



Biomembranas para el Tratamiento de Contaminantes Gaseosos

Máster en Ingeniería de los Recursos Naturales

Trabajo Final de Máster

AUTORA

Raquel Ibarz Martínez

TUTORES

Dr. Antonio David Dorado Castaño

Dr. Xavier Gamisans Noguera

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa (EPSEM, UPC)

Manresa, Enero 2014

Resumen

En el presente trabajo se pretende evaluar la viabilidad del uso de biomembranas para el tratamiento de contaminantes gaseosos en aire. La eliminación de estos contaminantes gaseosos hidrófobos se lleva a cabo mediante membranas de fibra hueca con una película de microorganismos, adherida sobre la superficie de la membrana, que biodegradan y digieren estos contaminantes. Este es un proceso poco estudiado a nivel de planta piloto e industrial y, por ello, su estudio es de gran interés. Se determina la compatibilidad de los diferentes tipos de membranas comerciales para el tratamiento de diversos contaminantes gaseosos hidrófobos para adaptar esta tecnología, que ha sido ampliamente estudiada en el campo de tratamiento de aguas y en el campo de la contaminación ambiental. Se elige al tolueno como contaminante de referencia puesto que su literatura está muy estudiada.

Al no existir un modelo matemático que se ajuste al diseño experimental propuesto, se plantea una metodología de determinación de la constante global de transferencia de materia del componente a eliminar (tolueno) desde el seno de la fase gaseosa al seno de la fase líquida, así como para la determinación de los parámetros de la ecuación de Monod y de la constante de Henry.

Se propone el diseño de un dispositivo experimental para llevar a cabo el proceso de biodegradación del tolueno a escala laboratorio y sus respectivos métodos analíticos para su determinación. Asimismo, se presenta un presupuesto aproximado de los costes de la instalación experimental y de los costes de operación.

Abstract

In the present work aims to evaluate the feasibility of using biomembranes for the treatment of gaseous pollutants in air. The elimination of these hydrophobic gaseous pollutants shall be carried out through the hollow fiber membrane with a film of microorganisms. These microorganisms are taped to the surface of the membrane and they break down and digest the pollutants. This process is little studied in a pilot plant and industrial scale, and for these both things is interesting to study. The compatibility of the different types of commercial membranes for the treatment of various hydrophobic gaseous pollutants is determined to be adapted to the technology. because it has been well studied in the field of water treatment and in the field of environmental pollution. Toluene is chosen as the reference contaminant since their literature is widely studied.

There isn't a mathematical model that fits the experimental design proposed and a methodology for determining the global constant mass transfer is proposed to remove the pollutant (toluene). Furthermore is determined the parameters of the Monod equation and Henry's constant.

Designing an experimental device is proposed to carry out the process of biodegradation of toluene at laboratory scale and the analytical methods. Also, an estimate of the costs of the experimental setup and the cost of operation is presented.

Índice

Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	vii
1. Introducción	1
1.1. Contaminación atmosférica. Eliminación con tratamientos biológicos convencionales	1
1.1.1. Biofiltros convencionales.....	3
1.1.2. Biofiltros percoladores	5
1.1.3. Lavadores biológicos	7
1.2. Membranas semipermeables	8
1.2.1. Ensuciamiento de las membranas	11
1.2.2. Estructura de la membrana.....	12
1.2.3. Tipos y configuraciones de membranas.....	13
1.3. Uso de membranas como tecnología para reducir la contaminación.....	16
1.3.1. Uso de membranas biológicas para el tratamiento de gases	16
1.3.2. Eliminación de contaminantes específicos con membranas biológicas.....	18
1.3.3. Fenómenos que tienen lugar en el proceso de descontaminación de corrientes gaseosas por membranas	30
1.3.3.1. Biodegradación.....	31
1.3.3.2. Transporte interfacial de contaminantes.....	33
1.3.3.2.1. Coeficiente global de transferencia de materia.....	37
1.3.3.2.2. Determinación del coeficiente global de transferencia de materia en un experimento abiótico	39
1.3.3.2.3. Coeficiente global de transferencia con reacción biológica	43

1.3.3.3. Difusión	47
1.4. Contaminante hidrófobo de estudio (Tolueno)	49
1.4.1. Propiedades del tolueno	49
1.4.1.1. Propiedades Químicas	50
1.4.1.2. Propiedades Físicas	50
1.4.2. Producción, aplicaciones y usos.....	51
1.4.2.1. Producción	51
1.4.2.2. Aplicaciones y usos	52
1.4.3. Efectos sobre la salud.....	52
1.4.4. Niveles permisibles de exposición ocupacional.....	58
1.4.5 Comportamiento en el aire ambiente	58
2. Objetivos y plan de trabajo.....	61
3. Montaje experimental	63
4. Descripción y diseño de experimentos	67
4.1. Experimentos abióticos. Determinación de la constante global de transferencia de materia.....	67
4.2. Formación de la biopelícula	67
4.3. Experimentos con el biorreactor. Determinación de los parámetros de la ecuación de Monod	68
4.4. Determinación experimental de la constante de Henry.....	70
5. Métodos analíticos	73
5.1. Determinación de tolueno	73
5.2. Determinación de pH	73
5.3. Análisis de nutrientes	74
5.4. Determinación de la concentración de oxígeno disuelto.....	74
6. Planificación temporal y presupuesto aproximado del trabajo	75
6.1. Planificación temporal del trabajo	75



6.2. Presupuesto aproximado del trabajo	75
7. Conclusiones.....	79
8. Plan de trabajo futuro.....	81
9. Nomenclatura.....	83
10. Bibliografía.....	87
11. Anexo	93

Índice de Tablas

	<u>Pág</u>
Tabla 1. Fuerzas impulsoras en procesos de membrana. Fuente: Iborra et al., 2013.....	-10
Tabla 2. Características de los elementos de la membrana. Fuente: Adaptado de Wagner, 2001.....	-14
Tabla 3-a. Recopilación bibliográfica de los diferentes parámetros de diseño y operación de distintos biorreactores de membrana.....	-28
Tabla 3-b. Continuación Tabla 3-a; Recopilación bibliográfica de los diferentes parámetros de diseño y operación de distintos biorreactores de membrana.....	-29
Tabla 4. Fórmula empírica para ciertos microorganismos. Fuente: Gòdia y López (1998)...	-31
Tabla 5 Propiedades físicas del tolueno.....	-51
Tabla 6. Solución de nutrientes (Según England et al., 2005).....	-65
Tabla 7. Presupuesto aproximado de fungibles.....	-76
Tabla 8. Presupuesto aproximado del material inmovilizado de la instalación.....	-77
Tabla 9. Presupuesto aproximado de los equipos y su utilización.....	-77
Tabla 10. Presupuesto aproximado de costes de personal para cromatógrafo de gases. Fuente: Basado en los precios públicos de la Universidad de Murcia.....	-78
Tabla 11. Presupuesto aproximado de costes de personal para cromatografía iónica. Basado en los precios públicos de la Universidad de Murcia.....	-78

Índice de Figuras

	<u>Pág.</u>
Figura 1. Esquema de un biofiltro convencional (Fuente: Dorado, 2009).....	-3
Figura 2. Esquema de un biofiltro percolador (Fuente: Dorado, 2009).....	-5
Figura 3. Esquema de un biolavador (Fuente: Dorado, 2009).....	-7
Figura 4. Sección transversal de membranas asimétricas. (a) membrana porosa. (b) membrana no porosa. Fuente: Iborra et al., 2013.....	-13
Figura 5. Tipos de configuraciones de módulos de membrana. Fuente: Iborra et al., 2013....	-14
Figura 6. Modos de operación: (a) Flujo del alimento perpendicular a la membrana. (b) Flujo del alimento en paralelo a la membrana. Fuente: Iborra et al., 2013....	-15
Figura 7. Diagrama esquemático de un biorreactor de membrana que contiene la membrana hidrófoba microporosa, una biopelícula y células suspendidas (Fuente: Mudliar et al., 2010).....	-17
Figura 8. Perfiles de concentración de un componente en la doble película.....	-33
Figura 9. Relación para los coeficientes de materia.....	-34
Figura 10. Esquema de una fibra hueca.....	-38
Figura 11. Transferencia de componente desde la fase gas a la líquida.....	-39
Figura 12. Esquema de la instalación experimental de un biorreactor de membrana de fibras huecas (Figura ampliada en Anexo).....	-63
Figura 13. Diagrama de Gantt de la planificación del Trabajo final de máster (TFM).....	-75

1. Introducción

1.1. Contaminación atmosférica. Eliminación con tratamientos biológicos convencionales

Las actividades industriales y agrícolas son las principales causantes de la contaminación, no sólo de los ríos, sino también del aire. En relación a la contaminación atmosférica, el aumento de ciertos componentes propios del aire, como el dióxido de carbono, es una de las causas a las que se atribuye el calentamiento global de nuestro planeta, debido a su efecto invernadero. Antes de la era industrial se estimaba que el contenido en CO₂ del aire estaba alrededor de 250 ppm; aunque en la actualidad se estima que su nivel ha aumentado hasta aproximadamente 350 ppm (Molina, 2012). Este aumento del contenido de dióxido de carbono en aire se atribuye prácticamente a las diferentes actividades industriales; sin embargo, su aparición también puede ser debida a actividades agrícolas.

