



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

**DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN PARA LA
CLARIFICACIÓN DE ZUMO DE PIÑA
MEDIANTE ULTRAFILTRACIÓN.
APLICACIÓN A UNA PRODUCCIÓN DE
0.5 m³/día.**

AUTOR: ROBERTO MORALES GÓMEZ

TUTORA: ALICIA IBORRA CLAR

COTUTORA: MARÍA ISABEL ALCAINA MIRANDA

Curso Académico: 2015-16

AGRADECIMIENTOS

Este escrito no va a ser la típica página nombrando a cada una de las personas que me han ayudado ni cómo, por varios motivos:

No acabaría nunca.

Con lo despistado que soy, se me puede pasar mencionar a alguien, y me molestaría más que a dicha persona.

Si no nombro a alguien que considera que debería aparecer en este apartado, esa persona se puede sentir ofendida.

Este trabajo no es ni mucho menos la culminación de nada, tan sólo un requisito que me permite seguir avanzando para ser lo que quiero.

Quienes me han ayudado de una manera u otra en cualquier ámbito, no sólo en el académico sino también en el personal, que es el más importante, saben de sobras quiénes son.

Si hay alguien que no sepa que le estoy agradecido, ya me encargaré de hacérselo saber.

Creo que mencionar a alguien en un texto no es una forma real de agradecimiento. Las demostraciones se realizan con hechos, día a día.

Así pues, este apartado no es sólo de agradecimiento, sino también una declaración de intenciones. Avanzaré de la forma que crea correcta. Me tenéis para lo que necesitéis.

Gracias.

RESUMEN

En el presente trabajo de final de grado se recoge el estudio de una clarificación de zumo de piña mediante tecnología de membranas, concretamente mediante ultrafiltración, con el objetivo de obtener las condiciones óptimas de operación, así como de diseñar una instalación industrial capaz de llevar a cabo dicho proceso.

Se escoge esta tecnología debido a que se emplea frecuentemente en la industria alimentaria con este tipo de propósitos, y se encuentra en fase de crecimiento. Esto es debido a que, empleando una cantidad moderada de recursos y un sistema sencillo de utilizar, se obtienen resultados satisfactorios.

Para ello, se desarrollan una serie de experiencias como se expone a continuación:

Primero, se obtiene del flux de permeado a través de cada una de las membranas propuestas, a diferentes presiones y temperaturas, y se analizan diversos parámetros en las corrientes de alimento y permeado, como son el índice de turbidez y la concentración de azúcares. Con esto se obtienen las condiciones óptimas de operación.

Seguidamente, se realizan diversos ensayos de ensuciamiento de las membranas propuestas, con el fin de hallar cuál de ellas es más adecuada para la clarificación propuesta.

Entre cada experiencia, se aplican diferentes limpiezas a las membranas y se calcula su permeabilidad pues, para realizar con corrección cada ensayo, es imprescindible caracterizar las membranas previa y posteriormente a cada ensayo.

Una vez concluida la fase experimental, se realiza el diseño de una instalación industrial con capacidad para ejecutar la clarificación objeto de este trabajo de final de grado.

RESUM

En el present treball de fi de grau s'arreglega l'estudi d'una clarificació de suc de pinya mitjançant tecnologia de membranes, concretament mitjançant ultrafiltració, amb l'objectiu d'obtindre les condicions òptimes d'operació, així com de dissenyar una instal·lació industrial capaç de dur a terme dit procés.

Es tria aquesta tecnologia degut a que s'empra freqüentment en la indústria alimentària amb aquest tipus de propòsits, i es troba en fase de creixement. Això es degut a que, emprant una qüantitat moderada de recursos i un sistema senzill d'utilitzar, s'obtenen resultats satisfactoris.

Per a això, es desenvolupen una sèrie d'experiències com s'exposa a continuació:

Primer, s'obté el flux de permeat a través de cadascuna de les membranes proposades, a diferents pressions i temperatures, i s'analitzen diversos paràmetres en les corrents d'aliment i permeat, com són l'índex de turbidesa i la concentració de sucres. Amb això s'obtenen les condicions òptimes d'operació.

Seguidament, es realitzen diversos assajos d'embrutament de les membranes proposades, amb el fi de trobar quina és la més adequada per a la clarificació proposada.

Entre cada experiència, s'apliquen diferents netejes a les membranes i es calcula la seua permeabilitat perquè, per a realitzar amb correcció els assajos, és imprescindible caracteritzar les membranes prèvia i posteriorment a cada neteja.

Una vegada conculsa la fase experimental, es realitza el disseny d'una instal·lació industrial amb capacitat per a executar la clarificació objecte d'aquest treball de fi de grau.

ABSTRACT

This final degree paper, studies a clarification of pineapple juice by membrane technology, specifically through ultrafiltration, in order to obtain the optimum operating conditions and design an industrial installation capable to carry out this process.

This technology is chosen because is frequently used in the food industry for such purposes, and is in a growing trend. This is due to the fact that using a moderate amount of resources and a system that is simple to use, satisfactory results are obtained.

To do this, a series of experiments are carried out as explained below:

First, each proposed membrane's permeated flux is obtained applying different pressures and temperatures, and various parameters are analyzed in the feed and permeate streams, such as the rate of turbidity and the concentration of sugars. With this method, the optimum operating conditions are obtained.

Immediately afterwards, various membrane's fouling tests are carried out with the objective of finding which one of them is best suited for the clarification proposed.

Between each test, different cleanings are applied to the membranes, and the permeability of each one is calculated because to do this correctly, it's essential to characterize the membranes before and after each cleaning.

After finishing the experimental phase, an industrial installation with capacity to carry out the clarification proposed in this final degree paper, is designed.

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTO I. MEMORIA DESCRIPTIVA

DOCUMENTO II. ESTUDIO ECONÓMICO

DOCUMENTO III. ANEXOS

DOCUMENTO I

MEMORIA DESCRIPTIVA

ÍNDICE

1. OBJETIVO DEL PROYECTO.....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	3
3. INTRODUCCIÓN	5
3.1. ANTECEDENTES.....	5
3.1.1 Clarificación enzimática.....	5
3.1.2 Clarificación enzimática apoyada por tecnología de membranas.....	6
3.1.3 Sistemas combinados.....	6
3.2. PROCESOS DE MEMBRANA.....	9
3.2.1 Introducción a los procesos de membrana	9
3.2.2 Clasificación de los procesos de membrana según sus parámetros relevantes.....	10
3.2.3 Parámetros de comportamiento de los procesos de membrana.....	13
3.2.4 Fenómenos de ensuciamiento	14
3.2.5 Protocolos de limpieza	17
3.3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE MEMBRANA MÁS ADECUADO PARA LA CLARIFICACIÓN .	18
4. Metodología experimental.....	19
4.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS.....	19
4.1.1. Índice de turbidez.....	19
4.1.2. Concentración de azúcar	19
4.1.3. Conductividad.....	20
4.1.4. pH	20
4.1.5. Factor de Reducción de Volumen	20
4.1.6. Sólidos Totales.....	21
4.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	22
4.3. PLANTA PILOTO.....	24

4.3.1. ESQUEMA DE LA PLANTA PILOTO	24
4.3.2. ENSAYOS EN PLANTA PILOTO	26
4.3.2.1. Determinación del coeficiente de permeabilidad de las membranas	26
4.3.2.2. Estudio de las condiciones de operación	26
4.3.2.3. Ensayos de ensuciamiento.....	27
4.4. DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SEMIINDUSTRIAL	27
5. RESULTADOS experimentales.....	29
5.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE LAS MEMBRANAS (K)	29
5.2 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN	31
5.2.1. Flux (J_p)	31
5.2.2. Concentración de azúcares ($^{\circ}$ Brix)	33
5.2.3. Índice de turbidez (NTU)	35
5.2.4. Estudio de la evolución de los parámetros expuestos anteriormente en función del índice de rechazo de las membranas	37
5.2.4.1. Concentración de azúcares (%R).....	37
5.2.4.2. Índice de turbidez (%R).....	39
5.2.5. Limpieza de las membranas	41
5.3. ENSAYOS DE ENSUCIAMIENTO	42
5.3.1. Primer ensayo de ensuciamiento	42
5.3.1.1. Flux (J_p).....	43
5.3.1.2. Concentración de azúcares ($^{\circ}$ Brix).....	44
5.3.1.3. Índice de turbidez (NTU).....	45
5.3.1.4. Estudio de la evolución de los parámetros expuestos anteriormente en función del índice de rechazo de las membranas	46
5.3.1.5. Limpieza de la membrana.....	47
5.3.2. Segundo ensayo de ensuciamiento	48
5.3.2.1. Flux (J_p).....	48
5.3.2.2. Índice de turbidez, concentración de azúcares y conductividad	50
5.3.2.3. Factor de Reducción de Volumen (FRV)	52
5.3.2.4. Limpieza de la membrana.....	53
5.3.2.5. Sólidos Totales (ST)	54
6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	55

6.1. Flux.....	55
6.2. Índice de turbidez	56
7. PROPUESTA DE INSTALACIÓN SEMIINDUSTRIAL.....	59
7.1. CÁLCULOS	59
7.2. COMPONENTES.....	60
7.3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN SEMIINDUSTRIAL	68
8. CONCLUSIONES	69
9. BIBLIOGRAFÍA.....	70

1. OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar un proceso de clarificación de un zumo de piña a escala semiindustrial, mediante la aplicación de la tecnología de membranas, obteniendo un caudal de producto final tratado de $0.5 \text{ m}^3/\text{día}$.

Dicho producto se pretende emplear como zumo de piña o bien utilizarse para enriquecer otros zumos, mejorando la consistencia, nitidez y propiedades organolépticas, además de alargar el tiempo de validez desde el punto de vista microbiológico sin requerir un tratamiento térmico agresivo.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio es de utilidad debido a su elevado potencial en aplicaciones en la industria alimentaria. Plantea el empleo de la tecnología de membranas como alternativa a otros procesos convencionales.

Concretamente, es aplicable en el ámbito de la preparación de productos mixtos, en los cuales uno de los componentes de dicha mezcla sería el zumo clarificado de piña obtenido mediante la técnica de ultrafiltración (UF), de modo que se logre obtener un producto final con las características organolépticas requeridas por el consumidor.

Esta tecnología permite la obtención de un producto final de calidad superior y mayor valor añadido, además de requerir un menor consumo energético, con el consiguiente ahorro económico.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. ANTECEDENTES

Existen diversos métodos para llevar a cabo la clarificación de disoluciones de diferente tipología. Cada método empleado permite alcanzar un determinado grado de utilidad dependiendo del tipo de aplicación empleada en la que se emplee, así como de las condiciones de operación seleccionadas.

A continuación, se exponen algunos de los métodos más frecuentes empleados en el ámbito de la industria alimentaria a escala semiindustrial.

3.1.1 Clarificación enzimática

Entre los diversos métodos existentes para obtener clarificados de zumos, se encuentran particularmente extendidos los enzimáticos que, con gran polivalencia, no solamente encuentran utilidad a este respecto, sino también en otras muchas aplicaciones como extracciones de aceites esenciales, obtención de zumos con pulpa y menor viscosidad de lo habitual, digestión de componentes no deseados...

Existen diversos preparados de disoluciones enzimáticas comerciales. Entre las más empleadas en el campo de la clarificación, se encuentran las pectinasas. Esto es debido a que las pectinas, heteropolisacáridos presentes en la pared celular de las frutas, los cuales forman geles en presencia de agua, se aglomeran formando disoluciones coloidales. Así pues, mediante el empleo de pectinasas, se hidrolizan las pectinas, permitiendo la formación de flóculos, facilitando de este modo la clarificación. Al finalizar el proceso, se aplica un tratamiento térmico para inactivar las enzimas, pues no es deseable una excesiva degradación, lo que podría ocasionar un producto de calidad deficiente.

Se pueden encontrar estudios acerca de diversas aplicaciones de clarificación mediante esta técnica, obteniendo buenos rendimientos (85%), por lo que resultan apropiadas para su aplicación en la industria.

Mediante este tipo de tratamiento se mantienen aproximadamente constantes la cantidad de sólidos solubles (como los azúcares), pasando de concentraciones de 11ºBrix a 10,52ºBrix, obteniéndose pues una reducción del 4,36%. Por otro lado, el índice de turbidez se ve reducido, pasando de concentraciones de 9,9 NTU a 2,63 NTU, obteniéndose pues una reducción del 73,43%, cumpliéndose así el objetivo de clarificar. [1]

3.1.2 Clarificación enzimática apoyada por tecnología de membranas

Se emplea, como es habitual, pectinasa para hidrolizar las pectinas. En este caso, se emplean además membranas polisulfonadas con un corte molecular (MWCO) de 50 kDa.

Los autores realizan una comparativa entre los valores de diversos parámetros analizados, como el índice de turbidez (muy representativo) del permeado de zumo de piña obtenido mediante UF, pasteurización o hidrolizado, a diferentes presiones. Los resultados resultan similares en todos los casos. Sin embargo, es apreciable una ligera ventaja de los procesos de membrana sobre las técnicas de pasteurizado e hidrolizado, en especial empleando elevadas presiones, puesto que se obtienen mayores reducciones en todos los casos en cuanto a los parámetros estudiados, obteniéndose de este modo un mejor clarificado. [2]

3.1.3 Sistemas combinados

Se han encontrado estudios de sistemas que incluyen más etapas, con posibles alternativas, como el que se muestra a continuación, aplicado a la clarificación de jarabe de glucosa obtenido por hidrólisis enzimática del almidón.

En dichos estudios se analiza no sólo el rendimiento de diversas técnicas como son la centrifugación, la filtración con posibilidad de emplearla seguida de ultrafiltración y la sedimentación, sino también el efecto del empleo de diversos coagulantes y floculantes previamente a la aplicación de estas técnicas. Finalmente se aplica una decoloración seguida de evaporación. Todo esto queda representado en la figura III.1.

Al inicio de las experiencias, la eliminación mediante centrifugación sobre jarabe floculado es un 10% más efectiva que sobre el jarabe sin flocular. Unos minutos más tarde, casi se igualan en un porcentaje de eliminación de sólidos del 98%, por lo que el efecto de los floculantes solamente resulta significativo durante los primeros minutos de centrifugación.

La centrifugación no es el método de separación más adecuado, ya que no se forma una masa compacta del precipitado obtenido.

La filtración simple alcanza valores de eliminación de sólidos entorno al 90% en algunos casos, de modo inversamente proporcional al tamaño de poro empleado.

La filtración en serie mejora este sistema, ya que la sucesión de filtros con tamaño de poro cada vez menor, evita que la torta que se forma sobre el filtro suponga una resistencia demasiado elevada al paso de la disolución a clarificar.

Los floculantes aumentan la velocidad de filtración, con mayor efecto sobre los filtros con mayor tamaño de poro, que presentan unos peores resultados en cuanto a % de eliminación de sólidos.

La aplicación de estos sistemas de filtrado en serie mejora la velocidad de filtrado respecto a su aplicación en un solo módulo, pero de manera muy leve.

En cuanto al empleo de técnicas de sedimentación, la variación que sufre la altura de sedimentación a lo largo del tiempo, en función del uso de floculantes y de la temperatura resulta similar en todos los casos, apreciándose una ligera ventaja que se acentúa con el tiempo para el caso de la muestra floculada a elevada temperatura. Cabe anotar que la influencia de la temperatura en los casos ensayados es inversamente proporcional a la altura de sedimentación obtenida.

Los autores obtuvieron una eliminación de sólidos entre el 86% y el 90% empleando las técnicas de sedimentación y filtración, con unos rendimientos entre el 44% y el 78%. Mediante el empleo de centrifugación, se logra casi un 98% de eliminación, pero el rendimiento se sitúa alrededor del 53%. Finalmente, la ultrafiltración ofrece una eliminación de sólidos del 99,9% lo que supone un rendimiento del 100%, destacando claramente sobre el resto de técnicas comentadas.

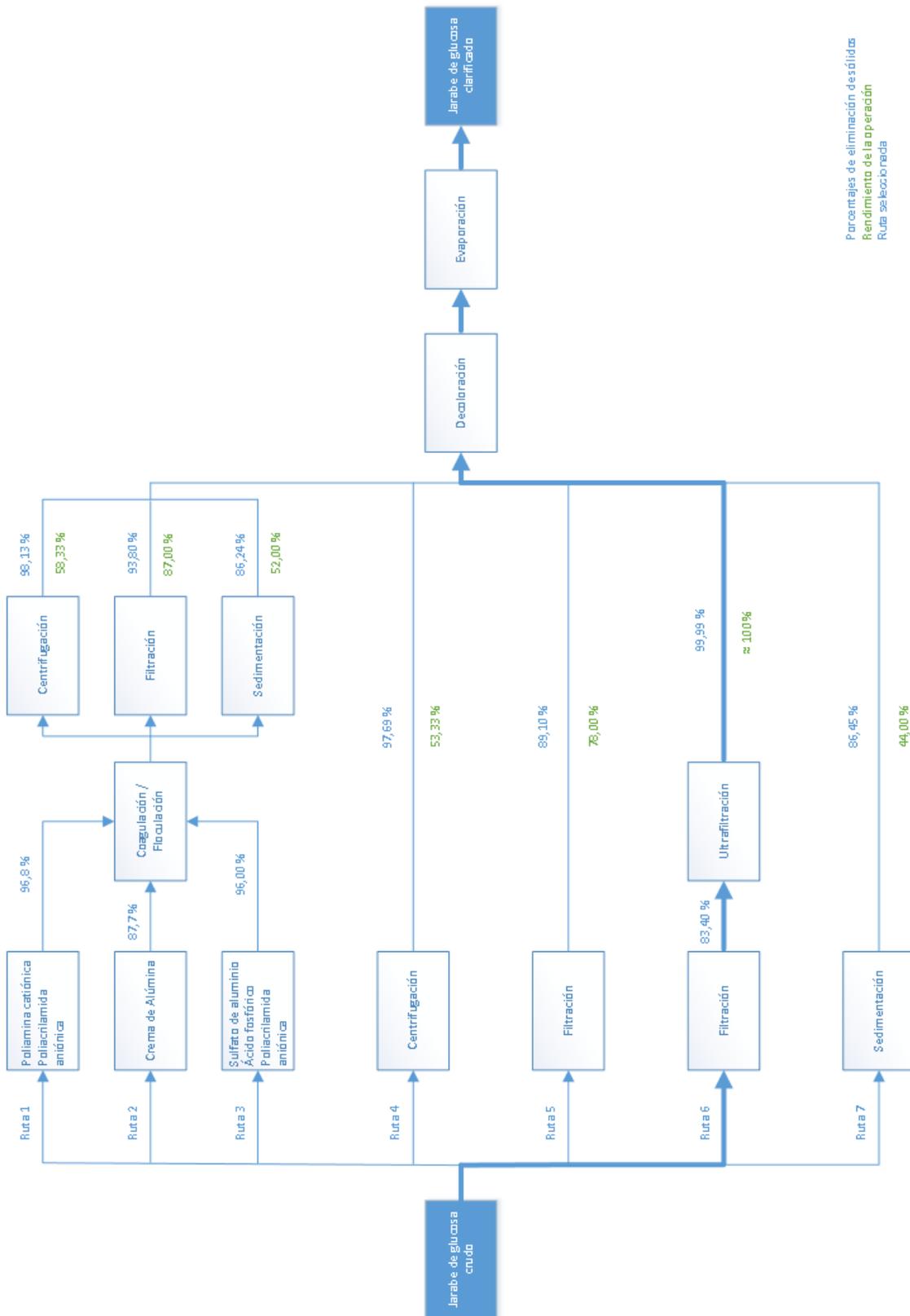
Con todo esto y el correspondiente estudio económico, es posible realizar una valoración acerca de los métodos empleados, como se refleja de forma esquemática en la tabla III.2.

