

Projecte de Fi de Carrera
Enginyer Industrial

**Estudio y diseño de una planta de producción de
membranas cerámicas de coste reducido**

MEMORIA

Autor: Francesc Sánchez Font
Director: Lázaro V. Cremades Oliver
Convocatòria: Juny 2007 (pla 94)



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



RESUMEN

La filtración por membrana implica la separación parcial de un flujo que contiene una mezcla de dos o más componentes mediante el uso de una barrera semipermeable (la membrana) a través de la cual algunos de esos componentes tienen más facilidad para atravesar. El proceso básico de separación comprende un flujo de alimentación separado en retenido (la parte del flujo que no atraviesa la membrana) y el permeado (si atraviesa). Aunque en la mayoría de las aplicaciones el flujo de alimentación, retenido y permeado son líquidos o gases, también se puede dar el caso de que sean sólidos. Los procesos más usuales son los de ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración. Estos procesos están conducidos por diferencias de presión y serán los que se describan con mayor detenimiento en el presente proyecto.

Este tipo de procesos se han convertido en una de las nuevas tecnologías que experimentan un mayor crecimiento en las últimas décadas. Sus características los hacen adecuados para distintas aplicaciones comerciales en diversos campos, como el médico (tratamiento de plasma), clarificación y desalinización de agua, separación de gas, separación de mezclas azeotrópicas mediante pervaporación, etc. Muchas otras aplicaciones están en diferentes fases de desarrollo, como la bioseparación y la separación de hidrocarburos.

El interés en la fabricación de este tipo de membranas radica en sus ventajas frente al resto de opciones en el mercado, como son una elevada resistencia química, un bajo coste de mantenimiento y mayor vida útil. El inconveniente principal que presentan es su elevado coste de fabricación, el cual se podría abaratar aplicando la tecnología desarrollada en el proyecto LCCM (Cusidó, 2003). Actualmente, las membranas cerámicas se emplean en limitadas aplicaciones de alto valor añadido (producción de vinos, zumos, etc.), debido a su elevado coste. El objeto del proyecto es diseñar una planta industrial que permita la fabricación de dichas membranas a un coste más asequible. Se confía en que de esta forma se podrá extender el campo de aplicación de las membranas cerámicas al tratamiento de otros fluidos de menor valor añadido, como es el caso de las aguas residuales.

El proyecto describe los diferentes materiales que se utilizan como base en la fabricación de membranas cerámicas, así como su procesado, junto con la maquinaria implicada y su distribución en la planta. También se elabora un estudio de mercado del producto y se analiza el impacto ambiental asociado a su fabricación.





SUMARIO

RESUMEN.....	1
SUMARIO.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Objetivos y alcance del proyecto.....	7
2. EL PROCESO DE FILTRACIÓN TANGENCIAL.....	9
2.1. La filtración mediante membrana.....	9
2.2. La filtración clásica y la filtración tangencial.....	10
2.3. Las técnicas de filtración mediante membrana.....	12
2.3.1. Las tecnologías de alta presión: ósmosis inversa y nanofiltración.....	13
2.3.2. Las tecnologías de baja presión: ultrafiltración y microfiltración.....	16
2.4. Tipos de membrana.....	19
2.4.1. Materiales de composición.....	19
2.4.2. Diferencias de estructura.....	20
2.5. Las ayudas de filtrado.....	21
2.6. La tecnología avanzada de membrana.....	25
2.7. Fundamentos teóricos de la filtración mediante membranas.....	26
2.7.1. Membranas.....	28
2.7.2. Factores que influyen al flujo de permeado durante el proceso de filtración.....	28
2.7.3. Razones de disminución del flujo de permeado durante el proceso de filtración.....	31
2.7.4. La polarización de la concentración.....	33
2.7.5. Obstrucción y limpieza.....	34
3. ESTUDIO ECONÓMICO.....	37
3.1. Análisis de la oferta.....	37
3.1.1. Tamaño de la oferta cerámica en España.....	37
3.1.2. La cerámica técnica en España.....	38
3.1.3. Oferta mundial de membranas cerámicas.....	39
3.2. Análisis de la demanda.....	40
3.2.1. Posición actual del mercado.....	40
3.2.2. Barreras del mercado.....	41
3.2.3. Crecimiento esperado.....	41
3.2.4. Tendencias industriales y tecnológicas.....	43
3.2.5. Aplicaciones previstas de las LCCM.....	45
3.3. Análisis de costes.....	46
3.3.1. Presupuesto estimado.....	46
3.3.2. Aproximación al balance de resultados según el escenario previsto.....	47



4. EXPLICACIÓN DEL PROCESO PROPUESTO.....51

4.1. Los materiales cerámicos.....	51
4.2. Las cerámicas avanzadas.....	52
4.2.1. Alúmina (Al_2O_3).....	52
4.2.2. Nitruro de silicio (Si_3N_4).....	52
4.2.3. Carburo de silicio (SiC).....	53
4.2.4. Circonio (ZrO_2).....	53
4.3. El procesado de cerámicas avanzadas.....	54
4.3.1. Compactación y sinterizado.....	54
4.3.2. Sinterización reactiva.....	54
4.3.3. Proceso sol gel.....	54
4.3.4. Unión y ensamblaje de piezas cerámicas.....	54
4.4 Generalidades de la fabricación de LCCM.....	55
4.4.1. Tecnología de bajo coste y adecuada para tratamientos terciarios.....	56
4.5. Esquema del proceso.....	57
4.6. Maquinaria del proceso en el almacén de materias primas.....	58
4.6.1. Molino de bolas.....	58
4.7. Maquinaria del proceso en la planta de producción.....	59
4.7.1. Unidades de mezclado, dosificado y otras.....	59
4.7.2. Extrusora recolectora.....	59
4.7.3. Cortado de la pieza en crudo.....	60
4.7.4. Túnel de secado.....	61
4.7.5. Horno de sinterizado.....	62
4.7.6. Unidad de aplicación de las capas filtrantes.....	64
4.7.7. Unidad de corte final.....	66
4.7.8. Control de calidad.....	66
4.8. Proceso de finalización y presentación de producto.....	67

5. MAQUINARIA ELEGIDA PARA EL PROCESO.....69

5.1. Mezcladora-amasadora.....	69
5.2. Extrusora.....	70
5.3. Recinto de secado.....	71
5.4. Horno de sinterizado.....	72
5.5. Bomba peristáltica para el engobado.....	74
5.6. Unidades de cortado.....	75

6. DISEÑO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN.....77

6.1. Distribución espacial del edificio de fabricación.....	77
6.1.1. Desglose por secciones.....	78
6.1.2. Almacenamiento y expedición.....	80
6.2. Necesidades de suministros energéticos, agua y comunicaciones.....	81
6.3. Características de la maquinaria.....	82



7. RESUMEN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO.....	83
7.1. Desglose de impactos en las diferentes etapas.....	83
7.2. Necesidades de agua.....	85
7.3. Necesidad de electricidad.....	86
7.4. Impacto asociado al uso y fin de vida de membranas cerámicas.....	86
7.4.1. Uso.....	86
7.4.2. Fin de vida útil.....	87
7.5. Consideraciones sobre riesgos laborales.....	87
8. CONCLUSIONES.....	89
LEGISLACIÓN APLICABLE.....	91
AGRADECIMIENTOS.....	93
BIBLIOGRAFÍA.....	94

ANEJO A: TABLAS COMPLEMENTARIAS

ANEJO B: INSTALACIÓN ELÉCTRICA

ANEJO C: PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS

ANEJO D: IMPACTO AMBIENTAL

ANEJO E: LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

ANEJO F: COSTES DE PROYECTO

ANEJO G: PLANOS





1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de membrana es un término genérico para una serie de procesos de separación diferentes y muy característicos. La separación por membrana se basa en la utilización de membranas semi-permeables, cuyo grado de permeabilidad define el proceso. En 1748, el científico francés Jean Antoine Nollet (1700-1770), diseña la membrana con permeabilidad selectiva, que permite separar partículas según su tamaño. La etapa de oro de esta tecnología empieza en 1960 con la invención por parte de Loeb y Sourirajan de la primera membrana asimétrica de acetato de celulosa para aplicaciones de OI. Este hecho consiguió captar el interés comercial y académico, principalmente por su aplicación para desalinización. Desde entonces, se fueron realizando avances en todas las fases de la tecnología de membrana: aplicaciones, herramientas de investigación, estructuras químicas y físicas, formación y configuraciones. A partir de los años 80, la nanofiltración obtiene un gran impulso debido a su aplicación como sistema de desmineralización. Es durante los últimos diez años cuando la micro y la ultrafiltración mediante membrana han avanzado con más celeridad. Esto ha sido debido en gran parte a una presión jurídica en EEUU y Europa, dónde se busca una reducción de la turbidez del agua, así como una desinfección de ésta sin ayuda de otros productos.

1.1. Objetivos y alcance del proyecto

El proyecto plantea el diseño de una planta de fabricación de membranas cerámicas de bajo coste, considerando que se dispone de una nave industrial, a falta de divisiones interiores, con las medidas que se detallarán más adelante. Las membranas que se fabricarán pertenecerán al rango de micro y ultrafiltración tangencial, y estarán destinadas a diversas aplicaciones, entre las que destaca la de tratamiento terciario de aguas residuales, por motivos ambientales.

El diseño de la planta se ha solucionado de forma que se optimice el espacio y se logre la máxima fluidez de entrada de materia prima y salida de producto. Se ha considerado una necesidad de espacio futura, por lo que las dependencias son de sobra espaciosas, y en cuanto a la elección de materiales, se han elegido los estándares habituales en naves industriales, atendiendo a criterios económicos. Esta planta permitirá trabajar de modo continuo o discontinuo atendiendo a la demanda. El siguiente objetivo del proyecto es la elaboración de un estudio económico y de mercado, en el que se trata de medir la potencialidad de la demanda y describir la oferta. Se intenta justificar la creación de la planta mediante la constatación de la existencia de un hueco en el mercado para el producto fabricado.





2. EL PROCESO DE FILTRACIÓN TANGENCIAL

2.1. La filtración mediante membrana

Los procesos de membrana son esencialmente un proceso de separación basado en propiedades moleculares. Una membrana es una lámina fina de material que actúa como un filtro muy específico que dejará pasar unas sustancias (usualmente agua u otro líquido portante), mientras que retiene otras, como sólidos suspendidos y otras materias. El flujo impulsor a través de la membrana se debe a la aplicación de una fuerza motriz, como puede ser la aplicación de baja o alta presión, el mantenimiento de un gradiente de concentración a ambos lados de la membrana o la introducción de un potencial eléctrico. De esta forma se rompe el equilibrio entre fases, el cual trata de compensar el flujo atravesando la membrana.

La filtración por membrana se utiliza para purificar o concentrar disoluciones y suspensiones o bien para fraccionar una mezcla de varios solutos y se puede utilizar como una alternativa a la floculación, las técnicas de purificación de sedimentos, la adsorción (filtros de arena y filtros de carbón activado, intercambiadores iónicos), extracción o destilación.

Tabla 2.1. Operaciones de membrana basadas en procesos moleculares [Kumar, 2001].

Propiedad molecular	Proceso de separación
Tamaño	Filtración, MF, UF, NF, diálisis, separación de gas
Afinidad	Adsorción/ Absorción OI, pervaporación, separación de gas
Carga	Intercambio iónico, electrodiálisis
Densidad	Centrifugación
Presión de vapor	Destilación por membrana
Punto de fusión	Cristalización
Naturaleza química	Complejación, sistemas de transporte activo

Algunas de las ventajas que generalmente conlleva operar con membranas son las siguientes:

- Reducción del número de procesos en sistemas de tratamiento.
- Potencial para la automatización de procesos y compactidad de las plantas.
- Huella ambiental mucho menor que las plantas de la misma capacidad.
- Facilidad de escalado y expansión.
- Reducción o eliminación de productos químicos.
- Menos producción de fangos.
- Reutilización de aguas y reciclado.



En cambio, existen algunos puntos negativos, como altos costes de fabricación, la reducida vida útil de las membranas o el embrutecimiento de éstas.

2.2. La filtración clásica y la filtración tangencial

Cuando se realiza una filtración frontal o total, todo el líquido que entra en contacto con la superficie de la membrana es forzado a pasar a través de ella. Algunos sólidos y componentes quedarán retenidos por la membrana mientras el resto pasará al otro lado. Este proceso depende principalmente del tamaño de poro de la membrana, aunque existen otros factores en juego. En consecuencia, el líquido gradualmente experimentará una mayor resistencia a pasar a través de la membrana, debido a la acumulación de sustancias. Cuando la presión del fluido entrante se mantiene continua, esto resultará en un decrecimiento del flujo. Después de un tiempo el flujo habrá disminuido tanto que la membrana necesitará ser limpiada, ya que la capa de retenido habrá alcanzado un grosor demasiado elevado. La presión necesaria para hacer pasar el flujo a través de la membrana es la llamada Presión Transmembrana (PTM).

La PTM se define como el gradiente de presión de la membrana, o la presión media del flujo de entrada menos la presión de permeado. A medida que se vaya colmatando la superficie filtrante, se deberá aumentar este parámetro si se quiere continuar adecuadamente el proceso, hasta llegar a un punto límite en que se deberá poner en marcha el proceso de extracción y limpieza.

Durante la limpieza de una membrana los componentes que se han acumulado y entorpecen la filtración son retirados hidráulica, química o físicamente. Cuando se realiza el proceso de limpieza, un módulo queda temporalmente sin funcionar y como resultado, la gestión con filtración frontal es un proceso discontinuo. En la práctica evidentemente se intenta hacer que el tiempo de filtración sea lo más largo posible, y aplicar un menor tiempo de limpieza posible.

Este tipo de filtración tiene por tanto ciertos inconvenientes:

- Precisan de elevadas presiones de trabajo, lo que repercute en un mayor coste energético.



- Las membranas se saturan rápidamente, bloqueando el funcionamiento del sistema de filtrado y disminuyendo su vida útil.
- No permite efectuar filtraciones continuas.
- A menudo precisan de ayudas de filtrado (las llamadas ‘filter aids’) que son materiales para aumentar la eficacia de las filtración, con lo que se incrementa significativamente el coste y el volumen de residuos.

Pese a estos aspectos negativos, la filtración total puede ser una buena solución para muchas aplicaciones, como el concentrado de componentes.

Cuando se realiza una filtración tangencial, el retenido es reciclado para que, mediante un ciclo de realimentación, vuelva a formar parte del flujo de alimentación. Este flujo entrante, es paralelo a la membrana por lo que este tipo de filtración permite trabajar con rangos de presión muy inferiores a los de la filtración total. Solamente una pequeña parte del flujo atravesará la membrana convirtiéndose en permeado, y la mayor parte irá a parar al depósito de retenido.

La velocidad del flujo de agua paralelo a la membrana es relativamente alta. El propósito de este flujo es el control del grosor de la capa. Como consecuencia de la velocidad a la que fluye el agua, las fuerzas de flujo son altas, lo que permite que los sólidos suspendidos sean arrastrados por el flujo de agua.

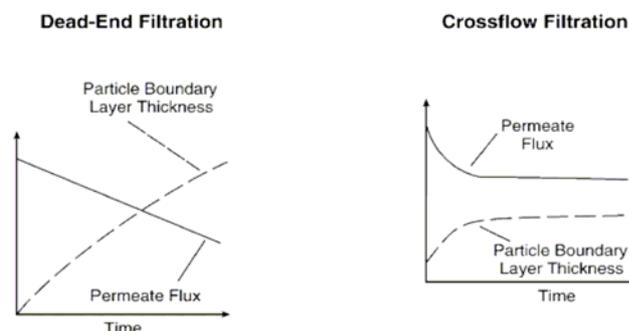


Figura 2.1. Comparativa de flujo de permeado y grosor de capa de retenido entre filtración clásica y tangencial [U.S. Department Of Energy, 1998].

Con este sistema de filtración se disminuye la posibilidad de atascamiento (tan solo pasa una parte del flujo total por la membrana) y se retrasa y disminuye la formación de costra de lodo. La gestión por filtración tangencial puede alcanzar flujos estables. De todas formas, la



limpieza de instalaciones de flujo tangencial debe ser aplicada de vez en cuando. La limpieza se realiza mediante chorro de agua trasero, mediante limpieza química u otros procesos. El sistema de flujo tangencial se aplica para ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y microfiltración, los procesos más habituales de membrana, dependiendo de los objetivos deseados.

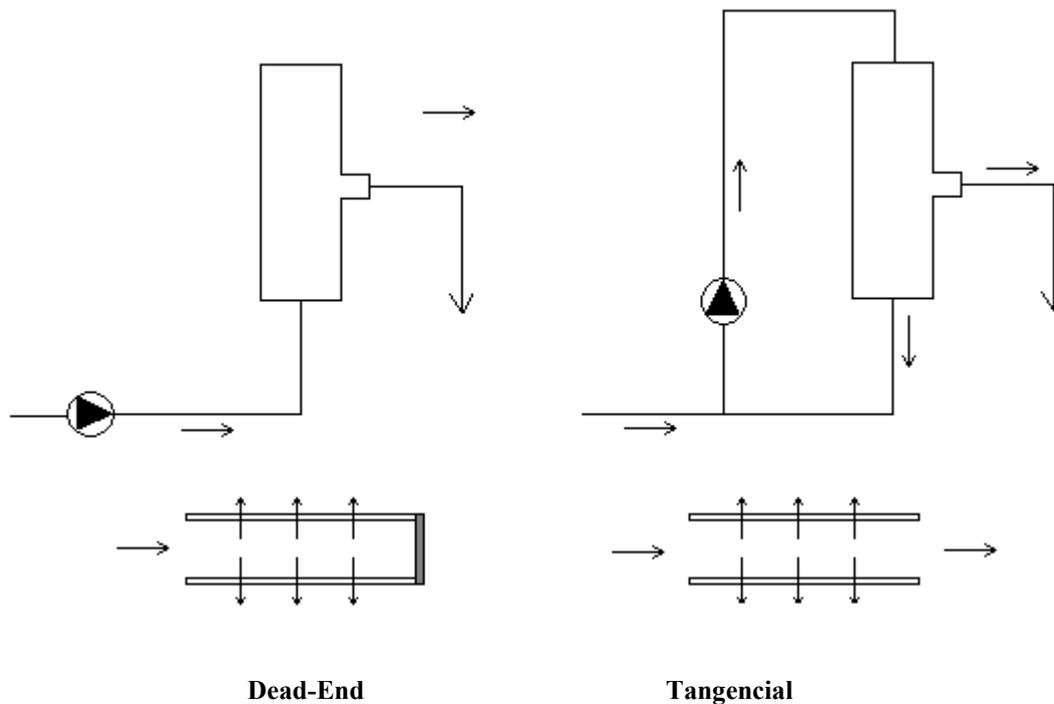


Figura 2.2. Filtración total y filtración tangencial.

2.3. Las técnicas de filtración mediante membrana

La habilidad de la membrana para diferenciar entre materiales determina su selectividad, factor que determina la efectividad de un proceso de filtración de membrana y se expresa mediante un parámetro llamado factor de retención o de separación (expresado en l/m^2h). Otro factor importante puede ser la productividad, expresado en las mismas unidades.

Cuando se emplea el término procesos de filtración, se hace referencia a las operaciones de membrana de MF (microfiltración), UF (ultrafiltración), NF (nanofiltración) y OI (ósmosis inversa). Estas operaciones tienen en común la fuerza impulsora: el gradiente de presión entre paredes de la membrana, lo que hace posible el desplazamiento del fluido hacia la zona de menor presión.



Desde la perspectiva industrial, muchos procesos de separación de efluentes que anteriormente usaban procesos químicos (caso de la floculación¹ y la precipitación) o físicos (caso de la centrifugación) han encontrado en los procesos de filtración por membrana una alternativa de manejo sencillo, que permite una construcción por etapas ó módulos, y que puede ofrecer una mejora en la calidad de los productos obtenidos, al no estar sometidos a procesos agresivos o contaminantes sobre el producto. Además, la operación de la técnica de filtración con membranas requiere normalmente un bajo consumo energético.

2.3.1. Las tecnologías de alta presión: ósmosis inversa y nanofiltración

La ósmosis es un proceso natural que ocurre en plantas y animales. De forma esquemática se puede decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones se unen a través de una membrana semipermeable (es decir, permite el paso de agua pero no de sales), existe una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las concentraciones finales, con lo que la diferencia de altura obtenida (se suponen los recipientes de cada soluto al mismo nivel inicial) se traduce en una diferencia de presión, llamada osmótica.

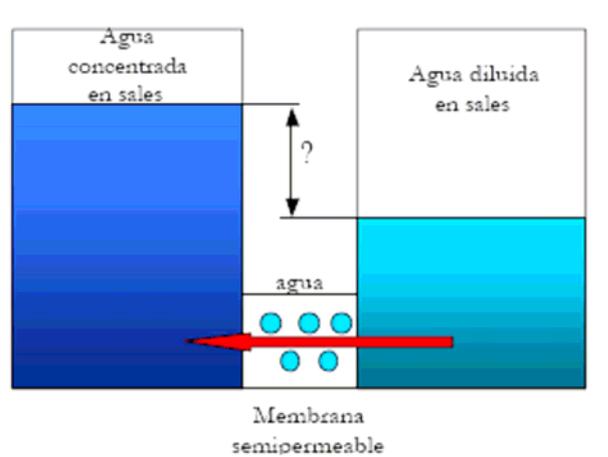


Figura 2.3. Proceso natural de ósmosis [Valero, Uche y Serra 2001].

Sin embargo aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica de una disolución respecto de otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular agua de la disolución más concentrada y purificando la zona con menor concentración, obteniendo finalmente un agua de pureza admisible, aunque no comparable a la de procesos de

¹ Transformación que sufren las suspensiones coloidales por asociación de las partículas constituyentes.



destilación. Por eso es altamente recomendable para la filtración de aguas salobres², en las que la sal a rechazar es mucho menor que en aguas marinas. La cantidad de permeado depende de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, de sus propiedades y de la concentración del agua bruta, y la calidad del agua permeada suele estar en torno a los 300-500 ppm (o mg/l) de TDS (Sólidos disueltos totales), cifra un orden de magnitud mayor al agua obtenida en un proceso de evaporación.

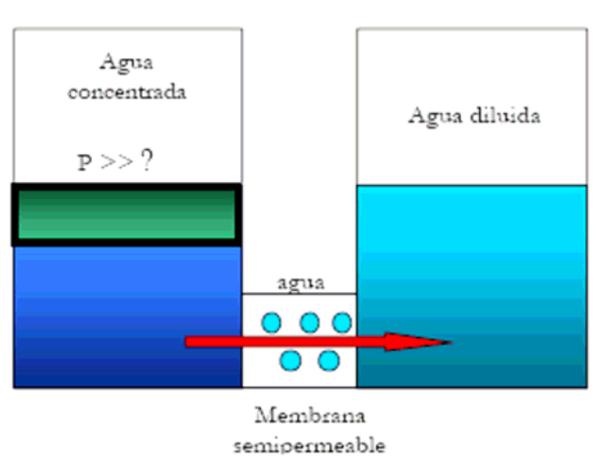


Figura 2.4. Proceso de ósmosis inversa [Valero, Uche y Serra 2001].

Una membrana para realizar ósmosis inversa debe resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. Por ejemplo, un agua sucia con 35.000 ppm de TDS a 25°C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para obtener permeado. Además debe ser permeable al agua para permitir el flujo y rechazar un porcentaje elevado de sales. En el caso de la ósmosis inversa, se recurre a la filtración tangencial, es decir, la dirección de flujo del agua a limpiar siempre es paralela a la superficie de la membrana, lo que implica que tan sólo una parte del agua sucia de alimentación pasa realmente a través de ella (un proceso clásico de filtración lo haría en su totalidad), y que no se acumulen sales en la membrana al arrastrarse por el agua sucia que no pasa por la membrana.

