <p>Datos eléctricos: Normativa de motor: IEC Tipo de motor: SIEMENS Potencia nominal - P2: 75 kW Potencia (P2) requerida por la bomba: 75 kW Frecuencia de red: 50 Hz Tensión nominal: 3 x 380-420D/660-725Y V Intensidad nominal: 126/73 A Intensidad de arranque: 850 % Cos phi - factor de potencia: 0.9 Velocidad nominal: 2978 rpm Eficiencia: IE4 95,6% Clase eficiencia IE: IE4 Eficiencia del motor a carga total: 95.6 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 95.8 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 95.6 % Número de polos: 2 Método de arranque: VFD or Soft starter Grado de protección (IEC 34-5): IP55 Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 92898766</p> <p>Paneles control: Frequency converter: NONE</p> <p>Otros: Posición de caja de conexiones: 6 Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.70 Peso neto: 751 kg Peso bruto: 933 kg Volumen de transporte: 2.91 m³ Dispositivo de gestión de empuje: Y País de origen.: DK Tarifa personalizada n.º: 84137075</p>

Descripción	Valor
Información general:	
Producto::	CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE
Código::	92905833
Número EAN::	5715121358750
Precio:	EUR 70686
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	2978 rpm
Caudal real calculado:	51.73 m³/h
Altura resultante de la bomba:	267.2 m
Altura máxima:	280.1 m
Etapas:	9
Impulsores:	9
Número de impulsores de diámetro reducido:	0
NPSH baja:	N
Orientación de bomba:	Vertical
Disp. de cierre:	Single
Código del cierre:	HQQE
Homologaciones:	CE, UKCA, SEPRO
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
Versión de la bomba:	A
Modelo:	A
Enfriamiento:	IC 411
Materiales:	
Base:	Stainless steel
Base:	EN 1.4408
Base:	ASTM A351 CF8M
Impulsor:	Acero inoxidable
Impulsor:	EN 1.4401
Impulsor:	AISI 316
Código de material:	A
Código para caucho:	E
Rodamiento:	WC/WC
Rodamiento de soporte:	Graflon
Dispositivo de gestión de empuje:	SiC/WC
Material certificado conforme a:	European standards
Instalación:	
Temperatura ambiente máxima:	55 °C
Presión de trabajo máxima:	40 bar
Presión máxima a la temp. declarada:	30 bar / 120 °C
Presión máxima a la temp. declarada:	40 bar / 80 °C
Tipo de conexión:	DIN
Tamaño de la conexión de entrada:	DN 100
Tamaño de la conexión de salida:	DN 100
Presión nominal para la conexión:	PN 25/40
Tamaño de la brida del motor:	FF500
Código de conexión:	F
Líquido:	
Líquido bombeado:	Etanol
Rango de temperatura del líquido:	-20 .. 120 °C
Concentración:	50 %
Temperatura del líquido durante el funcionamiento:	25 °C
Densidad:	903.9 kg/m³
Viscosidad cinemática:	0.43 mm²/s
Datos eléctricos:	
Normativa de motor:	IEC
Tipo de motor:	SIEMENS



Descripción	Valor
Potencia nominal - P2:	75 kW
Potencia (P2) requerida por la bomba:	75 kW
Frecuencia de red:	50 Hz
Tensión nominal:	3 x 380-420D/660-725Y V
Intensidad nominal:	126/73 A
Intensidad de arranque:	850 %
Cos phi - factor de potencia:	0.9
Velocidad nominal:	2978 rpm
Eficiencia:	IE4 95,6%
Clase eficiencia IE:	IE4
Eficiencia del motor a carga total:	95.6 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	95.8 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	95.6 %
Número de polos:	2
Método de arranque:	VFD or Soft starter
Grado de protección (IEC 34-5):	IP55
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	PTC
Motor N.º:	92898766
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Otros:	
Posición de caja de conexiones:	6
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	751 kg
Peso bruto:	933 kg
Volumen de transporte:	2.91 m ³
Dispositivo de gestión de empuje:	Y
País de origen.:	DK
Tarifa personalizada n.º:	84137075

92905833 CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE 50 Hz

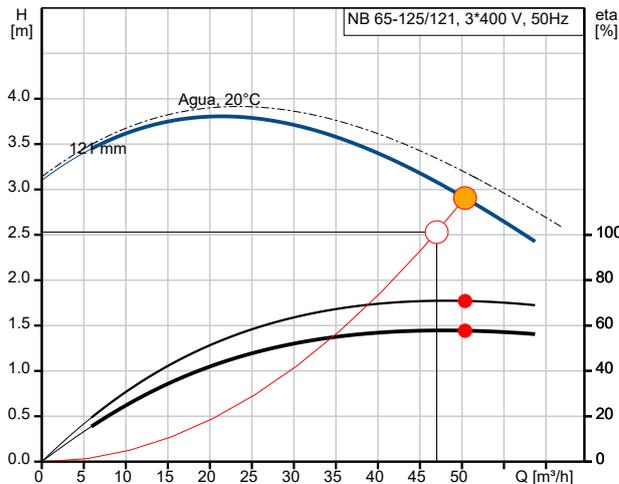


Nota: todas las unidades están en [mm] a menos que se indiquen otras. Exención de responsabilidad: este esquema dimensional simplificado no muestra todos los detalles.

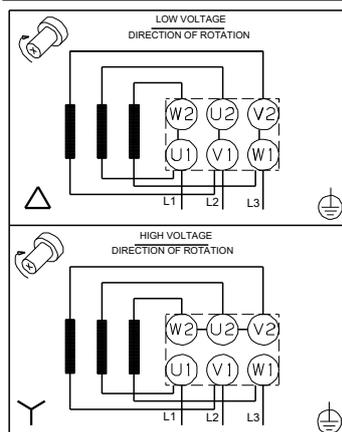
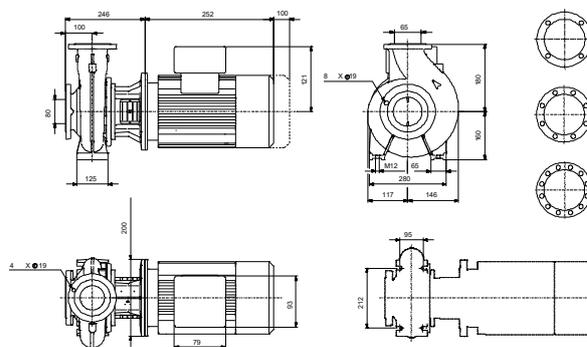
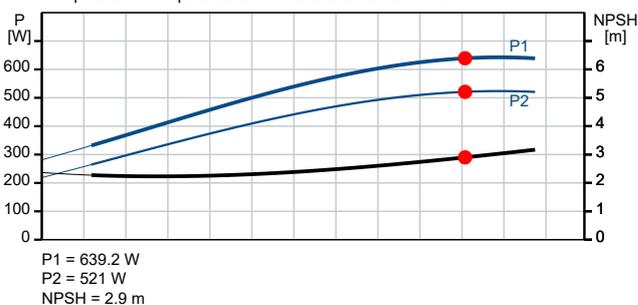
Contar	Descripción
1	<p>NB 65-125/121 AAF2AESBQQEEW3</p>  <p>Código: 97931701</p> <p>Bomba centrífuga de voluta, no autocebante y de una etapa, diseñada de acuerdo con la norma ISO 5199, con dimensiones y rendimiento nominal de acuerdo con la norma EN 733 (10 bar). Las bridas son de PN 16 y sus dimensiones satisfacen los requisitos establecidos por la norma EN 1092-2.</p> <p>La bomba posee un puerto de aspiración axial, un puerto de descarga radial, eje horizontal y un diseño que facilita la extracción del motor, el soporte del motor, la cubierta y el impulsor sin necesidad de desmontar la carcasa de la bomba ni las tuberías.</p> <p>El cierre de fuelle de caucho no equilibrado satisface los requisitos establecidos por la norma DIN EN 12756. La bomba está acoplada directamente a un motor asíncrono refrigerado por ventilador.</p> <p>Paneles control:</p> <p>Frequency converter: NONE</p> <p>Sensor de presión: N</p> <p>Líquido:</p> <p>Líquido bombeado: Etanol</p> <p>Rango de temperatura del líquido: -25 .. 120 °C</p> <p>Concentración: 50.0 %</p> <p>Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 0 °C</p> <p>Densidad: 925.8 kg/m³</p> <p>Viscosidad cinemática: 6.9 mm²/s</p> <p>Técnico:</p> <p>Velocidad predeterminada: 1440 rpm</p> <p>Caudal real calculado: 50.37 m³/h</p> <p>Altura resultante de la bomba: 2.906 m</p> <p>Diámetro real del impulsor: 121 mm</p> <p>Diámetro nominal del impulsor: 125</p> <p>Disp. de cierre: Single</p> <p>Código del cierre: BQQE</p> <p>Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B2</p> <p>Diseño rodamiento: Standard</p> <p>Materiales:</p> <p>Cuerpo hidráulico: Fundición</p> <p>Carcasa de la bomba: EN-GJL-250 ASTM class 35</p> <p>Mat. de anillo de desgaste: Latón</p> <p>Impulsor: Fundición EN-GJL-200 ASTM class 30</p> <p>Internal pump house coating: CED</p> <p>Eje: Stainless steel EN 1.4301 AISI 304</p> <p>Instalación:</p> <p>Temperatura ambiente máxima: 55 °C</p>