Tabla III.1. Evaluación general de las técnicas de separación

Característica	Filtración	UF	Centrifugación	Sedimentación
% de eliminación	Muy bueno	Excelente	Excelente	Muy bueno
Rendimiento	Bueno	Excelente	Regular	Regular
Coste de operación	Moderado	Muy alto	Alto	Bajo
Calidad del producto	Opaco	Translúcido	Claro	Opaco
Tiempo de operación	Bajo	Medio	Bajo	Alto

Se concluye según la tabla III.2, que todos los métodos son, en mayor o menor medida, aptos para la eliminación de sólidos. La mayor diferencia entre ellos radica en el tipo de aplicación concreta debida a la necesidad de solucionar un determinado problema, así como a la capacidad económica y el tiempo disponible para obtener el producto deseado.

En concreto, el método propuesto en el presente TFG, proporciona un producto de excelente calidad.



Porcentajes de eliminación de sólidos
Rendimiento de la operación
Ruta seleccionada

Figura III.1. Resultados generales de la ruta experimental (Castellanos y otros, 2004)

De este modo, gracias a estudios previos, se observan no sólo las diferencias entre los diversos métodos analizados, sino también las posibles combinaciones entre ellos con el fin de obtener el resultado deseado. [3]

Queda claro pues que el empleo de membranas, en concreto las que poseen un MWCO correspondiente al rango de separación denominado ultrafiltración, son no sólo válidas, sino también recomendables en caso de ser factible su implementación en el proceso productivo correspondiente.

Con toda la información presentada, se aborda en el punto siguiente el estudio teórico correspondiente a las membranas.

3.2. PROCESOS DE MEMBRANA

3.2.1 Introducción a los procesos de membrana

La tecnología de membranas es un proceso físico de separación de corrientes fluidas en el que la membrana ejerce de barrera selectiva, permitiendo el paso de algunas sustancias a su través (permeado) en mayor proporción, mientras que restringe o impide el paso de otras (rechazo).

Esta selectividad se debe a diferencias en las propiedades físicas y químicas entre la membrana y los componentes que forman la disolución. Estas propiedades pueden ser tales como el tamaño molecular, la carga eléctrica etc.

Existe una amplia tipología de membranas atendiendo a multitud de factores como son la morfología, la composición, el tipo de fuerza impulsora o el mecanismo de separación.

En este documento se aborda el estudio de las membranas poliméricas, las cuales emplean como fuerza impulsora diferencias de presión entre ambas caras de la membrana.

3.2.2 Clasificación de los procesos de membrana según sus parámetros relevantes

En la tabla III.1 se recogen los rangos de aplicación de las membranas poliméricas según su corte molecular, su morfología y el rango de presión aplicada.

Tabla III.2. Clasificación de los procesos de membranas que emplean diferencias de presión como fuerza impulsora

PROCESO	CORTE MOLECULAR (MWCO) [μm]	FUERZA IMPULSORA	MAGNITUD DE FUERZA [bar]	ESTRUCTURA POROSA	ESPECIES RETENIDAS
Microfiltración (MF)	[10 , 0.1]	$\Delta P/\Delta x$	0.1 , 2	Simétrica o asimétrica	Sólidos en suspensión (s.s.), bacterias
Ultrafiltración (UF)	[0.05 , 0.005]	$\Delta P/\Delta x$	2, 5	Simétrica o asimétrica	Pigmentos, macromoléculas
Nanofiltración (NF)	[0.005 , 0.0005]	$\Delta P/\Delta x$	5 , 20	Asimétrica con CA densa	Azúcares, lactosa, iones polivalentes
Ósmosis Inversa (OI)	[0.001 , 0.0001]	$\Delta P/\Delta x$	10 , 80	Asimétrica con CA densa	Minerales, sales, iones monovalentes

Como se ha comentado anteriormente, las membranas se clasifican atendiendo a diferentes características, como se muestra a continuación:

- Según la fuerza impulsora:

Las sustancias pueden permear a través de la membrana a causa de la existencia de gradientes de concentración (difusión), de gradientes de carga eléctrica (migración de especies iónicas) o de la aplicación de presión (convección).

- Según su composición:

Dependiendo de la composición, las membranas poseen diferente afinidad por determinadas moléculas.

Las membranas pueden estar formadas por materia orgánica (poliméricas) o inorgánica (cerámicas).

Las membranas inorgánicas de ultrafiltración están constituidas por materiales cerámicos, metálicos y vidrios, mientras que las orgánicas lo están por materiales poliméricos. Actualmente, se emplean predominantemente las membranas poliméricas sintéticas, debido a que al ser las más desarrolladas, existe mayor variedad, pudiendo escoger la más adecuada para cada aplicación. Además, poseen menor precio en comparación con otras.

A pesar de su mayor coste, las membranas basadas en materiales inorgánicos están adquiriendo relevancia con el paso del tiempo, ya que existe la necesidad de limpieza intensa en algunas aplicaciones, y las membranas poliméricas no son tan resistentes a tratamientos térmicos, químicos ni a esfuerzos mecánicos. Por ello, las membranas inorgánicas poseen mayor vida útil.

- Según su morfología:

Las membranas pueden poseer una estructura porosa. En ese caso, cuanto mayor sea la porosidad (fracción de huecos en el volumen ocupado por la membrana), mayor será el flux de permeado. En cuanto a la geometría de los poros, cuanto menor sea la tortuosidad (relación entre el espesor de la membrana y la longitud del poro), las moléculas permearán con mayor facilidad, por lo que se obtendrá un mayor flux de permeado.

Obviamente, existe un límite máximo para el valor de la porosidad dependiendo del material y la geometría de la membrana ya que, si dicho valor es excesivo, la membrana no resultará lo bastante resistente mecánicamente.

Se emplean diferentes cortes moleculares, con lo que se retienen distintos tipos de moléculas según su tamaño.

En cuanto a la simetría de las membranas, las simétricas presentan una estructura similar en todo su espesor, mientras que las asimétricas están formadas por dos capas diferenciadas:

- Capa activa (CA): capa densa que se encuentra en contacto con la corriente de alimento. Determina la selectividad y permeabilidad de la membrana.
- Capa soporte: capa porosa que proporciona resistencia mecánica afectando mínimamente al flujo de permeado (J_p).

La resistencia a la transferencia de masa se debe en parte al espesor de la membrana, por lo que resultan de especial interés las membranas asimétricas con CA fina, debido a su elevada selectividad y permeabilidad, de modo que la transferencia de materia queda determinada casi totalmente por dicha capa.

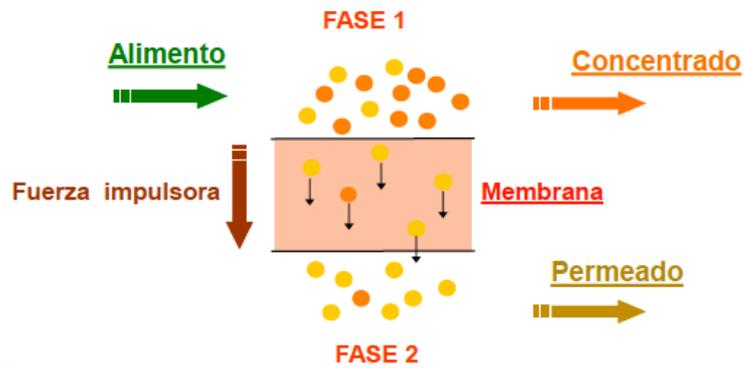


Figura III.2. Esquema básico de funcionamiento de una membrana [4]

Como se observa en la figura III.1, la corriente alimento fluye tangencialmente a la membrana, por la cual permean determinados componentes gracias a la fuerza impulsora del proceso. De este modo, se obtienen dos corrientes, una de rechazo o concentrado, y otra de permeado.

3.2.3 Parámetros de comportamiento de los procesos de membrana

La eficacia una membrana queda definida básicamente mediante dos parámetros, la *densidad de flujo o flux* (J_p) y la *selectividad*.

Sin tener en cuenta los fenómenos de ensuciamiento expuestos más adelante, el flux de permeado está caracterizado según:

$$J_p \left[\frac{L}{s \cdot m^2} \right] = k \cdot \frac{dX}{dx} \quad (\text{III.1})$$

siendo éste el volumen de disolución o disolvente que atraviesa la membrana por unidad de tiempo y superficie.

El *flux* de permeado se define como la capacidad de la membrana en unas condiciones de operación concretas. Se trata de un flujo volumétrico convertible a flujo másico o molar.

La permeabilidad de una membrana (k) se define como el cociente entre el flux de permeado y la presión transmembranal (PTM). Está influida por las características intrínsecas de la membrana y de la disolución (composición, distribución de tamaños de partículas, densidad, viscosidad...), además de por las condiciones de operación (temperatura, presión...). Se obtiene mediante ensayos con agua ultrapura (osmotizada) para evitar los fenómenos de ensuciamiento (explicados más adelante), los cuales reducen el flux.

La selectividad se define como la capacidad de una membrana para separar unos componentes de otros. Se suele expresar mediante el *índice de rechazo* (R).

En el caso de disoluciones acuosas compuestas por un disolvente (habitualmente agua) y un soluto, resulta conveniente expresar la selectividad en términos del *índice de rechazo* (R) hacia el soluto, que se ve parcial o totalmente rechazado, mientras que el disolvente permea a través de la membrana. Este índice se define mediante:

$$R_i = \frac{(C_{iA} - C_{iP})}{C_{iA}} = \left(1 - \frac{C_{iP}}{C_{iA}} \right) \cdot 100 \quad (\text{III.3})$$

donde C_{iA} es la concentración del componente "i" en el soluto, y C_{iP} en el permeado.

Un *índice de rechazo* del 100% indica un rechazo completo del soluto por parte de la membrana.

3.2.4 Fenómenos de ensuciamiento

Se observa en la figura III.2 la evolución del flux de permeado a través de la membrana con y sin limpieza cuando se aplica una PTM constante, así como el efecto de la polarización por concentración.

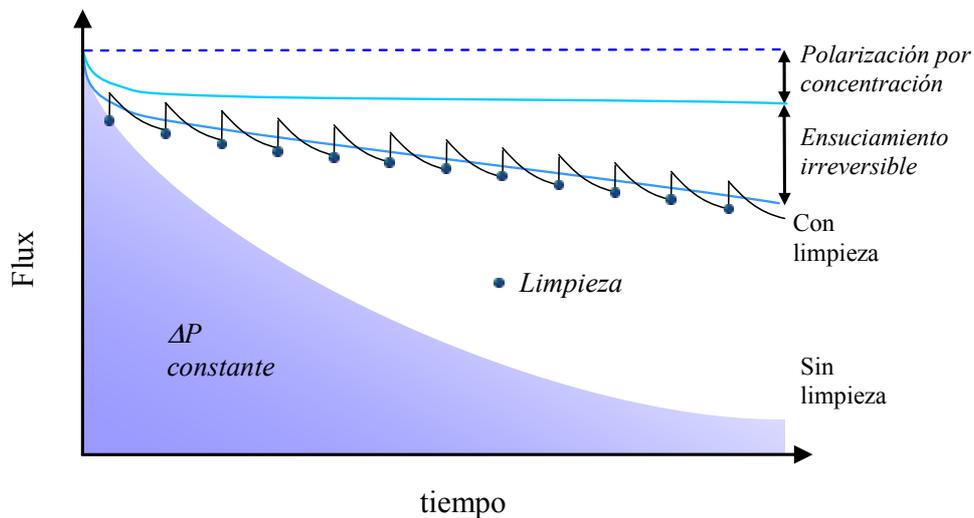


Figura III.3. Efecto de la limpieza de la membrana en el flujo a presión constante [5]

Los fenómenos de ensuciamiento se pueden diferenciar en dos grandes grupos: la polarización por concentración y el ensuciamiento propiamente dicho.

Polarización por concentración:

En ultrafiltración se retienen partículas coloidales, las cuales se encuentran cargadas negativamente. Hacia la superficie de la membrana se difunden tanto el disolvente como el soluto. Sin embargo, solamente la atraviesan el disolvente y algunos componentes de dicho soluto, pero no los coloides. De este modo, se acumulan partículas coloidales en la superficie de la membrana, generándose una zona de elevada concentración de dichas sustancias, denominada "capa de polarización". Si la concentración en esta zona alcanza un determinado valor, se comienza a formar una capa más espesa, denominada "capa gel", que supone una elevada resistencia al paso de las especies a su través, y por consiguiente a través de la membrana. En esta situación, la transferencia de materia hacia la membrana viene determinada por la difusión de especies a través de dicha capa, lo que supone un descenso del flux de permeado.

Además, la presencia de dichas especies cargadas, afecta a las propiedades de la membrana a causa de la polarización provocada en ella, alterando la selectividad de la misma, repercutiendo de manera negativa sobre el proceso.

Para combatir este fenómeno se puede recurrir a diversas estrategias, como pueden ser:

- Promover turbulencias para disgregar las moléculas acumuladas mediante el aumento de la velocidad de paso de la disolución alimento y/o colocación de separadores, incluso empleando membranas corrugadas de modo que se rompa la capa límite.
- Disminuir el flux que atraviesa la membrana, de modo que la zona concentrada se forme más lentamente.
- Aumentar la temperatura teniendo en cuenta que no se deben alcanzar límites en los que las moléculas se desnaturalizan.
- Añadir agentes químicos que disgreguen las moléculas acumuladas.

Este fenómeno se cuantifica mediante el “módulo de polarización por concentración”:

$$C_p = \frac{C_{im}}{C_{iA}} \quad (III.4)$$

Siendo:

C_{im} : concentración de la especie objetivo en la superficie de la membrana.

C_{iA} : concentración de dicha especie en el seno de la disolución alimento.

Una vez en el estado estacionario, aparece difusión desde la capa gel hacia la corriente de rechazo a causa del gradiente de concentraciones existente.

En dicho estado estacionario, el transporte de materia a través de la capa límite (J_V) es igual a la diferencia entre el flux convectivo hacia la membrana y el difusivo que se aleja de ella, según la ley de Fick:

$$J_P \cdot C_{iP} = J_V \cdot C_{iA} - D_i \cdot \frac{dC_i}{dx} \quad (III.5)$$

Siendo:

C_{iP} : concentración de la especie objetivo en la corriente de permeado.

D_i : difusividad de dicha especie.

dC_i/dx : variación de la concentración de dicha especie con la posición.

Ensuciamiento:

Este fenómeno disminuye el flujo de soluto permeado conforme se produce la separación de la disolución alimento, con lo que disminuye la selectividad (aumenta el *factor de rechazo*) y aumenta la PTM. Las causas de dicho ensuciamiento son las siguientes:

- Adsorción sobre la superficie de la membrana y/o en el interior de los poros, debido a afinidades químicas.
- Obstrucción de poros debido al bloqueo por parte de moléculas de tamaño similar al MWCO, o por acumulación de moléculas que, individualmente, pueden permear.
- Formación de capa gel, que es una red entre las macromoléculas de soluto y el disolvente, a causa de una elevada concentración de soluto en la corriente alimento. Este efecto se puede reducir mediante el aumento de la velocidad de paso del fluido, cosa que provoca turbulencias que arrastran la capa gel.
- Formación de precipitados en la superficie de la membrana y/o en el interior de los poros, a causa de la acumulación de soluto o la adhesión de materia en suspensión.

En los procesos impulsados por gradientes de presión, como es la UF empleada en el presente Trabajo de Final de Grado (TFG), el flujo convectivo a través de la membrana se define como:

$$J_p = \frac{\Delta P}{(\mu \cdot R_T)} \quad (\text{III.6})$$

donde ΔP es la PTM, μ es la viscosidad del fluido y R_T la resistencia total, formada por la suma de las resistencias presentes en el proceso, que son:

- R_m (mecánica): resistencia intrínseca debida a la estructura y al material de la membrana. Idealmente, sería la única resistencia en ausencia de soluto.
- R_{pc} (polarización por concentración): resistencia debida a la polarización por concentración.
- R_g (capa gel): debida a una concentración de soluto tal que se alcance su concentración de gelificación, formándose la denominada *capa gel* sobre la superficie de la membrana.
- R_{bp} (bloqueo de poros): en las membranas porosas ciertos solutos pueden bloquear los poros.
- R_{ads} (adsorción): debido a afinidades químicas, pueden producirse fenómenos de adsorción en la superficie y/o en el interior de los poros.