El proceso de ósmosis inversa es simple, y a priori solo son necesarias las membranas que filtren el contenido salino y el equipo presurizador. Pero una planta de OI es mucho más compleja que una agrupación de módulos y una o varias bombas, por ejemplo las membranas

² Se considera agua salobre al agua con mayor presencia de sal disuelta que el agua dulce y menor que el agua de mar. Técnicamente, es la que posee entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro (o 0,5 a 30 ppm).



se ensucian con la operación continuada y necesita un pretatamiento intensivo (mucho mayor que en los procesos de destilación), que comprende entre otros:

- Clorado para reducir la carga orgánica y bacteriológica del agua bruta.
- Filtración con arena para reducir la turbidez.
- Acidificación para reducir el pH y limitar la formación de depósitos calcáreos.
- Inhibición con polifosfatos de la formación de sulfatos de calcio y bario.
- Declorado para eliminar el cloro residual.
- Cartuchos de filtrado de partículas requeridos por los fabricantes de membranas.
- Microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) en el caso de aplicaciones industriales muy específicas ó en reutilización de aguas residuales.

La nanofiltración es un proceso de filtración por membranas operadas bajo presión de trabajo entre 5 kg/cm² y 35 kg/cm². Permite el paso de solventes y sales monovalentes, iones metálicos y pequeñas moléculas orgánicas de peso molecular 200 a 20000 u.m.a., mientras que rechaza las sales multivalentes y las macromoléculas. Retiene materiales de 10 a 100 Å (1 Å equivale a 10⁻¹⁰ m). Estos rangos de trabajo introducen un sistema de selección entre las membranas de ultrafiltración y ósmosis inversa.

Los rendimientos obtenidos en el tratamiento de aguas residuales son muy variados según el fabricante de las membranas y la calidad del efluente de entrada. Aproximadamente, se pueden alcanzar niveles de hasta el 95 % de eliminación de sales y un 90 % de reducción de DQO³ (Demanda Química de Oxígeno).

Las membranas empleadas en estos tratamientos son usualmente capas de hojas muy delgadas microporosas sujetas a una estructura de soporte más gruesa y porosa, generalmente fabricada en polipropileno o poliéster. Funcionan como filtros asimétricos, variando la resistencia al flujo y la caída de presión según el lado de la membrana que de al flujo de proceso. Estas técnicas de filtrado están más asentadas en el campo del suministro de aguas potables, tanto en la desalación como paso final de potabilizadoras (tratamientos terciarios).

³ Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg O₂/litro.



2.3.2. Las tecnologías de baja presión: ultrafiltración y microfiltración

El principio de la micro y la ultrafiltración es el mismo que los procesos anteriores. Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Las partículas de mayor tamaño que los poros de la membrana son retenidas totalmente. Las partículas que son más pequeñas que los poros de la membrana son retenidas parcialmente, dependiendo de la construcción de una capa de rechazo en la membrana. La microfiltración y la ultrafiltración son procesos dependientes de la temperatura, que retienen sólidos disueltos y otras sustancias del agua en menor medida que la nanofiltración y la ósmosis inversa.

Con la ultrafiltración, se separan los coloides, partículas y especies solubles de elevada masa molecular (1000-80000 u.m.a.). Para la eliminación completa de los virus, se requiere la ultrafiltración, mientras que con la microfiltración solo se eliminarían parte de ellos. Los poros de las membranas de ultrafiltración pueden retirar de los fluidos partículas de 0.001 a 0.1 μm aproximadamente. La ultrafiltración también puede aplicarse para el pre-tratamiento de agua antes de la nanofiltración o de la ósmosis inversa.

Ejemplos de campos en los que se aplica la ultrafiltración son:

- La industria de productos lácteos (leche, queso).
- La industria alimentaria (proteínas).
- La industria del metal (separación de emulsiones agua/aceite, tratamiento de pinturas).
- La industria textil.

Las membranas usadas para la microfiltración tienen un tamaño de poro de 0.1 – 10 μm . Estas membranas de microfiltración retienen todas las bacterias. Parte de la contaminación viral es atrapada en el proceso, a pesar de que los virus son más pequeños que los poros de la membrana de microfiltración. Esto es debido a que los virus se pueden acoplar a las bacterias. La microfiltración sirve para filtrar un efluente, extrayendo un filtrado estéril y libre de sólidos suspendidos y permite retener partículas tales como coloides, levaduras, bacterias, emulsiones, etc. Para separar partículas de tamaño más importante, no es necesario utilizar la filtración tangencial, y entramos de nuevo en el campo de la filtración clásica.



Algunos ejemplos de aplicaciones de la microfiltración son:

- Aclaración de zumos de frutas, vinos y cerveza.
- Separación de bacterias del agua (tratamiento biológico de aguas residuales).
- Tratamiento de efluentes.
- Separación de emulsiones de agua y aceite.
- Esterilización por frío de bebidas y productos farmacéuticos.
- Pre-tratamiento del agua para nanofiltración y ósmosis inversa.
- Separación sólido-líquido para farmacias e industrias alimentarias.

Tabla 2.2. Características generales de los tipos de membrana [Wagner, 2001].

	Osmosis inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Membrana	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica/ Asimétrica
Grosor Película	150 μm 1 μm	150 μm 1 μm	150-250 μm 1 μm	10- 150 μm
Tamaño de poro	<0.002 μm	<0.002 μm	0.2-0.02 μm	4-0.02 μm
Rechazo	Componentes de alto y bajo peso molecular. (sales, glucosa, aminoácidos)	Componentes de alto peso molecular. (oligosacáridos glucosa, aminoácidos)	Macromoléculas, proteínas, polisacáridos, virus	Partículas, bacteria, barro
Material habitual	Polimérico	Polimérico	Cerámico, polimérico.	Cerámico, polimérico.
Módulos de membrana	Tubulares (espirales y planas)	Tubulares (espirales y planas)	Tubulares (espirales, fibra hueca y planas)	Tubulares (fibra hueca)
Presión de operación	15-150 bar	5-35 bar	1-10 bar	<2bar

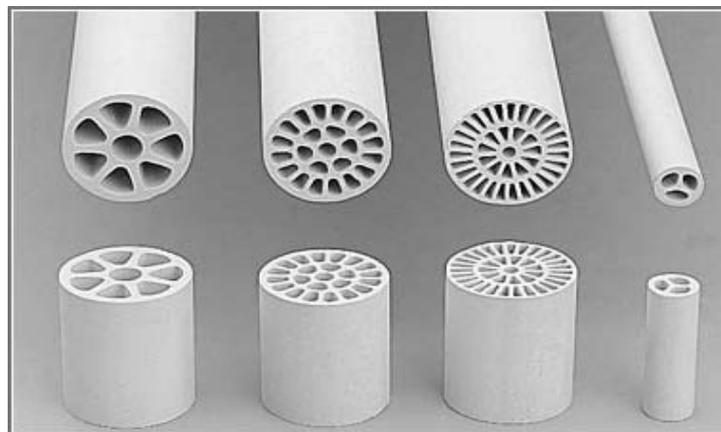


Figura 2.5. Membranas cerámicas tubulares [Rodríguez, E, 2003].



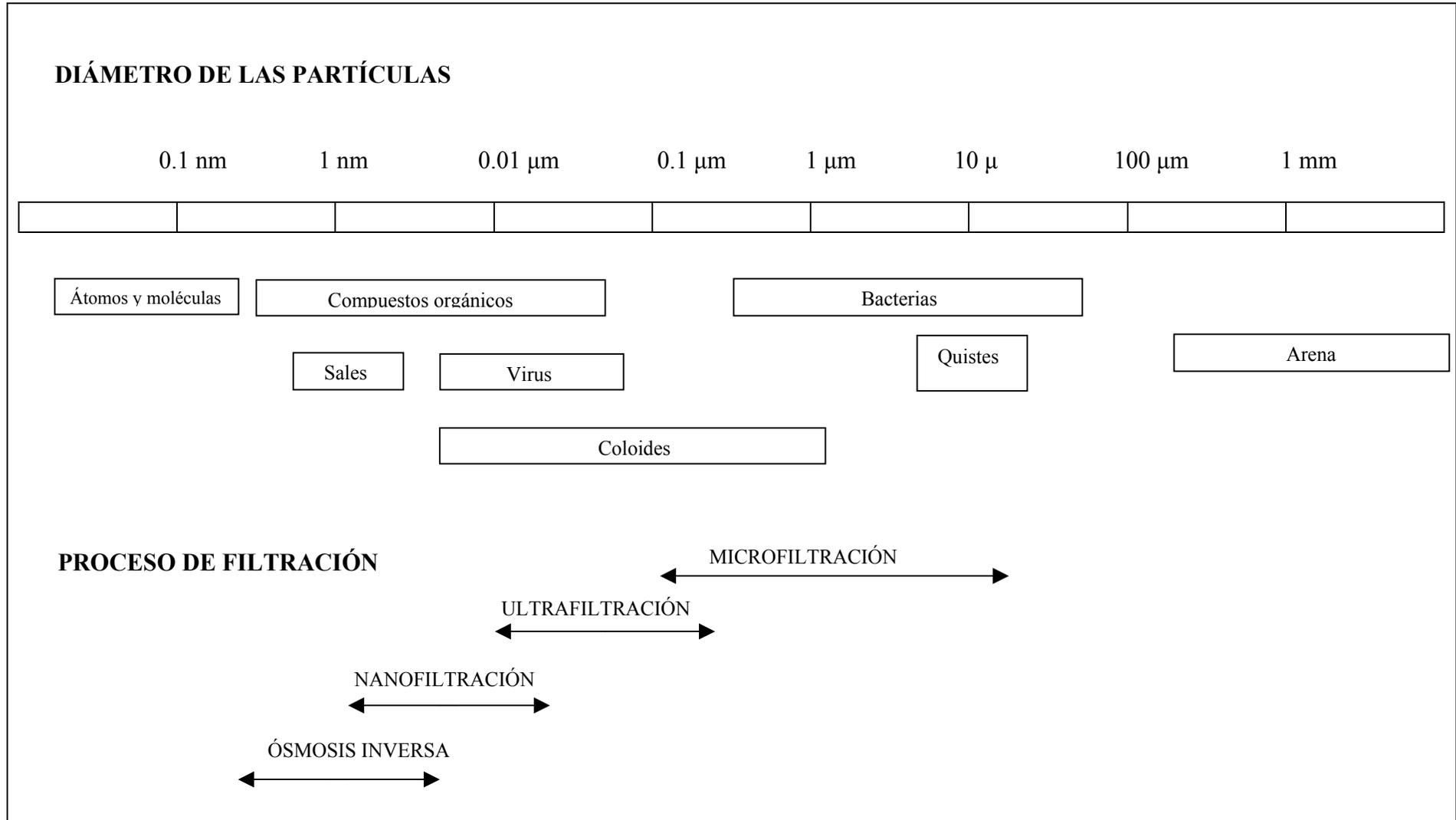


Figura 2.5. Alcance de los diferentes procesos de filtración.

2.4. Tipos de membrana

El punto más importante es la diferencia del tamaño de partícula separada. En función del tamaño de las partículas separadas mediante procesos de filtración tangencial, se distingue entre los cuatro procesos de filtración tangencial basados en diferencias de presión. En los siguientes apartados se describen las diferencias físicas que hay entre las membranas.

2.4.1. Materiales de composición

Según la aplicación requerida, se utilizan diversos materiales. Las dos clases genéricas son las membranas orgánicas y las minerales, llamadas así por la naturaleza del material utilizado para su fabricación.

Las membranas orgánicas, las más antiguas, se fabrican con diversos polímeros (acetato de celulosa, polisulfoso, PVDF, acrilonitrilo...), cuya elección se efectúa en función de las necesidades: tipos de reacciones químicas posibles, necesidad de homologación alimentaria, temperatura de trabajo, etc.

Los polímeros usados en estas membranas pueden ser hidrofílicos e hidrófobos. En el caso de los primeros, el agua se asocia con la membrana estableciendo enlaces de puente de hidrógeno. En los hidrófobos existe el problema de la adición a su estructura de las partículas hidrófobas presentes en el agua de alimentación, generando esto un aumento del embrutecimiento de las membranas, aunque por contra presentan mayor estabilidad mecánica, química y térmica que los polímeros hidrofílicos.

En general, los polímeros hidrofílicos son más usados en procesos destinados a retención salina, mientras que los hidrófobos son más usados en procesos de filtración de agua a baja presión. Existe la opción de combinarlos en membranas compuestas para aprovechar las ventajas de ambos materiales.

2.4.1.1. Los polímeros hidrofílicos.

- Celulosa y derivados. Son polímeros de bajo coste. Para el tratamiento de aguas se usan membranas de éster de celulosa, las cuales, aunque son sensibles a la hidrólisis alcalina i a la degradación biológica, se usan ampliamente en desalación, desinfección y clarificación y son relativamente resistentes al cloro.



- Poliamidas aromáticas. Se usan en procesos de desalación por su alta selectividad. Presenta mayor estabilidad química y térmica comparativamente con los polímeros de celulosa, aunque presenta sensibilidad a la degradación oxidativa y no es compatible con trabajo con fluidos clorados.
- Poliacrilonitrilo. Menos hidrófilo que los anteriores, es usado generalmente en procesos de ultrafiltración.

2.4.1.2. Los polímeros hidrófobos.

- Polisulfonas y poliestersulfonas. Es uno de los materiales mas utilizados para UF y MF desde su desarrollo en 1975. La mayor ventaja de estos compuestos es su resistencia tanto a la temperatura como al pH. Se utiliza principalmente en la industria láctea y de alimentación en general y también se utilizan como cuerpo soporte en membranas compuestas. Este tipo de membranas sin embargo por lo general no toleran aceites, grasas y disolventes polares y a menudo se presentan junto a polímeros hidrofílicos para combatir el embrutecimiento.
- Otros polímeros hidrófobos: politetrafluoroetileno, polietileno, policarbonato o isopropileno, etc.

2.4.1.3. Las membranas inorgánicas.

Las materias orgánicas tienen límites de resistencia mecánica, química y a la temperatura, lo que dio lugar en los ochenta a la utilización de nuevos materiales, tales como el Zirconio o el Titanio. Las membranas minerales satisfacen exigencias nuevas: trabajo con productos químicos, abrasivos o con altas temperaturas, necesidad de esterilización con vapor..., abriendo así nuevas vías a las técnicas de filtración tangencial. Estos materiales presentan una buena estabilidad térmica y química, pero presentan el inconveniente de que se procesan a temperaturas muy elevadas, incrementando mucho el coste energético de su fabricación.

2.4.2. Diferencias de estructura

La estructura de las membranas se ha mejorado con el tiempo optimizando los rendimientos de las técnicas de filtración tangencial.

Inicialmente, las membranas tenían una estructura simétrica, que significa que el tamaño de los poros seguía siendo prácticamente constante en todo el espesor de la membrana. En este



tipo de membrana todo el espesor provoca resistencia ante la masa transferida actuando como una barrera selectiva. Eso conducía a problemas de graves pérdidas de cargas (aumento del consumo energético) y de colmatado de las membranas. En la actualidad, este tipo de membranas son muy poco utilizadas.

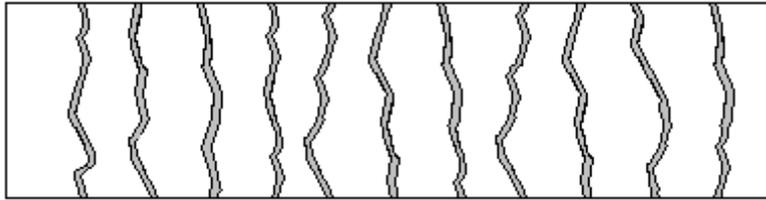


Figura 2.7. Membrana simétrica [modificado de Vidal-Asiain, 2005].

Para combatir esos inconvenientes, se desarrollaron membranas que tenían poros del tamaño del corte molecular únicamente en la parte de la membrana que está en contacto con el fluido a tratar.

Según la composición de la membrana (orgánica o mineral), se trata de membranas asimétricas o compuestas. La estructura asimétrica de las membranas orgánicas se obtiene actuando sobre factores de concentración, de temperaturas y de precipitación del polímero. La estructura compuesta en las membranas minerales se obtiene apilando capas de granos de diferentes tamaños.



Figura 2.8. Membrana asimétrica (o de gradiente) y membrana compuesta [modificado de Vidal-Asiain, 2005].

En las membranas asimétricas y compuestas el tamaño de poro en la superficie es más pequeño por lo tanto sólo esta parte actúa como barrera selectiva. Las partículas más grandes no entrarán en el cuerpo de la membrana de este modo se evita el atascamiento de la membrana. Este tipo de membrana combina la alta tasa de filtración de una membrana fina con la alta selectividad de una membrana densa.



Las membranas compuestas normalmente están formadas por dos capas: la capa soporte y la capa de filtración. El soporte habitualmente es una membrana simétrica la cual posee una alta porosidad, no influye en la selectividad y tiene más espesor que la capa filtrante. Esta, es muy fina (puede llegar hasta únicamente 1 μm), y es la responsable de la selectividad de la membrana.

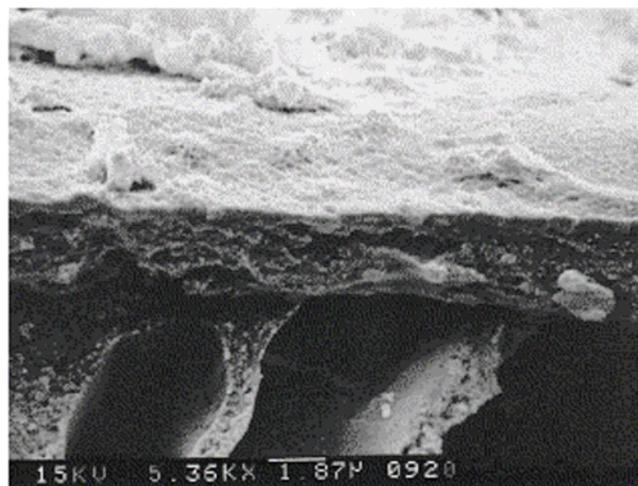


Figura 2.9. Imagen SEM⁴ de sección de membrana compuesta [Sagle y Freeman 2004].

En las membranas compuestas, la capa filtrante y el cuerpo soporte están fabricados de materiales diferentes. Los proveedores de membranas de micro y ultrafiltración utilizan mayoritariamente para la capa filtrante óxidos de aluminio, de zirconio o de titanio; y para el cuerpo soporte de la membrana carbono u óxidos de aluminio o de circonio. Estos materiales tienen la ventaja de tener una muy buena estabilidad térmica y química, pero presentan el inconveniente de que en general se sinterizan a temperaturas muy elevadas y, además, forman pastas cerámicas de muy baja plasticidad.

Las membranas no simétricas se pueden clasificar también como normales o inversas. En las normales la capa filtrante está en contacto con el flujo de alimentación y en las inversas, las menos utilizadas, es el cuerpo soporte el que está en contacto con el flujo de alimentación.

⁴ Scanning Electron Microscopy; Técnica usada para la captura de vistas magnificadas de membranas.



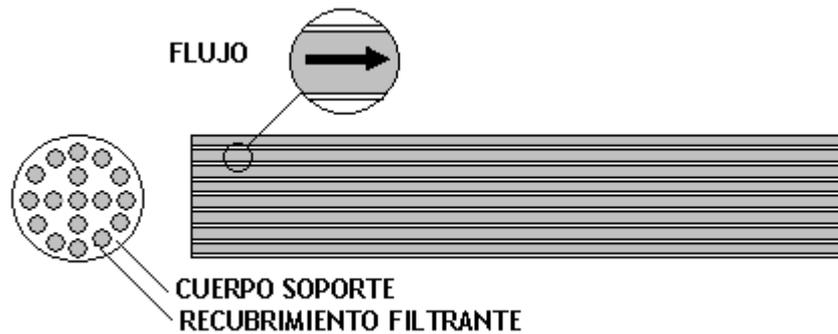


Figura 2.10. Distinción entre soporte y elemento filtrante.

Tabla 2.3. Cuadro resumen de tipologías de membrana [Alcarria, 2005].

Mecanismo de separación	Tamaño de poro	Porosas
		No porosas o densas
	Diferencia de solubilidad y difusividad de los materiales en la membrana	
Morfología	Carga iónica	
	Membranas isotrópicas	
	Membranas anisotrópicas	Asimétricas
Geometría		Mixtas
	Membranas planas	
	Membranas cilíndricas	Tubular
Material de composición (naturaleza química)		Fibra hueca
	Membranas orgánicas (polímeros)	Hidrófilos
	Membranas inorgánicas	Hidrófobos
		Cerámicas

2.5. Las ayudas de filtrado

Los ‘filter aids’ o ayudas filtrantes son aplicados en una amplia variedad de procesos con fluidos desde alimenticios y farmacéuticos hasta en la industria química. Estas ayudas son básicamente polvos inorgánicos minerales o materiales fibrosos orgánicos que se combinan con los elementos de filtración para incrementar la actuación de éstos, y poseen la ventaja de no transferir color, olor o sabor a los líquidos filtrados, y son insolubles en ácidos minerales u orgánicos. Las ayudas filtrantes se hacen circular añadidas al fluido a filtrar a través del filtro, formando una capa adecuada (*precoat*) destinada a atrapar los componentes deseados. Se depositan las partículas gruesas primero, seguidas de las más pequeñas. Esta adición de la ayuda filtrante al flujo se conoce como *bodyfeed* y la dosificación varía con el número de



sólidos contenidos en el flujo y la aplicación a que esté destinado el filtrado. Las ayudas de filtrado más comunes son las diatomeas, la perlita y la celulosa.

Las diatomitas son algas unicelulares que, cuando mueren, los restos de su esqueleto se depositan en los lechos acuíferos en capas masivas. En esos lechos encontramos el material fosilizado, que se denomina diatomea, con una envoltura silícica externa que hace que su forma se conserve de manera permanente e indestructible. Su particular estructura, estabilidad química, baja densidad global, alta capacidad de absorción, gran área superficial y baja capacidad de abrasión; capacitan al material para ser aplicable comercialmente como ayuda filtrante para la separación de los sólidos que se encuentran en suspensión dentro de un medio fluido. La diatomea tiene una estructura altamente intrincada y porosa, que le permite una gran precisión en la separación.

La perlita o silicato volcánico es un mineral de roca volcánica que contiene silicio. Después de un proceso de molido y calentamiento, la perlita convierte en un ligero polvo mullido y es entonces cuando es útil como ayuda filtrante. Al no tener una estructura tan enrevesada como la diatomea, la perlita se adecua mejor a la separación de partículas gruesas de los fluidos que tienen alto contenido en sólidos.

La celulosa es un carbohidrato que es el componente principal de la madera. Se compone de moléculas ligadas de glucosa que consolida las paredes de las células de la mayoría de las plantas. Como la perlita, la celulosa posee una estructura menos intrincada que la diatomea.

Existen una serie de desventajas asociadas al uso de estas ayudas filtrantes:

- Hay efectos ambientales por la deposición del lodo o de la capa de filtración obtenidos.
- Algunas ayudas filtrantes están en desuso debido a que provocan enfermedades pulmonares debido al polvo. La aspiración de polvo de diatomea puede producir silicosis. Las autoridades sanitarias desean reducir o eliminar el uso de estas ayudas filtrantes encontrando substitutos económicos, y algunos gobiernos europeos están considerando el prohibir del uso de las diatomeas.
- El uso de las diatomeas da lugar a altos costes, debido al proceso de extracción del material. Además, el proceso para convertirlas en ayuda filtrante es costoso.



2.6. La tecnología avanzada de membrana

La tecnología avanzada de membrana (micro, ultra, nanofiltración y ósmosis inversa, si se trabaja a bajas presiones) puede trabajar tan bien o incluso mejor que la tecnología clásica con respecto a la calidad del producto, el consumo de energía y en aspectos ambientales.