Además de la problemática que representa el aumento de dióxido de carbono en el aire, la actividad humana ha provocado que aparezcan en el aire compuestos ajenos a la propia composición del mismo. De este modo, uno de estos compuestos es el metano, que presenta un efecto invernadero mucho mayor que el dióxido de carbono. El metano puede aparecer en el aire por actividades industriales, aunque se estima que es la actividad ganadera la que provoca la mayor contaminación por metano.

Las diferentes actividades humanas (industriales, mineras, agrícolas, etc) han sido las causantes de que en el aire aparezcan compuestos contaminantes no propios del aire, la mayoría de ellos compuestos orgánicos volátiles (COV o VOC por sus siglas en inglés “*volatile organic compounds*”), tales como acetona, tolueno, hexano, limoneno, propano, butano, estireno, fenoles, cloroetileno, metanol entre otros muchos. Estos compuestos volátiles presentes en el aire pueden resultar peligrosos para la salud de las personas, ya que muchos de ellos se ha demostrado que son cancerígenos, y algunos de ellos mutagénicos. Además de los problemas en la salud, existen compuestos que son los causantes de una contaminación olorosa, que si bien, en algunos casos pueden no ser

perjudiciales para la salud, provocan las molestias propias desagradables asociadas al mal olor.

Existen diferentes tecnologías físico-químicas para lograr la eliminación de estos compuestos orgánicos volátiles y olorosos, como puede ser la condensación, incineración, absorción y desorción, adsorción en carbón activo y tamices moleculares, combustión catalítica o bien una combinación entre estas diferentes tecnologías. Estas tecnologías convencionales de eliminación de compuestos orgánicos volátiles en aire presentan ciertos inconvenientes. De este modo la absorción y la adsorción lo que hacen es pasar el contaminante de una fase gaseosa a una fase líquida o sólida, respectivamente; lo cual implica que se debería hacer un tratamiento posterior de estas nuevas fases contaminadas. Debido a que el contaminante orgánico en el aire está en una cantidad muy baja, si se desea utilizar un proceso de combustión es necesario quemar un combustible junto con el aire contaminado, lo cual resulta costoso debido a que el combustible tiene un coste adicional, y en algunos casos elevado. La condensación es una tecnología de eliminación de COV's que precisa que las corrientes gaseosas contengan una concentración suficientemente elevada del contaminante. En cualquier caso se observa que sería necesario realizar un tratamiento adicional.

Como alternativa a estos tratamientos físicos convencionales se pueden utilizar tratamientos biológicos utilizando microorganismos adaptados que puedan eliminar los contaminantes contenidos en el aire, ya que los utilizan como fuente de materia y energía. Por lo tanto, este tipo de tratamientos biológicos no producirán ninguna transferencia adicional del contaminante de una fase a otra, sino que lo eliminarán. De las diferentes biotecnologías utilizadas en la eliminación de contaminantes en el aire, generalmente se pueden dividir en cuatro tipos: biofiltros, biofiltros percoladores, lavadores biológicos y biorreactores de membrana.

Tal como se ha indicado anteriormente si la concentración de los contaminantes es baja algunos de los tratamientos convencionales no resulta adecuado. Sin embargo, los tratamientos biológicos presentan ciertas ventajas frente a los tratamientos físicos convencionales ya que los costes de operación y de la propia instalación suelen ser más bajos, y asimismo, las necesidades de energía son menores. Además, en los tratamientos

biológicos no se producen corrientes contaminadas y no son necesarios nuevos tratamientos de la corriente que se emite a la atmósfera.

1.1.1. Biofiltros convencionales

Los biofiltros son reactores en los que el aire contaminado se hace pasar a través de un lecho de partículas sobre las que se han inmovilizado ciertos microorganismos capaces de metabolizar los contaminantes contenidos en dicho aire (Figura 1). Para que el tratamiento sea adecuado el aire debe tener una cierta humedad que facilite el crecimiento de los microorganismos inmovilizados. Como se observa en la Figura 1, de forma ocasional por la parte superior del filtro se pulveriza la solución acuosa de nutrientes, lo que permite la humidificación adecuada del filtro y el aporte necesario de nutrientes para los microorganismos de la biopelícula. Los contaminantes que atraviesan el lecho, pasan de la fase gaseosa a la biopelícula microbiana que es donde tiene lugar la oxidación biológica y por lo tanto la eliminación del contaminante que ha sido metabolizado por los microorganismos.

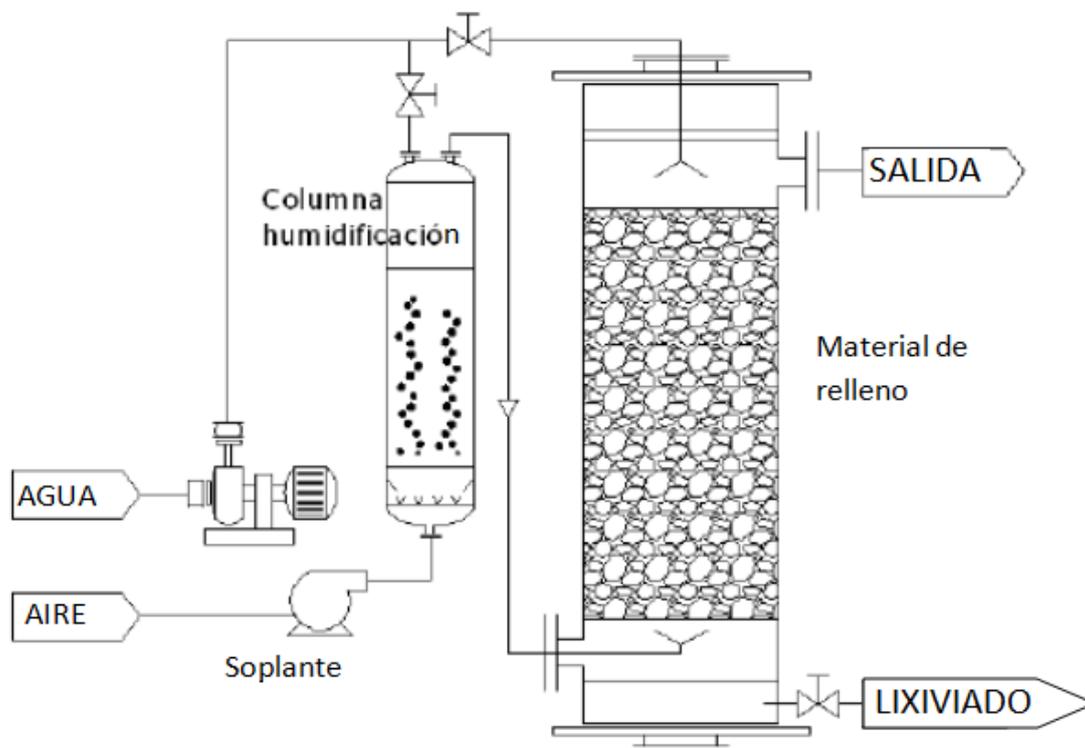


Figura 1. Esquema de un biofiltro convencional (Fuente: Dorado, 2009)

Los biofiltros se pueden utilizar para tratar una gran cantidad de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos que se hallan presentes en las corrientes gaseosas de escape de industrias y diferentes instalaciones municipales. Inicialmente se utilizaron en el tratamiento de los gases provenientes de las instalaciones de compostaje con el fin de eliminar compuestos olorosos indeseables. Actualmente se ha ampliado su aplicación a diversos compuestos orgánicos volátiles y olorosos, como pueden ser, al amoniaco, sulfuro de hidrogeno, mercaptanos, disulfuros, así como COV's (propano, butano, estireno, fenoles, cloroetileno, metanol, etc.). Devinny et al. (1999) y Shareefdeen y Singh (2005) han demostrado que mediante la utilización de instalaciones a escala laboratorio y escala piloto se pueden llegar a eliminar 60 de los 189 contaminantes peligrosos que puede contener el aire. Sin embargo, existen ciertos estudios que limitan las velocidades de carga de contaminantes a valores menores de $50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ (Kumar et al. 2008a; Wu et al. 1999).