De este modo, se cumple:

$$R_T = R_m + R_{pc} + R_g + R_{bp} + R_{ads} \quad (\text{III.7})$$

El fenómeno de ensuciamiento puede ser reversible o irreversible, siendo el último caso más frecuente cuando se bloquean los poros.

3.2.5 Protocolos de limpieza

Los fenómenos de ensuciamiento son diversos y complejos, afectados por multitud de variables como cargas eléctricas, interacciones hidrofóbicas, pH, temperatura, velocidad de flujo... afectan de forma relevante a las interacciones membrana-soluto. Por ello, dependiendo del caso a tratar, se emplean diferentes métodos, pudiéndose combinar entre ellos para obtener la mejor limpieza posible con el menor o nulo daño a la membrana.

A continuación, se exponen los métodos de limpieza más comunes:

Físicos: son menos eficaces que los químicos, pero no generan residuos.

- Aumento de la velocidad de la corriente alimento para arrastrar partículas.
- Inversión en la dirección del flujo mediante la aplicación de una presión en el lado del permeado, superior a la existente en el lado del alimento. De este modo se pretende eliminar la capa de partículas que dificulta el flujo, empujándola hacia la corriente alimento. Estos procesos se denominan back-washing, back-flushing, back-pulsing y back-shocking. Son aplicables únicamente a MF y a membranas abiertas de UF.
- Ultrasonidos.
- Eléctrica, que emplea un campo eléctrico que provoca que las partículas cargadas migren en la dirección de dicho campo. Se puede aplicar sin interrumpir el proceso, pero son necesarias membranas conductoras y una colocación especial del módulo con los electrodos.

Químicos: se trata de los métodos más empleados.

- Ácidos frente a partículas inorgánicas.
- Bases frente a partículas orgánicas.
- Desinfectantes y enzimas frente a agentes biológicos.
- Acomplexantes para reducir la dureza del agua y mantener los depósitos en suspensión.
- Tensoactivos frente a especies poco solubles en agua.
- Otros para acciones específicas: antiespumantes, inhibidores de corrosión...

Se considera que la limpieza es más efectiva cuanto mayor es el grado de recuperación de la permeabilidad de la membrana.

3.3. SELECCIÓN DEL PROCESO DE MEMBRANA MÁS ADECUADO PARA LA CLARIFICACIÓN

Debido al tamaño molecular de las especies que se desean retener en esta aplicación, como son sólidos en suspensión, macromoléculas y pigmentos, es fácil observar que la elección adecuada es el empleo de membranas de UF. De este modo, se conservan los azúcares e iones presentes en la disolución original, pero obteniendo unas propiedades organolépticas mucho más suaves debido a la ausencia de las moléculas rechazadas por la membrana.

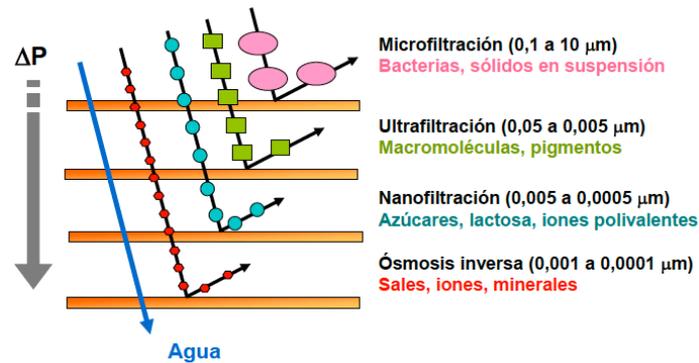


Figura III.3 Rango de separación de los procesos impulsados por presión [4]

Los clarificados de zumos son empleados en mezclas, para aportar sabor y algunos nutrientes sin que el resultado sea un fluido excesivamente espeso. No hay que olvidar la importancia de la corriente de rechazo, ya que se trata de un concentrado rico en sustancias nutritivas que pueden ser empleadas en otros preparados alimentarios.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 TÉCNICAS ANALÍTICAS

En el presente apartado se exponen las técnicas empleadas para la determinación de parámetros característicos relativos a la eficacia del proceso de membranas empleado, en el ámbito de la clarificación.

4.1.1. Índice de turbidez

Este parámetro indica la presencia de sólidos en suspensión de forma directamente proporcional.

Su determinación está basada en los métodos nefelométricos, los cuales se basan a su vez en la comparación de la intensidad de la luz dispersada por la muestra en condiciones definidas, y la dispersada por una disolución patrón de referencia en idénticas condiciones. Así, y atendiendo al método descrito en la norma UNE-EN 27027, la turbidez es determinada mediante la intensidad de luz dispersada en un ángulo de 90º, procedente de un haz de luz que se hace pasar a través de la muestra. La medida de la turbidez se expresa en unidades nefelométricas de turbidez (NTU). Para su determinación se ha empleado un turbidímetro DINKO, modelo D-112, cuya hoja técnica se adjunta en el *Anexo I*.

4.1.2. Concentración de azúcar

Esta medida se emplea para determinar la fracción de materia seca disuelta en un líquido, en porcentaje. En el caso de los zumos de fruta, esta medida indica el porcentaje de azúcar, referidos a la densidad del líquido.

Se mide analizando los grados Brix mediante el empleo de un refractómetro Iyymen, modelo NR151, cuya hoja técnica se adjunta en el *Anexo I*.

Este dispositivo dispone de un compensador automático de temperatura a 25 °C, para evitar dependencia de la temperatura, la cual modifica la densidad.

4.1.3. Conductividad

La medida de conductividad es una medida indirecta de la cantidad de sólidos disueltos, la cual puede obtenerse según la relación:

$$STD \left[\frac{mg}{L} \right] = 0.8 \cdot \Lambda_0 \left[\frac{\mu S}{cm} \right] \quad (IV.1)$$

La determinación de la conductividad (Λ_0) se realiza mediante electrometría con un electrodo conductimétrico CRISON, modelo CM 35, con una célula de referencia 50-61, cuya hoja técnica se adjunta en el *Anexo I*. Esta célula está provista de un compensador automático de temperatura a 25°C, de acuerdo a la norma UNE-EN 27888, ISO 7888 y ASTM D1125-95, expresándose la medida en $\mu S \cdot cm^{-1}$.

4.1.4. pH

El pH de una disolución es una medida de la concentración de iones hidroxilo (H_3O^+) presentes en la misma. Esta medida se realiza mediante electrometría con electrodo selectivo, un pH-metro CRISON, modelo GLP 22, equipado con un electrodo de referencia 52-03 con regulación automática de temperatura, cuya hoja técnica se adjunta en el *Anexo I*. Este dispositivo está diseñado de acuerdo a la norma ASTM D1293-99 e ISO 10523. La medida de pH se ha realizado con Para el correcto empleo de este equipo es necesario realizar diariamente el calibrado con las disoluciones patrón de pH 4.01 y pH 7.00 (DIN 19266).

4.1.5. Factor de Reducción de Volumen

Se trata de la relación entre el volumen de alimento y el volumen rechazado por la membrana, de este modo:

$$FRV = \frac{V_A}{V_R} \quad (IV.2)$$

4.1.6. Sólidos Totales

Una disolución puede contener tanto partículas en suspensión como compuestos solubilizados. De este modo, se diferencia entre materia sedimentable (Ss), en suspensión (SS) y totales disueltos (STD). El conjunto de todos ellos son los sólidos totales (ST).

La determinación de los sólidos totales se ha realizado mediante métodos gravimétricos, que permiten determinar la concentración por diferencia de peso entre las muestras, antes y después de filtrado y secado. De este modo, y de acuerdo al procedimiento descrito en la norma UNE-EN 872, se filtra a vacío un volumen conocido de muestra, empleando filtros de vidrio borosilicatado de 47 mm de diámetro y un tamaño de poro de 1.2 μm . Finalizado el filtrado, el filtro con la muestra húmeda se pesa y se introduce en una estufa a una temperatura de 105°C durante una hora. Concluida esta fase, se retira el filtro con la muestra seca y se espera a que alcance el equilibrio con el aire para finalmente pesarlo de nuevo. Así, por diferencia de pesada es posible hallar la cantidad de ST presentes en la muestra analizada. Su concentración está determinada por la ecuación:

$$SS \left[\frac{mg}{L} \right] = 1000 \cdot \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{IV.3})$$

siendo m_1 la masa húmeda, m_2 la masa seca, y V el volumen de la alícuota.

4.2. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se muestra en este apartado el tipo de estudio estadístico empleado para la posterior obtención de las superficies de respuesta de las variables representativas de este proceso (flux de permeado e índice de turbidez), en función de las variables manipuladas (presión y temperatura).

Response Surface Design Attributes

Response Surface Design Attributes
 Design class: Response Surface
 Design name: 3-level factorial design: 3²
 File name: Flux _ Design File.sfx

Base Design
 Number of experimental factors: 2
 Number of blocks: 1
 Number of responses: 1
 Number of runs: 12, including 3 centerpoints per block
 Error degrees of freedom: 6
 Randomized: Yes

Factors	Low	High	Units	Continuous
Presión	1	3	[bar]	Yes
Temperatura	20	30	[°C]	Yes

Responses	Units
Flux	[L/(h m ²)]

The StatAdvisor
 You have created a 3-level factorial design: 3² design which will study the effects of 2 factors in 12 runs. The design is to be run in a single block. The order of the experiments has been fully randomized. This will provide protection against the effects of lurking variables.

Figura IV.1. Atributos de diseño de la superficie de respuesta para el flux de permeado en la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura IV.1 se observan los parámetros introducidos en el programa de análisis estadístico *Statgraphics Centurion VI*, teniendo como variable de respuesta el flux de permeado.

 Response Surface Design Attributes

Response Surface Design Attributes
 Design class: Response Surface
 Design name: 3-level factorial design: 3²
 File name: <Untitled>

Base Design
 Number of experimental factors: 2
 Number of blocks: 1
 Number of responses: 1
 Number of runs: 12, including 3 centerpoints per block
 Error degrees of freedom: 6
 Randomized: Yes

Factors	Low	High	Units	Continuous
Presión	1	3	[bar]	Yes
Temperatura	20	30	[°C]	Yes

Responses	Units
Índice de Turbidez	[NTU]

The StatAdvisor
 You have created a 3-level factorial design: 3² design which will study the effects of 2 factors in 12 runs. The design is to be run in a single block. The order of the experiments has been fully randomized. This will provide protection against the effects of lurking variables.

Figura IV.2. Atributos de diseño de la superficie de respuesta para el índice de turbidez en la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Del mismo modo, es posible ver en la figura IV.2 los parámetros introducidos, teniendo en este caso como variable de respuesta el índice de turbidez.

4.3. PLANTA PILOTO

A continuación, se detallan las principales características de la planta piloto empleada, así como las experiencias llevadas a cabo con ella.

4.3.1. ESQUEMA DE LA PLANTA PILOTO

La planta piloto está compuesta por los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento: donde se deposita la disolución alimento, así como la corriente de rechazo recirculada.
- Agitador: asegura una distribución homogénea del alimento en el tanque de almacenamiento.
- Bomba impulsora: se encarga de asegurar que llegue el caudal deseado al módulo de membranas.
- Módulo de membranas: equipado con dos membranas con un área efectiva de $9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, las cuales operan en paralelo y permiten realizar la clarificación. Posee tres salidas, una para la corriente de rechazo (recirculada) y dos para las corrientes de permeado (a envasado o al siguiente proceso).
- Conducciones: por las cuales fluye la disolución problema (zumo de piña).

Seguidamente se muestra la estructura de la planta piloto mediante fotografías tomadas en el laboratorio.



Figura IV.3. Vista frontal de la planta piloto

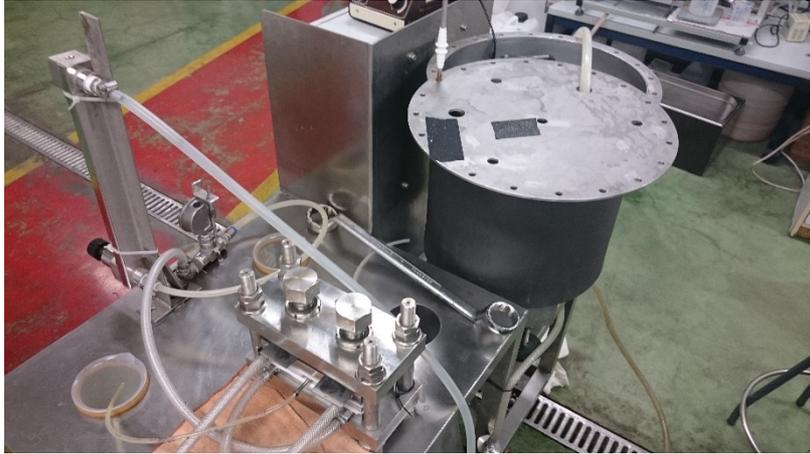


Figura IV.4. Vista trasera de la planta piloto



Figura IV.5. Detalle de la planta piloto: módulo de membranas

4.3.2. ENSAYOS EN PLANTA PILOTO

El procedimiento a seguir para la consecución de los objetivos anteriormente expuestos, así como las técnicas empleadas, se describen a continuación.

4.3.2.1. Determinación del coeficiente de permeabilidad de las membranas

Para iniciar la experiencia, es imprescindible estudiar la permeabilidad de las membranas nuevas, utilizando agua osmotizada. Los ensayos se llevan a cabo a diferentes presiones (**1 bar, 2 bar y 3 bar**), analizándose el flux de permeado obtenido en cada caso.

4.3.2.2. Estudio de las condiciones de operación

Seguidamente, se estudian las condiciones de operación óptimas para llevar a cabo la clarificación del zumo de piña. Para cumplir con este objetivo, se realizan ensayos con cada membrana a tres presiones y tres temperaturas diferentes, analizando el índice de turbidez y la concentración de azúcar del permeado resultante.

Una vez finalizada la experiencia anterior, la membrana ha sufrido el fenómeno de ensuciamiento, por lo que es necesario llevar a cabo una limpieza. Para ello, se deposita la membrana en una disolución de hipoclorito sódico a 1ppm, durante 24 h. Tras finalizar la limpieza, se estudia la nueva permeabilidad de la membrana.

Con los datos obtenidos, se elige de la membrana más adecuada para esta aplicación.

4.3.2.3. Ensayos de ensuciamiento

Se procede ahora a realizar un estudio en continuo con la membrana elegida en las condiciones óptimas de operación, para comprobar la evolución de su comportamiento con respecto a la disolución de zumo de piña. Para ello se analizan el índice de turbidez y la concentración de azúcar tanto del alimento como del permeado.

Una vez concluida la experiencia anterior, la membrana de nuevo ha sufrido el fenómeno de ensuciamiento, por lo que se requiere realizar de nuevo una limpieza. Para ello, se deposita durante una semana en un baño de agua osmotizada. Tras finalizar la limpieza, se estudia la nueva permeabilidad de la membrana.

Nuevamente se realiza un estudio en continuo con la misma membrana, para comprobar la evolución de su comportamiento con respecto a la disolución de zumo de piña, en las condiciones óptimas de operación. Esta vez se analizan además del índice de turbidez y la concentración de azúcar, la conductividad y el pH, tanto del alimento como de las muestras de permeado.

Finalmente, se analiza la cantidad de sólidos totales tras el proceso de clarificación mediante UF, y con ello el porcentaje de reducción de los mismos con respecto a la disolución inicial de zumo de piña.

4.4. DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN SEMIINDUSTRIAL

Con todas las experiencias realizadas, se procede a realizar el tratamiento de datos y diseño de una planta semiindustrial capaz de llevar a cabo el proceso estudiado.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se aborda el análisis de los resultados obtenidos en las experiencias realizadas en laboratorio, los cuales son también expuestos a continuación.

5.1. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD DE LAS MEMBRANAS (K)

Se realiza primeramente el estudio de la permeabilidad de las membranas nuevas a diferentes presiones, empleando para ello agua osmotizada, la cual, al estar libre de iones, permite obtener una correcta medida de este parámetro.

Seguidamente, en la figura V.1, se expone la representación gráfica de los datos experimentales obtenidos para cada membrana.

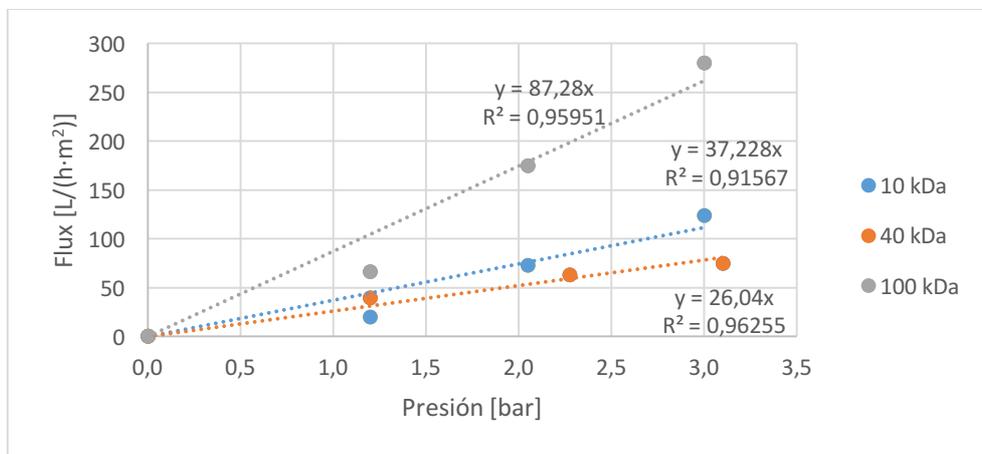


Figura V.1. Evolución del flux con la presión para cada membrana empleando agua ultrapura como efluente

Como se observa en la figura V.1, destaca sobre el resto el flux de permeado proporcionado por la membrana de 100 kDa, cosa lógica debido a su mayor MWCO.

Además de esto, es posible observar cómo la membrana de 10 kDa, a pesar de poseer un MWCO inferior al de la membrana de 40 kDa, proporciona un flux de permeado superior a esta última. Dicho fenómeno queda justificado por el mayor grosor de la capa activa de la membrana de 40 kDa, la cual ofrece una mayor resistencia a la transferencia de materia, hasta el punto de compensar el su mayor MWCO. El hecho de que la membrana de 10 kDa ofrezca un mayor flux de permeado también sugiere pensar que la mayor hidrofobicidad de la misma frente a la membrana de 40 kDa, debido a sus composiciones diferentes, puede ser uno de los causantes de este fenómeno.