Algunas ventajas de usar la tecnología avanzada de membrana son:

- Bajos requerimientos de energía y costes.
- Posibilidad de afrontar procesos con temperaturas más bajas.
- Diseños de procesos más simples.

La filtración tangencial es una de las tendencias por la que se opta actualmente, y está reemplazando un gran número de operaciones tradicionales de clarificación y esterilización en las industrias. Esta técnica se usa hoy en día con éxito por ejemplo en aplicaciones de las industrias farmacéuticas y biotecnológicas para purificar productos de alto valor añadido.

El incremento de la disponibilidad de los filtros basados en tecnologías avanzadas y los altos costes de uso y adquisición de las ayudas filtrantes harán que estos sistemas sean considerados en sectores que tradicionalmente usan otras técnicas, como puede ser la adición de ayudas filtrantes, ya que la filtración tangencial probablemente es la mejor alternativa.

Los procesos de MF, UF, NF y OI son procesos de filtración bajo presión y a una velocidad moderadamente alta, para que la probabilidad de que las partículas en suspensión del efluente queden encajadas en los poros de la membrana sea muy baja. La presión varía a partir de 0.5 bar en la microfiltración y alcanza valores de hasta 150 bar en la OI.

La separación es puramente física, no hay adición de productos químicos. En consecuencia, no hay modificación de la naturaleza de los productos tratados, punto muy importante cuando la meta es la reutilización de productos. Además, puede satisfacer exigencias que con la filtración clásica no sería posible.

- Filtrar partículas de tamaño muy pequeño (de 10 μm , a 1 nm aproximadamente).



- Aprovechar o reutilizar el residuo de la filtración (realimentación).
- Efectuar una filtración continua.
- Asegurar una calidad constante de la filtración.
- Efectuar una selección por tipo de moléculas.

Para esos casos, se requiere otra vía: la filtración tangencial, caracterizada por una circulación rápida del líquido a filtrar tangencialmente a la membrana. Así, al tiempo que se efectúa la filtración, se auto-limpia moderadamente la membrana, lo que permite trabajar más tiempo en continuo con características de funcionamiento estables (composición, caudal...).

Como se puede ver en la figura siguiente, hay una entrada (el líquido a filtrar) y dos salidas: un filtrado/permeado empobrecido y un concentrado/retenido enriquecido.

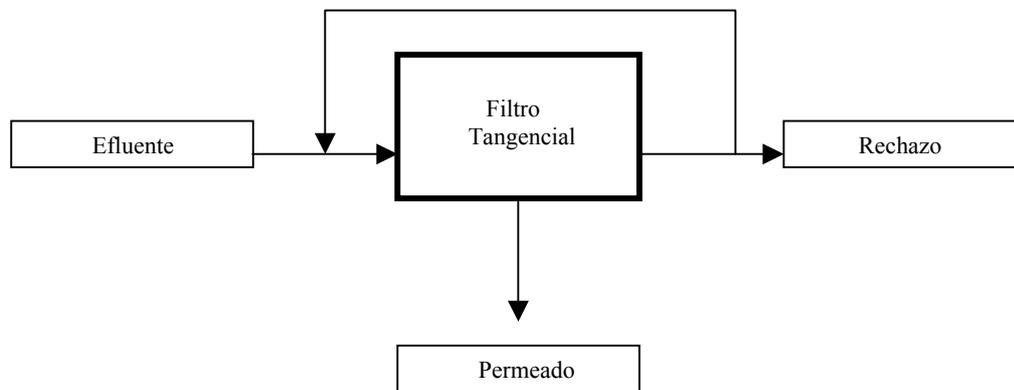


Figura 2.11. Proceso de filtración tangencial.

2.7. Fundamentos teóricos de la filtración mediante membranas

La tecnología de membrana sigue evolucionando y encontrando cada vez más aplicaciones en procesos alimentarios y farmacéuticos entre otros, y su desarrollo influenciará sensiblemente los procesos de separación en el futuro. Diversos procesos bajo presión se pueden utilizar para concentrar, esterilizar o purificar soluciones acuosas.

La tecnología avanzada de membrana puede trabajar tan bien o incluso mejor que el resto de tecnologías en cuanto a la calidad del producto, consumo de energía y aspectos medioambientales. Los costes de esta tecnología no están actualmente a un nivel moderado, lo que haría su implementación atractiva para muchas aplicaciones, pero se está en vías de



conseguirlo. La tecnología avanzada de membrana requiere que la investigación de la ciencia de los materiales se acompañe de la comprensión de los problemas relativos a los procesos industriales donde los módulos de membranas desarrollarán su función. Muy a menudo la investigación a nivel de laboratorio arroja prometedores resultados, pero es necesaria una mayor implicación de la industria con miras a desarrollar las membranas a un nivel comercial y promocionar la incorporación de los módulos de membranas junto a otras unidades de proceso.

Los argumentos para hacer esto son las obvias ventajas de esta tecnología: procesos más limpios y simples, menos aditivos químicos y menor consumo de energía. La demanda en la industria de mejores soluciones ambientales y tecnologías más limpias está impulsando el desarrollo y la implementación de la tecnología avanzada de membrana.

En la separación mediante membranas, cada membrana tiene la capacidad de transportar unos componentes más fácilmente que otros debido a las diferencias entre las propiedades físicas o químicas entre la membrana y los componentes permeados. El transporte a través de la membrana ocurre como resultado de una fuerza impulsora actuando en la alimentación y normalmente la tasa de permeado a través de la membrana es proporcional a la fuerza impulsora.

Como se ve en la siguiente tabla los procesos avanzados de membrana se pueden dividir de acuerdo con el tipo de fuerza directora que ayuda al transporte a través de la membrana.

Tabla 2.4 Procesos avanzados de membrana agrupados según fuerza directora.

Fuerza impulsora	Diferencia de presión	Diferencia de concentración	Diferencia de temperatura	Diferencia de potencial eléctrico
Procesos de membrana	-Microfiltración -Ultrafiltración -Nanofiltración -Ósmosis inversa	-Pervaporación (1) -Separación de gases -Diálisis -Membranas líquidas (2)	-Termo-ósmosis -Destilación por membrana	-Electrodíálisis -Electroósmosis
(1) La concentración de una solución coloidal tal que las partículas no pasen a través de una membrana semipermeable; la solución se pone dentro de la membrana y se evapora el solvente.				
(2) Películas finas hechas con líquidos que son estables en otro líquido (generalmente agua). Así el líquido no debe disolver en el agua, sino sin embargo se debe prevenir de derrumbarse en muchos de gotas pequeñas.				



2.7.1. Membranas

Una membrana se puede definir como una interfase que separa componentes de acuerdo con su estructura. En un sentido más amplio, una membrana es una barrera a través de la cual los fluidos y los sólidos son transportados selectivamente cuando una fuerza impulsora es aplicada.

Las primeras membranas se produjeron en Alemania en 1920 y fueron usadas como filtros bacterianos a nivel de laboratorios. Desde entonces la tecnología de membrana ha sido sensiblemente desarrollada. Hoy en día las membranas son manufacturadas con un amplio rango de materiales y pueden ofrecer una buena selectividad, una alta permeabilidad y una considerable estabilidad química.

La estructura de las membranas utilizadas se elige de acuerdo a las partículas o tamaño molecular, forma y propiedades químicas del flujo de alimentación. Las membranas también se pueden clasificar como orgánicas o sintéticas de acuerdo a su naturaleza.

Como se ha visto anteriormente, de acuerdo a su morfología o estructura, las membranas sólidas sintéticas se pueden clasificar como simétricas o asimétricas.

La selectividad es principalmente el resultado de la acción de tamizado de los poros pero también es causada por otros aspectos, como pueden ser las interacciones hidrofílicas-hidrofóbicas. Cuanto más pequeño sea el tamaño del poro mejor será la selectividad aunque esta varía mucho ya que el tamaño de los poros no es uniforme.

2.7.2. Factores que influyen al flujo de permeado durante el proceso de filtración

2.7.2.1. Presión transmembrana

La presión transmembrana es la fuerza impulsora de los procesos de membranas bajo presión, y se define como la diferencia de presión entre el costado del retenido y el del permeado.



$$PTM = P_{in} - P_p \quad (\text{Filtración frontal o total}) \quad (\text{Eq. 2.1})$$

$$PTM = \frac{P_{in} + P_{out}}{2} \quad (\text{Filtración tangencial}) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Donde,

PTM es la presión transmembrana.

P_{in} es la presión a la entrada de la membrana.

P_{out} es la presión a la salida de la membrana.

P_p es la presión del flujo de permeado.

El flujo de permeado aumenta con la PTM pero disminuye incrementando la resistencia de la membrana. La relación entre el flujo y la resistencia de la membrana se modela mediante la ecuación de Darcy.

$$J = P_i \cdot PTM \quad (\text{Eq. 2.3})$$

$$J = \frac{PTM}{\mu \cdot R_{tot}} \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Donde,

J es el flujo de permeado.

P_i es el coeficiente de permeabilidad.

μ es la viscosidad.

R_{tot} es la resistencia total de la membrana.

El flujo de permeado incrementa con la PTM pero la relación entre ellos solamente es lineal cuando la alimentación es agua pura. Si la alimentación es otra, el flujo pasa a ser independiente de la presión cuando se sobrepasa el llamado flujo límite (al que se llega cuando la capa de concentración de polarización alcanza un alto grado). Antes de llegar al flujo límite, el flujo de permeado aumenta con la presión.



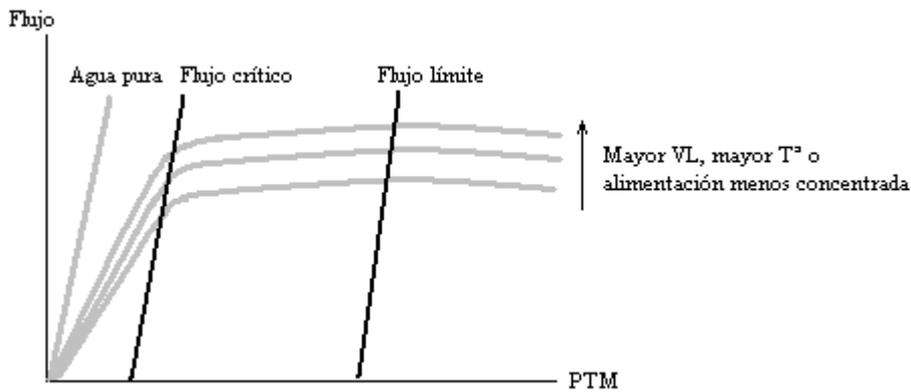


Figura 2.12. Parámetros que afectan al flujo de permeado [modificado de Mulder, 1991].

El modelo de capa de gel explica la independencia del flujo de la presión a partir del flujo límite, donde el principal responsable de la limitación del flujo es la formación de una capa de gel de una determinada concentración. Cuando se incrementa la presión sobre este límite, ocurre una compactación de la capa de gel y, por tanto, el flujo no aumenta. El concepto de la hipótesis de flujo crítico para la microfiltración fue introducido por Field et. al. (1995). De acuerdo a este concepto existe un flujo crítico, por debajo del cual no existe caída del flujo con el tiempo y el flujo depende linealmente de la PTM. Cuando se alcanza el flujo crítico el flujo aumenta más lentamente y se va acercando a un valor constante, llamado flujo límite, bajo el que es aconsejable operar.

Si la alimentación es agua pura, esta manera de representar puede ser usada para medir la permeabilidad ante el agua, lo que es un indicador de la limpieza de la membrana. Este fenómeno ocurre debido a que la membrana está libre de partículas cuando la alimentación es agua pura.

2.7.2.2. Velocidad lineal o de flujo tangencial

La velocidad lineal es la velocidad a la cual la alimentación fluye dentro de la membrana. Para una membrana tubular la velocidad lineal se puede definir como la relación entre el flujo de entrada y la sección interior de la membrana.

$$VL = \frac{F_{ret}}{A_c} \quad (\text{Eq. 2.5})$$



Donde:

F_{ret} el flujo de alimentación. [m^3/s]

A_c es la sección interior de la membrana. [m^2]

Una alta velocidad tiende a eliminar el material depositado y, consecuentemente, reduce la resistencia hidráulica a través de la membrana lo que lleva a obtener más flujo de permeado. Caudales más altos de la alimentación también reducen los fenómenos de la polarización de la concentración aumentando el coeficiente de la transferencia de masa.

2.7.2.3. Temperatura

Las altas temperaturas provocan más altos flujos de permeado, ya que la viscosidad será más baja y la difusión más alta. Sin embargo, es esencial no sobrepasar ciertos límites, debido a que las altas temperaturas desnaturalizan las proteínas y propician el crecimiento microbiano durante el proceso.

2.7.3. Razones de disminución del flujo de permeado durante el proceso de filtración

Durante el proceso de filtrado, el comportamiento de la membrana puede variar sensiblemente con el tiempo. A menudo, se puede observar un comportamiento típico: el flujo a través de la membrana disminuye con el tiempo. Este comportamiento es debido principalmente a la polarización de la concentración y al embrutecimiento de la superficie.

Estos dos fenómenos son aspectos del mismo problema, el cual es la acumulación de componentes retenidos en la capa filtrante de la membrana. Ambos introducen resistencias adicionales a la filtración en la cara en contacto con la alimentación, y al mismo tiempo, son responsables de la reducción gradual del flujo de permeado a través de la membrana y del cambio de selectividad del proceso.

La polarización de la concentración es un fenómeno reversible. El embrutecimiento es irreversible y puede ser causado por diversos mecanismos: adsorción, bloqueo de poros o formación de capa de gel. Los dos fenómenos no son completamente independientes el uno del otro, ya que el embrutecimiento puede ser resultado del fenómeno de polarización.



La magnitud de estos fenómenos depende en gran medida del tipo de membranas usadas en el proceso y de la alimentación empleada. La caída del flujo es considerable en microfiltración y ultrafiltración y, muy a menudo, el flujo es menor del 5 % del que sería para agua pura.

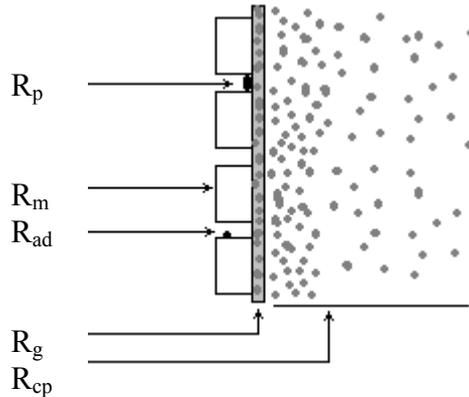


Figura 2.13. Resistencias a la filtración [modificado de Mulder, 1991].

El flujo a través de la membrana se puede describir como:

Flujo = Fuerza impulsora / (Viscosidad · Resistencia total)

$$J = \frac{PTM}{\mu \cdot R_{Tot}} = \frac{PTM}{\mu(R_m + R_{cp} + R_{ad} + R_g + R_p)} \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Las resistencias mostradas en la figura anterior, contribuyen en diferente medida a la resistencia total (R_{tot}). En el caso ideal, solamente aparecería la resistencia de la membrana (R_m). La membrana tiene la capacidad de transportar unos componentes más fácilmente que otros, o, en algunos casos, retener completamente los solutos, provocando una acumulación de moléculas retenidas cerca de la superficie de la membrana. Esto desemboca en una capa altamente concentrada próxima a la membrana y esta capa provoca una resistencia hacia la transferencia de masa, la polarización de la concentración (R_{cp}). El fenómeno de polarización siempre ocurre y es inherente a los procesos de separación con membranas. Cuando la concentración de la capa pasa a ser muy alta, se puede formar una capa de gel, apareciendo la resistencia de capa de gel (R_g). En las membranas porosas, es posible para algunas partículas con el mismo tamaño que el tamaño de poro penetrar en la membrana y bloquear estos últimos, apareciendo el fenómeno de resistencia de bloqueo (R_b). Este es el factor más importante del embrutecimiento en la filtración tangencial. Otra resistencia es la debida al



fenómeno de adsorción, (R_{ad}) que resulta de la deposición de solutos en los poros en la superficie de la membrana, debido al fenómeno de adsorción química. Este enlazado de solutos, particularmente macrosolutos tales como proteínas y polisacáridos, es el resultado de varias interacciones químicas entre el macrosoluto y la superficie de la membrana. Los factores que pueden influenciar esas reacciones físico-químicas son el pH y la temperatura entre otros.

2.7.4. La polarización de la concentración

La polarización de la concentración describe el perfil de la concentración de los solutos en la fase líquida adyacente a la membrana resultante del balance entre diferentes fenómenos de transporte. Como se ha indicado antes, este es un mecanismo reversible que desaparece tan pronto como la presión del proceso es retirada. La polarización de la concentración es responsable de la disminución del flujo en la filtración tangencial durante los primeros 15 segundos de operación.

Cuando una fuerza impulsora actúa en la solución de alimentación, los solutos son parcialmente retenidos mientras el disolvente pasa a través de la membrana. Esto significa que la membrana tiene una cierta retentividad para los solutos, mientras el disolvente puede pasar de forma más o menos libre.

Así pues, la concentración de los solutos en el permeado (C_p) es menor que la concentración de la alimentación (C_a), y este hecho es el principio básico de la separación mediante membranas. Como la membrana es en cierto grado impermeable para los solutos, los solutos retenidos se acumulan y su concentración se incrementará gradualmente. Estos, solamente pueden ser reconducidos hasta la corriente inicial por la difusión (movimiento de moléculas gaseosas o aerosoles dentro de líquidos, causados por un gradiente de concentración) y el flujo turbulento causado por el flujo tangencial a lo largo de la superficie de la membrana. Este fenómeno de acumulación en la superficie es conocido como polarización de la concentración. Esta acumulación generará un flujo de difusión de vuelta a la corriente inicial, pero después de unos instantes, las condiciones de estado estacionario se establecerán. El flujo convectivo de soluto hacia la membrana será equilibrado por el flujo de soluto a través de la membrana más el flujo de difusión desde la superficie de la membrana hacia la corriente



principal. El perfil de la concentración se establece en la capa límite como se observa en la siguiente figura, para una membrana asimétrica normal y una inversa.

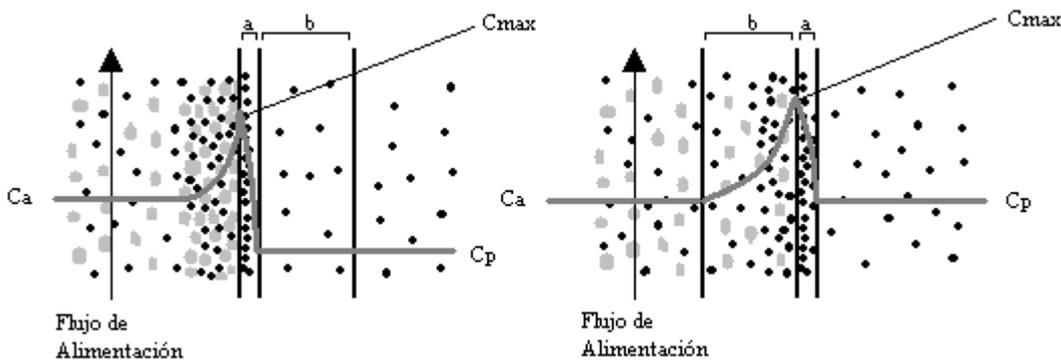


Figura 2.14. Perfil de la concentración [modificado de Mulder, 1991].

2.7.5. Obstrucción y limpieza

La obstrucción en la filtración por membrana equivale a un serio descenso del flujo. Es un fenómeno muy complejo y difícil de describir teóricamente. Incluso para una disolución dada, dependerá de parámetros físicos y químicos tales como concentración, temperatura, pH, enlace iónico e interacciones específicas. La contaminación de las membranas provoca un mayor gasto de energía, una mayor frecuencia de limpieza y un menor tiempo de vida de la membrana.

Durante los procesos de filtración de membrana la obstrucción de la membrana es inevitable, incluso con un pre-tratamiento suficiente. Los tipos y las cantidades de suciedad dependen de muchos factores diferentes, tales como la calidad del agua, tipo de membrana, material de la membrana y diseño y control de los procesos. Partículas, bioobstrucción y 'scaling'⁵ son los tres tipos principales de suciedad en una membrana. Estos contaminantes hacen que se requiera una mayor presión de trabajo para poder garantizar una capacidad continua de las membranas. Si no se procede a su limpieza, llegará el punto en el que la presión aumentará tanto que ya no será rentable económica ni técnicamente.

Las membranas se usan para eliminar una amplia variedad de sustancias procedentes de diferentes flujos de procesos. La obstrucción es el factor principal que reduce la utilidad de los procesos de membrana. El grado de obstrucción de la membrana determina la frecuencia

⁵ El scaling está constituido por la acumulación de sales insolubles (por encima de un nivel determinado de concentración) sobre la superficie de las membranas.



de limpieza, el tiempo de vida de la misma y el área de membrana necesitada, lo cual tendrá un efecto significativo en el coste, diseño y operación de las plantas con membranas.

Con el fenómeno de polarización de la concentración el flujo en un tiempo finito siempre es menor que el valor original. Cuando se han alcanzado las condiciones de estado estacionario no se observarán más caídas del flujo y éste se convertirá en constante en el tiempo. El fenómeno de polarización es reversible, pero en la práctica, una disminución del flujo aparece a menudo. Esta disminución es el resultado de la obstrucción de la membrana. Esta obstrucción está formada por partículas retenidas, coloides, emulsiones, suspensiones, macromoléculas, sales, etc., y forma un depósito en la superficie de la membrana (adsorción y constricción) o dentro de los poros (bloqueo). Dependiendo del tamaño de las partículas y del tamaño de poro de las membranas pueden aparecer diferentes tipos de suciedad, dando a lugar a diferentes caídas de flujo.

Parte del embrutecimiento se puede definir como permanente o irreversible lo que significa que requiere limpieza mecánica o química para restablecer las propiedades de la membrana. Otra fracción del embrutecimiento se puede considerar como reversible cuando el material depositado es barrido por el flujo tangencial en el momento en que la diferencia de presión ha cesado.

En las membranas no simétricas normales, la capa de suciedad se forma en la superficie de la capa de filtración. Después de cierto tiempo esta capa será la responsable de la separación. La resistencia que esta capa ofrece es muy dependiente de las condiciones dinámicas, tales como velocidad lineal y presión transmembrana. En las membranas no simétricas inversas la capa de suciedad se forma dentro del cuerpo soporte.

La suciedad se puede dividir en cinco categorías

- Componentes inorgánicos solubles.
- Partículas coloidales.
- Componentes orgánicos disueltos.
- Reactantes químicos.
- Microorganismos.



2.7.5.1. Métodos para reducir la obstrucción

La caída del flujo es perjudicial para los intereses económicos de la operación con membranas y por esta razón se deben tomar medidas para reducir el embrutecimiento. Es posible minimizarlo en cierto grado usando alguna de las siguientes alternativas:

- Incremento del transporte de soluto convectivo hacia el flujo principal. Se realiza eligiendo las condiciones apropiadas de módulo y optimizando las de flujo.
- Pretatamiento de la solución de alimentación. Se utiliza para eliminar determinados tipos de soluto o para cambiar las propiedades de la disolución. Algunos de estos tratamientos son tratamientos mediante calor, ajuste de pH, clorinación, adsorción en carbono activado o clarificación química.
- Cambios de las propiedades de la membrana. El propósito principal de los tratamientos de superficie es crear una superficie de tal naturaleza que las proteínas y otra suciedad no se peguen en ella. El embrutecimiento es más acusado en las membranas porosas que en las densas pero una distribución de tamaño de poro estrecho puede reducir la obstrucción. El uso de membranas hidrofílicas en lugar de hidrofóbicas también puede ayudar a reducirlo, así como las membranas cargadas negativamente cuando estén en presencia de coloides con carga negativa.
- Condiciones de proceso y de módulo. El fenómeno de obstrucción disminuye cuando la polarización de la concentración también lo hace.