Cuando el contenido de contaminantes en la corriente de alimentación del aire es elevado, puede dar como resultado la colmatación de los canales del lecho debido al crecimiento de la masa microbiana. Esto provoca que exista cierta canalización en el lecho y que al final el biofiltro no trabaje de forma adecuada. Debido a la obturación del lecho puede ocurrir que las pérdidas de carga a través de dicho lecho sean muy elevadas y deje de funcionar de un modo adecuado. Según Mudliar et al. (2010) las ventajas de utilizar biofiltros son: bajos costes de inmovilizado y de operación, caída de presión baja, puede tratar grandes volúmenes gaseosos con bajas concentraciones de COV's y compuestos olorosos y no se producen corrientes secundarias contaminadas. Por el contrario, presenta ciertas desventajas, tales como: colmatación del medio debido a las partículas de biomasa, deterioro del medio filtrante, menor eficiencia de tratamiento a altas concentraciones de contaminantes y dificultad en el control de la humedad y pH. Existen dos tipos de configuraciones convencionales de biofiltros utilizadas en el tratamiento de COV's y compuestos olorosos: (a) biofiltros de diseño abierto, con flujos ascendentes de gas, instalados fuera de las unidades que generan los contaminantes COV's y olorosos. Para este tipo de biorreactores son necesarias grandes áreas, además de estar expuestos a los cambios climáticos, que influyen en el rendimiento global del

biofiltro. (b) biofiltros de diseño cerrado, con flujos gaseosos que pueden ser tanto ascendentes como descendentes, instalados en habitaciones cerradas. Este tipo de biorreactores necesitan menos espacio que los de configuración abierta (Mudliar et al., 2010).

1.1.2. Biofiltros percoladores

En la Figura 2 se muestra un esquema de un biofiltro percolador, pudiéndose observar que es similar a la del biofiltro convencional, con una diferencia muy destacable que es que en este caso la solución acuosa de nutrientes se pulveriza de forma continua a lo largo de todo el proceso. En todo momento el gas contaminado y la solución acuosa circulan a través del biofiltros siendo indiferente que lo hagan en co o contracorriente, ya que ello no influye en el rendimiento de la biodegradación (Cox y Deshusses, 1999).

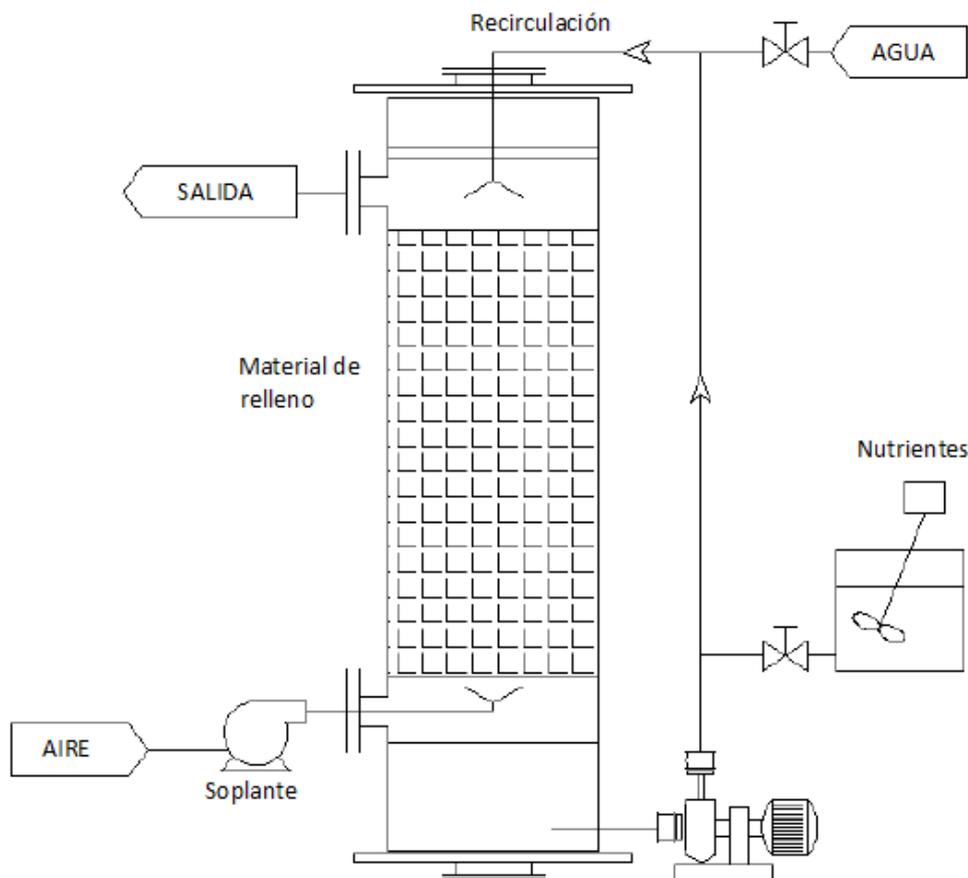


Figura 2. Esquema de un biofiltro percolador (Fuente: Dorado, 2009)

En el proceso de biodegradación, el contaminante inicialmente se absorbe en la película acuosa que envuelve la biopelícula, y posteriormente la degradación tiene lugar en el interior de la biopelícula. Los materiales del lecho son aquellos que son inertes. Sería conveniente que estos materiales inertes de relleno tuvieran una superficie específica de lecho elevada con el fin de facilitar un mayor contacto entre las fases líquida y gaseosa. La utilización de este tipo de tratamientos presenta las siguientes ventajas: bajos costes de operación y de instalación, baja caída de presión y capacidad para poder tratar los productos ácidos de la degradación de COV's. Sin embargo, presentan ciertas desventajas tales como: la acumulación de exceso de biomasa en el lecho filtrante, complejidad en la construcción y operación, y corrientes secundarias contaminadas.

Este tipo de biofiltros es más adecuado para tratar los COV's solubles en agua, aunque también se pueden tratar corrientes gaseosas cuya concentración en COV's sea inferior a $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Mudliar et al., 2010). Uno de los problemas de los biofiltros percoladores es la colmatación, que dificulta la circulación de los fluidos a través del mismo. Para minimizar o eliminar este problema de colmatación, se han sugerido tres tipos de estrategias: mecánica, química o biológica. La mecánica consiste en la agitación del lecho o bien, un lavado en contracorriente en agua, lo que permite el drenaje del exceso de biomasa acumulada en el biofiltro (Wubker et al., 1997; Laurenzis et al., 1998; Smith et al., 1996). El tratamiento químico se basa en la disociación del enlace químico entre la biomasa y la superficie de las partículas del lecho, lo que se logra mediante una deficiencia de agua o de nutrientes que afectará a la propia biomasa, o bien mediante la utilización de agentes desinfectantes (Mudliar et al., 2010; Cox y Deshusses, 1999; Armon et al., 2000; Chen y Stewart, 2000). Los métodos biológicos utilizan depredadores de la biomasa, tales como los protozoos (Cox y Deshusses, 1999). De entre todos estos métodos, el más eficiente parece ser que es el lavado en contracorriente y también el que causa menor perturbación en el ecosistema del biofiltro y en el rendimiento del mismo (Cai et al., 2004).

1.1.3. Lavadores biológicos

Los lavadores biológicos, básicamente consisten en un biorreactor y una unidad de absorción, tal como se muestra en la Figura 3. La corriente gaseosa contaminada se alimenta a una columna de absorción de relleno donde circula en contracorriente con agua, lo que permite la transferencia del contaminante de la fase gaseosa a la líquida. Esta corriente líquida con el contaminante se alimenta a un biorreactor que tiene una solución acuosa de nutrientes, además de microorganismos en suspensión, que son los que llevan a cabo la metabolización del compuesto contaminante. La mayoría de los biolavadores utilizan como microorganismos los lodos activados procedentes de las plantas de tratamientos de aguas residuales (Ottengraf, 1987). Sin embargo, en algunos casos se han utilizado cepas específicas de degradación (Mudliar et al., 2010).