Sin embargo, una vez se emplean disoluciones, los solutos ensucian rápidamente las membranas de menor MWCO, por lo que la de 10 kDa resulta ineficaz frente a las otras. Por ello, queda descartada y los posteriores ensayos se centran en el estudio de las membranas de 40 kDa y 100 kDa.

A continuación, en la tabla V.1, se exponen los coeficientes de permeabilidad (k) obtenidos para cada membrana en base a los datos de sus flujos, mostrados anteriormente en la Figura V.I.

Tabla V.1. Permeabilidad de cada membrana

Membrana	k [L/(m²·h·bar)]
10 kDa	37.23
40 kDa	26.04
100 kDa	87.28

Resulta lógico que un mayor flux implica una mayor permeabilidad de la membrana, resultando así los datos expuestos en la *Tabla V.1*, coherentes con la teoría.

5.2 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

Seguidamente se exponen los resultados que permiten la dilucidación de las condiciones óptimas de operación, a partir de las cuales es posible seleccionar la membrana que mejor se adapte a las mismas.

Empleando la disolución a tratar, zumo de piña concentrado, se analizan diversos parámetros relevantes respecto a la clarificación de zumo, los cuales han sido descritos con anterioridad en la introducción de este documento.

5.2.1. Flux (J_p)

Se analiza primeramente la evolución flux de permeado ofrecido por ambas membranas.

Seguidamente, en la figura V.2, se expone la representación gráfica correspondiente a los datos experimentales obtenidos para la membrana de 40 kDa.

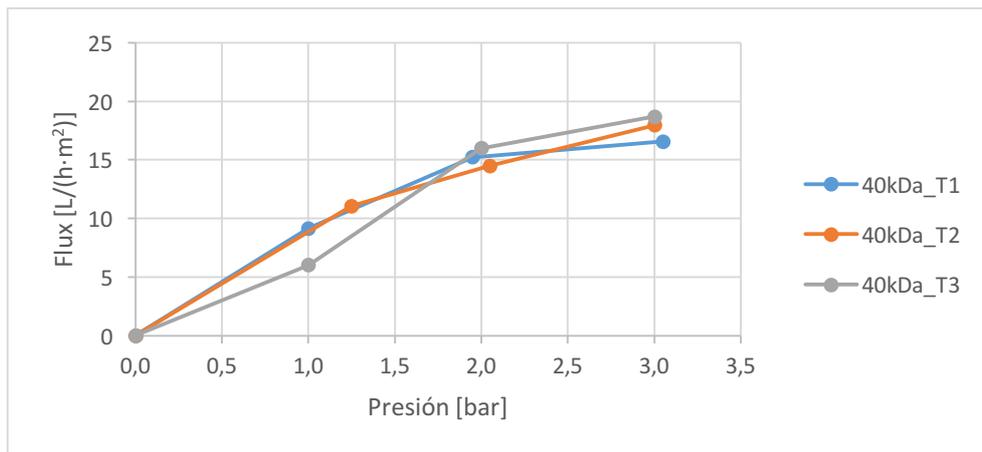


Figura V.2. Evolución del flux con la presión y la temperatura para la membrana de 40 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura V.2 se aprecia cómo el aumento de la presión se ve reflejado en un aumento del flux de permeado, siempre que no se alcance la presión crítica. Este efecto también se da con el aumento de la temperatura, debido a la disminución de la densidad y viscosidad de la disolución.

Sin embargo, en algunos casos se aprecia cómo no se cumple esta norma. Esto es debido a que el estudio se ha realizado en continuo por lo que, a la hora de ensayar temperaturas elevadas, las membranas ya habían sufrido ensuciamiento. De ahí la disminución de la tendencia ascendente del flujo en condiciones en las que debería continuar igual.

Seguidamente, en la figura V.3, se expone la representación gráfica correspondiente a los datos experimentales obtenidos para la membrana de 100 kDa.

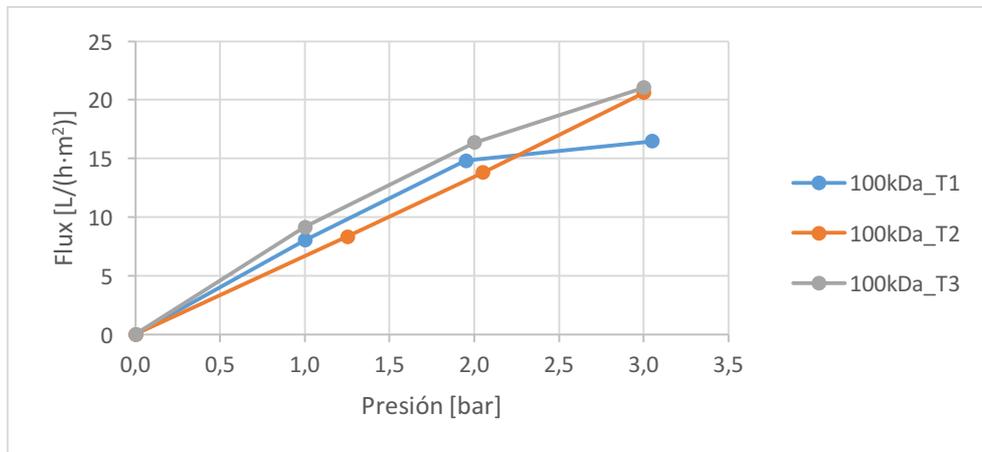


Figura V.3. Evolución del flux con la presión y la temperatura para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura V.3 es posible observar que la membrana de 100 kDa presenta la misma tendencia que la de 40 kDa en cuanto a la evolución del flux de permeado con la presión y la temperatura.

De las muestras de permeado obtenidas, se realizan medidas de variables indicativas de la efectividad de la tecnología empleada en su rango de aplicación, como se muestra en los puntos siguientes.

5.2.2. Concentración de azúcares (°Brix)

Seguidamente, en la figura V.4, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre la concentración de azúcares de la corriente de permeado en la membrana de 40 kDa.

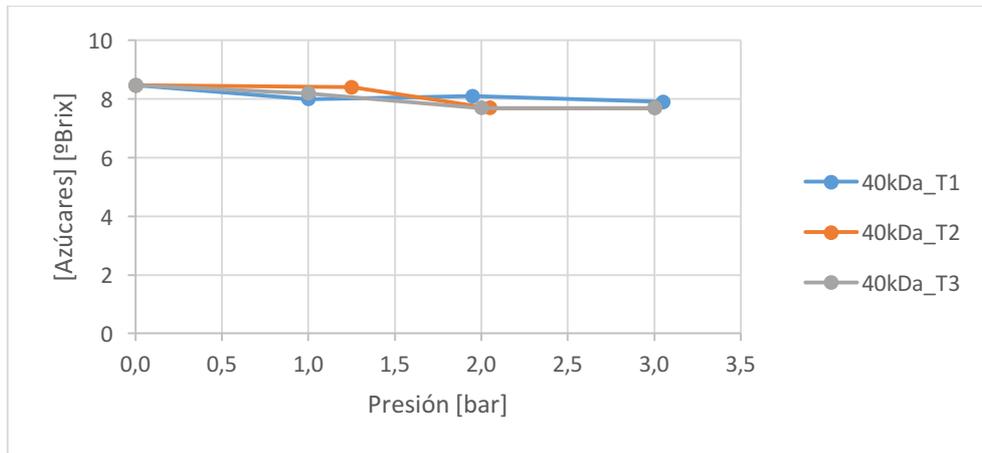


Figura V.4. Evolución de la concentración de azúcares con la presión y la temperatura para la membrana de 40 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Se observa en la figura V.4 cómo los °Brix apenas varían, situándose siempre en valores cercanos al 8% de materia seca (azúcares en el caso de zumos).

A continuación, en la figura V.5, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre la concentración de azúcares de la corriente de permeado en la membrana de 100 kDa.

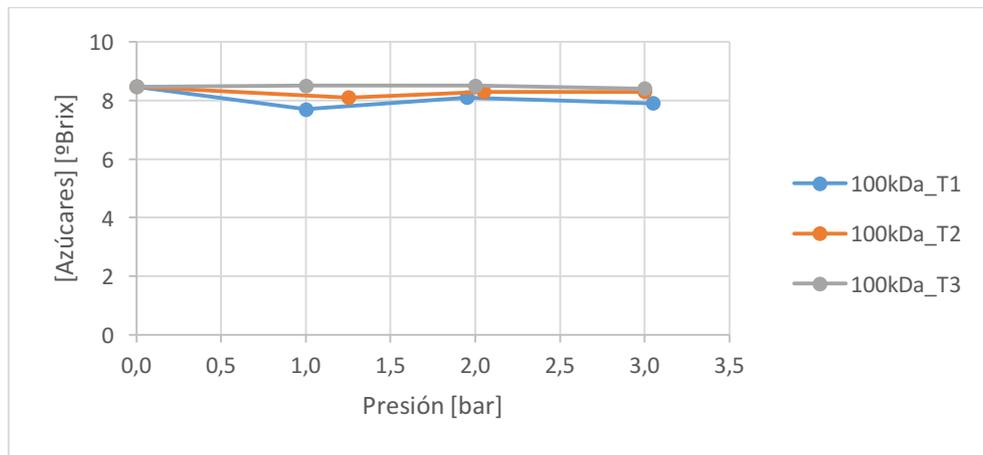


Figura V.5. Evolución de concentración de azúcares con la presión y la temperatura para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura V.5 es posible observar que la membrana de 100 kDa presenta la misma tendencia que la de 40 kDa en cuanto a la evolución de la concentración de azúcares en el permeado con la presión y la temperatura.

En comparación con la concentración de azúcares de la disolución original, para cada membrana (8.47° Brix), la corriente de permeado apenas presenta reducción de dicha concentración.

Esto es debido a que, según lo expuesto anteriormente en la introducción, con membranas de UF no es posible retener este tipo de moléculas. Por ello, la reducción de °Brix no es un factor significativo a la hora de escoger una de estas dos membranas.

La cantidad perdida, puede haberse visto adsorbida en la superficie de la membrana, en el interior de los poros, o en los sólidos en suspensión, rechazados por las membranas.

5.2.3. Índice de turbidez (NTU)

Seguidamente se exponen en la tabla V.5 los datos referentes al índice turbidez de la corriente de permeado.

A continuación, en la figura V.6, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre el índice de turbidez de la corriente de permeado en la membrana de 40 kDa.

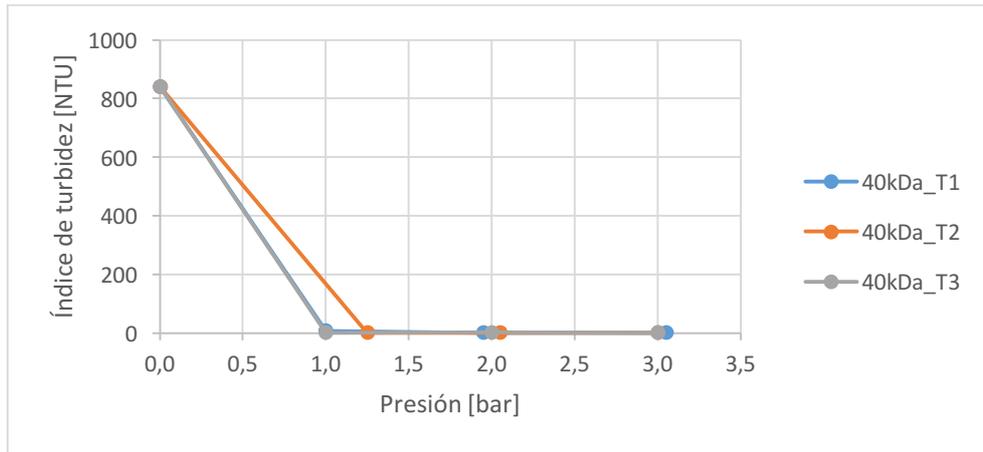


Figura V.6. Evolución del índice de turbidez con la presión y la temperatura para la membrana de 40 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Seguidamente, en la figura V.8, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre el índice de turbidez de la corriente de permeado en la membrana de 100 kDa.

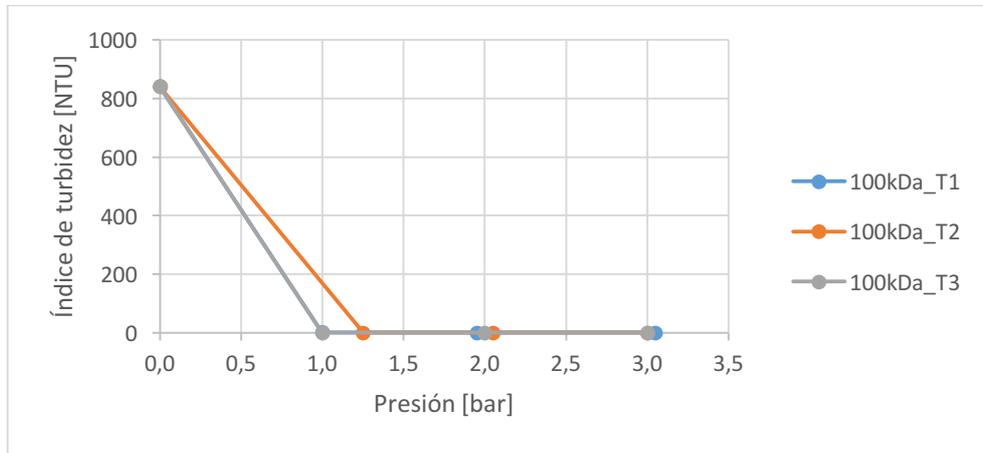


Figura V.7. Evolución del índice de turbidez con la presión y la temperatura para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Queda reflejado en las figuras V.6 y V.7 que el índice de turbidez apenas varía, situándose en valores cercanos a **0.5 NTU**.

En comparación con la disolución original, **el índice de turbidez se reduce prácticamente en su totalidad**.

Esto es debido a que, según lo expuesto anteriormente en la introducción, con membranas de UF es posible retener este tipo de moléculas, es decir, sólidos en suspensión, macromoléculas y pigmentos.

También se percibe un comportamiento similar de ambas membranas, por lo que la reducción del índice de turbidez no es un factor significativo a la hora de escoger una de estas dos.

5.2.4. Estudio de la evolución de los parámetros expuestos anteriormente en función del índice de rechazo de las membranas

En los puntos anteriores han sido analizados diversos parámetros en función de sus concentraciones, mas es posible realizar el estudio de su evolución teniendo en cuenta otro parámetro, el índice de rechazo de la membrana (en adelante %R), definido según la ecuación V.1.

$$R [\%] = \frac{X_0 - X_t}{X_0} \quad (V.1)$$

5.2.4.1. Concentración de azúcares (%R)

A continuación, se exponen en la tabla V.6 los datos referentes a la concentración de azúcares de la corriente de permeado, expresado como porcentaje rechazado.

Seguidamente, en la figura V.8, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre la concentración de azúcares de la corriente de permeado en la membrana de 40 kDa, en función del índice de rechazo.

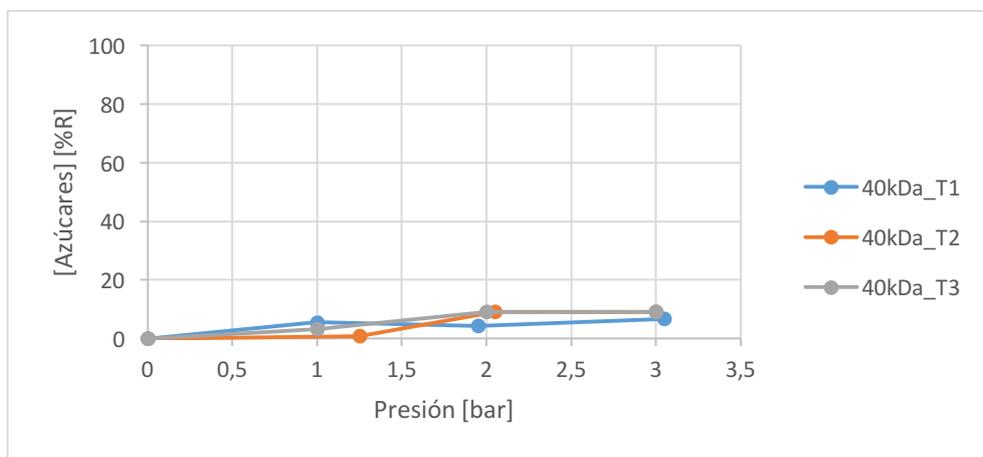


Figura V.8 Evolución de la concentración de azúcares con la presión y la temperatura, empleando zumo de piña como efluente, en función del porcentaje de rechazo de la membrana de 40 kDa

A continuación, en la figura V.9, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre la concentración de azúcares de la corriente de permeado en la membrana de 100 kDa, en función del índice de rechazo.

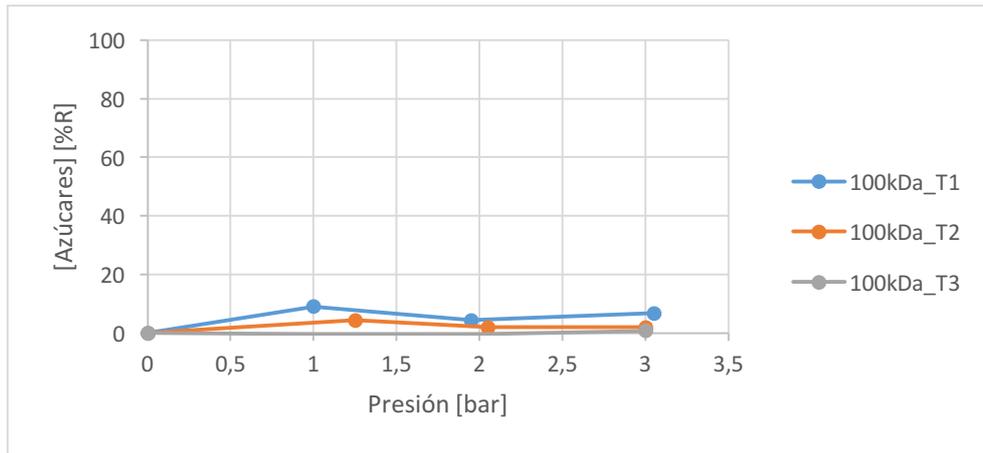


Figura V.9 Evolución de la concentración de azúcares con la presión y la temperatura, empleando zumo de piña como efluente, en función del porcentaje de rechazo de la membrana de 100 kDa

Como es posible observar en las figuras V.8 y V.9, los resultados experimentales obtenidos concuerdan con los predichos por la teoría, como se ha comentado en el punto 5.2.2.