El proceso más común de limpieza de membranas es el de limpieza química, en el que las membranas son empapadas determinados productos químicos, como el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido nítrico (HNO₃), o agentes desinfectantes, como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂). Primeramente la solución empapa las membranas durante unos minutos y después se aplica un chorro de agua delantero o trasero que enjuaga los contaminantes.

En el caso de membranas manufacturadas con materiales cerámicos, dada la elevada porosidad de los tubos de soporte y las membranas, y el reducido tamaño de los poros, la superficie expuesta a los agentes químicos es muy grande por lo que los materiales cerámicos comunes son atacados, con la consiguiente erosión progresiva de los mismos. Por este motivo es necesario que los materiales cerámicos usados como materia prima posean una resistencia mecánica y química adecuada.



3. ESTUDIO ECONÓMICO

El presente estudio económico analiza las características del sector de filtros de membrana y de los principales agentes que en él operan. Los objetivos a conseguir con la elaboración del estudio serían:

- Medir la potencialidad de la demanda (futuros clientes) según la cifra de negocios.
- Verificar que los clientes previstos existen realmente.
- Determinar la idoneidad del precio del producto.

3.1. Análisis de la oferta.

3.1.1. Tamaño de la oferta cerámica en España

España es uno de los líderes mundiales en producción, facturación y desarrollo tecnológico en el sector cerámico, el cual ha efectuado una evolución espectacular en los últimos años, con previsiones de crecimiento superadas ampliamente, especialmente en cerámica para la construcción, creándose incluso problemas de suministro en diferentes puntos del país.

La construcción de viviendas ha sido el principal responsable de la demanda de productos. Se estima que en el año 2003 se construyeron unas 700.000 viviendas y 650.000 en el 2004.

En cuanto a lo que se refiere a materias primas, se han multiplicado por diez los recursos en investigación y desarrollo de nuevos proyectos mineros, en especial en feldespatos y arcillas de cocción blanca y se multiplican también los proyectos de nuevas plantas de fabricación, especialmente de gres porcelánico y de ladrillos. Las claves del liderazgo se encuentran en unas materias primas de excelente calidad y una gran inversión en investigación y desarrollo.

Algunos de los puntos negativos del modelo de la industria cerámica española serían:

- La necesidad de cambiar a un proceso productivo más flexible desde un sistema de grandes producciones con stocks intermedios a un esquema de producción según pedido.
- Pocos suministradores nacionales de equipos técnicos e industriales.
- Bajo nivel de diversificación industrial.
- Bajas expectativas en cerámicas técnicas y electrónicas.



- Desplazamiento de los centros de producción de otras regiones geográficas con un mayor crecimiento demográfico, menores costes de mano de obra, menos restricciones medioambientales, y menos dependencia energética.
- La cada vez mayor dependencia de materias primas sintéticas o naturales extranjeras en la cerámica tradicional y las avanzadas.
- Aumento de la competencia internacional.
- El modelo industrial europeo del futuro en que este tipo de industrias asociadas al consumo de grandes cantidades de materias primas y una elevada demanda energética y valores añadidos medios no está bien consideradas y dónde el objetivo son las actividades de media a alta tecnología.

Tabla 3.1. Principales datos de la industria cerámica española en 1995 y 2002 [Regueiro, 2003].

	1995				2002			
	Empresas	Trabajadores	Valor de la producción (10 ⁶ €)	Producción	Empresas	Trabajadores	Valor de producción (10 ⁶ €)	Producción
Vidrio	760	27000	3427	2.000.000 t	690	22000	4885	3.066.000 t
Pavimentos y revestimientos	206	16800	1856	398M m ²	245	26000	3596	651M m ²
Fritas y esmaltes	23	2500	431	400.000 t	25	2750	836	750.000 t
Ladrillos y tejas	480	10500	539	19.200.000t	420	10600	900	28.000.000t
Materias primas	1040	5000	192	25.000.000t	140	4500	500	20.000.000t
Cerámica decorativa	350	5000	280	-	50	4000	200	-
Cerámica técnica	25	4000	114	-	20	3200	130	-
Refractarios	58	4000	156	339.000 t	55	1800	244	510.000 t
Cerámica de mesa	11	3000	94	60M piezas	6	650	33	32M piezas
Cerámica sanitaria	8	7000	273	9M piezas	6	3950	210	8M piezas
Alfarería	1200	20000	34	-	950	16000	30	-
TOTAL	3263	104800	7396		2507	95450	11564	

En las tablas A.1 y A.2 que figuran en el Anejo A del presente proyecto figuran datos sobre el consumo de materias primas y el mercado de minerales en España en los años 2001 y 2000.

3.1.2. La cerámica técnica en España

Su facturación se estima en algo menos del 2% de la facturación anual española de la industria cerámica en su conjunto. En la tabla siguiente tabla se citan los principales fabricantes estatales.



Tabla 3.2. Principales fabricantes de cerámicas técnicas avanzadas en España [Regueiro, 2003].

Empresa	Situación	Productos/ Servicios ofrecidos
Abrasivos Maniatan SA	Vitoria (Álava)	Rodillos centrales deprimidos, rodillos de pulido y desbastado de vidrio, puntas montadas, varillas, rodillos reguladores todos montados sobre gomas. Los materiales incluyen alúmina y carburo de silicio
Arcelite SA	Zaldibar (Vizcaya)	Servicio de recubrimientos para recubrimientos de diamante resistentes al desgaste
Auxiliar General de Electrónica SA	Bilbao (Vizcaya)	Cierres metal para tubos de vacío; componentes cerámicos pasivos de alta frecuencia.
Bonastre SPA	Caldes de Montbui (Barcelona)	Herramientas de corte de diamante policristalino y nitruro de boro cúbico.
Cerámica Técnica Industrial SA (C.T.I.)	Castellbisbal (Barcelona)	Cerámica para ingeniería de alúmina y otros materiales
Claved SA	Lliçà de Vall (Barcelona)	Esteatita y aislantes eléctricos de porcelana
Diamant Boart Ibérica SA	Vicálvaro (Madrid)	Productos abrasivos de diamante y CBN, incluyendo telas, pastas de pulido, piedras de pulido y rodillos de pulido
F.A.G. Española SA	Barcelona	Diversos tipos de rodillos de pulido de alúmina, carburo de silíceo y diamante
Ferro Enamel Española SA	Almazora (Castellón)	Productos para uniones cerámica/ vidrio para rodillos de pulido con uniones cerámicas
Filtrocesa	Bilbao (Vizcaya)	Filtros de porcelana para refinado de petróleo y otras aplicaciones
Gelter Ringsdorff SA	Madrid	Componentes ingenieriles de alta temperatura hechos de carbono, grafito, nitruro de boro pirolítico y carburo de silíceo. Los productos incluyen electrodos de carbono y grafito, intercambiadores de calor, etc.
Industrias Galarza SA	Bilbao (Vizcaya)	Aislantes eléctricos de porcelana
Industrias Garma SA	Sant Adrià del Besos (Barcelona)	Cerámica técnica y aislantes eléctricos de esteatita
INYSA	San Sebastián de los Reyes (Madrid)	Productos de cuarzo para aplicaciones electrónicas (filtros y osciladores). También componentes cerámicos electrónicos
José A. Lomba Camiña SA	La Guardia (Pontevedra)	Porcelana y aislantes eléctricos de esteatita
Nalda SA	(Valencia)	Aislantes eléctricos de porcelana
Tratamientos Térmicos SA (T.T.T.)	Bergara (Guipúzcoa)	Recubrimientos de sustratos metálicos utilizando cerámicas de óxidos y no óxidos de plasma o pulverización de llama
Unión Española De Abrasivos SA (UNESA)	Hernani (Guipúzcoa)	Rodillos, segmentos y bloques abrasivos vitrificados unidos con magnesita y resina. Los materiales incluyen alúmina y carburo de silíceo
Wear Solutions SL	Las Arenas	Servicios de recubrimientos ingenieriles utilizando PVD, CVD, pulverización de plasma e implantación de iones para aplicaciones mecánicas. Entre los materiales de recubrimiento se incluyen cerámicas y diamante

3.1.3. Oferta mundial de membranas cerámicas

Las membranas están siendo usadas ampliamente en muchos ámbitos, pero son relativamente desconocidas para los consumidores, ya que se encuentran normalmente ocultas en los procesos industriales. Algunas industrias dependen de las membranas para fabricar productos básicos, otras las necesitan para resolver procesos básicos de separación mientras otras usan las membranas para adecuarse a las normas ambientales.

Existen diversas empresas repartidas por todo el mundo que fabrican este tipo de membranas, entre las que destacan:

E.E.U.U: Ceramem, Cuno, GEA Filtration, ITT Industries, Pall Corporation, SpinTek, Sterlitech, Synkera Technologies, USFilter.



Holanda: Lenntech.

Alemania: Westfalia Separator AG.

Japón: Kubota Corporation.

Canadá: ARC.

En la tabla A.3 del Anejo A se ofrece una lista más completa de los principales fabricantes de membrana. Estos, proveen productos de gran calidad y unas excelentes prestaciones, generalmente para usos industriales o requerimientos de alta precisión. Es por ello que la fabricación de membranas de micro y ultrafiltración propuesta tiene cabida en el mercado. Las aplicaciones a las que estarían destinadas estas membranas no requerirían la alta precisión antes señalada, estas aplicaciones podrían ser por ejemplo la purificación de agua en hogares, filtrado de agua de piscinas o uso en aguas municipales (fuentes públicas, riegos, etc.). Como consecuencia de esto, el proceso de fabricación se puede ajustar para que resulte más económico, como se verá más adelante.

3.2. Análisis de la demanda

3.2.1. Posición actual del mercado

Las membranas sintéticas constituyen un creciente mercado en cuanto a la separación de gases, líquidos, metales y microorganismos. Las altas capacidades de separación se pueden combinar con grandes ahorros en energía, construcciones de módulos de bajo coste y alta selectividad. Los procesos basados en las membranas encuentran uso en aplicaciones muy variadas, aunque en general, solamente en algunos usos las membranas han tenido éxito comercial, mientras en otros campos siguen siendo una tecnología prometedora.

Los procesos de membrana se utilizan en aplicaciones como la desalación, purificación del agua, usos médicos, procesos químicos y alimentarios, etc. Hay, sin embargo, otros mercados potenciales substanciales, como la separación de productos de valor añadido, separación de gas, la separación de las mezclas alcano-alcano, la recuperación del hidrógeno y la gestión de desechos.



Existe una amplia gama de tecnologías de membrana y la mayoría están siendo desarrolladas o comercializadas por compañías en la Unión Europea. El desarrollo está en varias fases, desde Investigación y Desarrollo hasta el status comercial. Se espera que la mayoría de estas tecnologías sean completamente desarrolladas en el 2010, tanto en la UE como en el resto de mercados. El despliegue potencial en la UE es grande, con la expectativa de que el grueso de las ventas provenga de las compañías de los estados miembros. Los principales motores de esta tecnología son los EEUU y Japón, pero las compañías europeas tienen un papel potencial importante en la comercialización y la venta de la tecnología.

3.2.2. Barreras del mercado

Aunque los procesos de membrana tienen un considerable potencial, solamente algunas aplicaciones han logrado éxito a escala comercial. Las principales barreras a superar son:

- Falta de membranas adecuadas y equipo a escala industrial para determinados procesos.
- Carencia de información sobre los diferentes procesos y recelo a nuevas tecnologías.
- Dudas sobre los costes de inversión.
- La baja prioridad de la inversión en procesos de membrana en comparación en la realizada en equipos destinados al núcleo de la producción.

3.2.3. Crecimiento esperado

Según recientes estudios, el mercado de módulos de membranas de filtración tangencial y equipamiento destinado a purificar agua y otros líquidos crecerá de 7600 millones de dólares en 2006 a más de 10.000 millones en el año 2010.

El mercado de membranas de filtración tangencial se puede dividir en tres sectores principales. El mayor es el relativo a la OI, sumando el 50 % del total de ventas. Son las membranas más eficientes, usadas para desalinización y creación de agua de gran pureza para el sector electrónico, energético y farmacéutico.

La otra mitad de las ventas del mercado prácticamente se reparte entre ultrafiltración y microfiltración. La UF obtiene una eficiencia media y es utilizada mayoritariamente para aplicaciones como la purificación de zumos, el tratamiento de agua potable o como prefiltración a la OI. La MF es menos eficiente que las otras tecnologías, pero requiere menos



energía, y es más efectiva que los tratamientos convencionales a la hora de purificar agua destinada a ser bebida y el tratamiento de aguas residuales.

Se ha probado que combinando tratamientos biológicos y filtración por membrana en un mismo dispositivo compacto (Biorreactor de membrana, MBR) se obtienen unas grandes ventajas. Es por ello que el desarrollo de biorreactores de membrana está siendo tan elevado en los últimos tiempos. Debido a la pureza del agua tratada, ésta puede ser descargada directamente en medios acuosos receptores (río, lago, océano, corriente de agua u otro curso de agua). Para hogares de nueva construcción, esto eliminaría el largo transporte de aguas residuales hasta las depuradoras.

En el año 2009, la aplicación líder de la filtración por membranas será la desalinización, con ventas de equipo y membranas superiores a 2200 millones de dólares en todo el mundo (WWI, 2006).

Tabla 3.3. Ventas de membranas de filtración tangencial estimadas en 2009, en millones de dólares [WWI, 2006].

Desalinización	2200
Agua potable municipal	1500
Alimentación	1300
Sector farmacéutico	1100
Otros	3700
Total	9800

La globalización y consolidación continúan con la entrada de algunas de las compañías más grandes del mundo, como Siemens, que tras algunas adquisiciones se ha convertido en un importante participante. La reciente compra de Cuno por la multinacional 3M es otro ejemplo.

El mercado asiático crecerá en una tasa más alta que el resto de zonas. La falta de aguas limpias y el rápido incremento de las industrias electrónicas y farmacéuticas en la región son los principales motores. China será el más importante consumidor en el 2009, seguida de Japón y Corea del sur.

Mientras la mayor demanda será de membranas poliméricas, habrá un mercado creciente para membranas fabricadas con materiales no-poliméricos, tales como cerámica. Este tipo de membranas tienen el potencial de extender el uso de esta tecnología a ambientes de altas temperaturas y corrosivos, como los que se pueden encontrar en la industria petroquímica.



3.2.4. Tendencias industriales y tecnológicas

Hoy en día, existen oportunidades de mercado en cuanto a potabilización de agua, gestión de contaminación, generación de energía, producción comercial de dispositivos médicos, productos biotecnológicos, electrónicos, farmacéuticos, alimentos y bebidas, productos químicos y cosméticos, etc.

Mientras que la tecnología de membrana ha sido comercialmente viable durante 30 años, el futuro parece incluso mejor para estos eficaces y energéticamente económicos dispositivos. Abunda el entusiasmo por investigar nuevos usos para las membranas y para desarrollarlas, aunque el objetivo ha cambiado algo con los años. Los avances en el siglo XXI se encaminan a procurar a los dispositivos una mayor selectividad, estabilidad y una productividad más alta. Las mejoras son inevitables en diseño de la membrana, y el interés en nuevos materiales y modificaciones de la superficie de las membranas está creciendo

3.2.4.1. Aplicaciones de los 4 procesos impulsados por presión

En los últimos años la tecnología de OI ha ganado aceptación como una opción de tratamiento viable para muchas aplicaciones de separación de fluidos. Los bajos costes de operación y la capacidad de eliminar contaminantes orgánicos y el 95-98 % de las sales inorgánicas con mínimos requerimientos químicos hacen de la OI una tecnología atractiva para las industrias.

La OI encuentra sus aplicaciones en:

Potabilización de agua de mar o salobre, agua ultra-pura para procesos alimentarios o destinada a la industria electrónica, agua para usos farmacéuticos, agua para la industria química y del papel, tratamiento de aguas residuales, etc.

Algunas de sus futuras aplicaciones son:

Tratamiento de residuos industriales y municipales, acondicionamiento de agua para calderas, deshidratación de flujos, procesamiento de flujos a alta temperatura.

Algunas de las aplicaciones de la NF son:

Ablandamiento de agua, decoloración, eliminación de micro-contaminantes, separación de metales pesados, tratamiento de agua para torres de enfriamiento, etc.



La UF posee un amplio rango de aplicaciones, como por ejemplo:

Tratamiento de emulsiones de aceite de deshecho, tratamiento de suero (alto contenido en proteínas) de industrias lecheras, concentración de macromoléculas biológicas, recuperación de pintura galvanizada, concentración de colas para el sector textil, concentración de proteínas sensitivas al calor para aditivos alimentarios, concentración de gelatina, preparados farmacéuticos y enzimáticos, producción de agua ultra-pura para la industria electrónica, separación de macromoléculas reemplazando métodos convencionales de cambio de fase, etc.

Y en el punto de mira estarían:

Ultrafiltración de leche, separación y concentración de componentes activos biológicamente, cultivo de proteínas (algas, plancton...), refinamiento de petróleo, etc.

Las aplicaciones más importantes de la MF son:

Preparación de agua estéril para la industria farmacéutica, alimentación y bebidas (concentración de zumos, bebidas alcohólicas...), industria química, industria microelectrónica, fermentación, usos de laboratorio, etc.

Aplicaciones futuras de la MF:

En biotecnología, concentración de biomasa, separación de productos solubles, en tratamiento de aguas de deshecho que contengan tóxicos particulares, separación de solventes de pigmentos en pinturas.

3.2.4.2. El resto de las tecnologías

La Electrodialisis es un proceso de electro-membrana en el que los iones atraviesan una membrana de una solución a otra bajo la influencia de potencial eléctrico. Las oportunidades de mercado de la ED serían:

Tratamiento de aguas de deshecho radioactivas mediante membranas resistentes a la radiación, desacidificación de zumo de frutas, recuperación de metales pesados, recuperación de ácidos orgánicos de sales, control de pH sin adición de ácidos o bases, recuperación de ácido de aguafuertes, regeneración de resinas de intercambio de iones.



La separación de gas por membrana compite con tecnologías alternativas como la adsorción o la destilación criogénica pero posee ventajas como la compacidad y ligereza, diseño por módulos o bajo mantenimiento. Una membrana para la separación de gases esta constituida por una interfase continua, la cual posee algún tipo de propiedad que permite distinguir entre moléculas de gases diferentes, haciendo posible así su separación. Algunas aplicaciones son:

Recuperación de helio del gas natural, enriquecimiento del oxígeno a partir del aire, obtención de hidrógeno de la disociación del amonio, obtención de sulfuro de hidrógeno a partir del gas natural de las refinerías, separación y refinado de hidrógeno a partir de los gases de combustible de las refinerías de petróleo.

La pervaporación es un proceso para separar líquidos miscibles. Esta técnica aprovecha la compatibilidad química de un líquido con la membrana de modo que éste se disuelva en ella. Manteniendo una presión baja en el permeado, el soluto se vaporizará en la membrana y pasará al permeado.

El proceso de pervaporación basado en membrana ofrece significativos ahorros de energía en aplicaciones donde es difícil la separación por métodos convencionales, como para mezclas azeotrópicas o componentes cercanos al punto de ebullición. Las ventajas de este proceso sobre otras técnicas de separación son las siguientes:

Separación efectiva y económica de mezclas de sustancias con poca diferencia entre su punto de ebullición y mezclas azeotrópicas (mezclas de varios líquidos, generalmente usadas para refrigeración, que no permiten la separación por destilación), diseño modular de las membranas, bajos costes en relación a los sistemas convencionales.

3.2.5. Aplicaciones previstas de las LCCM

Los posibles usos de membranas de UF y MF fabricadas en la planta objeto de este estudio podrían ser los siguientes:

Tabla 3.4. Posibles aplicaciones y usuarios del producto según aplicación. *si se cumplen los estándares de calidad.

Aplicación específica	Usuario
Purificación doméstica de agua	Particulares
Filtrado de agua en piscinas	Particulares



Aguas municipales (riegos, fuentes...)	Empresa pública
Tratamiento terciario de depuración	Empresa pública
Aclaración de zumos, vino y cerveza*	Empresa privada
Tratamiento de productos lácteos (leche, queso)*	Empresa privada
Preparación de agua estéril*	Empresa privada

Al ser el producto acabado en este caso dependiente de inserción en módulos para poder operar, no se pueden considerar como demandantes a los particulares, sino que éstos serían las empresas suministradoras de sistemas de filtrado que trabajen con esta tecnología.

Se considera oportuno la elaboración de un plan de promoción entre estas empresas, a fin de dar a conocer en algunas de ellas el producto, exponer sus ventajas y tratar de que lo adopten en el diseño de sus productos. Para las empresas que ya usen módulos de membranas cerámicas se trataría de dar a conocer la principal virtud del producto, su bajo precio.

3.3. Análisis de costes

3.3.1. Presupuesto estimado

Para una instalación con equipos nuevos, cuya descripción se detalla en el capítulo 5, y considerando una producción diaria de 500 membranas, se presenta el presupuesto que aparece en la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Presupuesto de inversión.

Concepto	Coste	Total
Obra civil	33.000 €	
Instalaciones de suministros energéticos, agua y comunicaciones	18.000 €	
Costes de proyecto ⁶	9.500 €	
Legalizaciones e impuestos	12.000 €	
Seguros de responsabilidad civil	2.000 €	
TOTAL COSTE DE CONSTRUCCION		64.500 €
Mezcladora-amasadora	120.000 €	
Extrusora	210.000 €	
Recinto de secado	100.000 €	
Horno sinterizado	100.000 €	
Unidad de engobado	6.000 €	
Unidades de cortado	4.000 €	
Laboratorio de control de calidad	30.000 €	
TOTAL COSTE DE EQUIPAMIENTO INDUSTRIAL		570.000 €
Servicios de recepción de materias primas, almacenamiento y expedición		120.000 €
INVERSION TOTAL		754.500 €

⁶ Se desglosan en el Anejo F: Costes de proyecto.



Por tanto el coste total en instalaciones y equipamientos sería de 754.500 €, al que se le añadiría un 30 % en concepto de margen de seguridad al tratarse de la implantación de un tipo de producción del que no se tienen referencias concretas acerca de sus costes finales. Así pues, resulta una cantidad de 980.850 €, que se redondeará a 1.000.000 € para los cálculos.

3.3.2. Aproximación al balance de resultados según el escenario previsto

Si se prevé que la planta producirá 500 membranas/día, y considerando 200 días hábiles por año, se alcanza una cantidad de 100.000 membranas anuales. Se partirá de esta hipótesis de producción para efectuar una primera aproximación al balance económico anual, si bien no se considerará posible que se comercialice la totalidad de esta cantidad hasta el cuarto año de previsión. Se estima que el mercado de membranas (en todas sus variantes tecnológicas, es decir, membranas tanto orgánicas como inorgánicas) está creciendo anualmente un 15 %, por lo que se considerará esta cifra asumible en ese plazo. Fijando como precio de venta unitario 30 €, la facturación anual sería de 3.000.000 €.

Para estimar los costes de funcionamiento, en primer lugar, debe considerarse el factor de actualización de la inversión efectuada, 1.000.000 €. Considerando un interés del 5 % y 10 años de amortización, y aplicando la función de coste de capital:

$$a_f = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Donde:

a_f = factor de actualización

i = interés (fracción)

n = período de amortización (años)

De la expresión anterior resulta $a_f = 0.13$, y se considerará una cantidad fija anual de 130.000 € en concepto de amortización del capital. El coste del alquiler anual se evalúa en un máximo de 54.000 € (4.500 € x 12 meses) y se contemplará un mínimo de plantilla de personal de 5 personas a tiempo completo, con las finalidades de producción y comercialización cuyos costes se estiman en 300.000 €/año (60.000 € por empleado).



En la Tabla 3.6 se resume el balance anual de explotación

Tabla 3.6. Balance de costes de explotación anual.