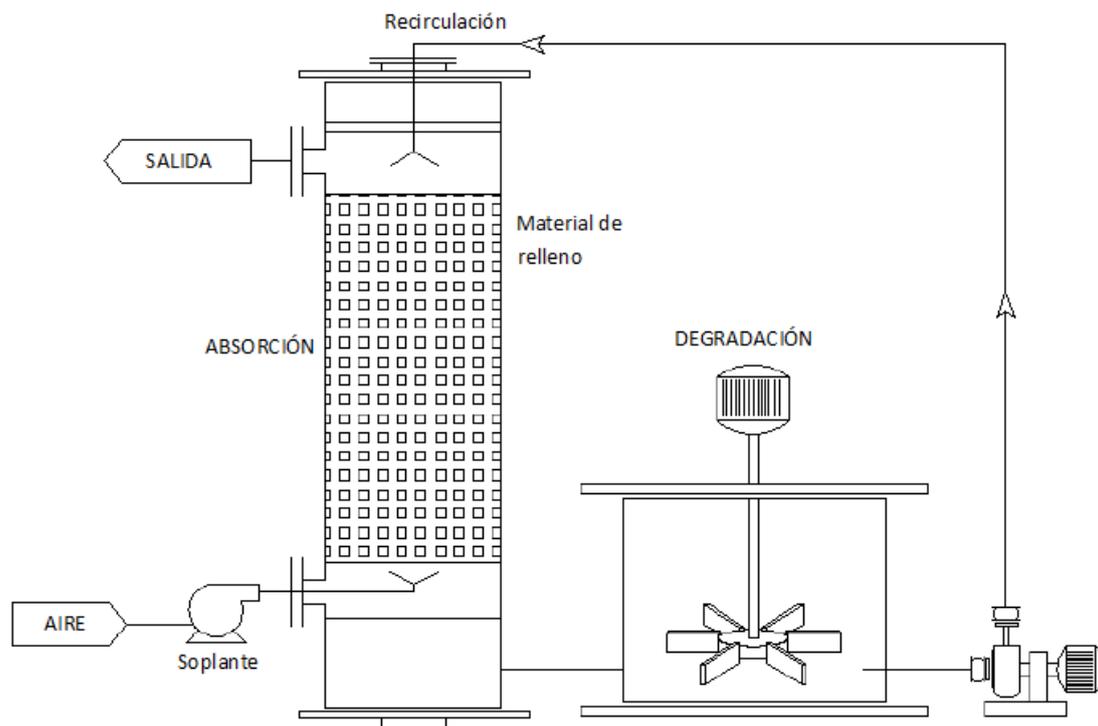


Figura 3. Esquema de un biolavador (Fuente: Dorado, 2009)

La solución tratada en el biorreactor, y libre del contaminante, se suele utilizar en la columna de absorción, como líquido absorbente. Este tipo de operación presenta ciertas ventajas como son: estabilidad y un mejor control de los parámetros de operación,

caídas de presión relativamente bajas y necesidades de espacio relativamente menores. Como desventajas, se pueden citar que los biolavadores pueden tratar contaminantes con una concentración máxima de $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, la superficie específica de contacto entre el gas y el líquido es baja, lo que dificulta la transferencia de materia, existe un exceso de generación de lodos, así como de líquido contaminado (Mudliar et al., 2010).

En el caso de compuestos poco solubles parece que la adición de agentes emulsificantes puede mejorar la eliminación de estos compuestos contaminantes y ello es debido a que estos emulsificantes favorecen la transferencia de materia del COV de la fase gas a la líquida (Mortgat, 2001).

1.2. Membranas semipermeables

Las membranas semipermeables se han utilizado en muchos procesos industriales de separación, existiendo diferentes tipos y configuraciones. Esta tecnología presenta ciertas ventajas sobre las tecnologías convencionales, tales como que pueda trabajar a una temperatura suave, suelen ser selectivas para ciertos componentes, existiendo diseños compactos y son de fácil instalación y operación, siendo además una tecnología limpia. Sin embargo, presenta una cierta desventaja que es el ensuciamiento de la membrana, lo que hace disminuir el flujo a través de ella, de los componentes que se desean transferir. Ello es debido a las deposiciones que pueden existir sobre los poros de la membrana que dificultan el flujo de fluido. Esto hace que cada cierto tiempo deba llevarse a cabo una limpieza de la membrana, aunque este ensuciamiento puede minimizarse escogiendo los parámetros adecuados de operación, así como las membranas apropiadas (Malik et al., 2013; Susanto, et al., 2007).

La vida media de la membrana es crucial para la implementación de este tipo de procesos a escala industrial, ya que las condiciones de operación pueden afectar de forma negativa al material del que está construido la membrana.

Tanto las necesidades de sustitución periódica de las membranas, como su vulnerabilidad al daño, pueden afectar los aspectos económicos del proceso y puede llegar a ser demasiado caro de aplicar este tipo de proceso.

La membrana es una barrera delgada semipermeable que limita el paso de ciertos componentes solubles o no, siendo permeable algunos e impermeable a otros. Las membranas normalmente están en forma de láminas finas de materiales sintéticos con diferentes configuraciones. Dependiendo del material utilizado para la preparación de la membrana pueden ser membranas sintéticas orgánicas (poliméricas o líquidas) e inorgánicas (cerámicas, metálicas o de vidrio). Algunas membranas están compuestas de más de una fase, en la que una capa suele ser porosa, y actúa como soporte de una capa densa hidrofóbica. Ambas capas suelen fabricarse de diferentes materiales, aunque los más comunes son de poliacrilonitrilo (PAN) para la capa porosa y de polidimetilsiloxano (PDMS) para la capa densa hidrofóbica. Este tipo de membranas combinan las ventajas de las membranas porosas y densas y, además, sufren menos problemas de colmatación que las que son solamente porosas (Álvarez-Hornos et al., 2011).

Puesto que la cantidad de componentes que se transfieren a través de una membrana es inversamente proporcional al espesor de la misma, sería conveniente que la membrana fuese lo más delgada posible. En la práctica, normalmente el menor espesor de membrana viene determinado por consideraciones tales como la fuerza mecánica. En muchos casos, se utilizan polímeros sintéticos que se han desarrollado para proporcionar de forma específica las características semipermeables requeridas. Las moléculas del componente que se desea transferir a través de la membrana lo hacen debido a la acción de una fuerza impulsora. La cantidad de componente transferido, viene determinada por el gradiente de la fuerza impulsora a través de la membrana, es decir, el incremento de fuerza impulsora dividido por el espesor de la membrana.

Las principales aplicaciones industriales de los procesos de membrana son la concentración, esterilización y fraccionamiento de productos, eliminación de soluto de soluciones líquidas y gaseosas, purificación y clarificación. Algunos de los aspectos que se utilizan en los procesos de membrana son el tamaño y forma de soluto, la carga hidrostática y la difusividad de dicho soluto a través de la membrana.

Dependiendo del tipo de proceso de membrana la fuerza impulsora puede ser mecánica (presión), química (concentración), térmica (temperatura) o potencial eléctrico

(voltaje). En la mayoría de las aplicaciones industriales, la membrana es una barrera sólida delgada, aunque el componente activo de una membrana también puede ser un líquido, un gas o un vapor. En la Tabla 1 se muestran los principales procesos de membrana clasificados de acuerdo con las fuerzas impulsoras.

Tabla 1. Fuerzas impulsoras en procesos de membrana. Fuente: Iborra et al., 2013.

Fuerza impulsora	Proceso de membrana	Componentes permeados	Componentes retenidos
Gradiente de presión	Ósmosis inversa	Disolventes Moléculas pequeñas	Solutos Moléculas grandes
	Nanofiltración		
	Ultrafiltración		
	Microfiltración		
Gradiente de presión parcial	Pervaporación	Componentes volátiles Moléculas de gas	Solutos no volátiles Moléculas de gas grandes
	Separación de gas		
Gradiente de potencial eléctrico	Electrodialisis Membrana de electrolisis	Solutos iónicos	Disolventes Solutos no iónicos Solutos grandes
Gradiente de concentración	Dialisis	Disolventes Moléculas pequeñas	solutos Solutos grandes
Gradiente de temperatura	Destilación por membrana	Disolventes Componentes volátiles	Solutos iónicos Solutos no volátiles Moléculas grandes

El **rendimiento** o **eficiencia** de una membrana se puede definir mediante diferentes parámetros tales como el flujo de permeación, la selectividad, coeficiente de retención y factor de separación.

El **flujo** o **densidad de flujo de permeación** se define como el volumen o masa que atraviesa la membrana en la unidad de tiempo y por unidad de área. En el sistema internacional las unidades utilizadas son $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ o $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, aunque también se pueden utilizar otras unidades.

La **selectividad** es la capacidad de una membrana para discriminar entre componentes de la solución original. La selectividad de una membrana se puede expresar de dos formas, dependiendo del proceso de membrana que se esté considerando.

El **coeficiente de retención** (R) generalmente se utiliza en sistemas de membrana cuya fuerza impulsora es la presión. Este coeficiente de retención viene definido como:

$$R = \frac{C_{R,m} - C_p}{C_{R,m}} \quad (1)$$

dónde $C_{R,m}$ es la concentración del componente en la superficie de la membrana en el lado de la solución a tratar y C_p es la concentración al otro lado de la membrana.