El índice de rechazo a los azúcares por parte de las membranas de ultrafiltración, resulta muy bajo, debiéndose ese leve grado de retención a fenómenos de adsorción en la superficie de la membrana, en el interior de los poros, o en los sólidos en suspensión, rechazados por las membranas.

5.2.4.2. Índice de turbidez (%R)

Seguidamente se exponen en la tabla V.7 los datos referentes al índice de turbidez de la corriente de permeado, expresado como porcentaje rechazado.

A continuación, en la figura V.10, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre el índice de turbidez de la corriente de permeado en la membrana de 40 kDa, en función del índice de rechazo.

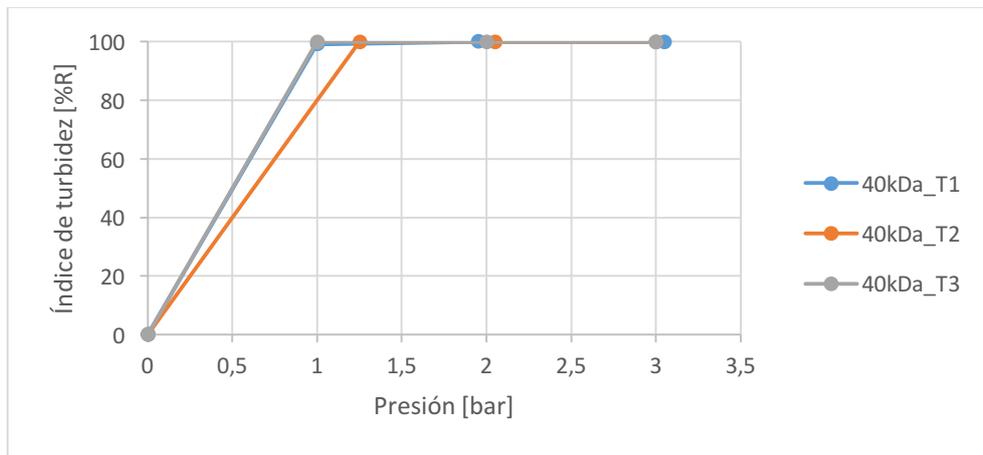


Figura V.10 Evolución del índice de turbidez con la presión y la temperatura, empleando zumo de piña como efluente, en función del porcentaje de rechazo de la membrana de 40 kDa

Seguidamente, en la figura V.11, se expone la representación gráfica correspondiente a la influencia de la presión y la temperatura sobre el índice de turbidez de la corriente de permeado en la membrana de 100 kDa, en función del índice de rechazo.

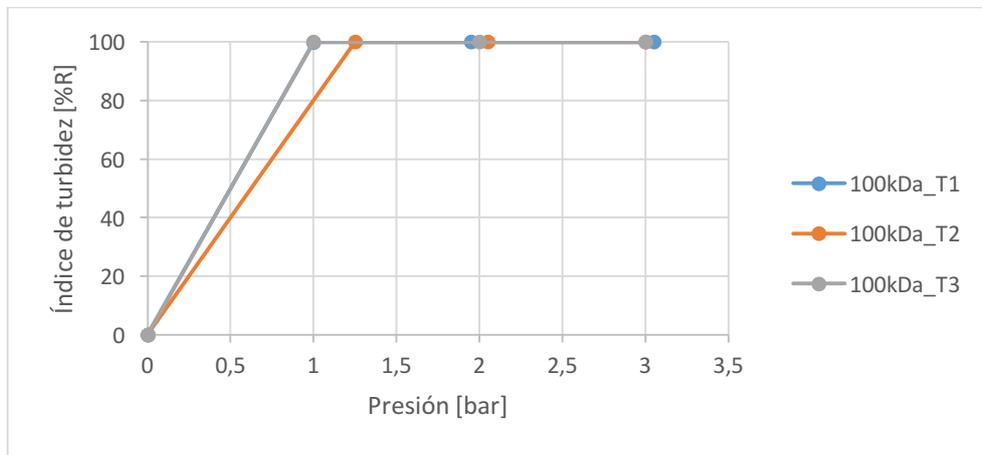


Figura V.11 Evolución del índice de turbidez con la presión y la temperatura, empleando zumo de piña como efluente, en función del porcentaje de rechazo de la membrana de 100 kDa

Como es posible observar en las figuras V.10 y V.11, los resultados experimentales obtenidos concuerdan con los predichos por la teoría, como se ha comentado en el punto 5.2.3.

El índice de rechazo a las partículas causantes de la turbidez en el zumo de piña por parte de las membranas de ultrafiltración, resulta muy elevado, casi total, debiéndose ese gran grado de retención a que este tipo de membranas poseen un MWCO capaz de retener sólidos en suspensión, macromoléculas y pigmentos.

5.2.5. Limpieza de las membranas

Tras realizar la anterior experiencia para hallar las condiciones de operación óptimas, es necesario realizar una limpieza de las membranas, ya que al emplear la disolución problema, ha sufrido los efectos del ensuciamiento, tanto de polarización por concentración (capa gel), como de ensuciamiento propiamente dicho (adsorción, bloqueo de poros...).

Por ello se realiza una limpieza con un baño consistente en una disolución de agua osmotizada con 1 ppm de Cloro libre durante un día.

Los resultados de la permeabilidad tras esta limpieza se exponen a continuación para ambas membranas, siendo k_0 el coeficiente de permeabilidad inicial y k_1 , tras la primera limpieza.

Tabla V.2. Permeabilidad inicial y posterior a la limpieza de las membranas de 40 y 100 kDa

Membrana	k_0 [L/(m ² ·h·bar)]	k_1 [L/(m ² ·h·bar)]
40 kDa	26.04	16.77
100 kDa	87.28	106.70

En la *Tabla V.2* se observa cómo tras la limpieza, la membrana de 40 kDa opera aproximadamente a un 65% de su capacidad inicial.

Sin embargo, la membrana de 100 kDa ha recuperado aproximadamente su capacidad original tras la limpieza realizada.

Así pues, debido su menor ensuciamiento, mejor regeneración y menor coste, **la membrana seleccionada entre las tres propuestas inicialmente, es la de 100 kDa**. Por ello, a partir de este punto, las experiencias se centran en la caracterización del funcionamiento de dicha membrana.

5.3. ENSAYOS DE ENSUCIAMIENTO

En este apartado se muestran los resultados de los ensayos de ensuciamiento realizados durante el desarrollo de la fase experimental del presente proyecto.

5.3.1. Primer ensayo de ensuciamiento

Finalizados los estudios mostrados anteriormente, se realiza un estudio del ensuciamiento de la membrana seleccionada, la de 100 kDa, con el objetivo de analizar su comportamiento durante un periodo prolongado de funcionamiento continuo.

En este ensayo se opera a una temperatura de 18.3 °C y a una presión de 3 bar.

El volumen inicial en el tanque es de 7.5 L

Del mismo modo que en el anterior ensayo, se analiza el flux, así como la turbidez y la concentración de azúcares de la corriente de permeado.

5.3.1.1. Flux (J_p)

A continuación, se muestran en la Tabla V.9 los datos relativos a la evolución del flux durante esta experiencia.

Seguidamente, en la figura V.12, se expone la representación gráfica correspondiente a la evolución del flux con el tiempo en el primer ensayo de ensuciamiento, para la membrana de 100 kDa.

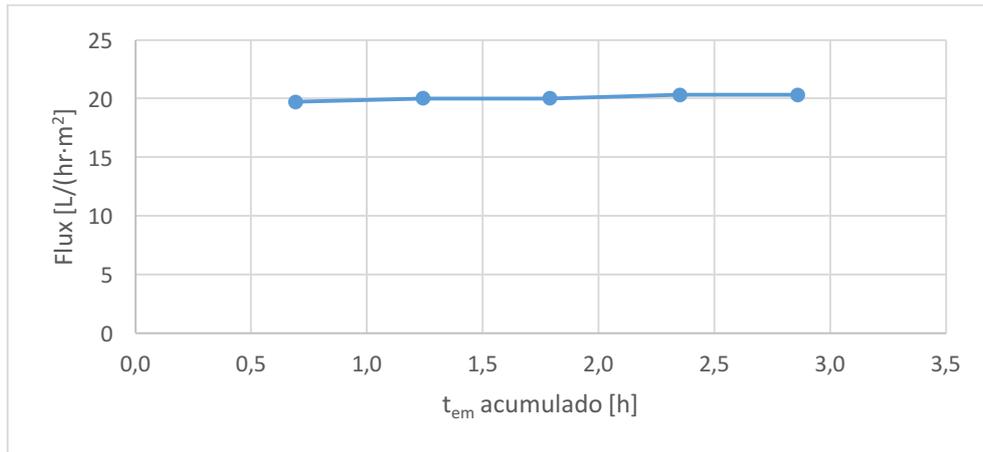


Figura V.12. Evolución del flux con el tiempo para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Como es posible observar en la figura V.12, los resultados experimentales obtenidos mantienen una tendencia lineal, lo que indica un **bajo grado de ensuciamiento** de la membrana en las condiciones de operación empleadas, a lo largo de la experiencia.

Este hecho refuerza la idea de que la mejor de las membranas propuestas es la seleccionada, la de 100 kDa.

5.3.1.2. Concentración de azúcares (°Brix)

A continuación, se pueden observar en la tabla V.10 los datos relativos a la evolución de la concentración de azúcares presentes en la corriente de permeado durante esta experiencia.

Seguidamente, en la figura V.13, se expone la representación gráfica correspondiente a evolución de los °Brix en el alimento y el permeado, para la membrana de 100 kDa.

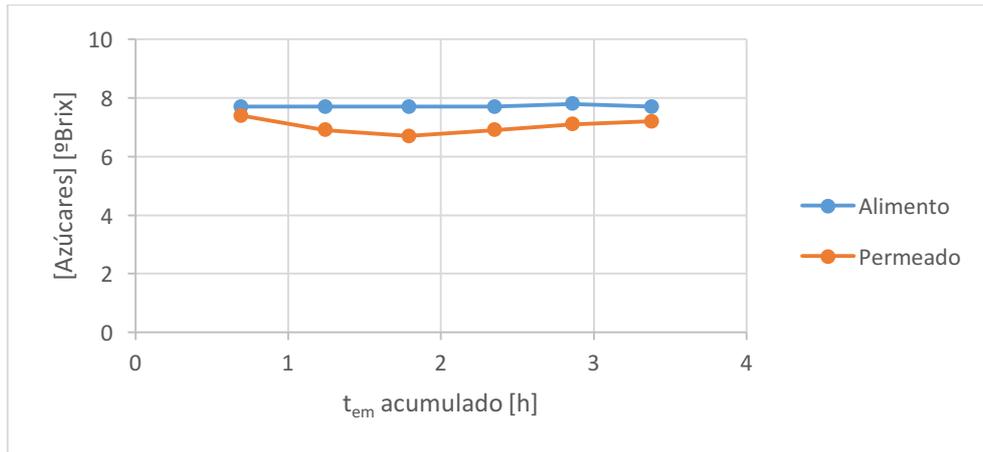


Figura V.13. Evolución de la concentración de azúcares en el alimento y el permeado para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Se observa en la figura V.13 cómo la concentración de azúcares apenas varía, situándose aproximadamente en valores entre el 7% y el 8% de materia seca (azúcares en el caso de zumos).

En comparación con la concentración de azúcares de la disolución original, apenas es apreciable una leve disminución en la corriente de permeado.

Esto es debido a que, según lo expuesto anteriormente en la introducción, con membranas de UF no es posible retener este tipo de moléculas.

5.3.1.3. Índice de turbidez (NTU)

En cuanto al índice de turbidez de la corriente de permeado, en la tabla V.11 se exponen los datos relativos a su evolución durante esta experiencia.

Seguidamente, en la figura V.14, se expone la representación gráfica correspondiente a la evolución del índice de turbidez en el alimento y el permeado, para la membrana de 100 kDa.

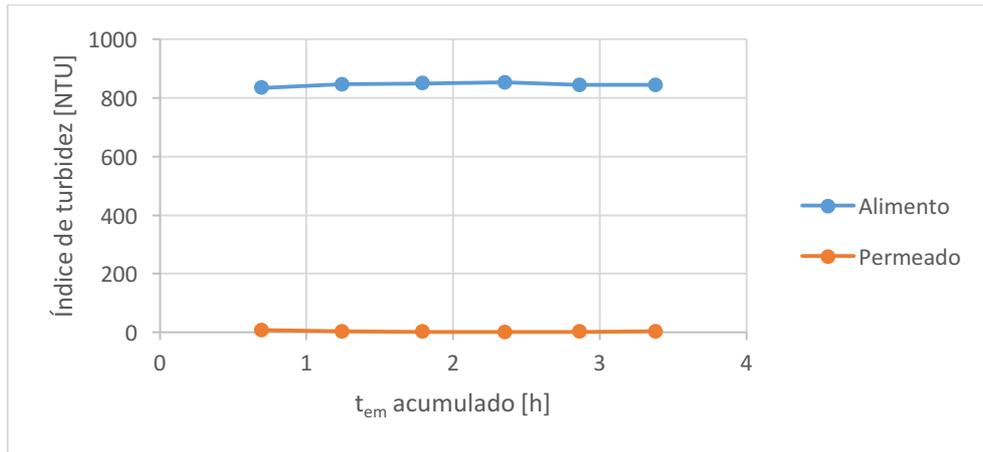


Figura V.14. Evolución del índice de turbidez en el alimento y el permeado para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura V.14 se ve reflejada una **gran reducción del índice turbidez del permeado respecto al alimento**. Esto es debido al correcto funcionamiento de la membrana de 100 kDa, correspondiente a procesos de UF, los cuales, como se ha visto anteriormente, retienen sólidos en suspensión, macromoléculas y pigmentos.

Además, no se aprecia ensuciamiento en el tiempo de operación ensayado, lo que hace más firme la elección de esta membrana sobre las otras propuestas.

5.3.1.4 Estudio de la evolución de los parámetros expuestos anteriormente en función del índice de rechazo de las membranas

Se muestra a continuación la variación de las variables estudiadas expresadas como porcentaje de rechazo a lo largo del ensayo de ensuciamiento.

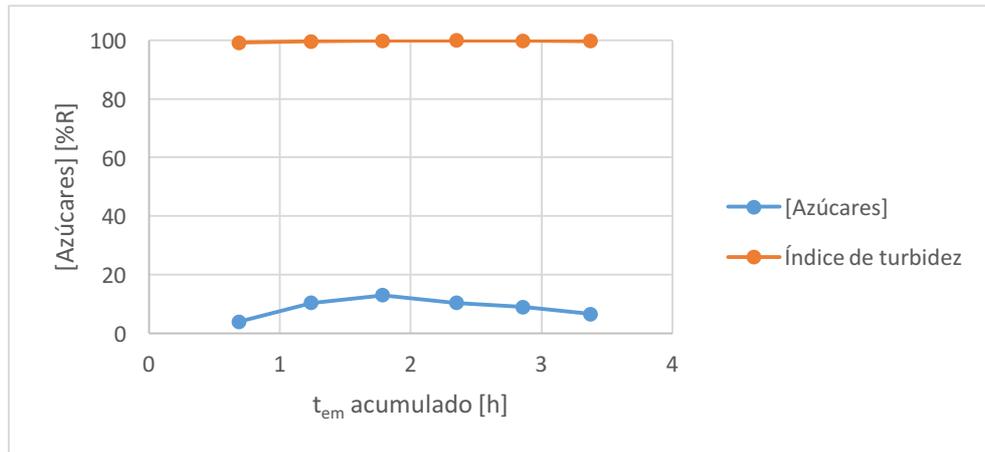


Figura V.15 Evolución de la concentración de azúcares con la presión y la temperatura, empleando zumo de piña como efluente, en función del porcentaje de rechazo de la membrana de 100 kDa

Queda representado en la gráfica V.15, como se viene observando en el presente documento, que el porcentaje de rechazo de azúcares en las membranas de UF es mínimo. Sin embargo, **el porcentaje de rechazo de sólidos en suspensión es casi total.**

5.3.1.5. Limpieza de la membrana

Una vez concluido el estudio de ensuciamiento, se procede de nuevo a la limpieza de la membrana, esta vez en un baño de agua osmotizada durante una semana, con el fin de dilucidar su actual permeabilidad.

En la tabla V.3, quedan de manifiesto las diferencias entre el flux inicial y los resultantes tras cada experiencia y su correspondiente limpieza, siendo k_0 el coeficiente de permeabilidad inicial, k_1 tras la primera limpieza y k_2 , tras la segunda limpieza.

Tabla V.3. Permeabilidad inicial y posterior a cada limpieza

ΔP [bar]	k_0 [L/(m ² ·h·bar)]	k_1 [L/(m ² ·h·bar)]	k_2 [L/(m ² ·h·bar)]
3	93.33	103.70	57.97

Se observa pues, en la tabla V.3, cómo tras la limpieza, la membrana opera aproximadamente a un **62% de su capacidad inicial**.

En este caso no se ha recuperado la permeabilidad inicial debido a que en esta segunda limpieza no se empleó cloro libre, sino solamente agua osmotizada. Esto es así incluso a pesar de haberse realizado la limpieza durante una semana, en lugar de durante un día, cosa que hace evidente la utilidad de la correcta selección de los métodos de limpieza de las membranas más adecuados para cada caso.