Contar	Descripción
1	<p> Presión de trabajo máxima: 16 bar Normativa de conexión de tubería: EN 1092-2 Tamaño de la conexión de entrada: DN 80 Tamaño de la conexión de salida: DN 65 Presión nominal para la conexión: PN 16 Lubricación de rodamiento: Grease Carcasa de bomba con pie: Yes Sí = Con bloque de soporte, No = Sin bloque de soporte: N </p> <p> Datos eléctricos: Tipo de motor: SIEMENS Potencia nominal - P2: 0.55 kW Frecuencia de red: 50 Hz Tensión nominal: 3 x 220-240D/380-420Y V Intensidad nominal: 2.2/1.26 A Intensidad de arranque: 590-590 % Cos phi - factor de potencia: 0.78 Velocidad nominal: 1440 rpm Eficiencia: IE3 80,8% Clase eficiencia IE: IE3 Eficiencia del motor a carga total: 80.8-80.8 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 81.1-81.1 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 79.3-79.3 % Número de polos: 4 Grado de protección (IEC 34-5): IP55 Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 99900485 Bearing insulation type N-end: N </p> <p> Otros: Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.70 Peso neto: 43 kg Peso bruto: 53 kg Volumen de transporte: 0.134 m³ VVS danés n.º: 386063127 País de origen.: HU Tarifa personalizada n.º: 84137051 </p>

Descripción	Valor
Información general:	
Producto::	NB 65-125/121 AAF2AESBQQEEW3
Código::	97931701
Número EAN::	5710626632749
Precio:	EUR 2455
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	1440 rpm
Caudal real calculado:	50.37 m³/h
Altura resultante de la bomba:	2.906 m
Diámetro real del impulsor:	121 mm
Diámetro nominal del impulsor:	125
Disp. de cierre:	Single
Diámetro del eje:	24 mm
Código del cierre:	BQQE
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B2
Versión de la bomba:	A
Diseño rodamiento:	Standard
Materiales:	
Cuerpo hidráulico:	Fundición
Carcasa de la bomba:	EN-GJL-250
Carcasa de la bomba:	ASTM class 35
Mat. de anillo de desgaste:	Latón
Impulsor:	Fundición
Impulsor:	EN-GJL-200
Impulsor:	ASTM class 30
Internal pump house coating:	CED
Código de material:	A
Código para caucho:	E
Eje:	Stainless steel
Eje:	EN 1.4301
Eje:	AISI 304
Instalación:	
Temperatura ambiente máxima:	55 °C
Presión de trabajo máxima:	16 bar
Normativa de conexión de tubería:	EN 1092-2
Tamaño de la conexión de entrada:	DN 80
Tamaño de la conexión de salida:	DN 65
Presión nominal para la conexión:	PN 16
Lubricación de rodamiento:	Grease
Carcasa de bomba con pie:	Yes
Sí = Con bloque de soporte, No = Sin bloque de soporte:	N
Código de conexión:	F2
Líquido:	
Líquido bombeado:	Etanol
Rango de temperatura del líquido:	-25 .. 120 °C
Concentración:	50.0 %
Temperatura del líquido durante el funcionamiento:	0 °C
Densidad:	925.8 kg/m³
Viscosidad cinemática:	6.9 mm²/s
Datos eléctricos:	
Tipo de motor:	SIEMENS
Potencia nominal - P2:	0.55 kW
Frecuencia de red:	50 Hz
Tensión nominal:	3 x 220-240D/380-420Y V
Intensidad nominal:	2.2/1.26 A
Intensidad de arranque:	590-590 %

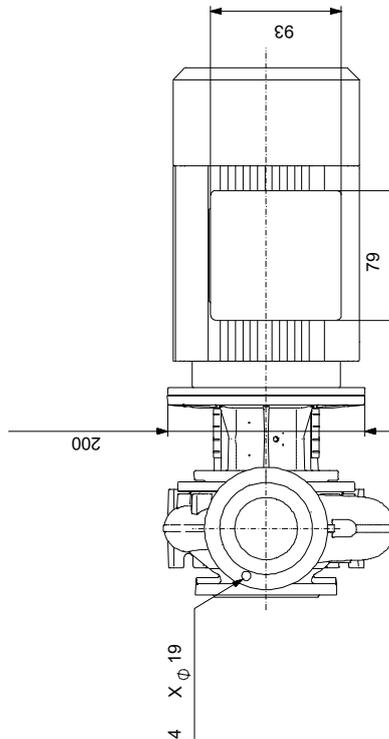
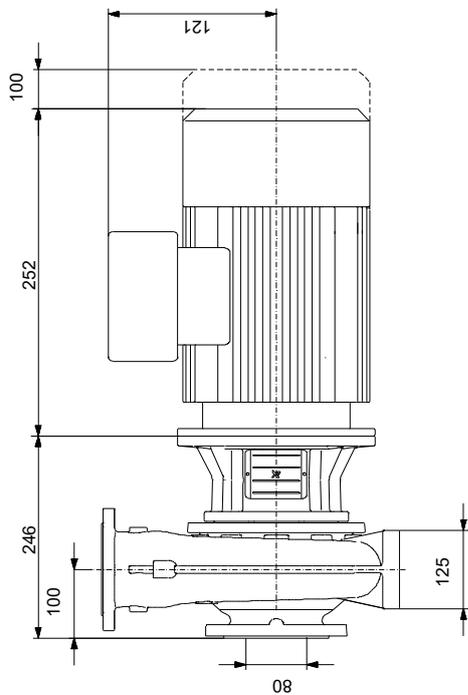
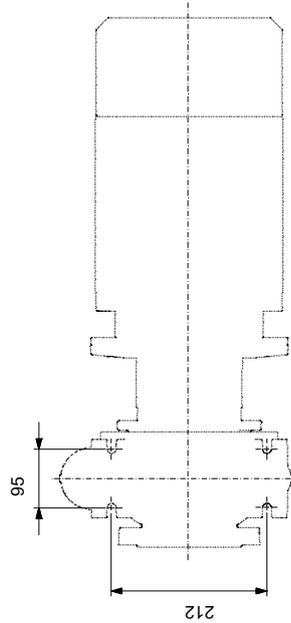
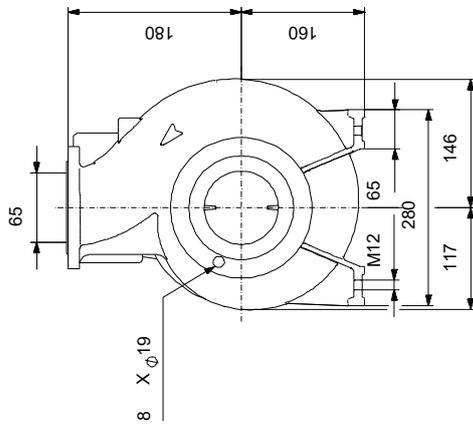
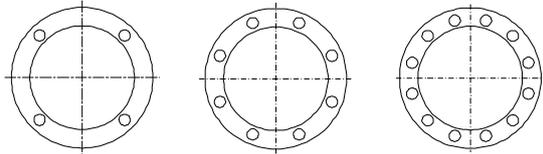


Q = 50.37 m³/h
H = 2.906 m
Líquido bombeado = Etanol Concentración = 50 %
Viscosidad = 6.9 mm²/s Densidad = 925.8 kg/m³
Bomba eta = 70.8 % Bomb+motor Eta = 57.7 %
Temperatura del líquido durante el funcionamiento = 0 °C



Descripción	Valor
Cos phi - factor de potencia:	0.78
Velocidad nominal:	1440 rpm
Eficiencia:	IE3 80,8%
Clase eficiencia IE:	IE3
Eficiencia del motor a carga total:	80.8-80.8 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	81.1-81.1 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	79.3-79.3 %
Número de polos:	4
Grado de protección (IEC 34-5):	IP55
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	NINGUNA
Motor N.º:	99900485
Diseño del montaje según norma CEI 34-7:	IM V1
Bearing insulation type N-end:	N
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Sensor de presión:	N
Otros:	
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	43 kg
Peso bruto:	53 kg
Volumen de transporte:	0.134 m³
VVS danés n.º:	386063127
País de origen.:	HU
Tarifa personalizada n.º:	84137051

97931701 NB 65-125/121 AAF2AESBQQEEW3 50 Hz



Nota: todas las unidades están en [mm] a menos que se indiquen otras. Exención de responsabilidad: este esquema dimensional simplificado no muestra todos los detalles.