Partida presupuestaria	Coste previsto [€/ año]
Amortización	130.000
Personal	300.000
Alquileres	54.000
Consumibles	70.000
Materias primas	300.000
Otros (consumos energéticos, fungibles,...)	100.000
Total (Impuestos no incluidos)	954.000

Es evidente que el balance de explotación es muy favorable, 3.000.000 € de facturación frente a 954.000 € de gasto, sin embargo la primera cantidad, sólo se podría alcanzar en caso de venta total de la producción, cuestión que difícilmente se alcanzaría durante el primer año aún atendiendo a la demanda insatisfecha por el producto a causa de los elevadísimos costes actuales.

Si se tiene en cuenta un caso bastante desfavorable, como es el de comercializar tan solo una tercera parte de la producción de las membranas LCCM (33.333 unidades), hecho que probablemente ocurra en los primeros años de funcionamiento del proceso, esto sería suficiente para equilibrar la balanza. También se debe comentar que los costes operativos reales también serían menores dado el carácter intermitente de la producción.

El análisis económico anterior se ha presentado como una mera aproximación, sin embargo los datos de la cuenta de resultados deben realizarse en una estimación temporal más dilatada. A continuación se expone un análisis a 10 años de la inversión empresarial. Para ello se define CF (= Cash flow), el flujo económico, que se determina por:

$$CF = B_{nt} + A_{nt} - I_t \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Donde:

B_{nt} = Beneficio neto (ingresos menos gastos y menos impuestos)

A_{nt} = Amortización de la inversión

I_t = Coste anual de la nueva inversión



De este modo se determina el VAN_{10} (= Valor actual neto a 10 años), mediante la fórmula:

$$VAN_{10} = \sum \frac{CF_t}{(1+i)^t} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Donde:

i = Tanto por uno de los intereses financieros

Igualmente resulta de interés determinar el coeficiente TIR (Tasa interna de rentabilidad), que se determina aplicando la expresión:

$$\sum \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Para simular los resultados financieros, se supondrá un año 0 sin ingresos y donde se efectúa la inversión de puesta en marcha, tres primeros años con ingresos del 10%, 40% y 80% del previsible y a partir del año 4 los 3.000.000 € completos. También se efectuarán estimaciones de la amortización anual (130.000 €), inversiones de nueva planta en orden creciente así como de impuestos. La columna de gastos se ha completado considerando un incremento en los gastos del 5% anual. Con estos datos, se obtiene un VAN_{10} de 4.732.774 € y un balance favorable a partir del cuarto año en que los ingresos superan los gastos de explotación, todo ello de acuerdo con las estimaciones consideradas. La TIR resultante ofrece un valor del 37,5 %, el cual se considera favorable.

Se entiende sin embargo que los datos aportados para la realización de la simulación son razonables y se concluye que la inversión es altamente rentable siendo el aspecto más problemático, que podría poner en duda la inversión, la capacidad de comercializar la producción prevista en la planta.



Tabla 3.7. Cálculo del VAN anual de la inversión a diez años.

año	% ingresos	Ingresos	Gastos	Amortización	Impuestos	Inversión	Benef. neto	CF	VAN anual
0			0	0	0	1.000.000	0	-1.000.000	-1.000.000
1	0,10	300.000	954.000	130.000	0	0	-654.000	-654.000	-622.857
2	0,40	1.200.000	1.001.700	130.000	22.539	25.000	175.761	150.761	136.745
3	0,80	2.400.000	1.051.785	130.000	402.011	50.000	946.204	896.204	774.175
4	1,00	3.000.000	1.104.374	130.000	582.656	50.000	1.312.969	1.262.969	1.039.048
5	1,00	3.000.000	1.159.593	130.000	564.434	100.000	1.275.973	1.175.973	921.405
6	1,00	3.000.000	1.217.573	130.000	545.301	100.000	1.237.126	1.137.126	848.541
7	1,00	3.000.000	1.278.451	130.000	525.211	100.000	1.196.338	1.096.338	779.147
8	1,00	3.000.000	1.342.374	130.000	504.117	150.000	1.153.510	1.003.510	679.215
9	1,00	3.000.000	1.409.492	130.000	481.967	150.000	1.108.540	958.540	617.883
10	1,00	3.000.000	1.479.967	130.000	458.711	150.000	1.061.322	911.322	559.473

VAN	4.732.774
-----	-----------

Tabla 3.8. Desglose del VAN acumulado durante los 10 años.

año	VAN anual	VAN acumulado
0	-1.000.000	-1.000.000
1	-622.857	-1.622.857
2	136.745	-1.486.112
3	774.175	-711.938
4	1.039.048	327.110
5	921.405	1.248.516
6	848.541	2.097.057
7	779.147	2.876.204
8	679.215	3.555.418
9	617.883	4.173.302
10	559.473	4.732.774

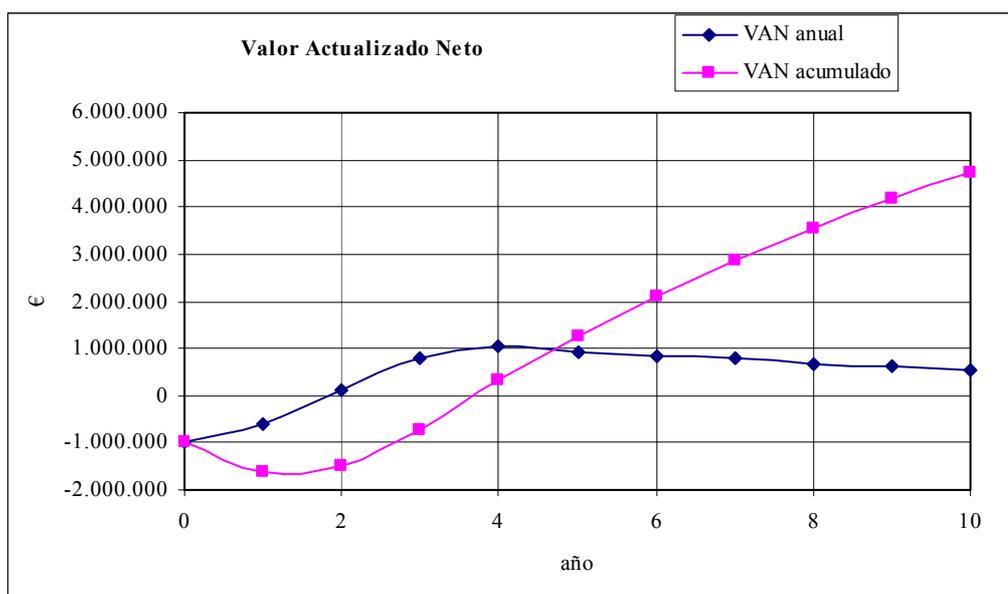


Figura 3.1. Valor Actualizado Neto, de una planta de producción industrial autónoma de membranas LCCM con un horizonte de evaluación de 10 años.



4. EXPLICACIÓN DEL PROCESO PROPUESTO

4.1. Los materiales cerámicos

Los materiales cerámicos son materiales inorgánicos no metálicos, constituidos por elementos metálicos y no metálicos enlazados principalmente mediante enlaces iónicos y/o covalentes. En general, son materiales típicamente duros y frágiles con baja tenacidad y ductilidad. Se comportan usualmente como buenos aislantes eléctricos y térmicos debido a la ausencia de electrones conductores. Normalmente, poseen temperaturas de fusión relativamente altas y, asimismo, una estabilidad química elevada en medios agresivos debido a la estabilidad de sus fuertes enlaces. Debido a estas propiedades, son indispensables para muchos de los diseños en ingeniería. De manera muy general, los materiales cerámicos se pueden clasificar en:

- Materiales cerámicos tradicionales: están constituidos por tres elementos básicos: arcilla, sílice y feldespato. En este grupo encontramos la porcelana fina, porcelana eléctrica, ladrillos, baldosas y también vidrios y cerámicas refractarias.
- Materiales cerámicos de uso específico en ingeniería (cerámicas avanzadas o cerámicas técnicas): están constituidas típicamente por compuestos puros o casi puros tales como óxidos, carburos o nitruros, siendo los más importantes el óxido de aluminio (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC), nitruro de silicio (Si_3N_4) y circonita (ZrO_2), combinados con algunos óxidos refractarios.

Según sus aplicaciones, pueden clasificarse en uno de los grupos siguientes: vidrios, productos estructurales de arcilla, porcelanas, refractarios, abrasivos, cementos y cerámicas avanzadas de reciente desarrollo.

Estos últimos se utilizan en una gran variedad de aplicaciones eléctricas y electrónicas. Muchos tipos de cerámicos se utilizan como aislantes eléctricos para corrientes de alto y bajo voltaje; también encuentran aplicaciones en varios tipos de condensadores, especialmente cuando se requiere miniaturización. Otros tipos de cerámicos, denominados piezoeléctricos, pueden convertir débiles señales de presión en señales eléctricas y viceversa; las cerámicas avanzadas, pueden ser utilizadas en motores de combustión interna y en turbinas, como placas para blindajes, en el empaquetamiento electrónico, como herramientas de corte, así como en la conversión, almacenamiento y generación de energía.



4.2. Las cerámicas avanzadas

En contraste con los cerámicos tradicionales, que se basan principalmente en la arcilla, las cerámicas técnicas o de ingeniería están constituidas principalmente por compuestos puros o casi puros, óxidos, nitruros o carburos. Las principales a citar son la alúmina, el nitruro de silicio, carburo de silicio y circonita, los cuales se pueden considerar como las primeras cerámicas avanzadas.

4.2.1. Alúmina (Al_2O_3)

Desarrollada originalmente para tubos refractarios y crisoles de alta pureza de utilización a elevadas temperaturas, ahora tiene aplicaciones mucho más variadas, como por ejemplo su utilización en materiales aislantes de bujías. La alúmina se emplea frecuentemente para aplicaciones eléctricas de buena calidad, donde se precisan bajas pérdidas dieléctricas y alta resistividad.

4.2.2. Nitruro de silicio (Si_3N_4)

Los materiales cerámicos con base de nitruro tienen una combinación muy útil de propiedades mecánicas ingenieriles, como una resistencia razonable, resistencia al impacto y propiedades refractarias. El Si_3N_4 se disocia significativamente a temperaturas por encima de los 1800°C y, por consiguiente, no se puede sinterizar directamente. Sin embargo, a lo largo de los últimos años se han desarrollado otros métodos de fabricación del nitruro de silicio.

Existen cuatro procesos principales; proceso por reacción de unión (RBSN), proceso de compactación en caliente de nitruro de silicio (HPSN), proceso de nitruro de silicio sinterizado (SSN) y proceso de nitruro de silicio de compactación isostática en caliente (HIP-SN). En el proceso de reacción de unión, un polvo compacto de silicio se nitrura en una corriente de gas nitrógeno. Este proceso produce un Si_3N_4 microporoso y con moderada resistencia.

Las aplicaciones para los cerámicos con base de nitruro de silicio incluyen herramientas de corte, rodillos antifricción y cojinetes de bolas, así como componentes para motores de explosión o diesel. Este material también se ha investigado para estudiar su posible uso en aplicaciones para motores avanzados.



4.2.3. Carburo de silicio (SiC)

Los cerámicos de altas prestaciones del tipo carburo de silicio tienen propiedades muy importantes, ya que su dureza es alta, son químicamente inertes, tienen buena resistencia a la abrasión y a la oxidación a altas temperaturas. Sin embargo el SiC es relativamente quebradizo por su baja resistencia al impacto y es difícil producir piezas cerámicas densas de grano fino.

Para hacer carburo de silicio sinterizado por reacción (enlazado), se infiltra un polvo compacto de SiC y carbono (grafito) con silicio fundido que reacciona con el carbono para formar SiC, uniendo los granos originales de SiC. El proceso no puede continuarse hasta que todos los poros que se encuentran entre los granos originales se llenen, ya que el silicio debe ser capaz de infiltrarse. Así el producto final contiene entre un 8 y un 20% de silicio libre. El SiC también se puede sinterizar usando polvo de α -SiC de calidad adecuada sin aplicación de presión externa si se añaden ayudas al sinterizado.

La resistencia a la flexión del SiC sinterizado es aproximadamente de 460 MPa y presenta una elevada resistencia al impacto. La mayoría de las aplicaciones más comunes de los cerámicos de SiC se basan en su alta dureza, resistencia química y resistencia a la abrasión. Las aplicaciones en los procesos químicos industriales incluyen sellados y válvulas, toberas, moldes, láminas para secado y troqueles para alambres. Otras aplicaciones que aprovechan su resistencia al desgaste y a la erosión son los cojinetes de impulso, cojinetes de bolas, bombas de impulsión y troqueles de extrusión. Debido a sus características de resistencia a la termofluencia, se usa en toberas, tubos de intercambiadores de calor y componentes de hornos de difusión.

4.2.4. Circonio (ZrO₂)

La zirconia pura es polimorfa y experimenta transformaciones desde una estructura tetragonal a otra monoclinica sobre los 1.170°C acompañada de una expansión de volumen y posible ruptura. Sin embargo combinando con otros óxidos refractarios, tales como CaO, MgO e Y₂O₃, la estructura cúbica se puede estabilizar a temperatura ambiente. Combinando ZrO₂ con el 9% de MgO y tratamientos térmicos especiales, se puede producir una zirconia parcialmente estabilizada (PSZ) y con una resistencia de impacto especialmente alta, que encuentra utilidad en las nuevas aplicaciones de los cerámicos.



4.3. El procesado de cerámicas avanzadas

Los cerámicos avanzados se han creado como consecuencia de un intento de mejora de las propiedades físicas de los cerámicos tradicionales. Para ello, es necesario un control excepcional de la pureza, del procesado y de la microestructura. Las diferentes formas de procesado de este tipo de cerámicos se describen en los siguientes puntos.

4.3.1. Compactación y sinterizado

Muchos cerámicos avanzados comienzan en forma de polvo, luego se mezclan con un lubricante para que mejore su compactación y, por último, se les aplica presión para darles forma. Tras este proceso de prensado, las partículas de polvo se tocan unas con otras, y se lleva a cabo un sinterizado que desarrolle la microestructura y propiedades requeridas. Este proceso se describirá mas adelante.

4.3.2. Sinterización reactiva

Algunos materiales cerámicos, como el Si_3N_4 , se producen mediante sinterización reactiva. El silicio se conforma y a continuación se le hace reaccionar con nitrógeno para formar el nitruro. La sinterización reactiva, que se puede efectuar a temperaturas más bajas, proporciona un mejor control dimensional, en comparación con la compactación en caliente. Sin embargo, se obtienen densidades y propiedades mecánicas inferiores.

4.3.3. Proceso sol gel

Este proceso se utiliza para producir y consolidar polvos cerámicos puros excepcionalmente finos. Se prepara una solución coloidal líquida, que contenga iones metálicos disueltos. Las reacciones de hidrólisis forman una solución organometálica o sol, compuesta por cadenas de tipo polimérico, con iones metálicos y oxígeno. De la solución se forman partículas de óxido amorfo, las cuales producen un gel rígido. El gel es secado y calentado para la sinterización y la compactación de la pieza terminada de cerámica; las temperaturas de sinterización son bajas debido a que los polvos son altamente reactivos.

4.3.4. Unión y ensamblaje de piezas cerámicas

Con frecuencia, los productos cerámicos se fabrican como componentes monolíticos, en vez de ensamblaje de varias piezas. Cuando dos componentes cerámicos se ponen en contacto



bajo carga, en la superficie frágil se crean concentraciones de tensiones, lo cual provoca una mayor probabilidad de rotura.

Además, los métodos para unir piezas cerámicas son limitados. Los cerámicos frágiles no se pueden unir por procesos de soldadura por fusión o de unión por deformación. A bajas temperaturas, se pueden conseguir uniones adhesivas utilizando materiales poliméricos; a temperaturas superiores se pueden utilizar cementos cerámicos. La unión por difusión se utiliza para unir cerámicos entre sí con metales.

4.4. Generalidades de la fabricación de LCCM

Los tubos de filtración tangencial se han fabrican principalmente con alúmina tabular (α - Al_2O_3 ⁷) así como de carburo de silicio (SiC) siempre a elevadas temperaturas de sinterización (1.800-2.000°C). Esta elevada temperatura de sinterización junto al propio proceso de conformación de los tubos y la tecnología asociada produce como consecuencia un alto coste de producción, que si bien es asumible para uso industrial, los hace resultar no rentables para otras muchas posibles aplicaciones que puedan solucionar importantes problemas medioambientales relacionados con la depuración o purificación de aguas e incluso gases.

En el caso de las membranas de gradiente se utiliza una técnica de centrifugado de una barbotina dentro de un cilindro hueco que sirve de molde, con lo que obtienen tubos huecos, que en este caso tienen un sólo canal. Con esta técnica se consigue una distribución radial de tamaños de partículas, ya que las más pequeñas se ubican más al interior del tubo, formando la capa filtrante, y las mayores hacia el exterior.

Para las membranas compuestas, el cuerpo de la membrana se fabrica por extrusión de una pasta húmeda (que en general incorpora algún plastificante para facilitar su moldeado), formando tubos huecos, que posteriormente son secados y sinterizados a temperaturas entre 1.800 y 2.000°C. La capa filtrante se aplica en capas sucesivas sobre el cuerpo soporte previamente sinterizado, mediante la técnica de engobado o a través de un proceso sol-gel, partiendo ambos de suspensiones coloidales, y posteriormente se sinteriza, a una temperatura normalmente inferior a la temperatura de sinterización del cuerpo soporte.

⁷ Alúmina de gran pureza para aplicaciones específicas.



Uno de los objetivos que se pretende es endurecer lo suficiente las membranas para que su inevitable degradación derivada de su uso y limpieza (que usualmente se efectuará mediante NaOH al 5% o bien con HCl o HNO₃ entre el 1 y el 2%) sea lo más lenta posible. Esto se puede solucionar aglomerando alúmina con otro óxido o alguna estructura de tipo espinela⁸, que sinterice a una temperatura inferior para reducir costes y que permita obtener un material de suficiente inercia química y resistencia mecánica adecuada. La idea para conseguir reducir el coste de fabricación de las membranas se basa en el uso de poliésteres y resinas que en mezcla con los compuestos arriba citados, den lugar a pastas cerámicas que pueden ser extrusionadas en geometrías tubulares. Los componentes orgánicos al ser uniformemente distribuidos en la pasta mixta extrusionada, permiten una sinterización a menor temperatura respecto de las cerámicas convencionales.

4.4.1. Tecnología de bajo coste y adecuada para tratamientos terciarios

Se pretende diseñar un proceso que logre disminuir la temperatura de sinterización de 1.800°C hasta aproximadamente 1.400°C, apta para la producción de las membranas en hornos cerámicos industriales convencionales. También se quiere desarrollar una técnica de fabricación de las membranas, en base a una tecnología simple y considerando de preferencia materias primas de uso habitual en la industria cerámica local.

En estas condiciones se obtendrían unos costes de producción muy competitivos (reducción de costes del orden del 80% al 90%), que permitirían en un futuro abrir nuevos mercados nacionales e internacionales para aplicaciones cuyos elevados costes de implantación hacen inviable hoy en día la adopción de esta tecnología, como en el caso de los tratamientos terciarios de aguas residuales (industriales, urbanas, domésticas, etc.).

La geometría de una membrana compuesta corresponde a un tubo hueco multicanal (de 1 hasta 39 canales, con un diámetro de cada canal mayor a 3 mm). Lo habitual es que cada tubo tenga una longitud aproximada de 1 m y un diámetro exterior de 1 a 2,5 cm. Para su utilización, cada membrana se dispone dentro de un módulo cilíndrico plástico, reforzado por acero inoxidable o fibra de vidrio, que contiene varias membranas que operaran en paralelo. A su vez se pueden disponer varios módulos en paralelo. En cada módulo, el líquido a depurar entra por los canales interiores a presión, fluyendo en forma tangencial a lo largo de la superficie de la capa filtrante, y el permeado se recoge en la capa exterior de los tubos.

⁸ Mineral magmático o metamórfico, normalmente asociado a rocas ácidas.



4.5. Esquema del proceso

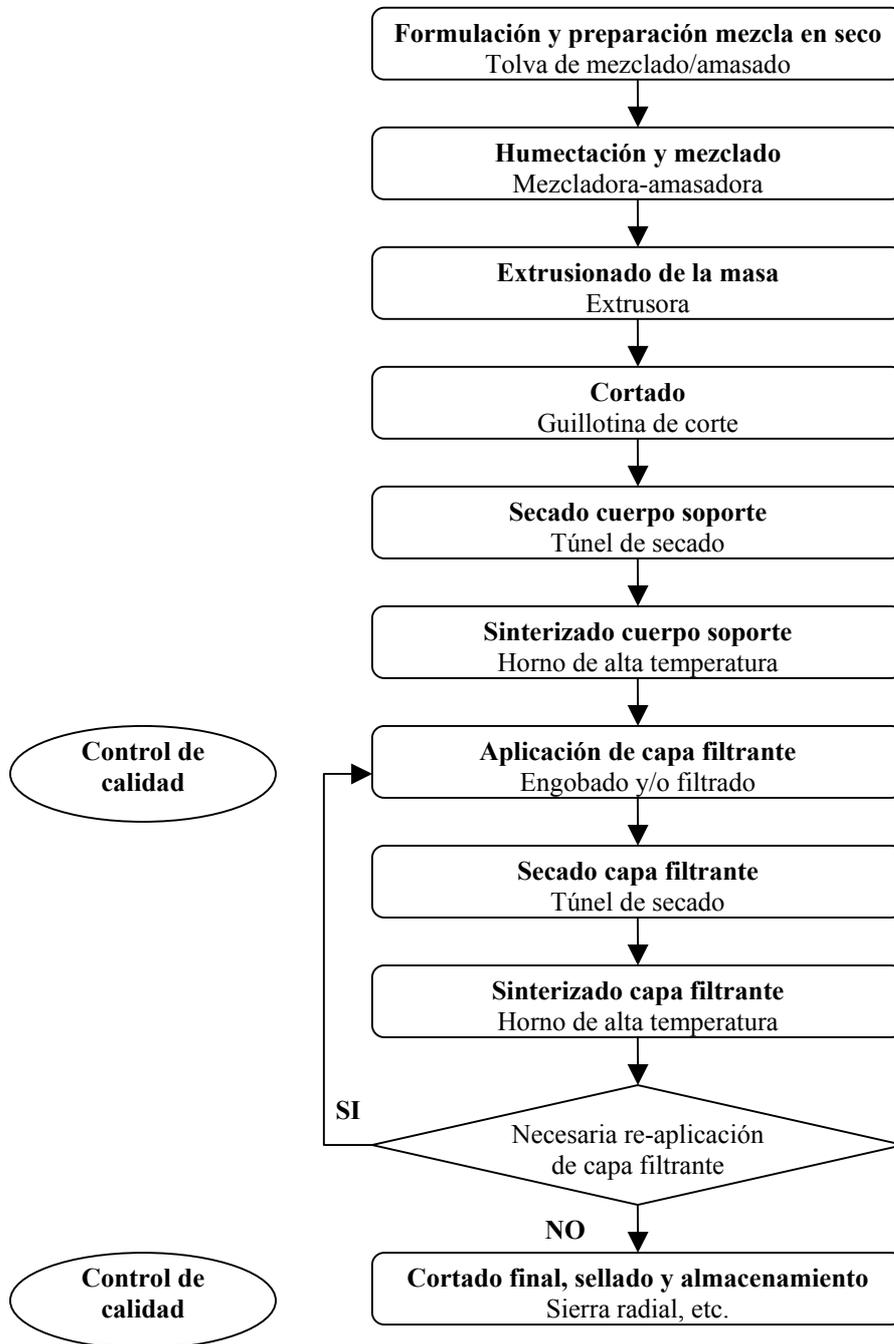


Figura 4.1. Diagrama de flujo del proceso industrial de fabricación de membranas LCCM.