5.3.2. Segundo ensayo de ensuciamiento

Una vez la anterior experiencia llega a su fin, se procede a realizar un segundo estudio de ensuciamiento de la membrana seleccionada.

En esta experiencia se analizan, además de las variables observadas en el primer ensayo de ensuciamiento, otras como el pH, la conductividad y el factor de reducción de volumen (en adelante FRV).

5.3.2.1. Flux (J_p)

Seguidamente, en la figura V.17, se expone la representación gráfica correspondiente a la evolución del flux de permeado, para la membrana de 100 kDa.

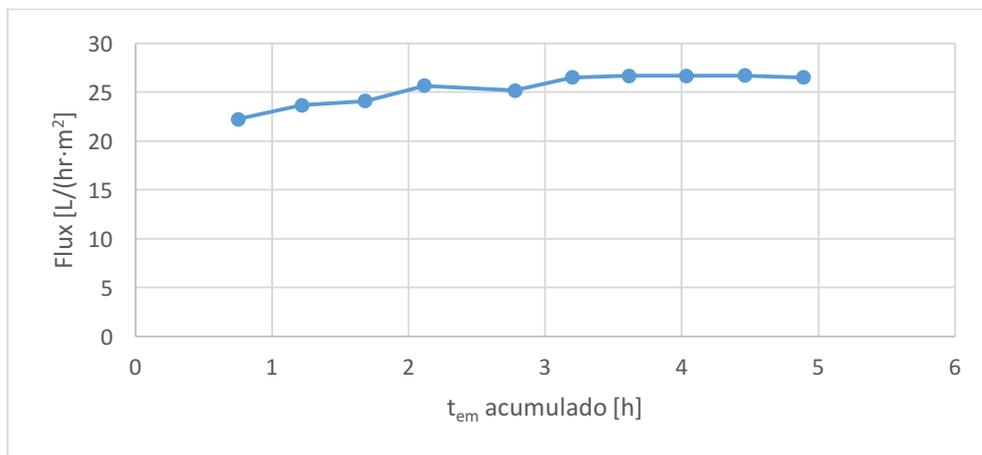


Figura V.17. Evolución del flux de permeado para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Se observa en la figura V.17 cómo el flux de permeado se mantiene aproximadamente estable tras el ascenso en las primeras fases.

Esto se debe al fenómeno de ensuciamiento producido con el tiempo, que provoca que el flujo se vea controlado por la transferencia de materia a través de la capa gel formada.

A continuación, en la figura V.18, se expone la representación gráfica correspondiente a la evolución del flux de permeado, para la membrana de 100 kDa, en función del factor de reducción de volumen (FRV).

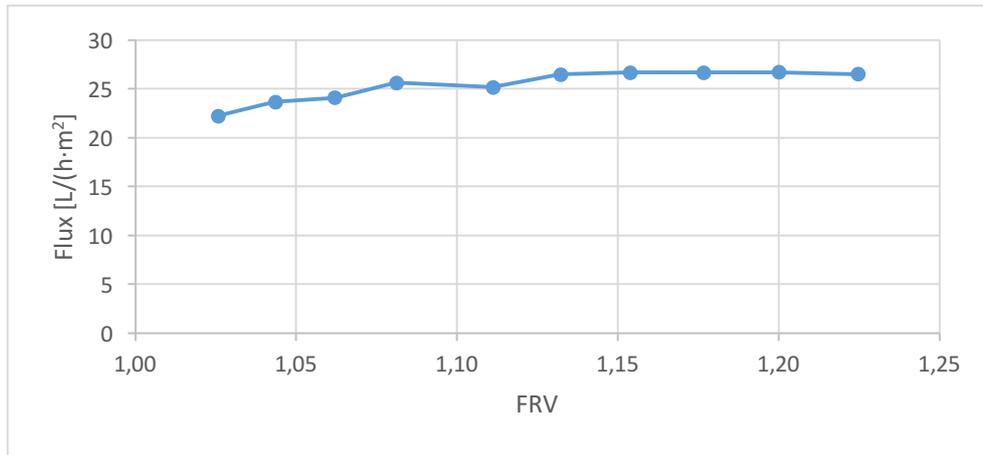


Figura V.18. Evolución del flux de permeado respecto al FRV, para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Se observa en la figura V.18 la misma tendencia representada en la figura V.15, como es lógico, pues el factor de reducción de volumen es directamente proporcional al tiempo de la experiencia.

5.3.2.2. Índice de turbidez, concentración de azúcares y conductividad

Se muestra a seguidamente la variación de las variables estudiadas expresadas como porcentaje de rechazo a lo largo del segundo ensayo de ensuciamiento.

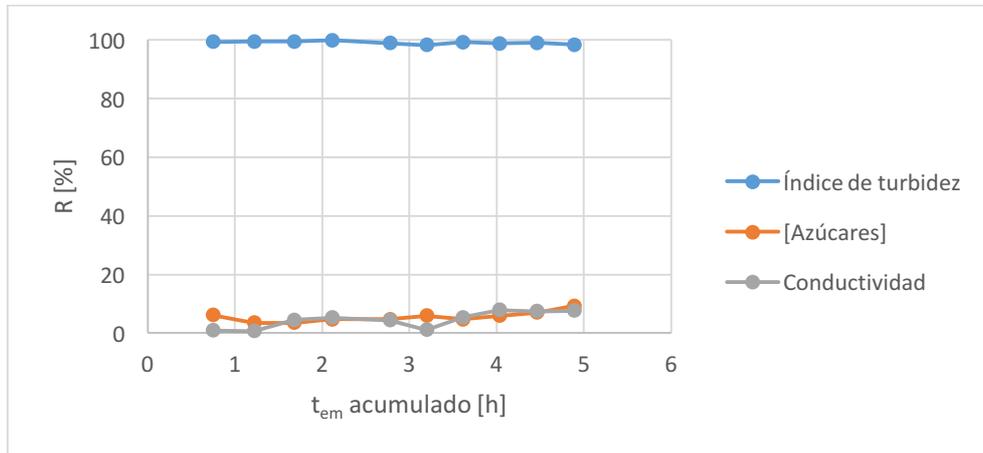


Figura V.19. Evolución de las variables estudiadas en el segundo ensayo de ensuciamiento, respecto al tiempo acumulado, para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Queda de manifiesto en la figura V.19 cómo la conductividad, al igual que la concentración de azúcares, apenas se reduce, debido a que las especies causantes de estos efectos, azúcares y sales, permean a través de la membrana sin problemas.

Sin embargo, como se ha observado anteriormente, el índice de turbidez se ve reducido casi en su totalidad, reafirmando la calidad de la membrana seleccionada para el proceso estudiado.

A continuación, se expone la representación gráfica correspondiente a la evolución de las variables estudiadas, expresadas como porcentaje de rechazo, a lo largo del segundo ensayo de ensuciamiento en función del FRV.

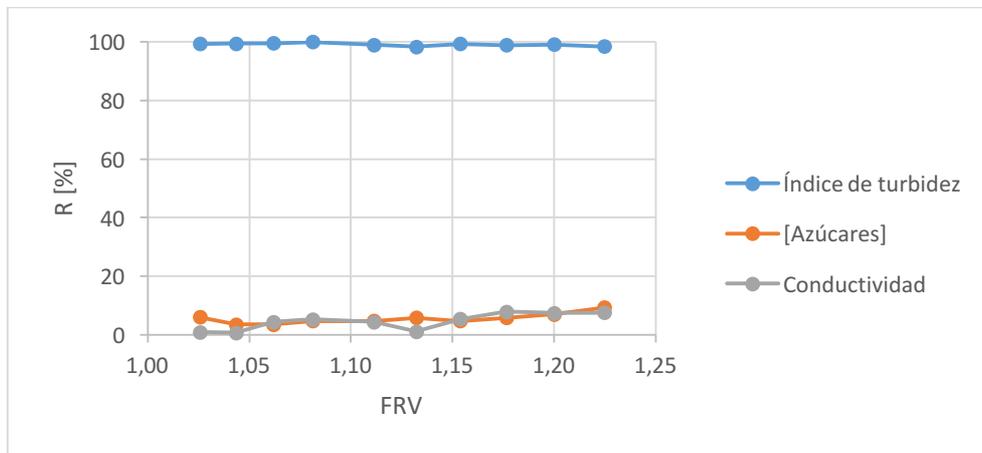


Figura V.20. Evolución de las variables estudiadas en el segundo ensayo de ensuciamiento, respecto al FRV, para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Se observa en la figura V.20 la evolución del índice de turbidez, la concentración de azúcares y la conductividad con el progreso de la experiencia, quedando así complementada la figura V.17, y haciéndose visible a groso modo la relación entre el tiempo de operación y el factor de reducción de volumen, detallado en el punto siguiente.

5.3.2.3. Factor de Reducción de Volumen (FRV)

Seguidamente, en la figura V.21, se expone la representación gráfica correspondiente a la evolución del factor de reducción de volumen, para la membrana de 100 kDa.

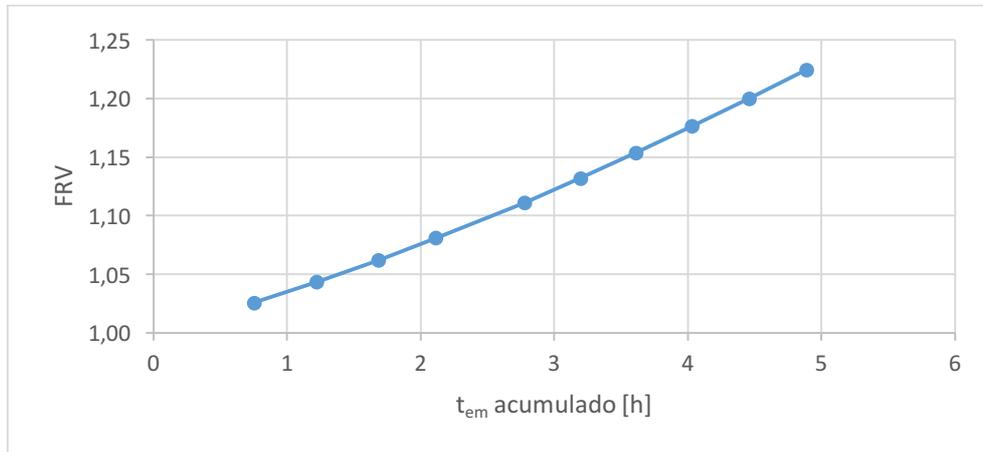


Figura V.21. Evolución del factor de reducción de volumen respecto al FRV, para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

Como se intuía en las gráficas anteriores, y concordando con la teoría, el factor de reducción de volumen posee un comportamiento directamente proporcional al tiempo de experiencia, de modo que la corriente de rechazo aparece cada vez más concentrada, ya que queda menor volumen para casi la misma cantidad de sólidos en suspensión.

5.3.2.4. Limpieza de la membrana

Una vez concluido el segundo estudio de ensuciamiento, se procede de nuevo a la limpieza de la membrana, esta vez en un baño de agua osmotizada durante 24 horas, con el fin de dilucidar su actual permeabilidad.

En la tabla V.4, quedan de manifiesto las diferencias entre el flux inicial y los resultantes tras cada experiencia y su correspondiente limpieza, siendo k_0 el coeficiente de permeabilidad inicial, k_1 tras la primera limpieza, k_2 tras la segunda limpieza y k_3 , tras la tercera limpieza.

Tabla V.4 permeabilidad inicial y posterior a cada limpieza

ΔP [bar]	k_0 [L/(m ² ·h·bar)]	k_1 [L/(m ² ·h·bar)]	k_2 [L/(m ² ·h·bar)]	k_3 [L/(m ² ·h·bar)]
3	93.33	103.70	57.97	37.35

Se observa pues, en la tabla V.4, cómo tras la limpieza, la membrana opera aproximadamente a un **62%** de su capacidad inicial.

En este caso no se ha recuperado la permeabilidad inicial debido a que en esta tercera limpieza tampoco se empleó cloro libre, sino solamente agua osmotizada durante 24 horas.

5.3.2.5. Sólidos Totales (ST)

Finalmente, se toma la medida de los sólidos totales (ST) presentes en la disolución alimento y en la disolución que forma el permeado obtenido.

Se obtiene para la disolución de alimento una concentración de ST de 80.267 g/L, mientras que en la disolución permeada restan solamente 0.063 g/L, quedando patente la efectividad de la tecnología de UF mediante membranas en cuanto a la aplicación sobre este proceso.

$$\text{Reducción de ST} = [ST]_A - [ST]_P \quad (\text{V.2})$$

De este modo, según la ecuación V.2, se logra una reducción de 80.204 g/L de sólidos durante el proceso, esto es, según la Ecuación V.3, una **reducción del 99.92%**.

$$\text{Reducción de ST (\%)} = \left(\frac{[ST]_A - [CT]_P}{[ST]_A} \right) \cdot 100 \quad (\text{V.3})$$

Se observa la reducción casi total de los sólidos en suspensión inicialmente presentes en la disolución, con lo que se corrobora una vez más la efectividad del método empleado, con la membrana y condiciones de operación adecuadas.

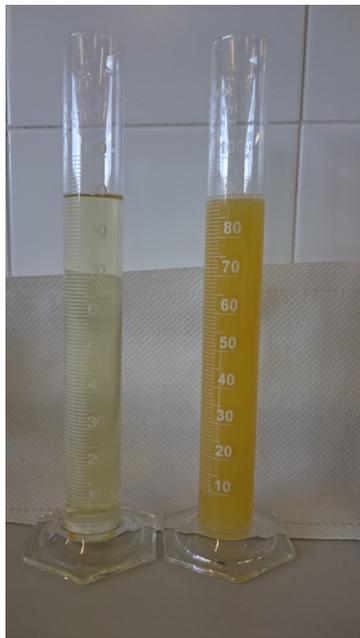


Figura V.22. Comparativa entre el zumo de piña previo a la clarificación y una vez clarificado

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se muestran a continuación los resultados de realizar un estudio estadístico DOE factorial a tres niveles, el cual tiene por objetivo corroborar las condiciones de operación óptimas halladas experimentalmente.

Se analizan las dos variables de respuesta que han resultado significativas, el flux de permeado y el índice de turbidez, en función de la presión y la temperatura empleadas.

6.1. FLUX

Se estudia en este apartado el efecto de las variables manipuladas, presión y temperatura, sobre el flux de permeado obtenido.

Seguidamente, en la figura VI.1. (a), se muestra la influencia de las variables de entrada, presión y temperatura, sobre el flux de permeado, así como las interacciones que se dan entre ellas.

Asimismo, en la figura VI.1. (b) se presenta un gráfico 3D que representa la superficie de respuesta del flux de permeado obtenido frente a las variables de entrada, presión y temperatura.

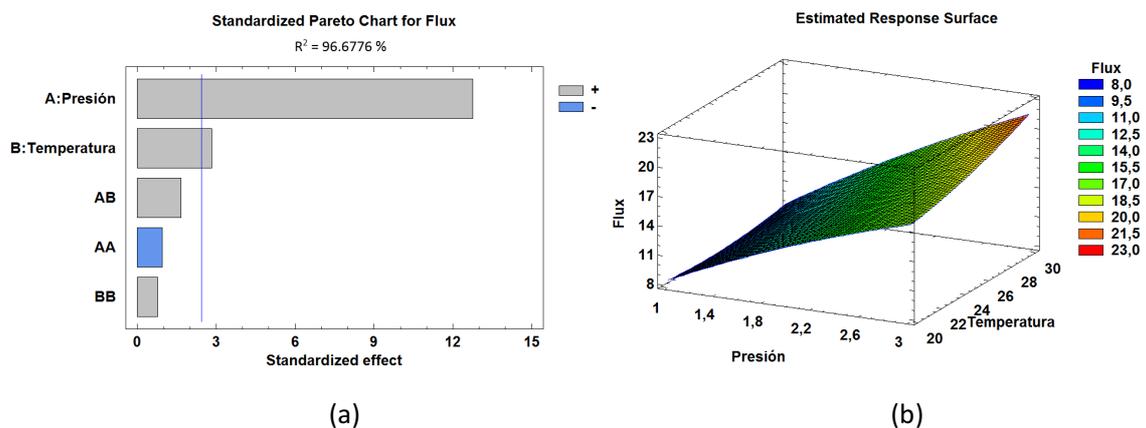


Figura VI.1. Diagrama de Pareto (a) y superficie de respuesta (b) para el flux de permeado para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura VI.1. (a) se observa que ninguna interacción entre las variables de entrada resulta significativa. Sin embargo, cada una por separado sí muestra un efecto significativo, en ambos casos positivo, sobre la variable controlada. Esto es, que los valores de presión y temperatura evolucionan de modo directamente proporcional a los del flux de permeado, cosa que concuerda con los resultados obtenidos experimentalmente.

Mientras que la temperatura afecta levemente, es apreciable la **gran relevancia de la presión** sobre el flux de permeado.

En la figura VI.1. (b) es posible observar la **relación aproximadamente lineal y directamente proporcional** que existe **entre la presión y el flux de permeado**.

Se aprecia asimismo en la figura VI.1. (b), una tendencia también aproximadamente lineal y directamente proporcional entre la temperatura y el flux de permeado, cosa debida a la disminución de viscosidad provocada por el aumento de la temperatura.

Como se ha expuesto con anterioridad, la temperatura es un parámetro influyente en el flux de permeado, pero no tanto como la presión.

6.2. ÍNDICE DE TURBIDEZ

Se estudia en este apartado el efecto de las variables manipuladas, presión y temperatura, sobre el índice de turbidez en la corriente de permeado.

Seguidamente, en la figura VI.2. (a), se muestra la influencia de las variables de entrada, presión y temperatura, sobre el índice de turbidez en la corriente de permeado, así como las interacciones que se dan entre ellas.

Asimismo, en la figura VI.2. (b) se presenta un gráfico 3D que representa la superficie de respuesta del índice de turbidez en la corriente de permeado frente a las variables de entrada, presión y temperatura.