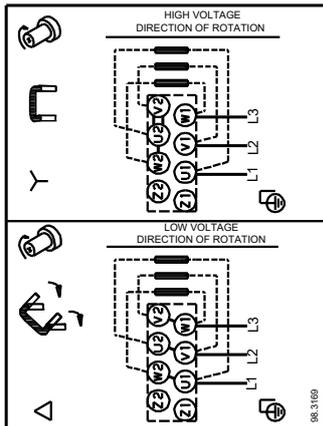
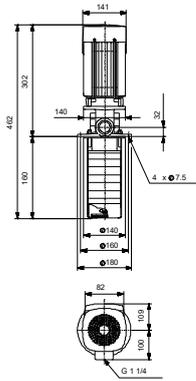
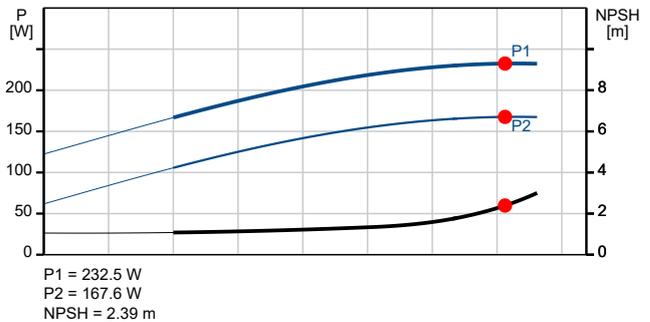
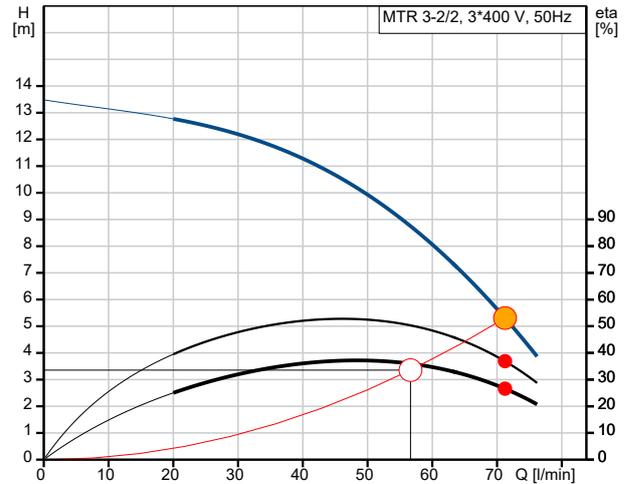
Contar	Descripción
--------	-------------

1	<p>MTR 3-2/2 A-W-A-HUUV</p>  <p>Código: 96514893</p> <p>Bomba centrífuga multietapa, sumergible y autocebante para instalación vertical en tanques, etc. El cabezal de la bomba y la base están fabricados en fundición; todas las demás piezas destinadas al contacto con el líquido están fabricadas en acero inoxidable. La bomba posee las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longitud de la instalación según DIN 5440. • El cierre mecánico cumple la norma EN 12756. • La transmisión de potencia tiene lugar por medio de un acoplamiento dividido de fundición. <p>Un cierre mecánico de cartucho garantiza la máxima fiabilidad, permite llevar a cabo la manipulación de forma segura y facilita el acceso y el mantenimiento. La bomba está equipada con un motor asíncrono de 3 fases, refrigerado por ventilador y montado sobre soportes.</p> <p>Profundidad de inmersión: 160 mm</p> <p>Paneles control: Frequency converter: NONE</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Emulsión Rango de temperatura del líquido: -10 .. 90 °C Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 20 °C Densidad: 1000 kg/m³</p> <p>Técnico: Velocidad predeterminada: 2873 rpm Caudal real calculado: 71.2 l/min Altura resultante de la bomba: 5.307 m Cámaras: 2 Drenaje de vuelta al depósito: N Orientación de bomba: Vertical Código del cierre: HUUV Homologaciones: CE,EAC,UKCA,RCM, Approvals for motor: CE,EAC,UKCA,SEPRO,RCMMorocco Energy approvals for motor: CE,Singapore Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B</p> <p>Materiales: Cabezal de la bomba: Fundición EN 1561 EN-GJL-200 ASTM A48-25B Impulsor: Acero inoxidable EN 1.4301 AISI 304</p> <p>Instalación: Temperatura ambiente máxima: 60 °C Presión de trabajo máxima: 25 bar Presión máxima a la temp. declarada: 25 bar / 90 °C Tipo de conexión: G internal thread Tamaño de la conexión de salida: 1 1/4 inch</p>
---	---



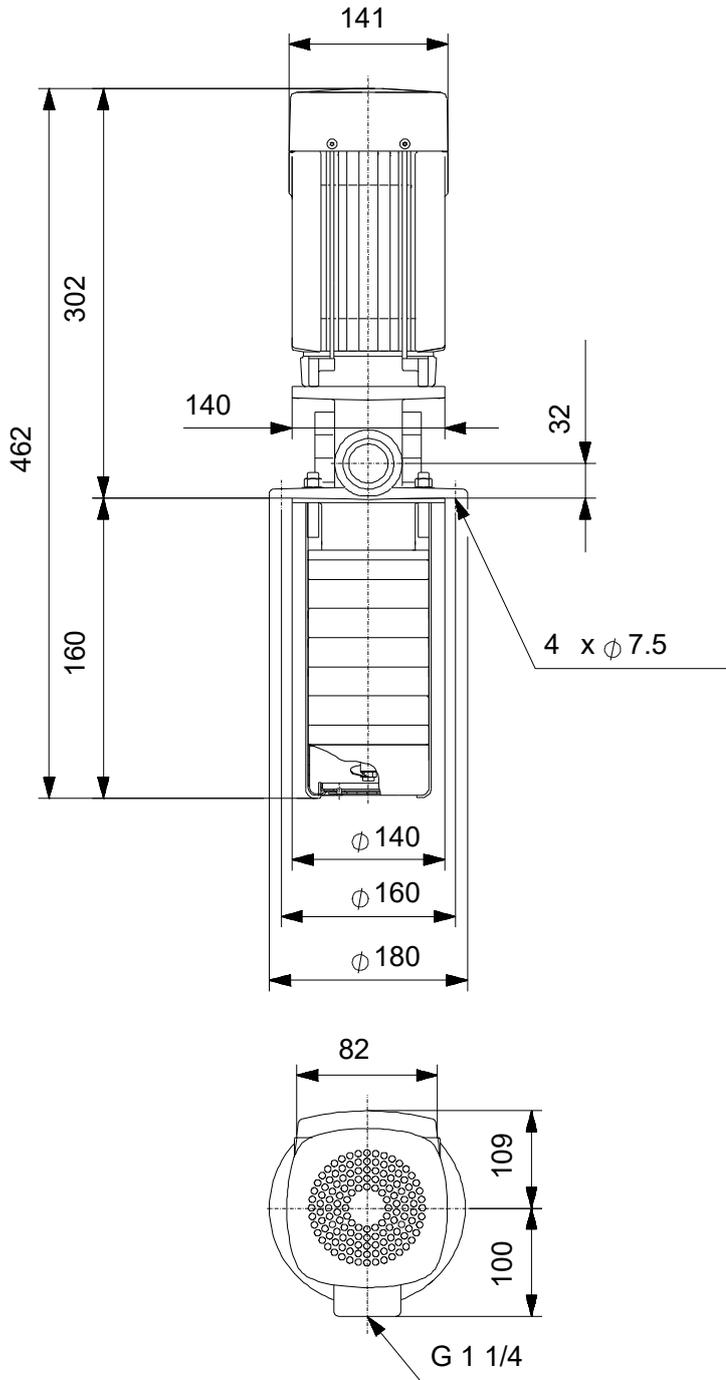
Contar	Descripción
1	<p>Profundidad de inmersión: 160 mm Tamaño de la brida del motor: FT85</p> <p>Datos eléctricos: Normativa de motor: IEC Tipo de motor: 71A Potencia nominal - P2: 0.37 kW Frecuencia de red: 50 Hz Adecuado para 50/60 Hz: N Tensión nominal: 3 x 220-240D/380-415Y V Intensidad nominal: 1.74/1.00 A Intensidad de arranque: 490-530 % Cos phi - factor de potencia: 0.80-0.70 Velocidad nominal: 2850-2880 rpm Clase eficiencia IE: IE3 Eficiencia del motor a carga total: 73.8-73.8 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 79.0-76.5 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 75.5-71.5 % Número de polos: 2 Grado de protección (IEC 34-5): 55 Dust/Jetting Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 85805102</p> <p>Otros: Posición de caja de conexiones: 6 Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.70 Peso neto: 12.9 kg Peso bruto: 16 kg Volumen de transporte: 0.045 m³ VVS danés n.º: 386963002 País de origen.: HU Tarifa personalizada n.º: 84137075</p>

Descripción	Valor
Información general:	
Producto::	MTR 3-2/2 A-W-A-HUUV
Código::	96514893
Número EAN::	5700396714998
Precio:	EUR 1862
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	2873 rpm
Caudal real calculado:	71.2 l/min
Altura resultante de la bomba:	5.307 m
Cámaras:	2
Impulsores:	2
Número de impulsores de diámetro reducido:	0
Drenaje de vuelta al depósito:	N
Orientación de bomba:	Vertical
Código del cierre:	HUUV
Homologaciones:	CE,EAC,UKCA,RCM,
Approvals for motor:	CE,EAC,UKCA,SEPRO,RCM Morocco
Energy approvals for motor:	CE,Singapore
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
Versión de la bomba:	A
Modelo:	A
Materiales:	
Cabezal de la bomba:	Fundición
Cabezal de la bomba:	EN 1561 EN-GJL-200
Cabezal de la bomba:	ASTM A48-25B
Impulsor:	Acero inoxidable
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI 304
Código de material:	A
Instalación:	
Temperatura ambiente máxima:	60 °C
Presión de trabajo máxima:	25 bar
Presión máxima a la temp. declarada:	25 bar / 90 °C
Tipo de conexión:	G internal thread
Tamaño de la conexión de salida:	1 1/4 inch
Profundidad de inmersión:	160 mm
Tamaño de la brida del motor:	FT85
Código de conexión:	W
Líquido:	
Líquido bombeado:	Emulsión
Rango de temperatura del líquido:	-10 .. 90 °C
Temperatura del líquido durante el funcionamiento:	20 °C
Densidad:	1000 kg/m ³
Datos eléctricos:	
Normativa de motor:	IEC
Tipo de motor:	71A
Potencia nominal - P2:	0.37 kW
Frecuencia de red:	50 Hz
Adecuado para 50/60 Hz:	N
Tensión nominal:	3 x 220-240D/380-415Y V
Intensidad nominal:	1.74/1.00 A
Intensidad de arranque:	490-530 %
Cos phi - factor de potencia:	0.80-0.70
Velocidad nominal:	2850-2880 rpm
Clase eficiencia IE:	IE3