El **factor de separación** (α) es la selectividad que normalmente para una mezcla de dos componentes i y j , se expresa en términos de un factor de separación. En este caso, si el componente i es la especie que se transfiere con mayor velocidad, el factor de separación α_{ij} se expresa mediante la ecuación:

$$\alpha_{ij} = \frac{C_{i,P} / C_{j,P}}{C_{i,R} / C_{j,R}} \quad (2)$$

dónde $C_{i,P}$, $C_{i,R}$ y $C_{j,P}$, $C_{j,R}$ son las concentraciones en el retenido y en el permeado en la interfase de la membrana para los componentes i y j , respectivamente.

1.2.1. Ensuciamiento de las membranas

Una de las principales desventajas de la tecnología de membranas, es el ensuciamiento o colmatación debido a la acumulación de materia sobre la superficie de la membrana o en el interior de los poros. El ensuciamiento de la membrana provoca una reducción del flujo de permeado y también causa cambios en la selectividad, lo que hace disminuir la eficacia del proceso global. El flujo de permeado se puede reestablecer mediante el proceso de limpieza de la membrana, pero esto hace que se deba para el proceso y al mismo tiempo se consumen grandes cantidades de productos químicos, energía, agua y tiempo. Además sucesivas operaciones de limpieza de la membrana puede reducir la vida media de la misma.

El ensuciamiento de la membrana es un fenómeno complejo, en gran parte afectado por las condiciones de operación, por las propiedades de la propia membrana y por las características del alimento, y también por interacciones complejas entre todos estos factores. Por consiguiente, una elección correcta de las condiciones de operación (temperatura, presión, velocidad de flujo a través de la membrana,...) y las características de las membranas (material de la membrana, dimensiones y configuración) pueden reducir significativamente el efecto de ensuciamiento sobre el rendimiento del proceso. Diferentes modelos matemáticos pueden predecir la disminución del flujo de permeado con el tiempo debido al ensuciamiento. Algunos de estos modelos pueden describir el efecto de los parámetros de operación sobre el ensuciamiento, siendo útil llevar a cabo la optimización del proceso (Iborra et al., 2013).

Con el fin de retardar el ensuciamiento se puede aumentar el caudal de circulación del fluido, lo que retarda la deposición de los sólidos depositados sobre la membrana, aunque también puede arrastrar parte de los que se ha depositado. En el caso de biorreactores, un caudal demasiado elevado puede producir el arrastre de la biopelícula. Por lo tanto, en este caso, es necesario llevar a cabo experimentos previos para determinar el caudal óptimo de operación. De cualquier forma, si la biopelícula formada crece demasiado convendría realizar una limpieza de la membrana para que los poros de la misma queden libres y faciliten la transferencia de materia a su través.

1.2.2. Estructura de la membrana

La capacidad de separación de un material sintético depende de sus propiedades físicas y químicas (tamaño de poro, estructura, diseño, características químicas y carga eléctrica).

Teniendo en cuenta la estructura de las membranas se pueden diferenciar dos grandes grupos: *porosas* y *no porosas*. Las membranas porosas permiten la separación debido al tamaño, forma y carga de los componentes, mientras que las membranas no porosas la separación se debe a la adsorción selectiva y difusión de los componentes.

Además, se pueden distinguir dos tipos de membranas dependiendo de la morfología, de la estructura, de la sección transversal: *simétricas* (cuando es uniforme) y *asimétricas* (cuando no es uniforme).

En la Figura 4 se muestran dos tipos de membranas asimétricas. En este tipo de membranas tanto la selectividad como la resistencia a la transferencia de materia vienen determinadas por la capa fina superior.

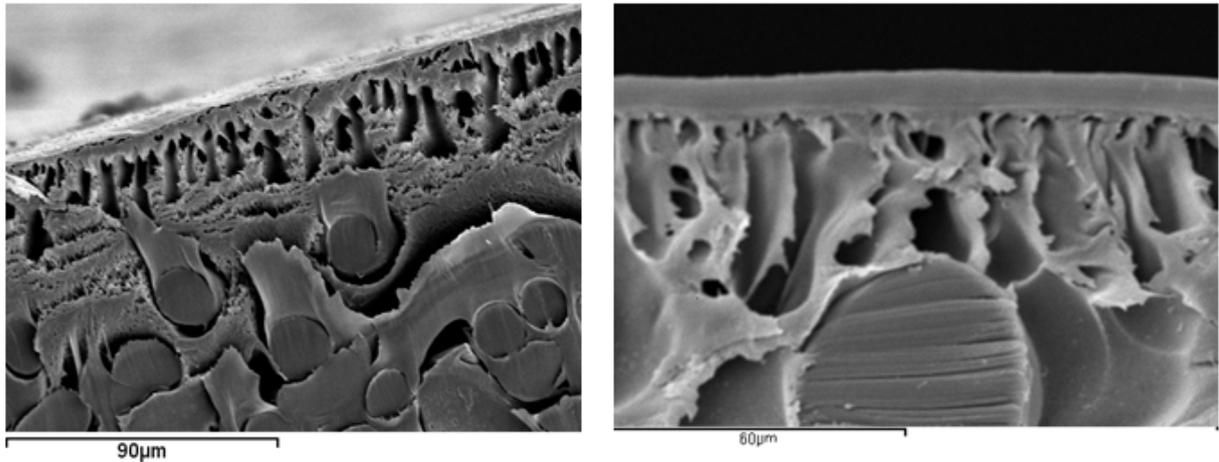


Figura 4. Sección transversal de membranas asimétricas. (a) membrana porosa. (b) membrana no porosa. Fuente: Iborra et al., 2013.

1.2.3. Tipos y configuraciones de membranas

Las plantas de tratamiento con membranas a menudo requieren grandes áreas de membrana para llevar a cabo un determinado proceso, por consiguiente es necesario llevar a cabo un buen desarrollo de esta tecnología a escala industrial con el fin de obtener unidades más pequeñas en las que el área de la membrana está empacada ofreciendo una relación área volumen más elevada. La unidad más pequeña en la que el área de membrana está empacada se la denomina módulo.

Las membranas se suelen construir en dos tipos de configuraciones: laminares y tubulares. Para ensamblar tales configuraciones se diseñan diferentes tipos de módulos. Las de láminas planas se construyen en forma de placa y marco o en módulos espirales. Mientras que las tubulares se construyen módulos propiamente tubulares, capilares o de fibra hueca. Las diferencias entre los últimos tipos de módulos residen principalmente

en las dimensiones del diámetro de los tubos utilizados, tal como se muestra en la Figura 5.

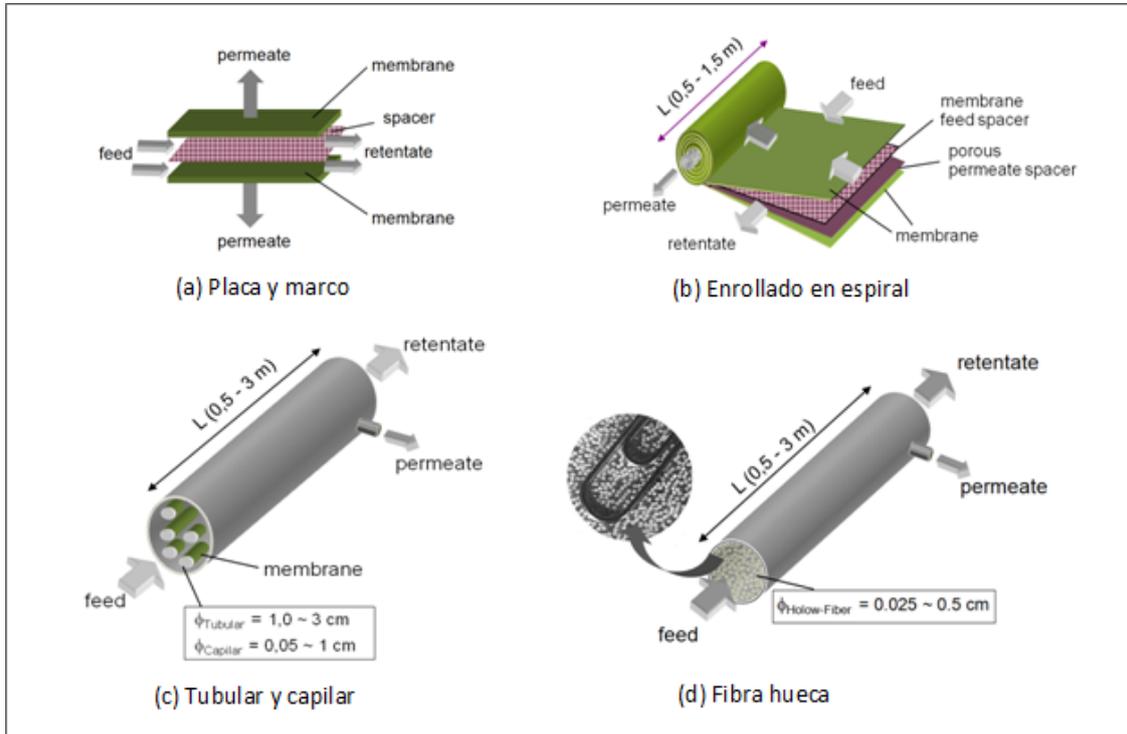


Figura 5. Tipos de configuraciones de módulos de membrana.