4.6. Maquinaria del proceso en el almacén de materias primas

4.6.1. Molino de bolas

Una vez realizada la primera mezcla de los distintos componentes de la pasta cerámica, ésta se debe someter a un proceso de molturación, que puede ser vía seca (molinos de martillos o pendulares) o vía húmeda (molinos de bolas continuos o discontinuos). El material resultante de la molturación presenta unas características distintas si aquella se efectúa por vía seca o por vía húmeda. En el primer caso se produce una fragmentación, manteniéndose tanto los agregados como los aglomerados de partículas, siendo el tamaño de partículas resultante (existen partículas mayores de 300 micras) superior al obtenido por vía húmeda (todas las partículas son menores de 200 micras). Al elegir el tipo de molturación a emplear, un factor decisivo lo constituye el coste de la inversión a realizar en cada caso. Como ejemplo, el procedimiento que se ha impuesto totalmente en el sector de la fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos por monococción, como consecuencia de las importantes mejoras técnicas que supone, es el de vía húmeda y posterior secado de la suspensión resultante por atomización.

En nuestro caso, debido al pequeño tamaño de partícula deseado, optaríamos por la molturación mediante molino de bolas. Esta máquina se trata de un cilindro metálico cuyas paredes están reforzadas habitualmente con material fabricado en aleaciones de acero al manganeso. Estas molduras van apernadas al casco del molino y se sustituyen cuando se gastan. El molino gira y la molienda se realiza por efecto de las bolas de acero al cromo o manganeso que se disponen dentro que, al girar con el molino, son retenidas por las ondulaciones de las molduras a una altura determinada, desde donde caen pulverizando por efecto del impacto el material mineralizado mezclado con agua.

En el procedimiento de vía húmeda, las materias primas pueden introducirse total o parcialmente en el molino de bolas. A la suspensión resultante se le elimina una parte del agua que contiene hasta alcanzar el contenido en humedad necesario para cada proceso, y se procede al secado.



4.7. Maquinaria del proceso en la planta de producción

4.7.1. Unidades de mezclado, dosificado y otras

Se dispondrán en la zona de producción de la nave:

- Como unidades de pesaje se considerarán básculas con capacidades de 1 a 10 kg., 10 a 50 kg. y de 50 a 250 kg.
- Una tolva para mezclado en seco de capacidad 500 kg.
- Una mezcladora/amasadora de brazos de doble sigma de capacidad máxima de 500 kg.
- Cadena o guía transportadora de transferencia. Se dispondrá desde la zona de extrusión de la pasta en verde hasta la zona de almacén de producto terminado, como se detalla en planos.

4.7.2. Extrusora recolectora

La extrusión es el procedimiento de fabricación de piezas que consiste en moldearlas mientras se las somete a una determinada presión, y, una vez comprimida, la materia pasa a través de una boquilla o dado que va a darle la forma deseada. En el proceso de elaboración de membranas cerámicas, la fase de extrusión es posiblemente la más importante de todas, y requiere maquinaria precisa y de gran potencia.

Básicamente el procedimiento de conformación de piezas por extrusión consiste en hacer pasar una columna de pasta, en estado plástico, a través de una abertura cuya sección transversal dará a la masa la forma geométrica final deseada, de sección constante. Esta pasta, estaría constituida por una mezcla de diferentes compuestos entre los cuales se tienen: polvos cerámicos, plastificantes, solventes y dispersantes. Los equipos que se utilizan constan de tres partes principales: el sistema propulsor, la matriz y la cortadora. El sistema propulsor más habitual es el sistema de hélice.

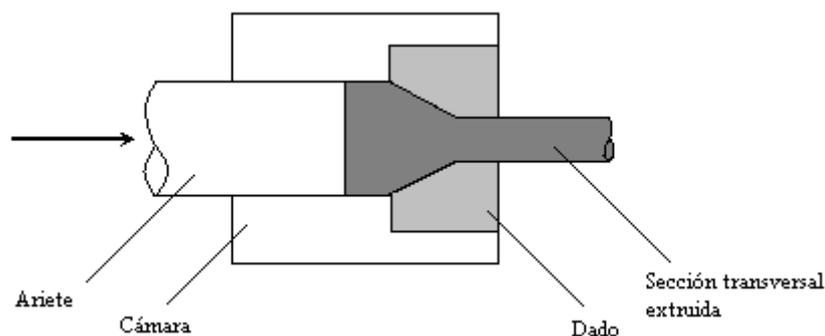


Figura 4.2. Esquema del proceso de extrusión.



Se pueden distinguir dos tipos de extrusoras:

- a) Extrusora monoblock: aquella que funciona con un sólo motor para accionar el cuerpo de amasado y el cuerpo extrusor.
- b) Extrusora combinada: aquella que utiliza dos motores independientes, uno para el cuerpo de amasado y otro para el cuerpo extrusor.

La máquina extrusora para el proceso de fabricación del cuerpo soporte cerámico debe alcanzar unas altas presiones de trabajo, del orden de 80 bar de presión, por tanto debe ser del tipo doble hélice o pistón. Igualmente, debido a la naturaleza abrasiva de la pasta a extruir, se deben procurar tratamientos endurecedores a determinadas partes de la extrusora como también sistemas de acondicionamiento de temperatura para el procesado de este tipo de material cerámico.

Se debe poner también un especial cuidado en el diseño de las boquillas, debido a la necesidad de conseguir un flujo laminar dentro del molde para la elaboración de membranas multitubulares.

Al acabar el proceso de extrusión, la membrana en fase verde debe ser recogida en un dispositivo de colchón de aire previo a su disposición en rodillos giratorios. Estos dispositivos mitigarán la presencia de deformaciones o la adquisición de tensiones internas que puedan generar patologías al final del proceso (perdida de linealidad, calibrado, grietas, etc.). Las membranas serán perfectamente rectas y de sección uniforme.

Para la adquisición de la extrusora y equipos de soporte, el mercado ofrece muy pocas opciones, siendo recomendable el suministro de los equipos de la compañía ECT. El presupuesto estimado es de 210.000 €.

4.7.3. Cortado de la pieza en crudo

Inmediatamente tras la extrusión se dispone el mecanismo de cortado. Se ejecutará el corte de las piezas con un exceso de 10 cm., el cual se eliminará durante el procesado final. Este corte se realizará mediante un hilo metálico conocido como ‘cuerda de piano’, en un proceso similar a uno de guillotina.



4.7.4. Túnel de secado

La pieza cerámica una vez conformada se somete a una etapa de secado, que tiene el fin de reducir el contenido en humedad de las piezas tras su extrusión hasta niveles lo suficientemente bajos para que las siguientes fases se desarrollen adecuadamente. El secado es un fenómeno de superficie: el agua en forma de humedad debe migrar a la superficie para su evaporación. El agua circula desde el interior del cuerpo hasta la superficie, donde se forma una capa límite que entra en contacto con la corriente de aire. A nivel microscópico, a medida que avanza el secado, las partículas de la pieza se van aproximando y la contracción de la pieza aumenta. La pérdida de agua en función de la contracción no es lineal, pudiéndose distinguir tres etapas: eliminación de agua en poros, eliminación de agua residual y eliminación de agua adsorbida. También hay que resaltar que la adición de desengrasantes a una pasta cerámica aumenta la conductibilidad capilar por tanto las velocidades de secado que pueden esperarse son más elevadas, y además, la contracción en secado disminuye.

Por lo tanto, durante el secado de piezas cerámicas, tiene lugar simultánea y consecutivamente un desplazamiento de agua a través del sólido húmedo y a través del gas. El aire que se utiliza debe ser lo suficientemente seco y caliente, pues se utiliza, no sólo para eliminar el agua procedente del sólido sino también para suministrar la energía en forma de calor, que necesita esa agua para evaporarse.

La velocidad de secado se expresa como la masa de agua evaporada por unidad de superficie en la unidad de tiempo ($\text{kg/m}^2\cdot\text{h}$). Al inicio del secado, la velocidad se va acelerando hasta llegar al punto máximo. A partir de ese momento, la velocidad se mantiene constante hasta alcanzar un punto, desde el cual y hasta el final del secado la velocidad es decreciente, llegando la pieza hasta el 0% de humedad. Cada material presentará un comportamiento al secado diferente, de ahí la necesidad de conocer la mineralogía de la materia prima.

Actualmente el secado de piezas en la industria cerámica se realiza en secaderos verticales u horizontales. En general los secaderos horizontales tienen un consumo menor que los verticales, debido a la mejor disposición de las piezas dentro del secadero y a la menor masa térmica. Tras el conformado de las piezas éstas se introducen en el interior del secadero, en donde se ponen en contacto en contracorriente con gases calientes. El principal mecanismo de transmisión de calor entre el aire y las piezas es el de convección, participando ligeramente el



mecanismo de radiación desde dichos gases y desde las paredes del secadero a dicha superficie.

En el proceso de obtención de LCCM, las piezas serán ubicadas en vagonetas, con soportes especiales horizontales o bien verticales, en cantidades de 500 a 1.000 unidades y entrarán mediante un sistema de guías o raíles de acero en un recinto cerrado con la finalidad de proceder al secado y eliminación del agua sobrante de conformado. Las opciones barajadas para la maquinaria de secado son: la implementación de un recinto de secado diseñado y construido in situ por los técnicos de la planta, su diseño y construcción por parte de una empresa externa bajo especificaciones dadas (empresas como Kilnogy, ubicada en Barcelona, realizan esta función) y la adquisición de un horno que se ajuste a las características del proceso. Para la confección del presupuesto se ha elegido esta última opción (la más costosa), aunque no deben descartarse las dos primeras.

A medida que aumenta la velocidad del aire disminuye el espesor de la capa límite, la resistencia se reduce y la velocidad de secado aumenta. En los secaderos industriales, la velocidad del aire es el parámetro más determinante del rendimiento de secado. Este aire caliente podría en su caso, proceder de la recuperación térmica de los gases de emisión del horno.

Muchos defectos que se ponen de manifiesto a la salida del secadero tienen su origen en anteriores etapas del proceso productivo que no tienen nada que ver con el secado. Así, una homogeneización incorrecta de la pasta origina contracciones locales diferentes (más contracción donde había más humedad) que se traducen en fisuras.

4.7.5. Horno de sinterizado

El sinterizado es el proceso de la unión de partículas de polvo a temperaturas elevadas, aunque por debajo de las de fusión. Este proceso provoca una densificación. El calor que recibe la pasta desencadena un conjunto de reacciones, entre las que destacan:

- Reacciones químicas.
- Reducción/creación de porosidad.
- Transformaciones cristalinas polimórficas.
- Producción de microgrietas.



Durante este proceso se produce un movimiento de átomos por el mecanismo de difusión. Primero se difunden los iones a lo largo de los bordes de grano y de la superficie, hacia los puntos de contacto entre partículas, lo que genera puentes ('cuellos') y conexiones entre granos individuales. Una difusión adicional de los bordes de grano reduce los poros, incrementando la densidad y, al mismo tiempo, los poros se hacen más redondos. Partículas inicialmente más finas y temperaturas más altas aceleran la velocidad de reducción de los poros.

Incluso después de largos tiempos de sinterizado todavía podría quedar porosidad en la pieza cerámica y la probabilidad de rotura puede ser muy alta. Es posible agregar aditivos a las materias primas para facilitar el desarrollo de una máxima densidad. Sin embargo, estos aditivos del sinterizado generalmente realizan lo anterior introduciendo una fase vítrea de bajo punto de fusión. Aunque se consigue minimizar la porosidad, otras propiedades, como la resistencia a la fluencia, empeoran.

En algunos casos, particularmente en cerámica avanzada, el conformado por compactación de polvos se efectúa a altas temperaturas, mediante prensas calientes o por compactación isostática en caliente (HIP, siglas en inglés). En el proceso HIP, los polvos se sellan en recipientes metálicos o de vidrio y simultáneamente se calientan y compactan en un recipiente con gas inerte a presión. Este proceso permite utilizar menos lubricante y permite una sinterización simultánea, proporcionando piezas con baja porosidad y con buenas propiedades mecánicas.

Los materiales absorbentes, los materiales activos, los soportes para catalizadores, los filtros, etc. deben disponer de una porosidad bien concreta, es por ello que el estudio y control de la porosidad es tan importante. La naturaleza de la porosidad es:

- Porosidad abierta (aparente): poros que tienen comunicación con el exterior. Son los responsables de las características de aislamiento acústico y de los problemas de heladicidad. Este fenómeno es la baja resistencia a la helada de una pieza cerámica, que tiene como consecuencia el deterioro de la misma por desprendimiento, exfoliaciones o roturas ocasionadas por la presión que se origina dentro de dicha pieza al pasar el agua que existía en su interior del estado líquido al estado sólido, con el consiguiente aumento de volumen.
- Porosidad cerrada: la responsable de las propiedades del comportamiento térmico.



La relación entre la porosidad total P_t y la densidad puede establecerse por la expresión:

$$P_t = 1 - \frac{d_a}{d_r} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde

P_t es la porosidad total (en tanto por uno).

d_a es la densidad aparente.

d_r es la densidad real.

Para el proceso de fabricación de LCCM se precisaría un horno de alta temperatura (unos 1400°C), para un uso discontinuo o intermitente. Este horno podría ser eléctrico (que sería el tipo más habitual para nuestro caso) o bien de gas (que tiene la ventaja de un menor coste energético).

Para la producción prevista (500 membranas/día) se proponen las siguientes especificaciones:

- Potencia: 180 kW.
- Temp. Máxima: 1450°C.
- Aislamiento (material refractario interior): fibra cerámica de Al_2O_3 .
- Unidad de control y programación de temperatura.
- Bomba de enfriamiento.
- Cabina de ventilación.
- Eliminación automática de vapores.
- Calefactores como mínimo en 4 costados.

El presupuesto estimado se situaría en 100.000 €, existiendo en este caso un considerable número de proveedores especializados. Las variaciones dimensionales del horno tienen en general poca incidencia en el precio final del horno, para la capacidad propuesta.

4.7.6. Unidad de aplicación de las capas filtrantes

Una vez sinterizado el soporte cerámico, el proceso industrial requiere la aplicación de una capa delgada (del orden de 50 μm) sobre el elemento soporte. Esta aplicación se puede hacer por dos vías:



- Aplicación por engobado (con una barbotina).
- Aplicación por filtración (mediante suspensión) o filtración más engobado.

4.7.6.1. Aplicación por engobado

El engobado se define como la aplicación de una fina capa de material cerámico a partir de una suspensión acuosa, que tradicionalmente estaba destinada al perfeccionamiento de las piezas, su alisado, o por motivos decorativos.

La disposición de esta capa puede realizarse directamente a través de una suspensión estable o barbotina de la formulación química deseada, o bien mediante la aplicación previa o intermedia de una capa de naturaleza orgánica de sellado de los poros del soporte y posterior aplicación de la barbotina. En la mayoría de los casos se realizará un doble proceso de disposición de capa delgada.

Los equipos necesarios para proceder a la ejecución de esta etapa son bastante simples. De las diferentes metodologías aplicables, se ha escogido la utilización de una bomba peristáltica reversible y con control de tiempo de residencia como la más efectiva y fácilmente automatizable aún que cabe decir que éste requerirá de un control o supervisión manual importante.

El principio de la bomba peristáltica se basa en el movimiento alternativo de contracción y relajación de la manguera, lo que fuerza el movimiento del fluido a través de ésta (a esta bomba se le conoce también como bomba exprimidora). Una manguera flexible, de pared lisa, se aloja en la carcasa de la bomba y es presionada en cada vuelta por dos zapatas unidas al rotor. La acción de rotación mueve el producto en el interior de la manguera, con una velocidad de desplazamiento constante, sin deslizamiento. Esto hace de este tipo de bombas la opción ideal para aquellas aplicaciones en que se requieran grandes dosificaciones, o presiones de trabajo hasta 15 bar. Se produce un vacío casi total que aspira el producto hacia el interior de la manguera, por lo que los líquidos altamente viscosos son bombeados sin problema por este tipo de bomba. Las bombas peristálticas también pueden ser utilizadas para el desplazamiento de soluciones acuosas o suspensiones, líquidos corrosivos, sustancias estériles o infecciosas, etc.

Este proceso contará con la elaboración propia de algunos elementos como el circuito hidráulico y conectores de goma para cada membrana.



4.7.6.1. Aplicación por filtración

Como alternativa y/o complemento a la disposición de la capa filtrante vía engobado, es posible realizar un proceso de filtración tangencial de una suspensión del compuesto cerámico (que formará la capa de filtración), en una unidad preparada al efecto. De este modo se puede garantizar una cobertura total de la superficie interior del soporte cerámico. La aplicación posterior del engobado (según el procedimiento ya descrito), permitirá asegurar la formación de una capa filtrante perfectamente uniforme en los casos que se requiera.

Una vez formado la capa de filtración, ya sea de MF o de UF, (en una o varias aplicaciones, vía engobado, filtración o una combinación de ambas) controlando su grosor, se dejará secar totalmente y hornear según su formulación química, entre 900 y 1.400 °C. En el caso de optar por la combinación de las dos técnicas, puede ser necesario un proceso de cocción intermedio (o bizcochado) entre una y otra aplicación.

4.7.7. Unidad de corte final

Durante este proceso de corte se reduce la longitud de la membrana a 0.5 m, y se realiza mediante una sierra circular radial de punta de diamante refrigerada con agua. Esta maquinaria tiene un coste sensiblemente inferior al resto de equipos. Tras el corte se aplica un lacado orgánico a pincel en las dos superficies de los extremos de la membrana, para evitar fugas en estas zonas.

4.7.8. Control de calidad.

Aparte del control visual, para el control de calidad de las piezas se efectuarían en principio dos tipos de prueba, la primera de las cuales sería comprobando la pérdida de presión a la entrada y salida de la membrana al aplicar aire, lo cual dará una idea de su porosidad. La segunda consistiría en elegir algunas membranas al azar y probarlas en una planta piloto usando un fluido de ensayo, como podría ser un líquido con la adición de colorante de granulometría dada.

Los principales defectos que se esperan en las membranas son:

- Tamaño de poro del cuerpo filtrante mayor o menor de lo requerido en las especificaciones.
- Grietas en los cuerpos soporte y filtrante.



- Geometría de la pieza fuera de las especificaciones.

4.8. Proceso de finalización y presentación de producto.

Finalmente, en el almacén de producto terminado, se dispondrán las membranas en cajas convenientemente protegidas de impactos y de polvo que las pudiera dañar. Así, alrededor de las membranas se dispondrá poliestireno expandido y cada una de éstas estará protegida del polvo con una funda plástica.

En principio se propone ubicar las membranas en cajas de 36 unidades, número que se puede aumentar o disminuir una vez se haya puesto en marcha el proceso y se tengan contactos con clientes para determinar sus necesidades. Las cajas inicialmente tendrían unas medidas de 60x24x24 cm. y una vez estuvieran llenas de producto se colocarían en palets.





5. MAQUINARIA ELEGIDA PARA EL PROCESO

5.1. Mezcladora-amasadora

Para esta máquina existen bastantes fabricantes que se podrían considerar. Los modelos más significativos que se han encontrado son los que se describen en la siguiente tabla:

Tabla 5.1. Características de distintas mezcladoras de material cerámico.

Modelo	Potencia	Dimensiones aproximadas de la cuba [m]	Capacidad aproximada de material	Otros aspectos de interés
Doménech F140	20-34 kW	Ancho boca x largo 0.75x2.55	1.5 m ³ 1100 kg	Masa: 3100 kg
Mixall M-366 (S. Howes, Inc.)	10-27 kW	Ancho boca x largo 1.0x1.8	1.35 m ³ 975 kg	Velocidad eje: 27 rpm
Mixall M-368 (S. Howes, Inc.)	10-27 kW	Ancho boca x largo 1.0x2.54	1.8 m ³ 1300 kg	Velocidad eje: 27 rpm
Powermix Horizontal mixer P244 (S. Howes, Inc.)	4- 13.6 kW	Ancho boca x largo 0.62x1.22	0.88 m ³ 641 kg	Velocidad eje: 56 rpm
Sackett HIM H500	15 kW	Ancho boca x largo 1.36x1.27	0.5 m ³	Masa: 1500 kg
Sackett Pug mill Model 24	-	Ancho boca x largo 0.71x3.05	0.592 m ³	-
Sackett Pug mill Model 36	-	Ancho boca x largo 1.67x3.05	1.827 m ³	-
Soldner Professional Clay Mixer 5.0HP	6.8 kW	Diámetro x alto Ø0.7x0.43 (cuba de sección circular)	136 kg	Masa: 385 kg
Bluebird 24s	2 kW	Ancho boca x largo 0.76x1.0x1.1	68 kg	Masa: 181 kg

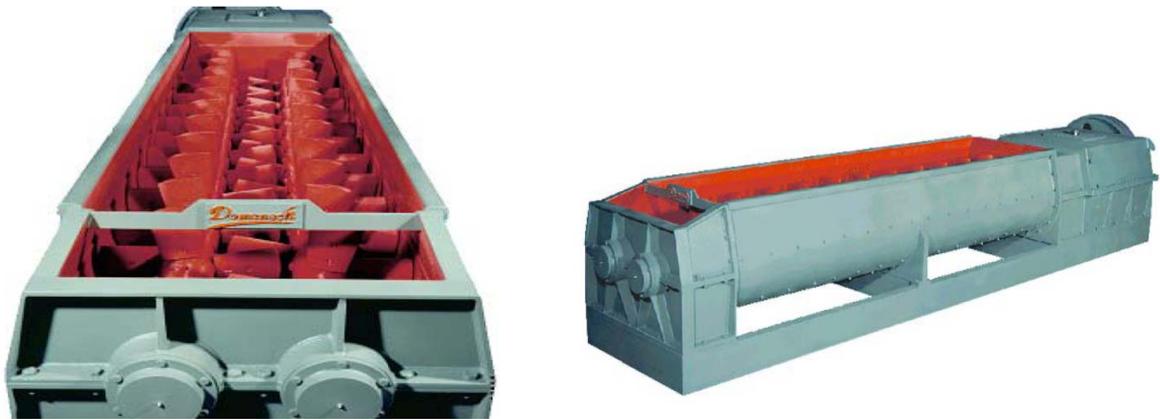


Figura 5.1. Amasadora de doble eje serie F [Doménech, 2006].

De las opciones presentadas, se ha escogido el modelo F-140 de Domenech Machinery & Systems S.A. Se precisa una máquina de gran capacidad y potencia. Esta amasadora se ajusta a las especificaciones y posee la gran ventaja que su factoría se ubica en Alicante, frente al resto de las proposiciones, en las que su fabricación es extranjera (EEUU). Este hecho hace que se reduzcan los costes logísticos así como las demoras ante eventualidades como reparaciones o mantenimiento.



En esta máquina, dos ejes giran a bajas revoluciones y solidarias a éstos se encuentran las palas de mezclado. Se fuerza al material a pasar a lo largo y por tanto a ser trabajado por todas las palas. Los ejes están accionados por un moto-reductor de engranajes paralelos helicoidales. Sus principales características son:

- Dimensiones de la cuba (ancho x largo): 0.75 m x 2.55 m.
- Estructura rígida construida en acero forjado electro-soldado, con cuba de amasado protegida por camisas anti-desgaste cambiables.
- Número de palas mezcladoras: 58.
- Diámetro de los ejes de amasado: 140 mm.
- Producción: 8-16 m³/h (en función de la cantidad de humedad añadida).
- Potencia necesaria: 15-25 CV (según consistencia del material).
- Masa: 3100 kg.
- Engranajes de 100.000 horas de trabajo estándar continuo.

5.2. Extrusora

La extrusión se usa como técnica de procesamiento de cerámicos desde hace más de 150 años. Su tecnología ha sufrido pocos cambios desde la década de los 50 del siglo pasado, y tiene asociada una elevada productividad. Para el proceso se precisa una extrusora de doble hélice, capaz de alcanzar presiones en el rango 80 bar y adecuada para cerámicos abrasivos. En la siguiente figura se muestra un esquema de extrusora tipo.