Descripción	Valor
Eficiencia del motor a carga total:	73.8-73.8 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	79.0-76.5 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	75.5-71.5 %
Número de polos:	2
Grado de protección (IEC 34-5):	55 Dust/Jetting
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	NINGUNA
Motor N.º:	85805102
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Otros:	
Posición de caja de conexiones:	6
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	12.9 kg
Peso bruto:	16 kg
Volumen de transporte:	0.045 m³
VVS danés n.º:	386963002
País de origen.:	HU
Tarifa personalizada n.º:	84137075

96514893 MTR 3-2/2 A-W-A-HUUV 50 Hz



Nota: todas las unidades están en [mm] a menos que se indiquen otras. Exención de responsabilidad: este esquema dimensional simplificado no muestra todos los detalles.

Contar	Descripción
--------	-------------

1	NB 125-200/196-180 BAF2AESBQQEMW3
---	--



Código: [98843510](#)

Bomba centrífuga de voluta, no autocebante y de una etapa, diseñada de acuerdo con la norma ISO 5199, con dimensiones y rendimiento nominal de acuerdo con la norma EN 733 (10 bar). Las bridas son de PN 16 y sus dimensiones satisfacen los requisitos establecidos por la norma EN 1092-2.

La bomba posee un puerto de aspiración axial, un puerto de descarga radial, eje horizontal y un diseño que facilita la extracción del motor, el soporte del motor, la cubierta y el impulsor sin necesidad de desmontar la carcasa de la bomba ni las tuberías.

El cierre de fuelle de caucho no equilibrado satisface los requisitos establecidos por la norma DIN EN 12756. La bomba está acoplada directamente a un motor asíncrono refrigerado por ventilador.

Paneles control:

Frequency converter: NONE
 Sensor de presión: N

Líquido:

Líquido bombeado: Etanol
 Rango de temperatura del líquido: -25 .. 120 °C
 Concentración: 50.0 %
 Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 0 °C
 Densidad: 925.8 kg/m³
 Viscosidad cinemática: 6.9 mm²/s

Técnico:

Velocidad predeterminada: 1465 rpm
 Caudal real calculado: 256.5 m³/h
 Altura resultante de la bomba: 8.686 m
 Diámetro real del impulsor: 188 mm
 Diámetro nominal del impulsor: 200
 Disp. de cierre: Single
 Código del cierre: BQQE
 Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B2
 Diseño rodamiento: Standard

Materiales:

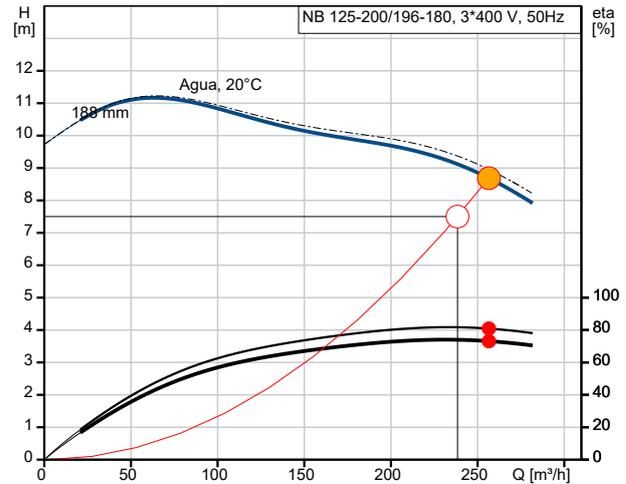
Cuerpo hidráulico: Fundición
 Carcasa de la bomba: EN-GJL-250
 ASTM class 35
 Mat. de anillo de desgaste: Latón
 Impulsor: Fundición
 EN-GJL-200
 ASTM class 30
 Internal pump house coating: CED
 Eje: Stainless steel
 EN 1.4301
 AISI 304

Instalación:

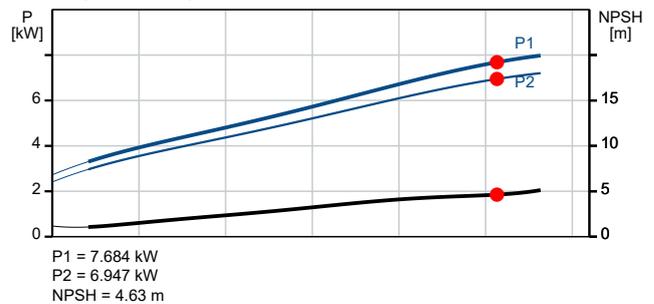
Temperatura ambiente máxima: 55 °C

Contar	Descripción
1	<p> Presión de trabajo máxima: 16 bar Normativa de conexión de tubería: EN 1092-2 Tamaño de la conexión de entrada: DN 150 Tamaño de la conexión de salida: DN 125 Presión nominal para la conexión: PN 16 Lubricación de rodamiento: Grease Carcasa de bomba con pie: Yes Sí = Con bloque de soporte, No = Sin bloque de soporte: N </p> <p> Datos eléctricos: Tipo de motor: SIEMENS Potencia nominal - P2: 7.5 kW Frecuencia de red: 50 Hz Tensión nominal: 3 x 380-420D/660-725Y V Intensidad nominal: 14.3/8.3 A Intensidad de arranque: 820-820 % Cos phi - factor de potencia: 0.84 Velocidad nominal: 1465 rpm Eficiencia: IE3 90,4% Clase eficiencia IE: IE3 Eficiencia del motor a carga total: 90.4-90.4 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 91.1-91.1 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 90.8-90.8 % Número de polos: 4 Grado de protección (IEC 34-5): IP55 Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 83V15222 Bearing insulation type N-end: N </p> <p> Otros: Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.70 Peso neto: 176 kg Peso bruto: 197 kg Volumen de transporte: 0.509 m³ VVS danés n.º: 386066205 País de origen.: HU Tarifa personalizada n.º: 84137051 </p>

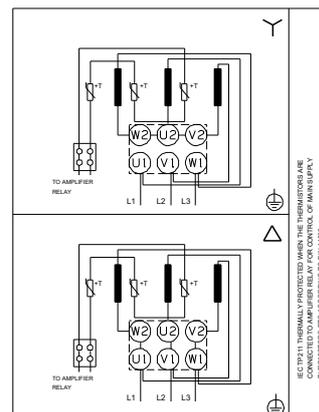
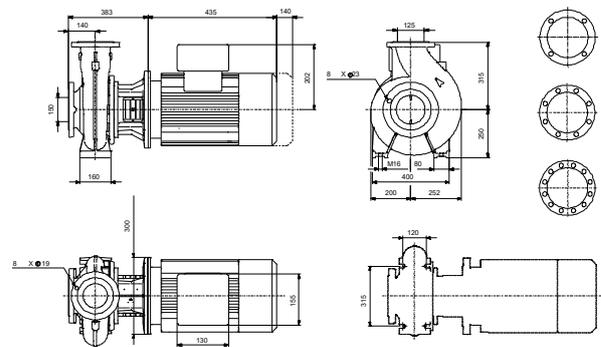
Descripción	Valor
Información general:	
Producto::	NB 125-200/196-180 BAF2AESBQQEMW3
Código::	98843510
Número EAN::	5712602251500
Precio:	EUR 6943
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	1465 rpm
Caudal real calculado:	256.5 m ³ /h
Altura resultante de la bomba:	8.686 m
Diámetro real del impulsor:	188 mm
Diámetro nominal del impulsor:	200
Disp. de cierre:	Single
Diámetro del eje:	32 mm
Código del cierre:	BQQE
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B2
Versión de la bomba:	A
Diseño rodamiento:	Standard
Materiales:	
Cuerpo hidráulico:	Fundición
Carcasa de la bomba:	EN-GJL-250
Carcasa de la bomba:	ASTM class 35
Mat. de anillo de desgaste:	Latón
Impulsor:	Fundición
Impulsor:	EN-GJL-200
Impulsor:	ASTM class 30
Internal pump house coating:	CED
Código de material:	A
Código para caucho:	E
Eje:	Stainless steel
Eje:	EN 1.4301
Eje:	AISI 304
Instalación:	
Temperatura ambiente máxima:	55 °C
Presión de trabajo máxima:	16 bar
Normativa de conexión de tubería:	EN 1092-2
Tamaño de la conexión de entrada:	DN 150
Tamaño de la conexión de salida:	DN 125
Presión nominal para la conexión:	PN 16
Lubricación de rodamiento:	Grease
Carcasa de bomba con pie:	Yes
Sí = Con bloque de soporte, No = Sin bloque de soporte:	N
Código de conexión:	F2
Líquido:	
Líquido bombeado:	Etanol
Rango de temperatura del líquido:	-25 .. 120 °C
Concentración:	50.0 %
Temperatura del líquido durante el funcionamiento:	0 °C
Densidad:	925.8 kg/m ³
Viscosidad cinemática:	6.9 mm ² /s
Datos eléctricos:	
Tipo de motor:	SIEMENS
Potencia nominal - P2:	7.5 kW