Fuente: Iborra et al., 2013.

La Tabla 2 muestra un resumen de las características de estos tipos de módulos de membrana.

Tabla 2. Características de los elementos de la membrana.

Fuente: Adaptado de Wagner, 2001.

Tipo de elemento	Espiral	Tubular	Placa y marco	Capilar	Fibra hueca	Cerámica
Densidad de área de membrana (m^2/m^3)	Alto	Bajo	Medio	Medio	Muy alto	Bajo
Costes - inversión	Bajo	Alto - bajo	Alto	Muy alto	Medio	Muy alto
Capacidad de ensuciamiento	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Muy alto	Medio
Facilidad de limpieza	Bueno	bueno	Bueno	Bajo	Ninguna	Muy bueno
Variables de coste	Bajo	Alto - Bajo	Medio	Medio	Bajo	Alto

Las membranas de fibra hueca son las que presentan una mejor relación de la densidad de área de membrana, lo que es una ventaja en relación a otros tipos de geometrías. En relación a los costes por inversión, las de geometría espiral son las que muestran una mejor característica seguida de las de fibra hueca. Los costes variables son bajos para las geometrías espiral y de fibra hueca. Estas dos características podrían ser favorables a la elección de la geometría de fibra hueca; sin embargo, son las que más se pueden ensuciar y su facilidad de limpieza es nula. Por lo tanto, la elección de una geometría para una determinada operación resulta complicada, y va a depender de las disponibilidades económicas y de la finalidad que se desea dar a la instalación.

Las membranas pueden operar de dos formas diferentes, tal como se muestra en la Figura 6. El modo más simple de operar es haciendo circular la corriente de alimento de forma perpendicular a la superficie de la membrana, en cuyo caso el alimento se fuerza que atraviese la membrana, lo que puede dar lugar a un mayor ensuciamiento de la misma y a una disminución del rendimiento del proceso. En este tipo de operación será necesario llevar a cabo frecuentes etapas de limpieza. Para la mayoría de las aplicaciones industriales es preferible trabajar con la alimentación que circule de forma paralela a la superficie de la membrana, ya que el ensuciamiento será menor.

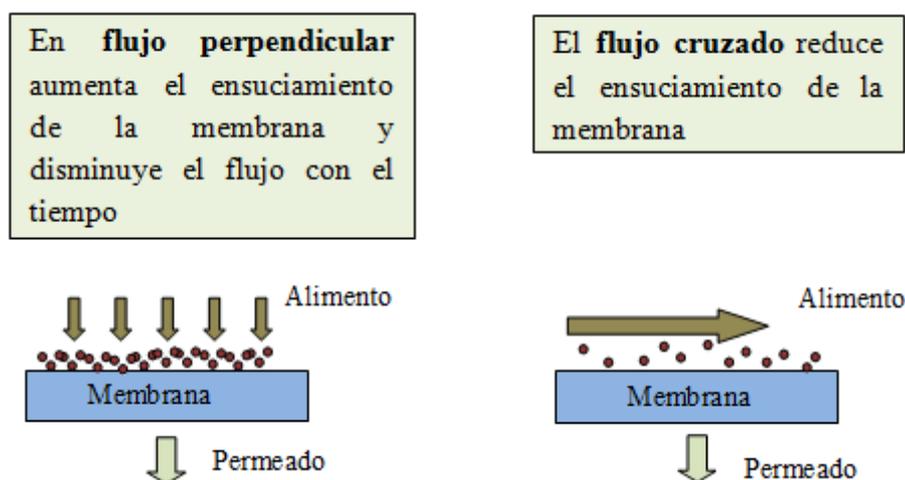


Figura 6. Modos de operación: (a) Flujo del alimento perpendicular a la membrana. (b) Flujo del alimento en paralelo a la membrana. Fuente: Iborra et al., 2013.

1.3. Uso de membranas como tecnología para reducir la contaminación

1.3.1. Uso de membranas biológicas para el tratamiento de gases

Las tecnologías biológicas más usuales en el tratamiento de corrientes gaseosas conteniendo compuestos olorosos indeseables son los biofiltros convencionales, los biofiltros de percolación y los lavadores biológicos. Estas tecnologías presentan buenas perspectivas desde el punto de vista no solo medioambiental, sino también el económico, ya que los costes de operación y los consumos energéticos son menores que los tratamientos físicos y químicos convencionales; además, no producen nuevas corrientes contaminadas y las emisiones de CO₂ son menores (Lebrero et al., 2013). Sin embargo, de los diferentes compuestos contaminantes productores de olores indeseables, aquéllos que son hidrofóbicos presentan problemas cuando se desean tratar con estas tecnologías biológicas, debido a que presentan una baja transferencia de materia. Asimismo, se debe tener presente que los contaminantes de la fase gaseosa, previo a su biodegradación, deben ser transferidos desde la fase gaseosa a la líquida. Además, el tratamiento será efectivo para aquellos contaminantes cuyo valor de la constante de Henry presente valores inferiores a 0,01 ($H = C_G/C_L$, siendo C_G y C_L las concentraciones del contaminante en fase gas y líquido, respectivamente). Ante esta problemática, el uso de membranas biológicas podría ser una buena alternativa en la eliminación de este tipo de contaminantes.

Este nuevo tipo de biorreactores se podría utilizar para el tratamiento de gases contaminados. Se caracteriza por tener la fase líquida y la fase gaseosa contaminada separadas por una membrana sobre la que se ha depositado una biopelícula que contiene los microorganismos adecuados para metabolizar los contaminantes de la fase gaseosa (Figura 7). En las biotecnologías descritas anteriormente ninguna de ellas es selectiva para un determinado contaminante. Sin embargo, los biorreactores de membrana permiten una permeación selectiva del contaminante, el cual atraviesa la membrana y se pone en contacto con la biopelícula, donde es metabolizado por los microorganismos. La fuerza impulsora que permite la difusión del contaminante a través de la membrana es la diferencia de concentración existente entre la fase gaseosa y la fase de la biopelícula.

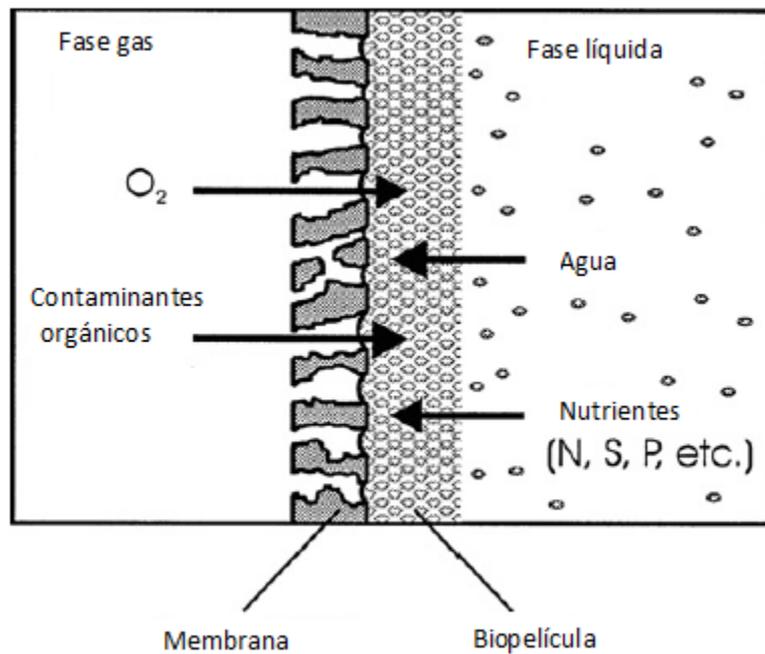


Figura 7. Diagrama esquemático de un biorreactor de membrana que contiene la membrana hidrófoba microporosa, una biopelícula y células suspendidas (Fuente: Mudliar et al., 2010).