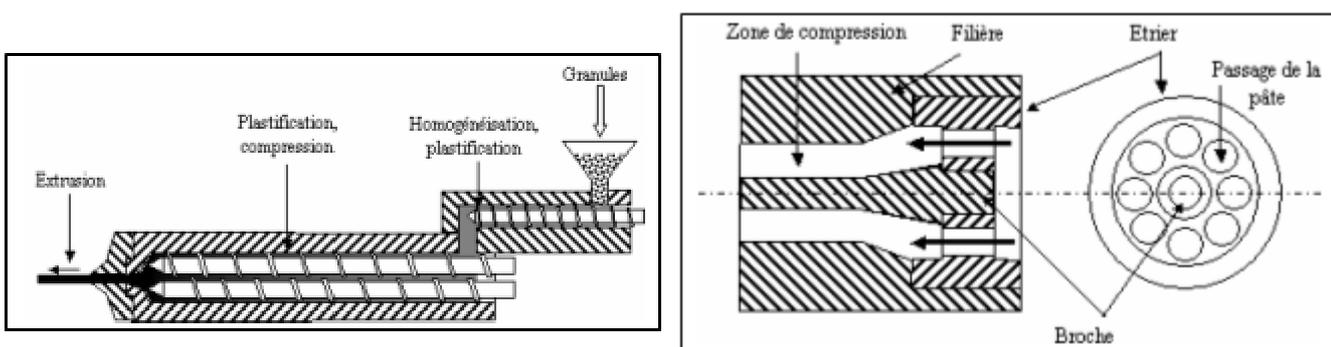


Figura 5.2. Sección esquemática de extrusora de doble hélice y detalle de un dado [Center for Technology Transfers in Ceramics, 2006].



En lo que se refiere a extrusoras para material cerámico y su equipamiento, existen pocas opciones en el mercado, siendo una de las más recomendables la gama de extrusoras suministradas por la compañía ECT-Haendle, y en particular el modelo VA-120.



Figura 5.3. Extrusora ECT-Haendle VA-120 [ECT-Haendle, 2006].

Sus principales características son:

- Potencia nominal: 11 kW.
- Diámetro cilindro: 120 mm.
- Presión máxima alcanzable: 200 bar.

5.3. Recinto de secado

Para realizar el proceso de secado de las piezas se puede optar por adquirir un horno de convección que cumpla las especificaciones requeridas, es decir, que circule aire a unos 100°C que se distribuya regularmente y tenga un volumen aproximado de 4 m³ o habilitar un espacio que ocupe en planta unos 2 m² con la citada circulación de aire caliente.

Considerando que se escoge la primera opción, el siguiente horno de convección cumple con las especificaciones.





Figura 5.4. Horno de circulación de aire O-DR-3 [Shuyong, 2006].

El modelo OVA-202 de Shuang Yeong Co. (Damper type cabinet furnace) trabaja mediante un flujo de calor horizontal y posee las siguientes características,

- Dimensiones interiores (cm): 140 x 60 x 120 (ancho x largo x alto).
- Dimensiones exteriores (cm): 200 x 80 x 190 (ancho x largo x alto).
- Potencia nominal: 14 kW.
- Rango de temperaturas: hasta 200° C.
- Control automático de temperatura, baja emisión de calor, alta eficiencia de consumo y gran aislamiento térmico.
- Libre de mantenimiento
- Posibilidad de diseño y manufacturación según requerimiento.

Además, posee la característica de compatibilidad de trabajo con vagoneta, lo cual repercutirá en la comodidad de todo el proceso.

5.4. Horno de sinterizado

Tras el secado, la estructura del cuerpo en verde es mantenida por pequeñas fuerzas de adhesión, por lo que se debe proceder con cuidado en el siguiente paso: el sinterizado. Los productos a base de óxidos cerámicos de gran pureza requieren temperaturas más altas de sinterizado que los cuerpos que contienen feldespato, como la porcelana, que incluye una alta proporción de material en fase vítrea.



Tabla 5.2. T^a de sinterizado de varios materiales cerámicos [keramverband, 2006].

Cerámico	Temperatura de sinterizado
Porcelana aluminica	Aprox. 1250°C
Porcelana cuarcica	Aprox. 1300°C
Esteatita	Aprox. 1300°C
Cordierita	1250°C - 1300°C
Óxido de aluminio	1600°C - 1800°C
Carburo de Silicio recristalizado	2300°C - 2500°C
Nitruro de Silicio	Aprox. 1700°C

Los hornos de sinterizado, están contruidos con material altamente refractario, lo que incrementa en gran medida su coste. En general existen dos tipos de horno, que comparten la característica básica de ser un recinto aislado en el cual el material es expuesto a una temperatura y atmósfera controlada.

En el horno intermitente el material es cargado en su interior para luego ser sellado y se incrementa su temperatura de acuerdo a unas especificaciones. Cuando el proceso ha concluido, tanto el horno como su carga son enfriados.

Los hornos continuos o de túnel son estructuras largas en las que solo su parte central está directamente calefactada. El material es transportado desde la entrada a lo largo del horno para incrementar su temperatura hasta la mitad del recorrido, punto a partir del cual empezará el descenso de temperatura hasta la salida. Algunos de estos hornos incorporan rodillos para el desplazamiento del material en su interior.

En el caso de elegir horno eléctrico, se requiere uno capaz de alcanzar los 1400 °C y no precisa poseer un tipo especial de atmósfera. El horno de carro W1500/14 manufacturado por Nabertherm posee las siguientes características principales:

- Potencia: 110 kW.
- Temp. Máxima: 1400 °C.
- Dimensiones interiores (m): 0.9 x 1.9 x 0.9 (ancho x largo x alto).
- Dimensiones exteriores (m): 1.6 x 2.7 x 2.0 (ancho x largo x alto).
- Peso: 3800 kg.
- Calefacción por 5 lados.





Figura 5.5. Horno de carro W1500 [Nabertherm, 2006].

Este tipo de hornos van equipados con un controlador de temperatura de alta precisión

5.5. Bomba peristáltica para el engobado

Existen un gran número de empresas fabricantes de este tipo de bombas, como VerderFlex, Boyser, Bredel, PCM Delasco, Autoclude, Rotho, etc. Una de las posibles elecciones es el modelo SPX15 de Bredel S.L, una bomba compacta la cual el la que mejor se ajusta a las necesidades, que se resumen en trabajo con barbotina cerámica y con manguera de alta durabilidad de 20 mm de diámetro interior (las membranas fabricadas son de 20 mm de diámetro exterior), y tener mantenimiento lo más reducido posible.

Sus principales aplicaciones se dan en fangos, carbonatos, barbotina cerámica, morteros, lodos, pinturas, colas, látex, detergentes, etc. La manguera se considera la parte más importante de las bombas peristálticas, por lo que éstas incorporan mangueras diseñadas para soportar gran fatiga, incorporando materiales de alta tecnología, afinamiento en su mecanizado y refuerzos, dando por resultado un alargamiento de la vida útil de éstas.

Las principales características de esta bomba son:

- Sus reducidas dimensiones, aproximadamente (en cm.) son 43x30x53.



- Posibilidad de trabajo con distintos tipos de boquilla.
- Opción de elegir tamaños de manguera de 15 y 20 mm de diámetro interior.
- Acepta presiones de hasta 7.5 bar.
- La potencia oscila entre 0.1 y 0.35 kW.
- Ofrece un caudal por revolución de 0.08-0.15 l. según el tamaño de la manguera.
- Mantenimiento únicamente respecto al cambio de manguera.
- Auto aspirante hasta 95% de vacío (0,05 bar absoluto).
- Puede funcionar en seco indefinidamente.
- Fácil de limpiar: paso franco del fluido, sin válvulas o puntos de retención.
- Excelente capacidad dosificadora.
- Funcionamiento reversible.

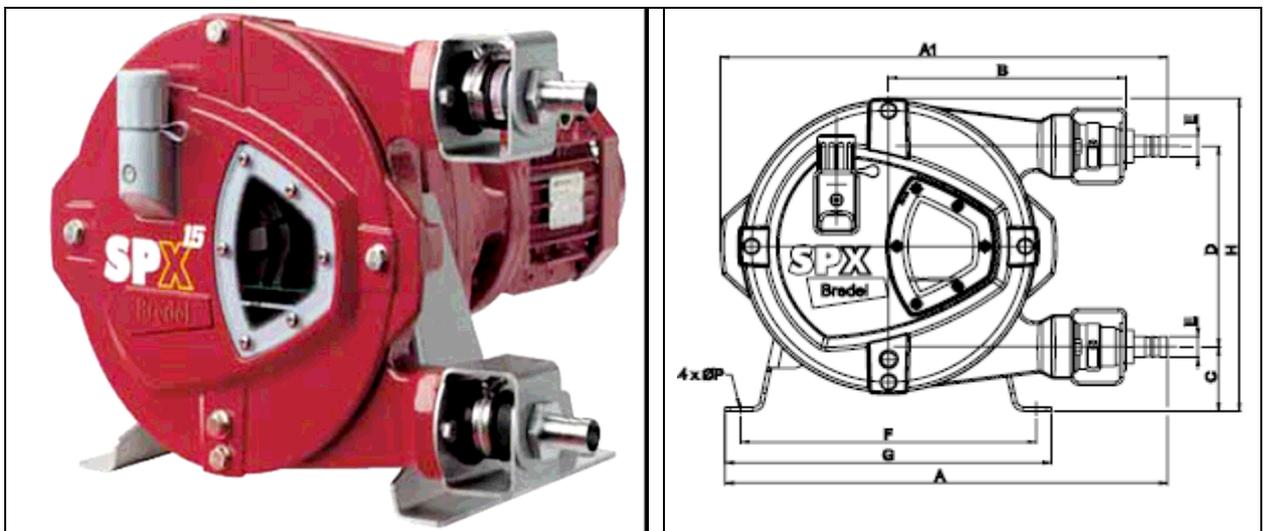


Figura 5.6. Bomba peristáltica reversible SPX15 [Bredel, 2006].

5.6. Unidades de cortado

Como ya se ha mencionado, el cortado de la pieza en verde se realiza con la ayuda de un hilo metálico, y será efectuado en principio por un operario, para más adelante valorar la implantación de un automatismo.

Para el cortado final de la pieza, se utiliza una sierra radial ubicada en su correspondiente soporte, equipada con un disco endurecido con polvo de diamante en su filo. Al tratarse de una máquina de común uso en la industria, se tiene una amplia gama de posibilidades de elección y se optará por un el modelo más económico que cumpla unos mínimos de calidad.





6. DISEÑO DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN

El proceso de fabricación de las membranas se explica en profundidad en el capítulo 4, y se realiza en las etapas que se muestran en la figura 4.1.

El edificio está formado por una nave rectangular, que posee una superficie de 478,85 m². Todo el proceso productivo, desde la entrada de las materias primas hasta la salida de los productos embalados y en cajas, así como el almacenamiento de los mismos, se realiza en su interior. La implantación se ha realizado en función de las necesidades de producción y atendiendo al principio de un funcionamiento racional del proceso productivo.

Como se detalla en planos, la nave que se proyecta tiene 30,5 m de largo, por 15,7 m de ancho. Su distribución espacial se describe en el siguiente punto.

6.1. Distribución espacial del edificio de fabricación

Las secciones que constituyen la planta son:

- Almacén de materias primas.
- Planta de producción.
- Planta de almacenamiento y expedición.
- Oficinas administración.
- Sala de reuniones.
- Sala dirección.
- Laboratorio de control de calidad.
- Aseos.

La capacidad de las distintas zonas en las que se divide el edificio ha sido determinada en función del régimen de funcionamiento que se ha impuesto en la fábrica. Este régimen de trabajo, se resume a continuación:

- Producción diaria de 500 membranas, producción razonable para considerar la creación de una empresa independiente.
- El funcionamiento de la fábrica es durante todo el año de forma uniforme en la hipótesis de 200 días laborables anuales, en jornadas laborables de 8 horas y se tiene en cuenta, por si



sucedieran imprevistos, tener materia prima almacenada, suficiente para al menos 7 días de funcionamiento.

- El almacén de producto terminado, se ha dimensionado de tal manera que tenga capacidad para albergar la producción de una semana de funcionamiento de la fábrica.

- La producción podría ser aumentada por ampliación de horarios laborables, mediante la realización de 2 o 3 turnos de 8 horas. Igualmente podría funcionar de modo intermitente según la demanda.

Bajo estas hipótesis se dimensionan las instalaciones y equipos industriales necesarios. Las opciones de equipamiento industrial que se presentan no son las únicas existentes en el mercado, sino que de las diferentes opciones disponibles y tras un periodo de trabajo a escala de laboratorio enmarcado en el proyecto Low Cost Ceramic Membranes - LCCM (Cusidó 2003) se eligen aquellas que se consideran como las más adecuadas tanto desde la perspectiva tecnológica como desde la perspectiva de escalado industrial, buscando el equilibrio entre el binomio gestión/amortización de la instalación.

Hay que señalar que en algunos casos, la propuesta de equipos especializados se ve muy limitada por el escaso número de fabricantes existentes, tanto desde la perspectiva local como internacional, que son en algunos casos prácticamente únicos.

6.1.1. Desglose por secciones

Las materias primas, que superaran los 25 productos, se ubicarán en depósitos o bien en sacos de hasta una tonelada. En este almacén, se dispondrá un molino de bolas industrial de preparación de barbotinas y equipos para pesaje. Se estima una superficie mínima necesaria de unos 50 m².

La planta de producción contiene maquinaria de mezclado y amasado, extrusionado y corte en crudo, túnel de secado, horno de alta temperatura, sección de engobado, sección de corte final y control de calidad, por lo que precisará un espacio no inferior a 140 m². Las sub-secciones que se forman alrededor de cada maquinaria se unirán mediante vagonetas sobre raíles.

Se proyecta una planta de almacenamiento y empaquetado para la expedición de los productos. El producto terminado se presentará en cajas conteniendo en principio 36 unidades



de producto, como se detalla más adelante. Se considera necesaria una superficie mínima de 50 m².

Se propone para el siguiente conjunto una superficie no inferior a 100 m²: sala de dirección, sala de reuniones, oficinas de administración y comercialización y laboratorio de desarrollo y control de calidad, anexo a las anteriores dependencias.

Finalmente, se debe equipar la planta con espacios de servicios (vestuarios, baños, duchas, botiquín, etc.) con una reserva de superficie de 25 m².

Tabla 6.1. Distribución espacial de la nave.

Dependencia	Dimensiones [m x m]	Superficie [m²]
Sala dirección	3,15 x 3,45	10,86
Sala de reuniones	4,20 x 3,45	14,49
Oficinas administración	7,45 x 3,45	25,70
Laboratorio de CC	7,40 x 7,00	51,80
Aseos	5,00 x 5,00	25,00
Almacén materias primas	14,95 x 4,00	59,80
Zona almacén producto terminado	14,95 x 4,00	59,80
Planta de producción	14,95 x 10,10 + 9,85 x 5,10	197,48

Esta distribución se ha realizado de manera que se aprovechen al máximo las dimensiones de la nave y los almacenes estén situados de forma que se reciba la materia prima y se suministre a la planta de una manera cómoda, así como se almacene y expida el producto terminado de la misma manera, por lo que se han puesto los dos almacenes en contacto con el principio y final de la línea de producción respectivamente. Dichos almacenes, los cuales disponen de espacio suficiente para la circulación de carretillas y personal para el almacenamiento, tienen la misma superficie y forma rectangular.

En el almacén de producto terminado, como ya se ha mencionado, se tendrá capacidad de almacenamiento al menos de la producción de una semana si se estuviera produciendo a plena capacidad, aunque en principio se supone que la producción será intermitente (bajo pedido).



6.1.2. Almacenamiento y expedición.

Teniendo en cuenta que la producción estimada a pleno rendimiento sería de 500 membranas/día, y que las medidas de cada unidad son 50 cm de longitud y sección circular de diámetro 20 mm, se debería tener espacio al menos para 2500 membranas, las cuales se presentarían en cajas.

Las cajas de cartón contarán con piezas de soporte de poliestireno expandido. Cada membrana se ubicará en una funda plástica transparente que le preservará de la acumulación de polvo, dada la naturaleza porosa del producto. El número de membranas por caja sería de múltiplos de 6, en varios niveles convenientemente ubicadas para un transporte seguro gracias a los separadores de poliestireno expandido. Las unidades de embalaje se adquirirán en empresas especializadas de cartonaje de acuerdo con la gestión de la demanda.

Si se suponen cajas de 36 unidades (cantidad que puede modificarse una vez se inicie el proceso y se estime el número más adecuado), éstas podrían tener unas dimensiones de 60x24x24 cm, como se observa en la figura 6.1.

Las cajas se colocarían agrupadas sobre un palet standard de 1 x 1'20 m, tumbadas y en planos de ocho cajas cada uno, hasta un total de tres planos, lo que supone una altura de $24 \times 3 = 72$ cm. El número de cajas agrupadas en cada palet es por lo tanto igual a 24 y el número de membranas por palet es 864. Para alojar la producción de una semana se requerirán 3 palets, los cuales no tendrán problema de ubicación en el almacén ya que se ha dimensionado en exceso para evitar futuros problemas de espacio o por si se varía el formato de presentación.

En el mismo almacén de producto terminado se dispondría una zona con los palets de cajas de cartón plegadas, de los separadores de poliestireno expandido y de cajas con las fundas de plástico, la cual no ocuparía más de 8 m². Si se tiene en cuenta la producción de 500 membranas/día, el consumo de cajas asciende a 2780 cajas/año, por lo que serían necesarios 5 palets de 500 cajas plegadas durante un año. Para los separadores de poliestireno, se debería estudiar la forma óptima que deberían tener, y a partir de ahí encargar a una empresa especializada su fabricación, como también pasaría con las fundas de plástico de las membranas.



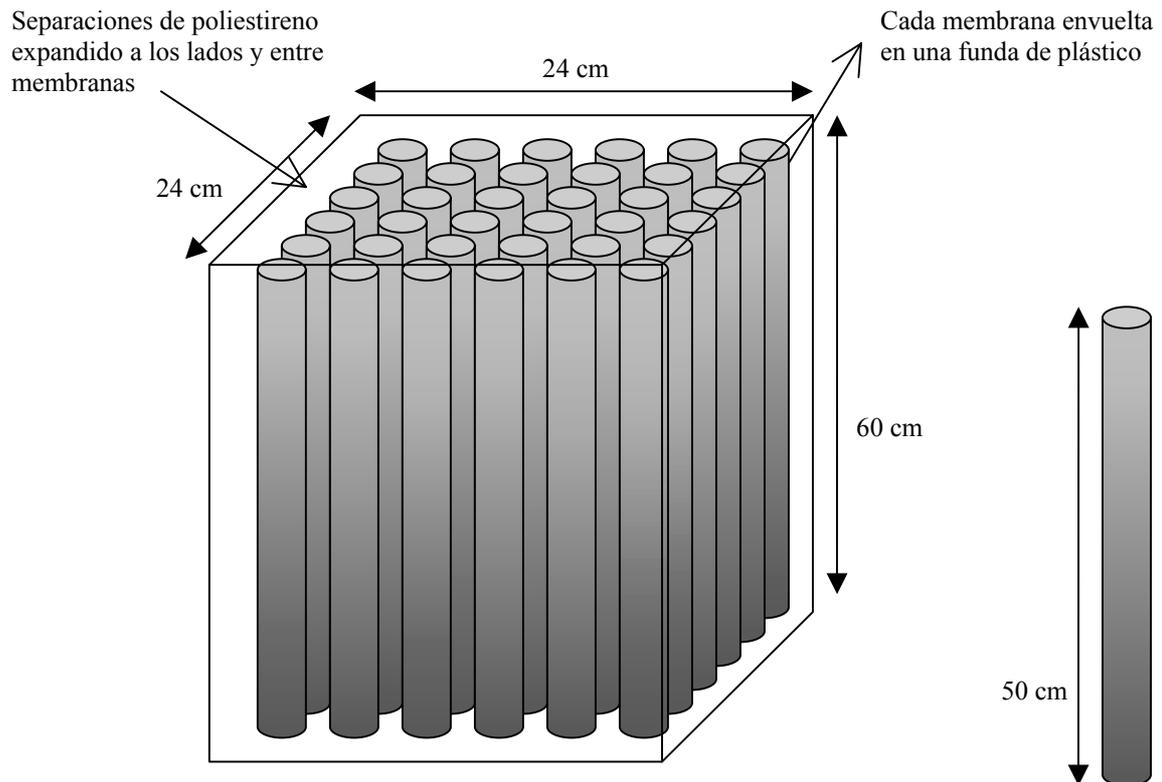


Figura 6.1. Posible embalado de producto.

6.2. Necesidades de suministros energéticos, agua y comunicaciones

En la planta de producción se requerirá disponer de instalaciones para el suministro de:

Electricidad

Como se detalla en el anejo relativo a la instalación eléctrica de la planta, ésta se realizará mediante conexión trifásica y tendrá una potencia total de 197 kW y, si se supone un 70 % de los aparatos eléctricos en funcionamiento (caso bastante desfavorable), la intensidad necesaria sería igual a 329 A. La instalación estará protegida por un magnetotérmico de 400 A y un fusible de la misma intensidad.

Gas natural

Al haber proyectado horno eléctrico en lugar de utilizar horno de gas, este suministro puede ser prescindible o en todo caso acogerse a una tarifa comercial.



Agua potable

Las necesidades de agua para el proceso industrial son relativamente escasas, por lo que la contratación de una tarifa mínima (posiblemente doméstica) será suficiente. Se estima el consumo previsto de este fluido no superior a 30 m³/mes.

Comunicaciones

Dos líneas telefónicas como mínimo del tipo ADSL se considerarán suficientes para el volumen de comunicaciones previsto, que incluirán red Internet y centralita con teléfonos supletorios.

6.3. Características de la maquinaria

Las características de la maquinaria se detallan en el capítulo 5 y en cuanto a espacio y potencia se resumen en la siguiente tabla:

Máquina	Dimensiones aproximadas			Potencia nominal
	Longitud	Ancho	Alto	
Mezcladora-amasadora	2,5 m	0,75 m	1 m	20-34 kW
Extrusora	2,5 m	1,5 m	2 m	11 kW
Túnel de secado	0.8 m	2 m	1.9 m	14 kW
Horno de sinterizado	2,7 m	1,57 m	2 m	110 kW
Unidad de aplicación de las capas filtrantes	0.4 m	0.3 m	0.5 m	0.1 – 0.35 kW
Unidad de cortado	0.5 m	0.5 m	1 m	3 kW

Tabla 6.2. Dimensiones y potencia de la maquinaria.



7. RESUMEN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL PROCESO

7.1. Desglose de impactos en las diferentes etapas

Etapa	Tipo de contaminación	Afección
Almacenamiento de materias primas	Atmosférica	Partículas
Mezclado / dosificado	Atmosférica	Partículas
	Aguas	Sólidos en suspensión, metales
	Residuos	Partículas, metales
	Ruido	Molesta
Conformado pieza	Aguas	Sólidos en suspensión
	Residuos	Inertes
Secado	Atmosférica	Partículas
	Residuos	Inertes
Cocción	Atmosférica	Partículas y gases
	Residuos	Inertes
	Térmica	Irrelevante

Tabla 7.1. Tipo de impacto en las principales fases del proceso.

Almacenamiento y mezclado / dosificado

En esta etapa de producción se tienen los equipos: molino de bolas, unidades de pesaje, tolva de mezcla en seco y mezcladora/amasadora.