Q = 256.5 m³/h H = 8.686 m
 Líquido bombeado = Etanol Concentración = 50 %
 Viscosidad = 6.9 mm²/s Densidad = 925.8 kg/m³
 Bomba eta = 80.9 % Bomb+motor Eta = 73.1 %
 Temperatura del líquido durante el funcionamiento = 0 °C

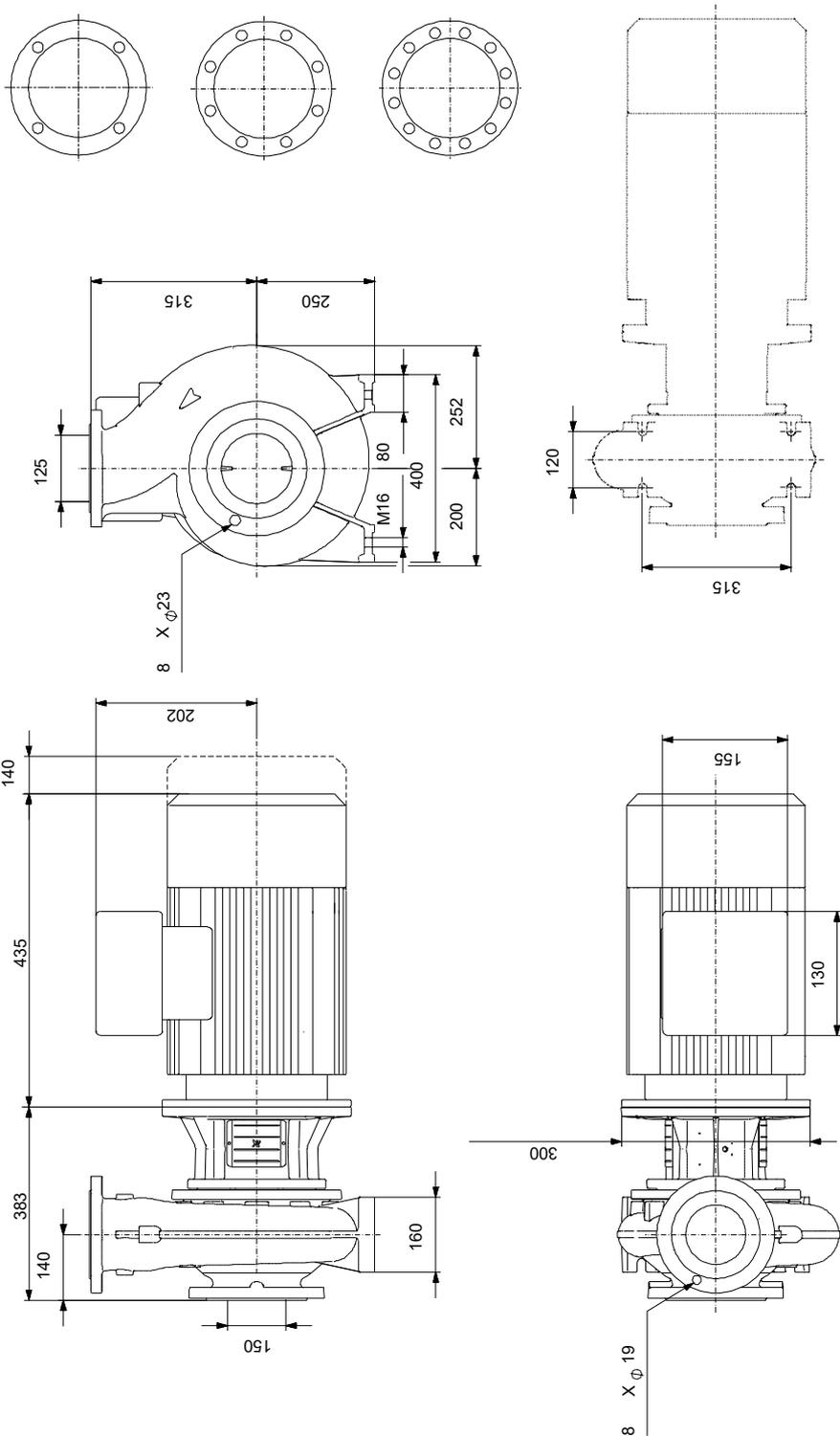


P1 = 7.684 kW
 P2 = 6.947 kW
 NPSH = 4.63 m



Descripción	Valor
Frecuencia de red:	50 Hz
Tensión nominal:	3 x 380-420D/660-725Y V
Intensidad nominal:	14.3/8.3 A
Intensidad de arranque:	820-820 %
Cos phi - factor de potencia:	0.84
Velocidad nominal:	1465 rpm
Eficiencia:	IE3 90,4%
Clase eficiencia IE:	IE3
Eficiencia del motor a carga total:	90.4-90.4 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	91.1-91.1 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	90.8-90.8 %
Número de polos:	4
Grado de protección (IEC 34-5):	IP55
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	PTC
Motor N.º:	83V15222
Diseño del montaje según norma CEI 34-7:	IM V1
Bearing insulation type N-end:	N
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Sensor de presión:	N
Otros:	
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	176 kg
Peso bruto:	197 kg
Volumen de transporte:	0.509 m³
VVS danés n.º:	386066205
País de origen.:	HU
Tarifa personalizada n.º:	84137051

98843510 NB 125-200/196-180 BAF2AESBQQEMW3 50 Hz

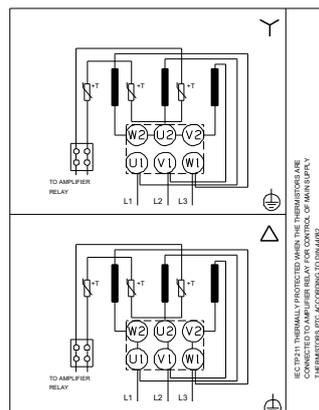
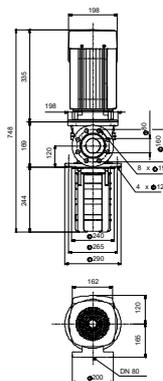
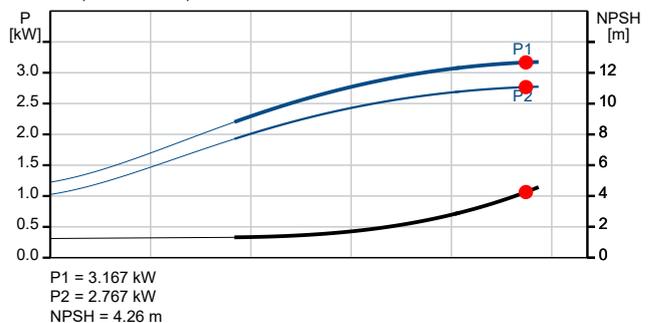
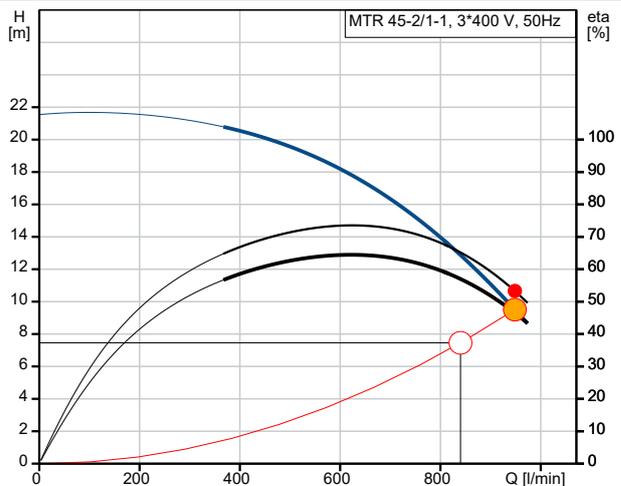


Nota: todas las unidades están en [mm] a menos que se indiquen otras. Exención de responsabilidad: este esquema dimensional simplificado no muestra todos los detalles.