Un aspecto importante a destacar es que no es necesario aplicar una diferencia de presión transmembrana. La fuerza impulsora depende del coeficiente de partición aire-agua del componente volátil que se está difundiendo. Los biorreactores de membrana presentan ventajas tales como: que no existen partes móviles, el proceso permite un cambio de escala fácil, los flujos de gas y de líquido se pueden cambiar independientemente, no existiendo problemas de inundación, carga o formación de espuma. Las desventajas de este tipo de biorreactores son los altos costes de construcción, estabilidad operacional a largo plazo y la posible colmatación de los canales del líquido debido a la formación de un exceso de biomasa (Mudliar et al., 2010).

1.3.2. Eliminación de contaminantes específicos con membranas biológicas

Existen diversos trabajos sobre la aplicación de tratamientos con membranas biológicas en la eliminación de diferentes tipos de contaminantes. Así, utilizando una membrana porosa hidrofóbica de polipropileno sobre la que se ha depositado una biopelícula de *Xanthobacter* Py2, se puede eliminar propeno de una corriente gaseosa (Reij et al, 1995). Estos autores obtuvieron que la transferencia del propeno, desde la corriente de aire hacia la suspensión del fluido de nutrientes, estaba controlada por la transferencia de materia en fase líquida, siendo despreciable la resistencia a través de la membrana. Además, debe resaltarse que la transferencia de materia en fase líquida se puede minimizar aumentando el caudal de esta fase.

En la eliminación de propeno de una corriente gaseosa también se ha utilizado un biorreactor de membrana hidrofóbica de fibra hueca, con un tamaño de poro de $0.2 \mu\text{m}$ (Reij et al, 1996). Sobre la superficie interna de las fibras se formó una biopelícula de *Xanthobacter* Py2. Con un tiempo de residencia de 80 s para la corriente gaseosa se obtuvo una eficiencia de eliminación del propeno del 95%. Sin embargo, para tiempos de operación a largo plazo, la velocidad de eliminación del propeno fue disminuyendo gradualmente. Cuando la velocidad de circulación del líquido, conteniendo los nutrientes, era baja (1 a $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$) se observó una obstrucción de los poros de la membrana con un exceso de formación de biomasa sobre la superficie de las fibras. Para evitar este problema utilizaron velocidades de circulación del líquido de $90 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Sin embargo, a esta velocidad más elevada se observó un descenso en la velocidad de eliminación del propeno. Por lo tanto, es aconsejable trabajar con velocidades intermedias, superiores a $5 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ e inferiores a $90 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Para eliminar tolueno contenido en una fase gaseosa se ha utilizado un biorreactor de membrana de fibra hueca fabricado en polisulfona (Parvatiyar et al., 1996a). En este trabajo, los autores utilizaron lodo secundario de una planta de tratamiento de aguas municipales para formar una capa de microorganismos sobre la superficie externa de la membrana. Con el fin de obtener un rápido crecimiento de la biopelícula, el caudal de gas se mantuvo a niveles bajos. Un caudal bajo de gas supone un tiempo de residencia más elevado, dando como resultado una mayor eliminación de tolueno y un mayor

crecimiento de la biomasa. Al cabo de ocho semanas de operación se consiguió una eficiencia de eliminación de tolueno del 64%, para una concentración de tolueno en fase gas de 200 ppm, y un caudal de gas de $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. Posteriormente, duplicaron tanto el caudal de gas como el contenido de tolueno, de modo que cuando se llegó a un nuevo estado estacionario en la operación consiguieron una eficiencia del 78%. Aumentando de nuevo la concentración de tolueno en el gas de entrada (hasta 600 ppm) en una operación en estado estacionario se consiguió una eficiencia de eliminación de tolueno del 84%. Utilizando los datos de eliminación de tolueno llegaron a estimar las constantes de Monod, de modo que sus valores fueron $11.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ y $0.6 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ para k y K_{M_0} , respectivamente. En este trabajo se pone de manifiesto que un aumento del tiempo de residencia facilita la eliminación del contaminante, lográndose eficiencias bastante elevadas.

En otro trabajo se presenta la biodegradación de tolueno y tricloroetileno (TCE) utilizando un biorreactor de membrana de fibra hueca de polisulfona (Parvatiyar et al., 1996b). Para la formación de la biopelícula sobre la superficie externa de las fibras huecas se utilizaron los lodos secundarios de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales. Operando con un caudal de la fase gaseosa de $80 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ y una concentración de tolueno de 200 ppm a la entrada se consiguió una eficiencia de eliminación del 50% para el tolueno, mientras que para concentraciones de 400 y 600 ppm de tolueno se consiguieron eficiencias de eliminación del 60 y 70%, respectivamente, llegando hasta el 80% una vez formada una biopelícula uniforme en la superficie externa de la membrana. A continuación, manteniendo 600 ppm de tolueno, se introdujo una corriente gaseosa que contenía 20 ppm de TCE, disminuyendo la conversión del tolueno hasta un 63%. Al cabo de pocos días se logró una eficiencia de eliminación de TCE del 50%. Al eliminar el tolueno de la fase gaseosa se obtuvo que para una concentración de entrada de TCE de 20 ppm y un tiempo de residencia de 36 s, se logró una eficiencia de eliminación del 30%. Se observa que la presencia de tolueno incrementa la eficiencia de eliminación de TCE, y que el tolueno es imprescindible para conseguir una adecuada eliminación de TCE.

Muchos compuestos volátiles con una baja solubilidad en agua son difíciles de eliminar del aire que los contiene, debido a que la fuerza impulsora de la transferencia de materia en fase acuosa es muy baja. Este es el caso del propeno, y es por ello que

para eliminarlo se puede utilizar una membrana hidrofóbica plana microporosa como soporte de una biopelícula (Reij et al., 1997). La biopelícula formada sobre la membrana se logra con inóculos de *Mycobacterium* Py1 y *Xanthobacter* Py2, que utilizan propeno como fuente de carbono en su metabolismo. Se tardaron 20 días en formar la biopelícula alimentando una corriente de aire conteniendo de 200 a 350 ppm de propeno. La eliminación posterior de propeno fue posible con concentraciones del mismo en el intervalo de 10 a 1000 ppm en aire. En este trabajo se pone de manifiesto que se puede lograr eliminar propeno con concentraciones muy bajas, incluso por debajo de 30 ppm.

Ergas et al. (1999) presentan un modelo de transferencia de materia desde la fase gas hasta la biopelícula, utilizando un biorreactor de membrana de fibras huecas de polisulfona. Como compuesto que se transfiere desde la fase gaseosa toman tolueno, ya que su biodegradación está bien establecida. Los microorganismos utilizados en la biodegradación de tolueno provienen de una planta de tratamiento de aguas residuales. Las eficiencias de eliminación están en el intervalo del 28 al 72%, siendo directamente proporcional al tiempo de residencia del gas e inversamente proporcional a la carga de sustrato. La máxima capacidad de eliminación de tolueno fue de $42 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$.

Mediante un biorreactor de membranas de fibra hueca de polipropileno se puede eliminar el tricloroetileno (TCE) contenido en una corriente gaseosa (Dolasa y Ergas, 2000). En este trabajo, las fibras huecas de la membrana se hallan sumergidas en una solución de nutrientes. Se llevaron a cabo experimentos en discontinuo con un cultivo microbiano mixto procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales, que puede co-metabolizar TCE con tolueno como sustrato primario. La degradación de tolueno siguió una cinética de primer orden con un coeficiente de velocidad de $6 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{g} \text{ biomasa}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Además, se obtuvo una eficiencia de eliminación del 80% de TCE, con concentraciones de hasta $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Trabajando con el biorreactor de membrana de fibras huecas se logró una eliminación de TCE del 30%. Trabajando con TCE en la fase gas y tolueno en la fase líquida se obtuvo un máximo de eliminación de TCE del 23%, aunque los resultados fueron variables y parece que están relacionados con la utilización de tolueno en fase líquida y con el espesor de la biopelícula, de modo que el tolueno favorece la eliminación de TCE. Sin embargo, también se observó que

los microorganismos en suspensión podrían co-metabolizar TCE a velocidades más elevadas que con microorganismos fijados en biopelículas.

Attaway et al. (2001) describen el desarrollo y evaluación de un sistema de biotratamiento de una corriente gaseosa conteniendo benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX). El sistema utilizado por estos autores es un biorreactor de membrana tubular de silicona, con una biopelícula formada principalmente por *Pseudomonas putida*, obtenidos a partir de dos aislados enriquecidos con sedimentos de río. La máxima capacidad de eliminación fue de 105 g de substrato $\text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, referido al volumen total del sistema. Si se refiere al volumen de la membrana tubular, la máxima capacidad de eliminación es de 43 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, para la eliminación combinada de todos los contaminantes BTEX. Se observa que este valor es prácticamente el mismo que el obtenido por Ergas et al. (1999). En un trabajo con sistemas de biofiltros y biofiltros de percolación (Kennes y Thalasso, 1998) se obtuvieron capacidades de eliminación de BTEX en el intervalo de 20 a 80 g de substrato $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$. En este trabajo se pone de manifiesto que este sistema se puede utilizar para la eliminación y la destrucción continua de BTEX y otros potenciales COV's en corrientes gaseosas. La eliminación BTEX depende de su concentración en la fase gaseosa y del caudal de esta fase, de modo cuando se disminuye el caudal de la fase gaseosa se aumenta la eficiencia de eliminación.