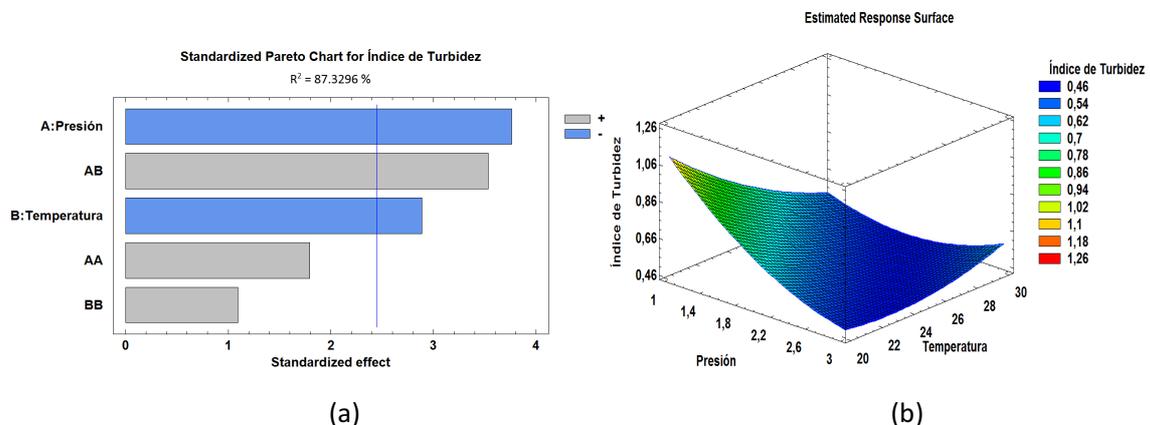


Figura VI.2. Diagrama de Pareto (a) y superficie de respuesta (b) para el índice de turbidez en la corriente de permeado para la membrana de 100 kDa, empleando zumo de piña como efluente

En la figura VI.2. (a) se observa que tanto la presión como la temperatura resultan significativas, con un efecto negativo, sobre la variable controlada. Esto es, que los valores de presión y temperatura evolucionan de modo inversamente proporcional a los del índice de turbidez en la corriente de permeado, cosa que concuerda con la reducción de la cantidad de sólidos solubles obtenida experimentalmente.

Además, en este caso sí resulta significativa la interacción entre los parámetros de entrada, siendo positiva dicha interacción.

Mientras que la temperatura afecta levemente, nuevamente se aprecia la **gran relevancia de la presión** en el proceso estudiado.

En la figura VI.2. (b). es posible observar la **relación aproximadamente lineal e inversamente proporcional** que existe **entre la presión y el índice de turbidez**.

Como se ha comentado anteriormente, es notable la gran influencia de la presión sobre dicho parámetro. Esto se debe a que la presión provoca la compactación de la membrana y de la posible capa de ensuciamiento, cosa que dificulta el paso de las partículas coloidales a través de la membrana.

Se aprecia asimismo en la figura VI.2. (b), una tendencia también aproximadamente lineal e inversamente proporcional entre la temperatura y el índice de turbidez en la corriente de permeado, cosa debida a la disminución de viscosidad provocada por el aumento de la temperatura.

Como se ha expuesto con anterioridad, la temperatura es un parámetro influyente en el flux de permeado, pero no tanto como la presión.

7. PROPUESTA DE INSTALACIÓN SEMIINDUSTRIAL

Se presentan en este apartado los componentes, así como el diseño de una instalación semiindustrial capaz de llevar a cabo el proceso propuesto en el presente trabajo.

7.1. CÁLCULOS

La densidad de flujo de permeado disminuye de manera directamente proporcional a la temperatura del alimento [6].

Debido a las limitaciones técnicas de la planta empleada para la obtención de los datos experimentales mostrados en apartados anteriores, diversos parámetros no se logran mantener en los valores deseados de manera lo suficientemente exacta. Por ello, se realizan los cálculos necesarios para ajustar estos valores a los requeridos, cosa que permite diseñar correctamente la instalación semiindustrial propuesta, como se muestra en el Anexo.

Los ensayos se realizaron a una temperatura promedio de 25°C, obteniéndose un flux de permeado $J_p = 20 \text{ L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$. Con el objetivo de no deteriorar el zumo, manteniendo así sus propiedades funcionales y organolépticas, se desea operar a una temperatura de **15°C**.

Para esto, se tiene en cuenta la Tabla I.1 del Anexo, obtenida basándose en la variación inversamente proporcional de la viscosidad con la temperatura, factor directamente relacionado con el flux de permeado.

Realizando los cálculos que se adjuntan en el Anexo, finalmente se obtiene un flux de permeado $J_p = 15.649 \text{ L}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$, que se emplea para realizar el diseño de la planta.

También en el Anexo se adjunta el cálculo para hallar el volumen requerido para cada tanque, el cual es $V = 1 \text{ m}^3$.

7.2. COMPONENTES

Se incluyen en el Anexo los datos correspondientes a los componentes a continuación expuestos.

- Tanques de almacenamiento con sistema de refrigeración:

Depósito para los fluidos que intervienen en el proceso capaz de mantenerlos a la temperatura deseada.



Figura VII.1. Tanque de almacenamiento refrigerado. [7]

- Agitadores:

aseguran una distribución homogénea de los fluidos en los tanques de almacenamiento.



Figura VII.2. Agitador a contra rotación. [8]

- Sensores de nivel:

permiten conocer la cantidad de disolución almacenada en cada tanque, con el objetivo de que no exceda niveles mínimos ni máximos.

Se selecciona el modelo LD362_M12 de la marca ICOS.

LD362-M12

Material
PPA - Polifitlamida
(tuerca en PA)



Figura VII.3. Sensor de nivel [9]

- Sensores de temperatura:

permiten conocer propiedades del fluido como la viscosidad, además de informar de un exceso de temperatura que pueda desnaturalizar el alimento.

Se selecciona el modelo D61 de la marca Gesa.



Figura VII.4. Sensor de temperatura. [10]

- Filtro:

dificulta la obstrucción de la bomba. Se sitúa, por tanto, antes de la misma.
Se selecciona el filtro



Figura VII.5 Filtro. [11]

- Bombas:

se encargan de asegurar que llegue el caudal deseado al módulo de membranas.
Se selecciona el modelo Cat 2SF10ES de la marca Cat.



***Triplex Direct-Drive
Plunger Pump***

Model

2SF

Figura VII.6. Bomba. [12]

- Sensores de presión:

permiten detectar infra o sobrepresiones y ajustar las bombas. Se sitúan entre las bombas y las válvulas de alivio.

Se selecciona el modelo DN-52 de la marca Abad Controls.



Figura VII.7. Sensor de presión. [13]

- Medidores de caudal:

Se selecciona el caudalímetro MDC – 16...160 L/h de la marca Abad Controls.



Figura VII.8. Medidor de caudal. [14]

- Analizadores en línea: se sitúa uno en cada corriente (alimento, rechazo y permeado).
 - Analizador de turbidez: realiza la medición mediante nefelometría. Expresa el resultado como el índice de turbidez, en NTU.

Se escoge el modelo MicroTOL 2 de la marca Coleparmer.



Figura VII.9. Analizador de turbidez. [15]

- Módulos de membranas:

equipados con las membranas que permiten realizar la clarificación. Poseen dos salidas, una para la corriente de rechazo y otra para la corriente de permeado.



Figura VII.10. Módulo de membranas. [16]

- Membranas:

actúan como filtro selectivo para llevar a cabo la clarificación deseada.



Figura VII.10. Membranas. [17]

- Válvulas de seguridad:

permiten desviar un posible exceso de caudal en caso de sobrepresión. Se sitúan a la salida de la bomba, pues es el punto de mayor presión en la instalación.



Figura VII.11. Válvula de seguridad. [18]

Se selecciona el modelo AA 11 46 de la marca Salvador Escoda.

- Válvulas de retención:

Se selecciona el modelo AA 05 416 de la marca Salvador Escoda.



Figura VII.12. Válvula de retención. [18]

- Válvulas de regulación:

permiten regular el caudal que circula por cada línea de la instalación.

Simple:

Se selecciona el modelo AA 02 117 de la marca Salvador Escoda



Figura VII.13. Válvula de regulación simple. [18]

De tres vías:

Se escoge el modelo VRG131 50-40 de la marca Salvador Escoda.



VRG 3 vías

Figura VII.14. Válvula de regulación de tres vías. [19]

De cuatro vías:

Se escoge el modelo VRG 141 50.40 de la marca Salvador Escoda.



VRG 4 vías

Figura VII.15. Válvula de regulación de cuatro vías. [19]

7.3. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN SEMIINDUSTRIAL

En el presente apartado se muestra el esquema básico de la instalación propuesta en la que se daría lugar la clarificación de zumo de piña empleando tecnología de membranas.

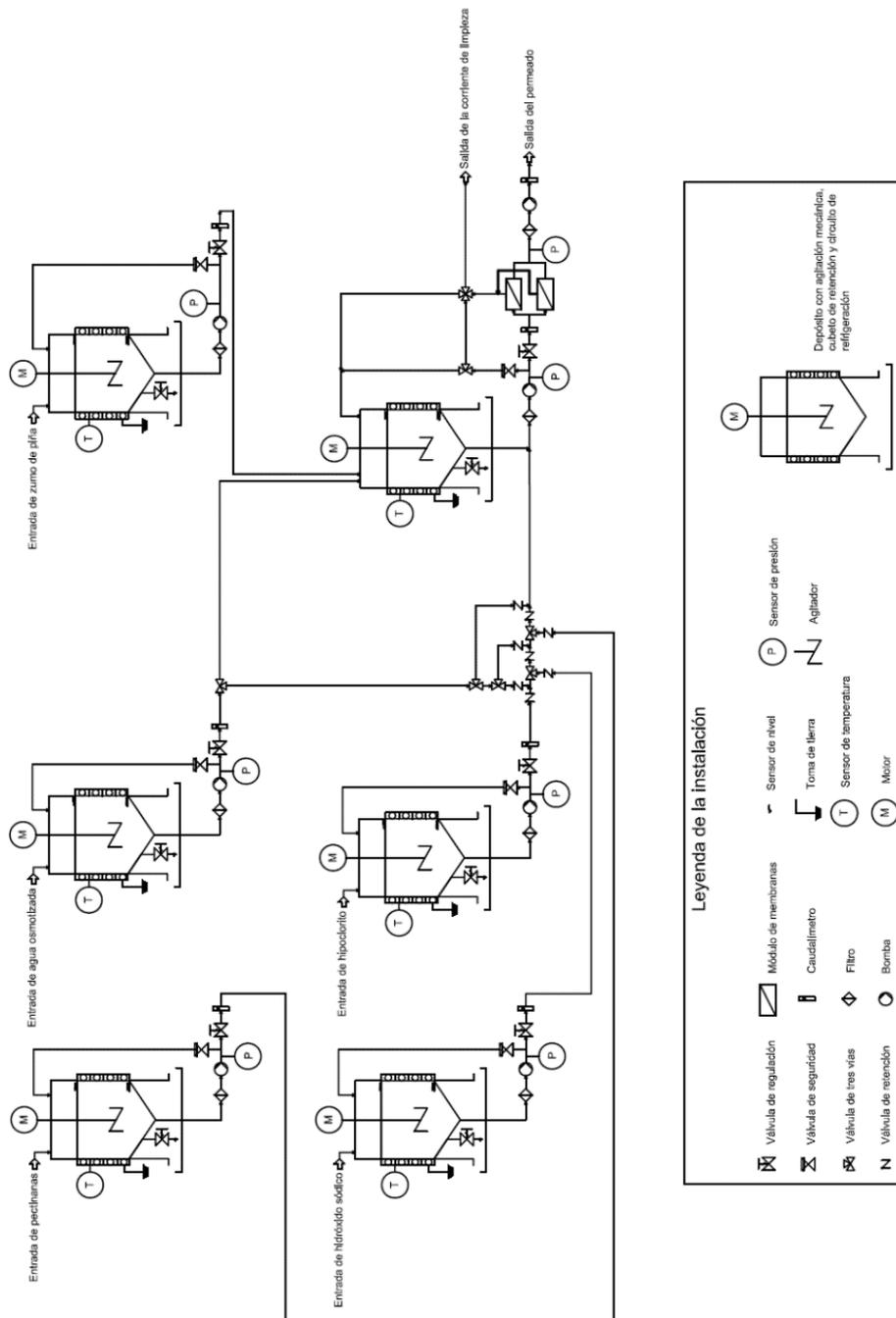


Figura VII.1. Diagrama de flujo de la instalación propuesta para llevar a cabo la clarificación de zumo de piña mediante ultrafiltración

8. CONCLUSIONES

Una vez realizado el análisis de resultados y el estudio de su aplicación semiindustrial, es posible obtener una serie de conclusiones acerca del TFG realizado.

- Se observa la mayor efectividad tanto de flux de permeado como de rechazo de las membranas con mayor MWCO, siempre dentro del rango de aplicación de la UF (10, 40 y 100 kDa).
- También queda claro el leve efecto positivo entre la temperatura y el flux de permeado, si bien deben tenerse en cuenta los límites de temperatura que desnaturalizarían la disolución alimento.
- En cuanto a la presión, también se observa su efecto positivo sobre el flux de permeado, en este caso bastante acentuado. Sin embargo, se ha de tener la precaución de no alcanzar la presión crítica, a partir de la cual se favorece el ensuciamiento de la membrana-
- Cuando analiza la reducción de sólidos solubles, se observa un claro efecto positivo de la presión sobre la reducción del índice de turbidez.
- Se comprueba que la UF logra los resultados deseados en cuanto a clarificación, ya que elimina casi la totalidad de las partículas que provocan turbidez en la disolución alimento. Además, este método permite mantener la concentración de azúcares, y el pH de la disolución inicial, por lo que las características organolépticas no se ven afectadas, siendo apropiadas para la aplicación propuesta, es decir, emplear el clarificado obtenido como componente de mezcla en productos de zumo de fruta mixtos, sin aumentar la densidad de dicho producto.
- En cuanto a la viabilidad económica del proceso, desde el punto de vista técnico, la aplicación de la tecnología de membranas hoy en día es un proceso muy empleado y recomendado en la industria alimentaria. Si bien, para su aplicación a escala hay que realizar una inversión importante. No obstante, esta quedaría amortizada con los beneficios obtenidos en la venta del producto, debido a su mayor valor añadido.

Con todo, queda de manifiesto en el presente TFG, la gran utilidad de la tecnología de membranas, en concreto de la ultrafiltración, para los procesos de clarificación de bebidas y zumos, bien por sí misma o en combinación con otras técnicas que mejoren los resultados de ésta por emplearse previa o simultáneamente, o mejoren el producto final por emplearse con posterioridad a la ultrafiltración. De este modo, nos encontramos ante una tecnología eficaz, eficiente y versátil, además de respetuosa con el medio ambiente, la cual hoy en día sigue desarrollándose.

9. BIBLIOGRAFÍA

- (1) D. C. P. Campos *et al*, "Clarificación de jugo de anacardo (*Anacardium Occidentale* L.) utilizando tratamiento enzimático y microfiltración", *Alimentaria*, 2002, Julio-Agosto, pg. 121-124.
- (2) L. M. J. Carvalho *et al*, "Clarification of pineapple (*Ananas Comosus* L. Merr) juice by UF", *Alimentaria*, 1996, nº 275, pg. 129-132.
- (3) Óscar Fernando Castellanos Domínguez *et al*, "Alternativas para la clarificación del jarabe de glucosa obtenido por hidrólisis enzimática del almidón", *Ingeniería e Investigación*, 2004, nº 55, pg. 8-21.
- (4) María Isabel Alcaina Miranda, "Operaciones y procesos unitarios en la industria de alimentos. Fundamentos de la tecnología de membranas", apuntes de la asignatura "Operaciones y procesos unitarios en la industria de alimentos", 2016.
- (5) Sergio Barredo Damas, "Recuperación de efluentes textiles mediante técnicas de membrana", tesis doctoral, 2011.
- (6) Claudia Muro *et al*, "Membrane Separation Process in Wastewater Treatment of Food Industry", *Food Industrial Processes - Methods and Equipment*, 2012, 253-280.
- (7) <http://ucon.de/en/container/beheizbare-container/typ-ibc-gekuehlt.php>
- (8) <http://www.pimecsa.com/agitador-a-contra-rotacion.html>
- (9) <http://www.icossensores.es/Sensor-De-Nivel-Vertical/LD362M12/>
- (10) <https://www.termometros.com/es/termometro-bimetalico-para-tuberias>
- (11) <http://www.russellfinex.com/es/equipos-de-separacion/filtros-autolimpiantes/?gclid=CIGT2rLEjs4CFdMK0wodeQUECQ>
- (12) <http://www.catpumps.com.ar/pdf/CAT2SF10ES.pdf>
- (13) <http://store.abadcontrols.com/pressure-gauges/general-purpose-pressure-gauges-1/153j10.html>
- (14) <http://store.abadcontrols.com/flowmeters/water-glass-flowmeter-mdc-16-160-l-hour.html>
- (15) http://www.coleparmer.com/assets/Catalog_pdfs/PDF_CP/JZ_1374.pdf
- (16) <http://www.lenntech.com/products/membrane/osmonics/osmonics.htm?gclid=CM-7ofLEjs4CFUQW0wod1qQMFA>

- (17) <http://www.carbotecnia.info/producto/porta-membranas-codeline/>
- (18) http://www.salvadorescoda.com/tarifas/Valvuleria_Agua_Tarifa_PVP_SalvadorEscoda.pdf
- (19) http://www.salvadorescoda.com/tecnico/CO/Tarifa_Catalogo_ESBE_09-10.pdf

DOCUMENTO III

ESTUDIO ECONÓMICO

ÍNDICE

1. GASTOS ASOCIADOS LA INSTALACIÓN DE LA PLANTA	1
1.1. PRESUPUESTOS PARCIALES.....	1
1.1.1 Mano de obra	1
1.1.2 Equipos.....	2
1.2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.....	4
1.3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA	4
1.4. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	5

1. GASTOS ASOCIADOS LA INSTALACIÓN DE LA PLANTA

En este apartado se exponen los precios unitarios de los componentes que forman la instalación diseñada. Así como la cantidad requerida de cada uno de ellos, obteniendo de este modo el precio total de la planta industrial.