Contar	Descripción
1	<p>MTR 45-2/1-1 A-F-A-HUUV</p>  <p>Código: 98513687</p> <p>Bomba centrífuga multietapa, sumergible y autocebante para instalación vertical en tanques, etc. El cabezal de la bomba y la base están fabricados en fundición; todas las demás piezas destinadas al contacto con el líquido están fabricadas en acero inoxidable. La bomba posee las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longitud de la instalación según DIN 5440. • El cierre mecánico cumple la norma EN 12756. • La transmisión de potencia tiene lugar por medio de un acoplamiento dividido de fundición. <p>Un cierre mecánico de cartucho garantiza la máxima fiabilidad, permite llevar a cabo la manipulación de forma segura y facilita el acceso y el mantenimiento. La bomba está equipada con un motor asíncrono de 3 fases, refrigerado por ventilador y montado sobre soportes.</p> <p>Profundidad de inmersión: 244 mm</p> <p>Paneles control: Frequency converter: NONE</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Emulsión Rango de temperatura del líquido: -10 .. 90 °C Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 20 °C Densidad: 1000 kg/m³</p> <p>Técnico: Velocidad predeterminada: 2902 rpm Caudal real calculado: 948 l/min Altura resultante de la bomba: 9.505 m Cámaras: 2 Drenaje de vuelta al depósito: N Orientación de bomba: Vertical Código del cierre: HUUV Homologaciones: CE,EAC,UKCA,RCM, Approvals for motor: CE,EAC,UKCA,SEPRO,RCMMorocco Energy approvals for motor: CE,CC,SingaporeAust./N.Z. Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B</p> <p>Materiales: Cabezal de la bomba: Fundición EN 1561 EN-GJL-200 ASTM A48-25B Impulsor: Acero inoxidable EN 1.4301 AISI 304</p> <p>Instalación: Temperatura ambiente máxima: 60 °C Presión de trabajo máxima: 25 bar Presión máxima a la temp. declarada: 25 bar / 90 °C Tipo de conexión: DIN Tamaño de la conexión de salida: DN 80</p>

Contar	Descripción
1	<p>Profundidad de inmersión: 244 mm Presión nominal para la conexión: PN 40 Tamaño de la brida del motor: FT130</p> <p>Datos eléctricos:</p> <p>Normativa de motor: IEC Tipo de motor: 100LC Potencia nominal - P2: 3 kW Frecuencia de red: 50 Hz Adecuado para 50/60 Hz: N Tensión nominal: 3 x 380-415D V Intensidad nominal: 6.3 A Intensidad de arranque: 840-920 % Cos phi - factor de potencia: 0.87-0.82 Velocidad nominal: 2900-2920 rpm Clase eficiencia IE: IE3 Eficiencia del motor a carga total: 87.1-87.1 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 88.0-87.0 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 87.7-85.4 % Número de polos: 2 Grado de protección (IEC 34-5): 55 Dust/Jetting Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 85U15510</p> <p>Otros:</p> <p>Posición de caja de conexiones: 6 Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.70 Peso neto: 70.9 kg Peso bruto: 87.6 kg Volumen de transporte: 0.169 m³ País de origen.: HU Tarifa personalizada n.º: 84137075</p>

Descripción	Valor
Información general:	
Producto::	MTR 45-2/1-1 A-F-A-HUUV
Código::	98513687
Número EAN::	5711496393730
Precio:	EUR 4862
Técnico:	
Velocidad predeterminada:	2902 rpm
Caudal real calculado:	948 l/min
Altura resultante de la bomba:	9.505 m
Cámaras:	2
Impulsores:	1
Número de impulsores de diámetro reducido:	1
Drenaje de vuelta al depósito:	N
Orientación de bomba:	Vertical
Código del cierre:	HUUV
Homologaciones:	CE,EAC,UKCA,RCM,
Approvals for motor:	CE,EAC,UKCA,SEPRO,RCM Morocco
Energy approvals for motor:	CE,CC,SingaporeAust./N.Z.
Tolerancia de curva:	ISO9906:2012 3B
Versión de la bomba:	A
Modelo:	B
Materiales:	
Cabezal de la bomba:	Fundición
Cabezal de la bomba:	EN 1561 EN-GJL-200
Cabezal de la bomba:	ASTM A48-25B
Impulsor:	Acero inoxidable
Impulsor:	EN 1.4301
Impulsor:	AISI 304
Código de material:	A
Instalación:	
Temperatura ambiente máxima:	60 °C
Presión de trabajo máxima:	25 bar
Presión máxima a la temp. declarada:	25 bar / 90 °C
Tipo de conexión:	DIN
Tamaño de la conexión de salida:	DN 80
Profundidad de inmersión:	244 mm
Presión nominal para la conexión:	PN 40
Tamaño de la brida del motor:	FT130
Código de conexión:	F
Líquido:	
Líquido bombeado:	Emulsión
Rango de temperatura del líquido:	-10 .. 90 °C
Temperatura del líquido durante el funcionamiento:	20 °C
Densidad:	1000 kg/m³
Datos eléctricos:	
Normativa de motor:	IEC
Tipo de motor:	100LC
Potencia nominal - P2:	3 kW
Frecuencia de red:	50 Hz
Adecuado para 50/60 Hz:	N
Tensión nominal:	3 x 380-415D V
Intensidad nominal:	6.3 A
Intensidad de arranque:	840-920 %
Cos phi - factor de potencia:	0.87-0.82
Velocidad nominal:	2900-2920 rpm



Descripción	Valor
Clase eficiencia IE:	IE3
Eficiencia del motor a carga total:	87.1-87.1 %
Eficiencia del motor a una carga de 3/4:	88.0-87.0 %
Eficiencia del motor a una carga de 1/2:	87.7-85.4 %
Número de polos:	2
Grado de protección (IEC 34-5):	55 Dust/Jetting
Clase de aislamiento (IEC 85):	F
Protección de motor integrada:	PTC
Motor N.º:	85U15510
Paneles control:	
Convertidor de frecuencia:	NONE
Otros:	
Posición de caja de conexiones:	6
Índice de eficiencia mínima, IE min:	0.70
Peso neto:	70.9 kg
Peso bruto:	87.6 kg
Volumen de transporte:	0.169 m ³
País de origen.:	HU
Tarifa personalizada n.º:	84137075

PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN

En este documento, se obtiene el presupuesto del Trabajo Fin de Grado expuesto en la memoria descriptiva, que abarca tanto el estudio experimental en el laboratorio como el diseño de la planta de ósmosis inversa. El proceso estudiado es una de las etapas que componen el proyecto global de recuperación de polifenoles presentes en el alperujo, teniendo estudios previos ya presupuestados para la extracción, ultrafiltración (Rojo-Adalid, 2021) y nanofiltración (Sáez Montesinos, 2022) a partir de extractos acuosos.

El presupuesto para el estudio experimental consta de 3 cuadros de precios: la mano de obra, el material fungible y el material amortizable. Por otro lado, el presupuesto de escala industrial se basa en los cuadros de precios para la mano de obra en planta, los equipos y materiales principales, y los accesorios o equipos auxiliares. En este caso, se considera que la inversión en la adquisición del terreno es nula, ya que se propone desarrollar el proceso en la propia almazara con suficiente espacio físico para ello, reduciendo los costes en transporte y almacenamiento.

Una vez calculados ambos apartados, se procede al cálculo del presupuesto general del Trabajo Fin de Grado.

2. PRESUPUESTO DE LABORATORIO

2.1. Cuadro de precios N.º 1: Mano de obra

La mano de obra en el estudio experimental de laboratorio consiste en la contratación de un estudiante en prácticas en el Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental dentro de la Universidad Politécnica de Valencia. En la Tabla 1, se resume el coste total de la mano de obra. A su vez, se considera un ingeniero químico para dirigir el trabajo del estudiante durante el período de prácticas.

Tabla 1. Cuadro de precios de mano de obra en laboratorio

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Estudiante en prácticas	h	450	4,10	1.845,00
Ingeniero químico	h	450	15,30	6.885,00
Importe TOTAL				8.730,00

El importe total de la mano de obra de laboratorio es de **OCHO MIL SETECIENTOS TREINTA EUROS**.

2.2. Cuadro de precios N.º 2: Material Fungible

En la Tabla 2, se resume el coste de todo el material fungible empleado para el estudio experimental de la planta de ósmosis inversa. Dicho material es consumible y, por ende, no amortizable.

Tabla 2. Cuadro de precios de material fungible en el estudio experimental

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Alperujo	kg	2,4	0,00	0,00
Membrana 010104	m ²	0,05168	1.924,00	99,43
Membrana UP005	m ²	0,02584	1.924,00	49,72
Membrana NF270	m ²	0,0072	1.924,00	13,85
Membrana NF90	m ²	0,0072	1.924,00	13,85
Papel de filtro	ud	6	0,21	1,26
Filtros (0,45 µm)	ud	15	0,22	3,30
Jeringas (5 mL)	ud	10	0,14	1,40
Viales HPLC	ud	15	1,09	16,35
Cubetas de espectrofotómetro	ud	100	0,06	6,00
Guantes de nitrilo	ud	60	0,30	18,00
Gafas de seguridad	ud	1	4,20	4,20
Agua destilada	L	60	5,96	357,60
Pipeta Pasteur	ud	25	0,13	3,25
Carbonato de sodio	kg	0,1	77,70	7,77
Ácido sulfúrico 95-98% p/p	L	0,3	89,60	26,88
Etanol	L	30	15,38	461,40
Reactivo Folin-Ciocalteu	L	0,05	262,00	13,10
Puntas de micropipetas (100 µL)	ud	20	0,06	1,20
Puntas de micropipetas (1000 µL)	ud	50	0,09	4,50
Puntas de micropipetas (5 mL)	ud	50	0,15	7,50
Tubo Falcon (50 mL)	ud	40	0,36	14,40
Tubo Eppendorf (2 mL)	ud	8	0,05	0,40
Importe TOTAL				1.125,36

El importe total del material fungible de laboratorio es de **MIL CIENTO VEINTICINCO EUROS CON TREINTA Y SEIS CÉNTIMOS**.