El principal impacto es la emisión de partículas de óxidos metálicos estables e inertes al aire, la mayoría de Al_2O_3 . En general, la alúmina es eliminada eficientemente de los pulmones, pero el riesgo asociado a una exposición crónica a la alúmina no se ha concretado. Algunos autores opinan que puede generar neumoconiosis mientras otros recomiendan inhalar alúmina en polvo como método terapéutico y preventivo en caso de silicosis. Asimismo, algunos estudios parecen indicar que la inhalación masiva de alúmina o aluminio puede favorecer el desarrollo de fibrosis intersticial.

La inhalación de altas concentraciones de polvo de ésta sustancia puede originar irritación del tracto respiratorio superior. También se produce irritación de los ojos por el contacto con este polvo, por lo que los operarios deberán hacer uso de una mascarilla estándar y gafas de protección de seguridad o protección ocular combinada con la protección respiratoria.



Extrusora / recolectora

Se generarán residuos inertes de material cerámico con base de Al_2O_3 , debido a fallos en la etapa de mezclado, mal funcionamiento de la extrusión debido a restos acumulados de material, atascamientos, etc. Se trata de residuos crudos que en ocasiones podrán ser reutilizados (insertados en la alimentación de la extrusora o en la mezcladora) o por el contrario ser desechados. Si se cuidan las condiciones de trabajo, la cantidad de desechos de material extrusionado puede llegar a ser mínima.

Zona de secado

El recinto de secado será un horno de 1 m³ aproximadamente de capacidad, donde circulará aire caliente a unos 100 °C para el secado previo de las piezas a la cocción. Se desprenderá una cantidad de polvo baja y se generarán residuos, debidos a las piezas defectuosas.

Horno de sinterizado

Se trata de un horno de alta temperatura (hasta 1400 °C), para un uso discontinuo. Para este tipo de proceso se contará con un horno eléctrico o de gas, que tiene la ventaja de un menor coste energético. La potencia consumida por el horno se podría estimar en unos 110 kW.

En esta fase se desprenden componentes volátiles de la pasta y del combustible en el caso de proyectar horno de gas, además de producirse residuos debidos a piezas defectuosas y contaminación térmica debido a las altas temperaturas.

Las emisiones del sinterizado cumplirán la legislación vigente de carácter general, debido a la presencia minoritaria de productos orgánicos (<5%), en forma de aceites, polifosfatos, dextrinas, metilcelulosas, etc.) los cuales no contienen compuestos clorados, por lo que se descarta la emisión de compuestos orgánicos complejos como los pertenecientes a las familias de los dioxanos y furanos. No se prevé en este sentido la implantación de filtros o sistemas de postcombustión ni equipos de control complementarios en los hornos. Además, las cantidades de materia prima por horneado no superarán los 1.000 kg. y por tanto los factores de emisión estarán dentro de los límites legislativos actualmente en vigor.



Los residuos de piezas cocidas se desecharán en vertederos de inertes, como ocurre con los materiales de construcción, por lo que se dispondrá un contenedor estándar en la planta para su posterior transporte a depósito.

Aplicación de la capa filtrante

Estos residuos son los procedentes de la depuración de las aguas de lavado de la unidad de aplicación de la capa filtrante. Como consecuencia, se va a generar agua residual que presentará turbidez y color debido a las partículas de material que está presente en la barbotina, esencialmente Titanio. La generación de estos residuos será muy reducida, y se considerarán residuos no especiales.

En otro tipo de industria cerámica, se podrían recuperar estos residuos en el proceso productivo, pero para la fabricación de membranas filtrantes, la precisión deseada de tamaño de poro desaconseja la introducción de desechos tras la fase de aplicación de la capa filtrante.

Unidad de almacenamiento y expedición

La producción será intermitente, es decir, producción bajo pedido. Por este motivo no se plantea disponer de grandes stocks de membranas. Para la expedición de membranas, se considera necesario disponer de cajas de cartón con piezas de soporte de poliestireno expandido. Cada membrana se ubicará en un funda plástica transparente que le preserve de la acumulación de polvo, debido a la naturaleza porosa del producto.

Este tipo de embalajes generarán residuos asimilables a urbanos, los cuales serán cuantitativamente poco importantes y no requerirán una gestión especial.

7.2. Necesidades de agua

Las necesidades de agua para el proceso industrial son relativamente escasas, por lo que la contratación de una tarifa mínima será suficiente. Se estima el consumo previsto no sea superior a 30 m³/mes.

No debe descartarse la necesidad de establecer algún tipo de tratamiento del agua en alguna parte del proceso (rectificación o desionización), en especial para la preparación de barbotinas



para engobado. En este caso el volumen de agua a tratar será una pequeña fracción del total del agua empleada (del orden del 15%).

7.3. Necesidad de electricidad

La acometida necesaria dependerá en gran medida de si el proceso de sinterización cerámica se realiza con horno eléctrico o bien de gas. En todo caso se recomienda una conexión trifásica MT con potencias entre 100 y 500 kW, de acuerdo a los equipos seleccionados.

7.4. Impacto asociado al uso y fin de vida de membranas cerámicas

7.4.1. Uso

Durante el uso de este tipo de membranas, el impacto medioambiental se produce durante el proceso de limpieza de éstas. Durante el proceso de limpieza química, las membranas son empapadas determinados productos químicos, como el cloruro de hidrógeno (HCl) y el ácido nítrico (HNO₃), o agentes desinfectantes, como el peróxido de hidrógeno (H₂O₂).

Primeramente la solución empapa las membranas durante unos minutos y después se aplica un chorro de agua delantero o trasero que enjuaga los contaminantes, produciendo agua residual que contiene estos compuestos, además de algo de material cerámico debido a la erosión y los residuos procedentes de la operación de filtrado, conocidos como lodo.

El lodo está formado por componentes inorgánicos solubles, partículas coloidales, componentes orgánicos disueltos, reactantes químicos y microorganismos, y forma un depósito en la superficie de la membrana o dentro de los poros que se desprende tras la limpieza.

En el caso de la operación de depuración de aguas, se deberá recurrir a un depósito controlado, el cual debe ser de la categoría de especial, o sea, apto para la recepción de residuos tóxicos, que serán los procedentes de los fangos de tratamiento de las aguas residuales.



7.4.2. Fin de vida útil

Una vez que la membrana ha agotado su capacidad de filtrado, después de un largo periodo de uso por lo general, no constituye un residuo problemático, al poder ser depositado en un contenedor normal debido a su carácter inerte.

7.5. Consideraciones sobre riesgos laborales

- Se debe prever el uso de mascarillas, guantes y protectores anti-ruido en algunas secciones del proceso industrial.
- Existencia de severas medidas de seguridad eléctrica y de ventilación en el área de secado y horneado así como de evacuación de gases. No se contemplan riesgos de deflagración.
- Se dispondrán medidas de protección contra incendios de acuerdo con la legislación vigente.
- Formación continua del personal para cada una de las etapas de la producción industrial.

En el anejo D se presentan las fichas de seguridad química (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, 2007) de los materiales predominantes en la composición de la membrana, la alúmina y el dióxido de Titanio.





8. CONCLUSIONES

En los últimos tiempos han cobrado especial importancia los sistemas de tratamiento de agua debido a razones ambientales, por lo que la implementación de una planta destinada a la fabricación de membranas adecuadas para tratamiento terciario de agua es especialmente interesante.

Como se ha visto, es posible diseñar un proceso de fabricación que resulte rentable, teniendo en cuenta la técnica desarrollada en el proyecto LCCM (Cusidó, 2003) que permite principalmente obtener membranas de calidad suficiente para la citada aplicación. Actualmente, el elevado precio de las membranas cerámicas únicamente las hace aptas para la elaboración de productos de alto valor añadido, como zumos y vino, o aplicaciones técnicas en industrias químicas, farmacéuticas, etc. Se debe tener en cuenta además, que las membranas producidas se podrán destinar a estas otras aplicaciones si se cumplen los requerimientos de éstas.

Las membranas producidas en la planta diseñada pertenecerán al rango de micro y ultrafiltración y la composición de su pasta de elaboración no se ha descrito por motivos obvios. Estas membranas, consiguen la purificación de agua mediante un método no agresivo y que no genera prácticamente residuos, lo que es una alternativa más que interesante a los tratamientos terciarios habituales. Además, se debe tener en cuenta la elevada resistencia al ataque químico y durabilidad de las membranas cerámicas frente a las de otro material.

Según refleja el estudio económico, existe un hueco en el mercado para este producto. El coste de mercado de cada membrana es aproximadamente de 300 €/unidad, mientras que el precio fijado en el presente proyecto es de 30 €/unidad, si bien las membranas existentes en el mercado pueden poseer una mejor calidad, dependiendo de los fines a que se destinen. En ese estudio se constata que la inversión resulta favorable a partir del cuarto año.

Se ha considerado la nave de partida con unas dimensiones fijadas (de 30,5 x 15,7), pero se puede adaptar fácilmente el proceso a una nave de características más reducidas, así como ajustar el número de personal envuelto en el proceso, junto con otras medidas con las que se podrían reducir costes de implantación en los primeros años de funcionamiento de la planta. Así mismo, la maquinaria descrita no debe considerarse como la única alternativa.





LEGISLACIÓN APLICABLE

Europea

Directiva 96/91/CE del Consejo de 24 de septiembre de 1996 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación (DOUE 10/10/1996).

Decisión de la Comisión, de 17 de julio de 2000, relativa a la realización de un inventario europeo de emisiones contaminantes (EPER) con arreglo al artículo 15 de la Directiva 96/61/CE del Consejo relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación (IPPC) (DOCE L192 28/07/2000).

Directiva 85/337/CEE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente (DOUE 175, 5/7/1985).

Directiva 97/11/CE, de 3 de marzo, por la que se modifica la Directiva 85/337/CEE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente. (DOCE L73, 14/03/97). Transpuesta en la Ley 6/2001, de 8 de mayo (BOE 111, 09/05/01).

Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de abril de 2004, sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales (DOUE L143, 30/04/04).

Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas (DOUE L135, 30/05/1991).

Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

Directiva 98/83/CE del Consejo de 3 de noviembre de 1998 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.

Decisión de la Comisión 94/3/CEE de 20 de diciembre de 1993, por la que se aprueba la lista europea de residuos. Esta decisión se modifica por decisiones posteriores como la Decisión 2000/532/CEE (DOCE L266, 6/9/2000), la Decisión 2001/118/CEE (DOCE L47, 16/2/2001), la Decisión 2001/119/CEE (DOCE L47, 16/2/2001) y la Decisión 2001/573/CEE (DOCE L201, 28/7/2001).

Directiva 91/156/CEE del Consejo de 18 de marzo de 1991 por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los residuos.

Directiva 98/15/CE de la Comisión de 27 de febrero de 1998 por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I.



Estatal

Ley 38/1999, de 5 de noviembre, de Ordenación de la Edificación. (BOE 266, 6/11/99).

Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. (BOE 224, 18/9/2002).

Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales. (BOE 303, 17/12/2004).

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. (BOE 74, 28/03/2006).

Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano (BOE 21/02/2003).

Real Decreto 773/1997, de 30 de mayo, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la utilización por los trabajadores de equipos de protección individual.

Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas. Transposición al derecho interno español de la Directiva 91/271/CEE.

Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos. Transposición al derecho interno español de la Directiva 91/156/CEE (BOE 96, 22/4/1998).

Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental. (BOE 239, 05/10/88).

Real Decreto-ley 9/2000 de 6 de Octubre, de modificación del RDL 1302/1986 de evaluación de Impacto Ambiental.

Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación (BOE 02/07/2002).

Ley 31/1995, de 8 de noviembre de prevención de riesgos laborales (BOE 269, 10/11/1995).

Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

Real Decreto 509/1996 de 15 de Marzo, sobre tratamiento de aguas residuales urbanas.

Real Decreto-ley 1/2001 de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la ley de aguas de 2 de Agosto de 1985.



AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van dirigidos

A Ana, por su apoyo constante, su comprensión y el empuje proporcionado durante la confección del presente proyecto.

A mis padres, José Francisco y Magdalena, en especial por su esfuerzo económico durante los años de carrera.

A Kika, Carlos, Pau y Neus, por su cariño.

A mis compañeros Sergi, Txus, Vicent, Corda y Toni por su amistad.

Especialmente a los profesores Lázaro Cremades y Joan Antoni Cusidó, por la ayuda prestada, el material aportado y sobre todo por la comprensión demostrada durante el transcurso del presente proyecto.



BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas

- ALCARRIA, M. *Evaluación Tecnológica de los Biorreactores de Membrana*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2005.
- BREDEL. *Introducing: Wild Thing. bombas peristálticas industriales Bredel: La SPX10 y la SPX15*. [<http://www.watson-marlow.com/wmb-gb/pop-spx15.htm>, octubre 2006].
- CENTER FOR TECHNOLOGY TRANSFERS IN CERAMICS. *Extruder*. [http://www.ceramic-center.com/anglais/moyens_forme_extrusion.php, octubre 2006].
- DOMENECH MACHINERY & SYSTEMS. *Catálogo de productos*, 2006.
- ECT-HAENDLE. *Extrusion for ceramic technology*. 2006. [<http://www.ect-haendle.de/downloads/prospekt.pdf>, noviembre 2006].
- FIELD, R. W. et al. *Critical flux concept for microfiltration fouling*. Journal of Membrane Science 100, 259-272. 1995.
- GARCIA, J., BOIX, O. *Cálculo de instalaciones de alumbrado*. [<http://edison.upc.edu/curs/llum/exterior/calculos.html>, agosto 2006].
- HELLERSTEIN, J. P. et al. *Industrias manufactureras. Vidrio, cerámica y materiales afines*. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. [www.mtas.es/insht/EncOIT/pdf/tomo3/84.pdf, mayo 2006].
- INE, INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. *Notas de prensa. Encuesta del gasto de las empresas en protección ambiental. Año 2003*.
- INTERNATIONAL ALUMINUM INSTITUTE. *Statistics*. [<http://www.world-aluminium.org/iai/stats/index.asp>, diciembre 2006].
- KERAMVERBAND. *Breviary Technical Ceramics. From Forming to Firing*. [http://www.keramverband.de/brevier_engl/4/1/4_1_4.htm, noviembre 2005].
- KUMAR, S. *Membrane Processes for Water and Wastewater Treatment*. Dept. of Civil, Construction and Environmental Engineering Iowa State University, 2001. [<http://www.te-webserver.cce.iastate.edu/courses/ce525/Membrane-Samir.ppt>, agosto 2006].
- MEDINA, J. A. *Instalaciones de desalación para la agricultura, su futuro*. I Congreso AEDyR, Murcia, 2000.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO. *Reglamento de Seguridad contra incendios en establecimientos industriales*. Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre. BOE núm. 303 de 17 de diciembre.



- MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES. *Fichas Internacionales de Seguridad Química. Óxido de Aluminio / Dióxido de Titanio*.
[<http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0351.htm>, enero 2007]
[<http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0338.htm>, enero 2007].
- MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES. *Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión*. [<http://www.mtas.es/insht/legislation/RD/REBT.htm>, agosto 2006].
- MULDER, M. *Basic Principles of Membrane Technology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1991.
- NABERTHERM. *Catálogo hornos desaglomerado, sinterización, cocción, decoración, laboratorio*) [http://www.nabertherm.de/downloads/C2_1_spanisch.pdf, julio 2005].
- PRATS, D. *Reutilización de aguas residuales. Calidad requerida y costes asociados*. I Congreso AEDyR, Murcia, 2000.
- REGUEIRO, M. *Cerámica y Vidrio en España*. Dpto. Cristalografía y Mineralogía, Universidad Complutense de Madrid, textos de estudio, 2003
[http://www.ucm.es/info/crismine/Ceramica_vidrio.pdf, octubre 2005].
- RODRÍGUEZ, E. *Obtención de Membranas Cerámicas de Bajo Coste para Micro y Ultrafiltración Tangencial, destinadas a Tratamientos Terciarios*. Terrassa, Octubre de 2003.
- SAGLE, A., FREEMAN, B. *Fundamentals of Membranes for Water Treatment*
[<http://www.waterprogram.tamu.edu/wmhs602/readings/desal/Membranetechnology.pdf>, enero 2006].
- SHUANG YEONG CO. 2002 *Damper type cabinet furnace*.
[http://www.shuyong.com.tw/shuyong_en_p-o3.htm, octubre 2006].
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Crossflow Filtration. Tanks Focus Area*. Office of Environmental Management Office of Science and Technology, September 1998.
- VALERO, A., UCHE, J., SERRA, L. *La desalación como alternativa al PHN*. Informe de la Diputación General de Aragón , 2001.
- VIDAL-ASIAÍN, L. *Las técnicas de filtración tangencial y el medio ambiente*. Revista 3, IV trimestre 1999. [<http://www.asiain-asesores.com/rev3/pag31.htm>, marzo 2005].
- WAGNER, J. *Membrane Filtration Handbook Practical Tips and Hints*. Second Edition, Revision 2. November 2001. Osmonics, Inc.
- WWI. *Cross-flow membrane market to reach \$10 billion by 2010* .
Artículo sobre RO/UF/MF World Markets (MCILVAINE COMPANY, 2006)
[http://ww.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?ARTICLE_ID=249218&p=41, marzo 2006].



Bibliografía complementaria

- ACERCAR. *Descripción del proceso cerámico*.
[<http://www.acercar.org.co/industria/manuales/iceramica/02proceso.pdf>, marzo 2005].
- AENOR. *Dibujo técnico. Normas básicas*. 1999.
- ALI, S., et al. *Membrane Separation and Ultrafiltration*.
[<http://vienna.bioengr.uic.edu/teaching/che396/sepProj/FinalReport.pdf>, septiembre 2005]
- AMBIENTUM. *Nanofiltración de aguas residuales*. Edición Junio 2002.
[http://www.ambientum.com/revista/2002_15/NNFLTRCNGC2.asp, diciembre 2005].
- AMERICAN MEMBRANE TECHNOLOGY ASSOCIATION. *Membrane Filtration (MF/UF)*. [http://www.membranes-amta.org/amta_media/pdfs/NFRO.pdf, junio 2006]
Nanofiltration and Reverse Osmosis (NF/RO). [http://www.membranes-amta.org/amta_media/pdfs/MFUF.pdf, junio 2006].
- ARANGUEZ, P., CONDE, J. *Tecnología, investigación y desarrollo compatible con el medio ambiente: El centro tecnológico de la cerámica industrial de Toledo*. I Congreso de Ciencia Regional de Andalucía.
- ARBURG. *Inyección de polvo: Powder injection moulding. Fabricación de piezas complejas de metal y cerámica*.
[http://www.arburg.it/com/common/download/web_523048_es.pdf, octubre 2006].
- ASCER. *Proceso de fabricación de baldosas cerámicas*.
[<http://www.spaintiles.info/documentos/proceso.pdf>, diciembre 2006]. *Guía de la baldosa cerámica*. [<http://www.spaintiles.info/documentos/gbc.pdf>, diciembre 2006].
- BENDICK, J. A. et al. *Application of Cross-Flow Microfiltration for the Treatment of Combined Sewer Overflow Wastewater*. *Journal of environmental engineering*, pp. 1442-1449. Diciembre 2004.
- BIOÉTICA.ORG. *Las diatomeas*. [<http://www.prodiversitas.bioetica.org/diatomeas.htm>, junio 2005].
- BLASCO, A. CEPICMA. *Biomembranas*. Asecorp on-line, 2001. [<http://www.asecorp-online.com/ficheros/coltec/coltec2-2-2001.pdf>, junio 2005].
- CALLISTER, W. D. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Reverté, Barcelona (2000).
- CASADO, C. *Comportamiento de membranas cerámicas de pervaporación en la deshidratación de disolventes orgánicos industriales*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria, marzo 2005.



- CENTRO CANARIO DEL AGUA. *Bioreactores de membrana. Evolución histórica e implantación a nivel mundial*. [<http://www.fcca.es/Docs/MBRhistoria.pdf>, febrero 2006].
Tipos fundamentales. Ventajas e inconvenientes. [<http://www.fcca.es/Docs/MBRtipos.pdf>, febrero 2006].
- CLARK, R. M. *Cost estimating for conventional water treatment*. Journal of environmental engineering division, Vol. 108, No. 5, September/October 1982, pp. 819-834.
- DARTON, E. G., DUDLEY, L. Y. *Membrane Pre-Treatment and Scale Control*. [<http://www.derwentwatersystems.co.uk/chemical-treatments/paper-two.pdf>, marzo 2005]
- DOBON, S., BAGGER-JØRGENSEN, R. *Cross-flow filtration of Fruit Juice*. Danish Environmental Protection Agency, 2000.
- ELÍAS, X. *Optimización de los Procesos Cerámicos Industriales, ponencias ID 57, 58, 59 y 60*. Marzo 2001. [<http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias>, abril 2006]
- EPRI COMMUNITY ENVIRONMENTAL CENTER. *Membrane technologies for water and wastewater treatment*. California, 1997.
- GERMAN, R. M. *Sintering Theory and Practice*. John Wiley and Sons, Inc., 1996.
- INTERNATIONAL ALUMINUM INSTITUTE. *Third Bauxite Mine Rehabilitation Survey*. [<http://www.world-aluminium.org>, junio 2006].
- LÓPEZ, A., GUERRERO-STRACHAN, J. *Instalaciones eléctricas para proyectos y obras*. Madrid, Thomson-Paraninfo, 1993.
- KANG, S-T. et al. *Direct observation of biofouling in cross-flow microfiltration: Mechanisms of deposition and release*. Journal of membrane science. July 2004.
- KIM, A. S., HOEK, E. M. *Cake Structure in Dead-End Membrane Filtration: Monte Carlo Simulations*. *Environmental engineering science*. Volume 19, Number 6, 2002 pp. 373-386.
- MIRI, R., JOULIÉ, R. y RIOS, G. M. *Study of transient flows of microparticles suspension by use of the tangential microfiltration process*. [<http://www.ichmt.org/abstracts/MECT-02/Abstracts/7-3.pdf>, marzo 2005]
- MMS IBERICA. *Tecnologías de membrana*. [<http://www.mmsiberica.com/tecnologia.htm>, marzo 2005].
- RED IBEROAMERICANA DE POTABILIZACIÓN Y DEPURACIÓN DEL AGUA. *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Cap. 19: la reutilización de aguas residuales*. [http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_19.pdf, agosto 2006].
- ROGER, J., RIERA, M. y ROLDÁN, C. *Tecnología eléctrica*. Madrid, Síntesis, 2ª ed. Feb. 2002.



- SANCHEZ, J. M. *Pulvimetalurgia y Materiales Cerámicos. Apuntes*. Campus tecnológico de la universidad de Navarra. Dpto. de Ingeniería de Materiales.
[http://www.tecnun.es/asignaturas/pulvimetal/pagina_4.html, noviembre 2006].
- SANZ, J.L. *Instalaciones eléctricas (Resumen del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión)*. Madrid, Thomson-Paraninfo, 2003.
- SARTORIUS. *Removal of E. coli from Fermentation Broth using Crossflow Microfiltration*. Developing Applications #3. [<http://www.sartorius.com/common-process/literature/developing-applications.html>, mayo 2005].
- SECRETARÍA DE ESTADO DE ENERGÍA, DESARROLLO INDUSTRIAL Y DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA EMPRESA. *Estrategia de desarrollo y eficiencia energética en España 2004-2012. 3, subsector minerales no metálicos*. 5 de Noviembre 2003.
- SWEDISH CERAMIC INSTITUTE. *Ceramic development. Part 1*.
http://www.sci.se/pdf/Ceramic_Development_1997-1999_Part_1.pdf, octubre 2006].
- VALERO, A., UCHE, J., SERRA, L. *La desalación como alternativa al PHN*. Informe de la Diputación General de Aragón , 2001.
- WANG, H.Y., WAY, S. D. y LA VALLE, P. *Microfiltration of Yeast suspensions*. August 20, 2001. [<http://www.engin.umich.edu/class/che360/coursepack/ch7-microfiltration.pdf>, junio 2005].