1.1. PRESUPUESTOS PARCIALES

Seguidamente se expone el presupuesto desglosado en bloques.

1.1.1 Mano de obra

A continuación, se muestra el presupuesto relativo al pago de las nóminas de los trabajadores. Se plantea una instalación de la planta en el tiempo de 10 días.

Descripción	Ud.	Medición	Precio [€]	Importe [€]
Peón	h	80	12,77	1021,60
Oficial de primera	h	80	15,98	1278,40
Jefe de montaje	h	80	18,20	1456,00
Ingeniero Químico	h	300	15,63	4687,50
Total				8443,5

1.1.2 Equipos

En este punto se muestra el coste relativo a los elementos que componen la instalación.

Componentes principales			
Descripción	Precio [€]	Cantidad	Importe [€]
Tanque de almacenamiento	405,25	6	2431,50
Bomba	210,50	7	1473,50
Módulos de membranas	840,25	2	1680,50
Membranas	315,75	2	631,50
Válvulas de seguridad	594,68	6	3568,08
Válvula de retención	15,40	8	123,20
Válvulas de regulación simples	286,04	12	3432,48
Válvula de regulación de tres vías	106,80	6	640,80
Válvula de regulación de cuatro vías	132,00	1	132,00
Total			14113,56

Componentes secundarios			
Descripción	Precio [€]	Cantidad	Importe [€]
Agitador	120,50	6	723,00
Sensor de nivel	33,45	6	200,70
Sensor de temperatura	11,45	6	68,70
Filtro	20,40	7	142,80
Sensor de presión	7,57	7	52,99
Medidor de caudal	160,20	7	1121,40
Analizador de turbidez	56,30	2	112,60
Toma de tierra	136,40	6	818,40
Total			3240,59

Resumen	
Descripción	Importe [€]
Componentes principales	14113,56
Componentes secundarios	3240,59
Total	17354,15

1.2. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

A continuación, queda reflejado el coste total que suponen los dos apartados anteriores.

Descripción	Importe
Mano de obra	8443,50
Equipos e instrumentación	17354,15
Total	25797,65

1.3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA

Seguidamente, se expone el presupuesto reflejado en el cuadro anterior, teniendo en cuenta los gastos generales producidos y el beneficio industrial obtenido.

Presupuesto	Importe
Presupuesto total de ejecución material	25797,65
Gastos generales (13%)	3353,69
Beneficio industrial (6%)	1547,86
Total	30699,20

1.4. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

Finalmente, se muestra el presupuesto total calculado para la instalación industrial propuesta en el presente TFG, incluyendo el I.V.A.

Presupuesto	Importe
Presupuesto de ejecución por contrata	30699,20
I.V.A. (21%)	6446,83
Total	37146,04

El presupuesto de base de licitación asciende a la expresada cantidad de:

TREINTA Y SIETE MIL CIENTOCUARENTA Y SEIS EUROS CON CUATRO CÉNTIMOS

DOCUMENTO II

ANEXOS

ÍNDICE

1. TABLA DE AJUSTE DEL FLUX CON LA TEMPERATURA.....	1
2. CÁLCULOS.....	3
2.1. Reducción de los ST	3
2.2. Cálculos para la instalación.....	4
3. HOJAS TÉCNICAS DEL INSTRUMENTAL.....	7
3.1. Instrumental de laboratorio	7

1. TABLA DE AJUSTE DEL FLUX CON LA TEMPERATURA

 ZA Les Laurons 26110 NYONS ☎ INT (33) 4-75-26-47-69 📠 INT (33) 4-75-26-47-87	TECHNICAL DIRECTIONS TAMI Industries MEMBRANES	Document B.BL NOMB26 GB Written by BBL 21/02/2006 Rev. 26	
--	---	---	---

To make this measurement, it is necessary to note the following parameters :

- permeate flow (Qp) in l/h.
- inlet (Pe) and outlet pressure (Ps) of the carter and permeate back-pressure (Cp).
- temperature, to determine the coefficient (Kt) to convert to 25°C (see table hereafter).

Water flow measurements can be made at different pressures and temperatures.
 The DE 1 25 value is corrected following the calculation formula herunder :

$$TMP = \frac{(Pe + Ps) - Cp}{2}$$

$$DE\ 1\ 25 = \frac{Qp \times Kt}{TMP \times A} \quad (A = \text{membrane area in m}^2)$$

Temperature coefficient table "Kt"

C°	Coef. Kt	C°	Coef. Kt	C°	Coef. Kt	C	Coef. Kt
0	2,003	25	1,000	50	0,612	75	0,426
1	1,934	26	0,977	51	0,603	76	0,420
2	1,870	27	0,955	52	0,594	77	0,414
3	1,808	28	0,934	53	0,585	78	0,409
4	1,751	29	0,913	54	0,575	79	0,404
5	1,696	30	0,893	55	0,566	80	0,398
6	1,645	31	0,875	56	0,557	81	0,393
7	1,596	32	0,860	57	0,549	82	0,385
8	1,549	33	0,839	58	0,541	83	0,383
9	1,505	34	0,822	59	0,533	84	0,380
10	1,463	35	0,816	60	0,525	85	0,375
11	1,422	36	0,788	61	0,517	86	0,371
12	1,383	37	0,773	62	0,509	87	0,366
13	1,346	38	0,759	63	0,502	88	0,362
14	1,311	39	0,744	64	0,495	89	0,357
15	1,278	40	0,730	65	0,488	90	0,354
16	1,245	41	0,717	66	0,482	91	0,349
17	1,214	42	0,703	67	0,471	92	0,347
18	1,184	43	0,691	68	0,468	93	0,342
19	1,153	44	0,678	69	0,461	94	0,339
20	1,127	45	0,667	70	0,454	95	0,334
21	1,099	46	0,656	71	0,449	96	0,331
22	1,073	47	0,644	72	0,442	97	0,327
23	1,048	48	0,634	73	0,436	98	0,324
24	1,022	49	0,624	74	0,431	99	0,320

Example:

- . membrane area : 22,8 m²
- . transmembrane pressure : 1,3 bars
- . temperature : 15 °C
- . Kt at 15°C : 1,278
- . permeate flow : 10500 l/h

. DE 1 25 = $\frac{10500 \times 1,278}{1,3 \times 22,8} = 453$ l/h.m² at 1 bar and 25°C

Figura I.1. Ajuste del flux de permeado con la temperatura

2. CÁLCULOS

2.1. Reducción de los ST

Concentración de sólidos en el alimento: $C_0 := 120.4 \frac{\text{gm}}{\text{L}}$

Concentración de sólidos el alimento (diluida a 2/3 para evitar la obturación de las membranas):

$$C_A := C_0 \cdot \frac{2}{3} = 80.267 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{L}}$$

Concentración de sólidos en el permeado: $C_P := 0.063 \frac{\text{gm}}{\text{L}}$

Reducción de ST: $\Delta ST := C_A - C_P = 80.204 \cdot \frac{\text{gm}}{\text{L}}$ $\Delta ST_{\%} := \frac{\Delta ST}{C_A} = 99.922 \cdot \%$

2.2. Cálculos para la instalación

Planta piloto:

Condiciones operativas: $T_w := 298\text{K}$ $p := 3\text{bar}$

Flux de permeado de zumo de piña: $J_{P_298} := 20 \frac{\text{L}}{\text{hr}\cdot\text{m}^2}$

Área de la membrana empleada: $A_m := 9 \cdot 10^{-3} \text{m}^2$

El caudal de permeado se define como: $Q_p := J_{P_298} A_m = 0.18 \frac{\text{L}}{\text{hr}}$

Debido a posibles sobrecalentamientos inesperados que pudieran degradar el zumo en caso de que el sistema de refrigeración fuera insuficiente, se decide implementar la solución a escala industrial con las siguientes condiciones operativas:

Instalación industrial:

Condiciones operativas: $T_w := 288\text{K}$ $p := 3\text{bar}$

Factor de corrección según el documento proporcionado por TAMI industries, incluido en el presente Anexo:

Para pasar de $T = 298 \text{ K}$ a $T = 288 \text{ K}$: $K_t := 1.278$

Se propone una expresión correctora del coeficiente de permeabilidad:

$$k_{P_288} = \frac{Q_{P_298} K_t}{PTM \cdot A_m} = \frac{J_{P_298} K_t}{PTM}$$

Siendo $k_P \cdot PTM = J_P$, queda la siguiente expresión:

Expresión correctora del flux de permeado: $J_{P_288} = \frac{Q_{P_298} K_t}{A_m} = J_{P_298} K_t$

La planta piloto opera a $PTM := 3\text{bar}$

Aplicando las condiciones operativas de la planta piloto, queda:

$$J_{P_288} := \frac{J_{P_298}}{K_t} = 15.649 \frac{\text{L}}{\text{hr}\cdot\text{m}^2} \quad \Delta J_{P_ \%} := \frac{J_{P_298} - J_{P_288}}{J_{P_298}} = 21.753\%$$

Se desea operar con un rendimiento del 50%: $\eta := 50\%$

Se pretende producir un caudal de permeado de: $Q_{\text{permeado}} := 0.5 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Según la definición de rendimiento, el caudal de zumo de piña que se debe alimentar a la planta es:

$$\eta = \frac{Q_P}{Q_A} \quad Q_A := \frac{Q_P}{\eta} = 0.042 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

El flux de permeado se define como: $J_P = \frac{Q_P}{A_{\text{membrana}}} \rightarrow A_{\text{membrana}} = \frac{Q_P}{J_P}$

Por lo que el área de membrana requerida, es: $A_{\text{m_ind}} := \frac{Q_P}{J_{P_288}} = 1.331 \text{ m}^2$

Cálculo del volumen de tanque requerido: $V = Q_A \cdot t \xrightarrow{t := 24\text{hr}} V_{\text{ww}} := Q_A \cdot t = 1 \text{ m}^3$

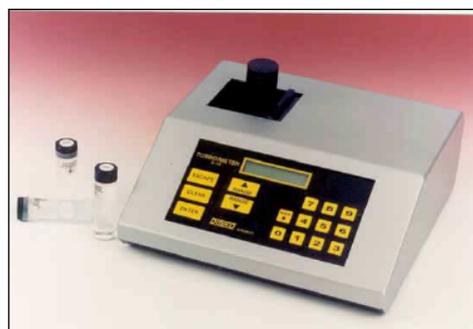
3. HOJAS TÉCNICAS DEL INSTRUMENTAL

3.1. Instrumental de laboratorio

Turbidímetro Dinko D-112:

TURBIDÍMETRO Modelo D-112

- ◆ Medición nefelométrica de turbidez causada por la luz reflejada en ángulo de 90° con respecto a la luz incidente, de partículas suspendidas en un líquido
- ◆ Lectura digital en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez)
- ◆ Lámpara de tungsteno. Espectro ajustado 400-600nm
- ◆ Conforme EPA "EPA Manual of Methodes for Chemical Analyses of Water and Wastes" U.S.A
- ◆ Versión D-112IR con Led infrarrojo de pico centrado a 860nm según norma ISO 7027(DIN-EN27027)
- ◆ Sistema óptico de tres detectores con linealidad compensada
- ◆ Auto-cero
- ◆ Auto rango
- ◆ Memoria de calibración
- ◆ Lecturas promedio
- ◆ Teclado de membrana, entrada de datos de calibración interna
- ◆ Incluidos patrones, cubetas y maleta en el modelo P portátil



Rango: tres escalas 0 -9,999 / 10 - 99,99 y 100 – 999,9NTU
 Precisión: ± 2% escala 1 y 2, ± 3% escala 3
 Resolución: 0,001 / Repetitividad: ± 1% de la lectura.
 Volumen de muestra: mínimo 5ml
 Dimensiones 250 x 260 x 95mm / Peso 2Kg
 Alimentación 230V-50/60Hz

Código	Modelo	Artículos
1.9773.00	D-112	Turbidímetro
1.9793.00	D-112IR	Turbidímetro

PATRONES SDB DE TURBIDEZ conforme EPA y ISO, con CERTIFICADO. CUBETAS

Código	Artículos
1.9775.00	Cubeta porta-muestras, 4u
1.9776.00	Patrón Primario 5NTU, 60ml
1.9777.00	Patrón Primario 40NTU, 60ml
1.9778.00	Patrón Primario 400NTU, 60ml
1.9796.00	Patrón Primario IR, 5NTU, 60ml
1.9797.00	Patrón Primario IR, 40NTU, 60ml
1.9798.00	Patrón Primario IR, 400NTU, 60ml
1.9779.00	Patrón Primario de Formazina 4000NTU, 125ml
1.9790.00	Solución limpiadora antiestática, 250ml

Figura III.1. Ficha del turbidímetro Dinko D-112

Refractómetro Ivymen NR-101:



Digital portable refractometers "NR-101" and "NR-151"



APPLICATIONS

Model NR-151. Measurement of % Brix and refractive index n_D .

Ideal for concentrations of sugars in % Brix and the measurement of refractive index n_D . For fruit, juices, drinks, milk, wine, edible oils, food industry, chemicals, pharmaceutical, science, petrochemical, oils, lubricants etc.

Model NR-101. % Brix, refractive index n_D and % salinity.

Ideal for concentrations of sugar % Brix, measuring refractive index n_D and NaCl in % of salinity.

Ideal for fruit, juices, drinks, milk, wine, edible oils, food industry, chemicals, pharmaceutical, science, petrochemical, oils, lubricants etc.

COMMON FEATURES

Portable and easy to use.

Alphanumeric display.

Determinations using a high precision photo cell integrated to a CCD camera and digital image processor.

Chamber prism of anti corrosive stainless steel and lid.

Automatic temperature compensation (ATC) to 20 °C, with a sample temperature range from 5 to 40 °C.

Temperature selection °C or °F.

Calibration using distilled water.

Function selection limits and tolerable alarms.

Microprocessor with instant response.

Disconnects automatically if inoperable for 3 minutes.

Low voltage alarm.

Power supply 9V battery.

Operating temperature from 0 to 40 °C at up to 90% relative humidity and a maximum height of 2000 m above sea level.



Model NR-151



Model NR-101

MODELS	Part No.	Reading and Measurement	Measurement range	Measurement Resolution	Measurement Precision	Temperature Range	Temperature Resolution	Temperature Precision	Height/Width/Depth cm	Weight Kg
NR-151	5901012	Brix %	0.0 - 95.0%	0.1%	±0.1%	0 +40 °C 32 +140 °F	0.1 °C 0.2 °F	±1 °C ±2 °F	6 18 10	0.9
		Refraction index n_D	1.3330 - 1.5318 n_D	0.0001 n_D	±0.0002 n_D					
NR-101	5901013	Brix %	0.0 - 60.0%	0.1%	±0.1%					
		Refraction index n_D	1.3330 - 1.4419 n_D	0.0001 n_D	±0.0002 n_D					
		Salinity %	0.0 - 28.0 %	0.1 %	±0.1 %					

Comes complete with protective carry case, dosing burette, bottle of distilled water and a 9V battery.

Figura III.2. Ficha del refractómetro Ivymen NR-101

pH-metro/conductímetro:



Especificaciones

Sujetas a cambio sin previo aviso.

Especificaciones	
Pantalla	De cristal líquido, retroiluminada, con pictogramas
Teclado	De membrana, 6 teclas
Escalas de medida (la resolución depende de la escala)	Conductividad 0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 500 mS/cm Salinidad 0.0 a 1999 $\text{mg}/\text{l NaCl}$ 2.0 a 50.0 $\text{g}/\text{l NaCl}$ TDS 0 mg/l a 500 g/l Temperatura -20.0 a 150.0 $^{\circ}\text{C}$ -4.0 a 302.0 $^{\circ}\text{F}$
Error de medida (± 1 dígito)	Conductividad ≤ 0.5 % Salinidad ≤ 0.5 % TDS ≤ 0.5 % Temperatura ≤ 0.2 $^{\circ}\text{C}$ (0.4 $^{\circ}\text{F}$)
Reproducibilidad (± 1 dígito)	Conductividad ± 0.1 % Salinidad ± 0.1 % TDS ± 0.1 % Temperatura ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ (0.1 $^{\circ}\text{F}$)
Compensación de temperatura	Mediante sensor de temperatura Pt1000 integrado
Temperatura de referencia (RT)	20 o 25 $^{\circ}\text{C}$ (68 o 77 $^{\circ}\text{F}$). Ajuste de fábrica: 25 $^{\circ}\text{C}$ (77 $^{\circ}\text{F}$)
Coefficiente de temperatura (TC)	0.00 a 9.99%/ $^{\circ}\text{C}$ (ajuste de fábrica: 2%/ $^{\circ}\text{C}$)
Factor de conversión TDS	0.00 a 4.44 (ajuste de fábrica: 0.64)
Patrones de calibración	147 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 12.88 mS/cm y 111.8 mS/cm (a 25 $^{\circ}\text{C}/77$ $^{\circ}\text{F}$)
Constante de célula aceptada	Entre 0.05 y 50 cm^{-1} (ajuste de fábrica: 1.0 cm^{-1})
Dimensiones del instrumento y condiciones ambientales	
Temperatura de funcionamiento	De 0 $^{\circ}\text{C}$ a 50 $^{\circ}\text{C}$ (de 32 $^{\circ}\text{F}$ a 122 $^{\circ}\text{F}$)
Temperatura de almacenamiento	De -15 $^{\circ}\text{C}$ a 65 $^{\circ}\text{C}$ (de 5 $^{\circ}\text{F}$ a 149 $^{\circ}\text{F}$)
Condiciones ambientales	80% de humedad relativa (sin condensación)
Peso	300 g
Tamaño	186 x 73 x 38 mm
Datos técnicos adicionales	
Gestión de energía	Desconexión automática tras 5 minutos de inactividad.
Tipo de protección	IP 67
Fuente de alimentación (pilas)	3 pilas de 1.5V, tipo AA. Autonomía de más de 400 horas
Conector	MP-5, multipin de 5 contactos
Garantía	
Instrumento	5 años
Sensores	6 meses

Figura III.3. Ficha del pH-metro/conductímetro Crison CM 35 +