2.3. Cuadro de precios N.º 3: Material amortizable

En la Tabla 3, se obtiene el cuadro de precios del material amortizable empleado a escala de laboratorio para el estudio experimental. El cálculo del importe se obtiene a partir de la Ecuación 1, siendo C el coste del equipo, A la tasa de amortización y t el tiempo utilizado del equipo.

$$I = \frac{C \cdot t}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

La tasa de amortización depende del tipo de material, eligiendo un criterio de 12 años para maquinaria y 6 años para equipos de procesamiento de información (Agencia Tributaria, 2023).

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

Tabla 3. Cuadro de precios de material amortizable en el estudio de laboratorio

Concepto	Coste (€)	Amortización (años)	Tiempo (días)	Importe (€)
Planta de ultrafiltración	9.900,00	12	30	67,76
Planta de nanofiltración	5.338,23	12	10	12,18
Equipo Elmasonic P 70 H	275,00	12	20	1,25
Baño de refrigeración	2.310,00	12	20	10,54
Centrífuga Sigma 6-16KS	10.094,38	12	5	11,52
Nevera	373,28	12	120	10,22
Congelador	319,95	12	120	8,76
Colador de malla	3,00	12	5	0,00
Cubo plástico	2,80	12	5	0,00
Gradilla metálica de tubos	5,50	12	60	0,08
Pala dosificadora	1,89	12	5	0,00
Matraz Kitasato (2 L)	142,27	12	5	0,16
Abrazadera metálica	2,50	12	5	0,00
Micropipeta 1000 µL	58,38	12	30	0,40
Micropipeta 100 µL	43,45	12	30	0,30
Micropipeta 5 mL	67,76	12	30	0,46
Conductímetro GLP 31+	114,95	12	20	0,52
pHímetro GLP 21+	708,00	12	20	3,23
Espectrofotómetro Hach DR 600	9.990,00	12	30	68,38
Resistencia eléctrica	23,50	12	15	0,08
Caudalímetro	373,73	12	30	2,56
Termómetro digital	41,00	12	30	0,28
Manómetro	15,05	12	30	0,10
Pala agitadora eléctrica (2 ud)	1.768,00	12	5	2,02
Equipo LC-ESI-qToF-MS	200.600,00	12	5	228,84
Vortex Heidolph REAX top	549,95	12	30	3,76
Estufa	2.048,73	12	30	14,02
Jarra de plástico (5 L)	5,69	12	120	0,16
Balanza de precisión Kern (d=0,1 mg)	1.060,40	12	40	9,68
Balanza de precisión Kern (d=0,01 g)	798,00	12	60	10,92
Módulo de membrana Rayflow	1.562,00	12	30	10,69
Bomba de vacío Laboport	860,58	12	5	0,98
Ordenador (2 uds)	1.100,00	6	90	45,17
Cables conectores	16,12	6	90	0,66
Vaso de precipitados 1 L (2 uds)	8,40	12	40	0,08
Vaso de precipitados 100 mL (5 uds)	18,45	12	30	0,13
Vaso de precipitados 50 mL (5 uds)	15,00	12	30	0,10
Matraz Erlenmeyer 250 mL	2,38	12	40	0,02
Espátula metálica	3,10	12	30	0,02
Probeta 1 L	14,90	12	15	0,05
Matraz aforado 100 mL	12,31	12	20	0,06

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

Concepto	Coste (€)	Amortización (años)	Tiempo (días)	Importe (€)
Matraz aforado 50 mL	11,28	12	20	0,05
Equipo de baño de agua	1095,00	12	30	7,49
Refractómetro portátil	45,78	12	30	0,31
Importe TOTAL				534,02

El importe total del material amortizable de laboratorio es de **QUINIENTOS TREINTA Y CUATRO EUROS CON DOS CÉNTIMOS**.

3. PRESUPUESTO DE ESCALA INDUSTRIAL

3.1. Cuadro de precios N.º 4: Mano de obra industrial

En la Tabla 4, se dispone del cuadro de precios para la mano de obra necesaria en el diseño e instalación de la planta industrial. Los precios unitarios de cada profesión son definidos mediante valores promedios actuales de una base de datos (Indeed, 2023).

Tabla 4. Cuadro de precios de mano de obra industrial

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Ingeniero químico	h	450	15,30	6.885,00
Operario de planta	h	600	10,33	6.198,00
Operario de mantenimiento	h	450	10,05	4.522,50
Importe TOTAL				17.605,50

El importe total de mano de obra industrial es de **DIECISIETE MIL SEISCIENTOS CINCO EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS**.

3.2. Cuadro de precios N.º 5: Equipos principales

En la Tabla 5, se recoge el cuadro de precios para los materiales y equipos principales de la planta, separando los costes de las membranas, tuberías, codos, bombas y depósitos.

Tabla 5. Cuadro de precios de materiales y equipos principales en la planta industrial

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Membranas	ud	1	----	5.887,24
Membrana NF90 400/34i	ud	6	784,04	4.704,24
Tubo de presión (6 elementos)	ud	1	1.183,00	1.183,00
Tuberías	ud	1	----	3.380,32
Tubería AISI 316L DN 40 mm	m	5	11,38	56,90
Tubería AISI 316L DN 150 mm	m	28	85,12	2.383,36
Tubería AISI 316L DN 200 mm	m	5	100,61	503,05
Tubería AISI 316L DN 250 mm	m	3	145,67	437,01
Tubería AISI 316L DN 300 mm	m	6	169,48	1.016,88
Accesorios de tubería	ud	1	----	1.355,76

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Codo 90º AISI 316L DN 40 mm	ud	3	3,58	10,74
Codo 90º AISI 316L DN 150 mm	ud	10	48,05	480,50
Codo 90º AISI 316L DN 200 mm	ud	2	72,76	145,52
Codo 90º AISI 316L DN 300 mm	ud	5	143,80	719,00
Bombas	ud	1	----	75.003,00
CRN 95-9 A-F-A-E-HQQE	ud	1	70.686,00	70.686,00
NB 65-125/121 AAF2AESBQQEEMW3	ud	1	2.455,00	2.455,00
MTR 3-2/2 A-W-A-HUUV	ud	1	1.862,00	1.862,00
NB 125-200/196-180 BAF2AESBQQEMW3	ud	1	6.943,00	6.943,00
MTR 45-2/1-1 A-F-A-HUUV	ud	1	4.862,00	4.862,00
Depósitos	ud	1	----	65.256,65
PRFV 92,16 m ³ Ø 4 m h 7,3 m	ud	3	16.314,16	48.942,49
PRFV 9,36 m ³ Ø 2 m h 3 m	ud	1	1.656,91	1.656,91
PRFV 82,80 m ³ Ø 4 m h 6,6 m	ud	1	14.657,26	14.657,26
PRFV 28,21 m ³ Ø 4 m h 2,2 m	ud	2	4.993,73	9.987,47
PRFV 21,84 m ³ Ø 4 m h 1,7 m	ud	1	3.866,12	3.866,12
Importe TOTAL				150.882,97

El importe total de materiales y equipos principales es de **CIENTO CINCUENTA MIL OCHOCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS CON NOVENTA Y SIETE CÉNTIMOS.**

3.3. Cuadro de precios N.º 6: Equipos auxiliares

En la Tabla 6, se obtiene el cuadro de precios para los equipos auxiliares de la instalación de la planta de ósmosis inversa, entre ellos válvulas, sensores, medidores de caudal y accesorios necesarios para que el proceso esté controlado y sea efectivo.

Tabla 6. Cuadro de precios de equipos auxiliares en la instalación de la planta industrial

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Válvula de compuerta DN 150	ud	9	241,90	2.177,10
Válvula de alivio AISI 316 Swagelok	ud	5	72,01	360,05
Válvula de regulación	ud	5	53,70	268,50
Válvula de tres vías Depala DN 150	ud	1	466,00	466,00
Válvula de tres vías Depala DN 200	ud	4	542,00	2.168,00
Conexión de toma a tierra	ud	8	430,57	3.444,56
Caudalímetro de inserción Hydrins	ud	5	335,23	1.676,15
Manómetro industrial WIKA	ud	8	120,40	963,20
Intercambiador de calor Alfa Labal	ud	1	1.940,84	1.940,84
Cabezal rotativo dBlanco	ud	1	836,11	836,11
Filtro de cartuchos Russell Finex	ud	1	537,00	537,00
Sensor de temperatura IFM TN7511	ud	3	318,10	954,30

Estudio experimental y diseño de un proceso de ósmosis inversa para concentrar una corriente enriquecida en compuestos fenólicos procedentes de 120 m³/día de extractos hidroalcohólicos de alperujo

Concepto	Unidad	Cantidad	Precio unitario (€/ud)	Importe (€)
Sensores de nivel IFM LI5131	ud	8	139,20	1.113,60
Importe TOTAL				16.905,41

El importe total de materiales y equipos auxiliares es de **DIECISÉIS MIL NOVECIENTOS CINCO EUROS CON CUARENTA Y UN CÉNTIMOS.**

4. PRESUPUESTO GENERAL

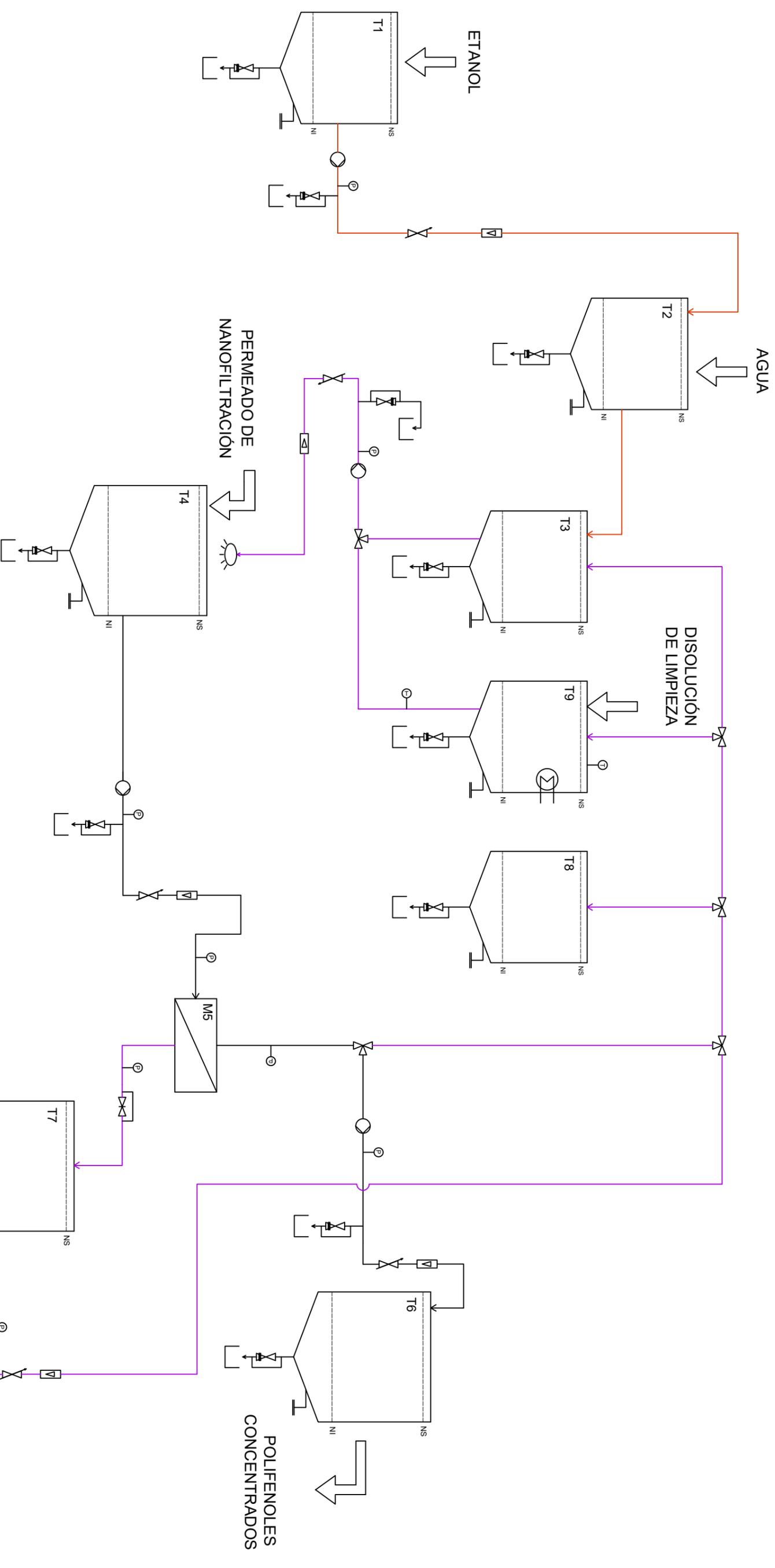
Teniendo en cuenta los cuadros de precios calculados anteriormente, se resume el presupuesto general del Trabajo Fin de Grado en la Tabla 7.

Tabla 7. Presupuesto general del proyecto

Concepto	Coste total
1. Presupuesto de laboratorio	10.389,39 €
2. Presupuesto a escala industrial	185.393,88 €
TOTAL	195.783,27 €
Sistema de control de procesos (15%)	29.367,49 €
Instalación eléctrica (10%)	19.578,33 €
Presupuesto de ejecución material (PEM)	244.729,09 €
Gastos generales (13%)	31.814,78 €
Beneficio industrial (6%)	14.683,75 €
Presupuesto de ejecución por contrata (PEC)	291.227,61 €
IVA (21%)	61.157,80 €
PEC + IVA	352.385,41 €
Honorarios del proyectista (4%)	14.095,42 €
PRESUPUESTO DE INVERSIÓN	366.480,83 €

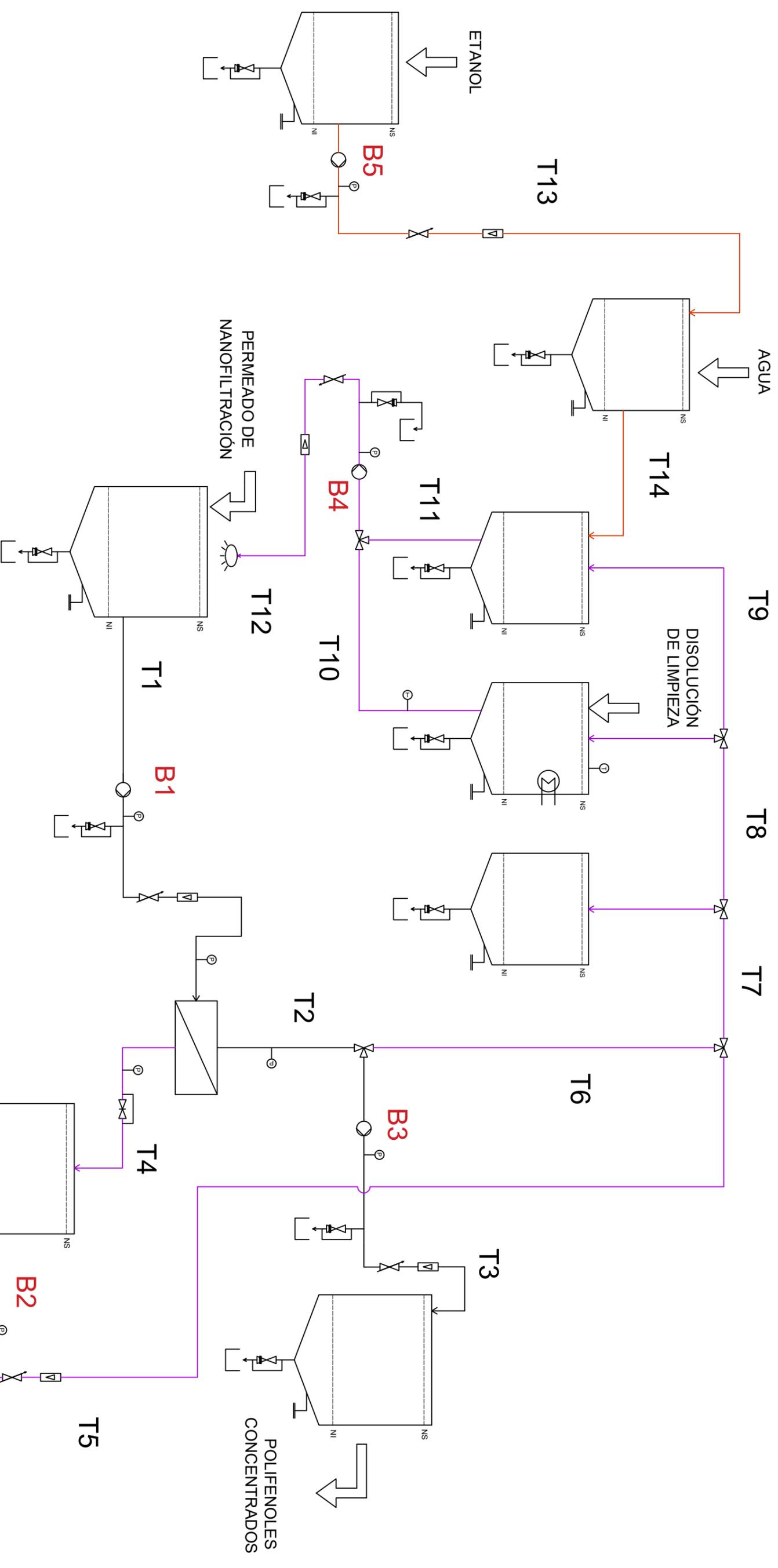
Asciende el presupuesto de inversión a la expresada cantidad de **TRESCIENTOS SESENTA Y SEIS MIL CUATROCIENTOS OCHENTA EUROS CON OCHENTA Y TRES CÉNTIMOS**

PLANOS



LEYENDA

	Válvula de seguridad		Módulo de membranas		Termómetro
	Válvula de regulación		Tanque cerrado de base cónica		Manómetro
	Válvula de compuerta		Niveles de seguridad		Conexión a tierra
	Válvula de tres vías		Cisterna		Aportes externos
	Caudalímetro		Bomba		
	Cabezal rotatorio		Intercambiador de calor		



LEYENDA

	Válvula de seguridad		Módulo de membranas		Termómetro
	Válvula de regulación		Tanque cerrado de base cónica		Manómetro
	Válvula de compuerta		Niveles de seguridad		Conexión a tierra
	Válvula de tres vías		Cisterna		Aportes externos
	Caudalímetro		Bomba		
	Cabezal rotatorio				
	Intercambiador de calor				