Una aplicación de especial interés es el tratamiento de compuestos orgánicos volátiles de azufre ya que pueden causar malos olores, incluso aunque estén en cantidades muy pequeñas. De Bo et al., (2003) utilizaron un biorreactor plano de membrana para eliminar sulfuro de dimetilo. Utilizaron tres tipos de membranas, una estaba compuesta de una capa densa de polidimetilsiloxano de 17 μm sobre una capa de soporte porosa de 175 μm de Zirfon (polisulfona conteniendo rellenos de ZrO_2). Además utilizaron dos membranas compuestas comerciales cuya capa porosa de soporte era de bifluoruro de polivilideno (PVDF) de 210 μm de espesor recubiertas una de ellas por 1 μm de PDMS y la otra por 2.5 μm . Para la biopelícula formada sobre la capa densa se utilizaron dos inóculos, un cultivo puro de *Hyphomicrobium* VS y el otro una suspensión de *Hyphomicrobium* VS, bacterias de oxidación amónica (AOB) y bacterias de oxidación de nitritos (NOB). La eficiencia máxima de eliminación de sulfuro de

dimetilo obtenida fue de $4.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$. Este valor es más alto que cualquier valor obtenido por filtros y por filtros de percolación.

Para la eliminación de benceno contenido en una corriente de aire se ha utilizado membranas de tubo de goma látex y un módulo de membranas de fibra hueca (Fitch et al., 2003). Utilizando los tubos de goma de látex, la biopelícula se formó mediante un cultivo que podía degradar compuestos aromáticos, enriquecido con lodos activados. Se obtuvo una eficiencia de eliminación de benceno del 80% para una densidad de flujo de masa de $45 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$. Trabajando con el módulo de fibras huecas se obtuvo una eficiencia de eliminación del 99.8%.

Se puede eliminar el tolueno presente en una corriente gaseosa utilizando un biorreactor de membrana plana (Jacobs et al., 2004). La membrana utilizada en este trabajo estaba compuesta de una capa de soporte porosa de fluoruro de polivinilideno (PVDF) de $210 \mu\text{m}$ de espesor y de una capa densa de polidimetilsiloxano (PDMS) de $1 \mu\text{m}$ de espesor. Debido a su alta capacidad de metabolizar tolueno sobre la capa densa de la membrana se formó una biopelícula de *Pseudomonas putida* TVA8. Estos autores trabajaron con distintos tiempos de residencia de la corriente gaseosa, entre 2 y 24 s, con un caudal de carga entre 10 y $483 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$. La máxima capacidad de eliminación de $397 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ se consiguió con un tiempo de residencia de 24 s para una carga de $475 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, lo que representa una eficiencia de eliminación del 84%. Esta eliminación es equivalente a $0.793 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, cuando se expresa por unidad de área de la membrana. Con tiempos de residencia más bajos, de 8 s, consiguieron menores las eficiencias de eliminación, entre 40 y 60%.

En este trabajo llevado a cabo sobre la eliminación de tolueno, se utilizó un biorreactor de membrana tubular con tubo simple, doble y múltiple (England et al., 2005). Para la formación de la biopelícula se utilizó inóculo procedente de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas residuales. Las membranas tubulares eran de silicona, por cuyo interior circulaba el gas contaminado con tolueno, mientras que por el exterior podía circular o estar sin circular el líquido con los nutrientes necesarios para la capa microbiana. Con el reactor de tubo simple, con un volumen de 965 cm^3 , se consiguió una eliminación de tolueno de $32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ con circulación

de líquido nutriente y una carga de entrada de $390 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, mientras que si no existía circulación del líquido, la eliminación de tolueno fue de $41 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ con una carga de entrada de $400 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Cuando se operó con doble tubo, con un volumen de 1.99 L, se consiguió una eliminación de tolueno de $42 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ con circulación de líquido nutriente y una carga de entrada de $80 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, mientras que si no existía circulación del líquido, la eliminación de tolueno fue de $40 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ con una misma carga de entrada de $80 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Con el reactor de módulo múltiple, con un volumen de 78.5 L, únicamente se trabajó con recirculación de líquido, consiguiendo una eliminación de tolueno que dependía de la concentración y carga de entrada, estando en un intervalo entre 1 y $220 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Tal como se ha expuesto anteriormente (Attaway et al., 2001), con un biorreactor de doble tubo de silicona, encontraron una velocidad media de eliminación de $5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ calculado sobre la superficie de membrana, y de $43 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, calculado en base al volumen del reactor, siendo los compuestos contaminantes benceno, tolueno etilbenceno y xileno (BTEX). Con un biorreactor de membranas de látex se consiguieron eliminaciones de $18 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ (Fitch et al., 2003). Las diferencias entre las velocidades de eliminación de los contaminantes se pueden atribuir a la diferencia de solubilidad en los tubos, las velocidades de circulación del aire, las superficies de las membranas y/o la composición de la biopelícula.

Kim y Kim (2005) utilizaron un biorreactor de membranas de fibra hueca para eliminar tolueno de una corriente gaseosa. En este trabajo se estudió el efecto del oxígeno sobre la actividad microbiológica, encontrándose que bajos niveles de oxígeno limitaron la velocidad de degradación del tolueno. Debido a lo cual, es necesario utilizar una membrana que favorezca la transferencia de oxígeno, y de esta forma se utilizaron membranas porosas hidrofóbicas de polietileno, sobre cuya superficie se formó una capa de microorganismos provenientes de una planta de tratamiento de aguas residuales que contenía compuestos orgánicos volátiles. Los microorganismos presentaron una similitud del 73% con *Pseudomonas putida* tipo A1. Se consiguieron eficiencias de eliminación de tolueno en el intervalo de 86 a 97%, con unas cargas de tolueno de 0.85 a $4.3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$.

Kumar et al. (2008b) trataron una corriente gaseosa contaminada con un contenido en tolueno en el intervalo de 0.21 a $4.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, utilizando un biorreactor de membrana plana compuesta de una parte de soporte poroso de poliacrilonitrilo (PAN) de $185 \mu\text{m}$

de espesor, recubierta por una capa densa muy fina ($0,3 \mu\text{m}$) de polidimetilsiloxano (PDMS). Sobre la capa densa se desarrolló una biopelícula con un contenido mayoritario del microorganismo *Burkholderia vietnamensis* G4. El biorreactor operó de forma continua con tiempos de residencia comprendidos entre 2 y 28 s, con unas velocidades de carga entre 1.2 y $26.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$. Se obtuvieron unas eficiencias de eliminación de tolueno en el intervalo del 78 al 99%. Para tiempos de residencia superiores a 5 s las eficiencias de eliminación de tolueno siempre fueron superiores al 78%.

Existen diferentes fuentes de emisión de gases contaminados conteniendo compuestos orgánicos volátiles de sulfurados a temperaturas elevadas, como es el caso de las industrias de papel y pulpa de papel. Debido a que el enfriamiento de los gases calientes aumenta los costes de operación de los reactores biológicos, la aplicación de microorganismos termófilos podría ser una solución efectiva. Por ello, Luvsanjamba et al. (2008) plantearon un estudio cuyos objetivos fueron la eliminación de sulfuro de dimetilo contenido en gases contaminados bajo condiciones termofílicas (52°C), utilizando un biorreactor de membrana plana, además de examinar la estabilidad a largo plazo del reactor a temperaturas elevadas. La membrana utilizada consistía en una capa porosa de soporte de PDMS de $240 \mu\text{m}$ de espesor y una capa densa de PVDF de $2 \mu\text{m}$ de espesor. Obtuvieron una capacidad máxima de eliminación de $54 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, referido al volumen del reactor, correspondiente a $0.108 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, referido a la superficie de la membrana, trabajando con un caudal másico de carga de $64 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, referido al volumen del reactor, correspondiente a $0.128 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, referido a la superficie de la membrana, con una eficiencia de eliminación del 84% con un tiempo de residencia del gas de 24 s. Operando a largos períodos (9 meses) se observó un descenso de la eficiencia de eliminación, hasta el 50% después de 3 meses de operación en continuo; sin embargo, esta eficiencia se recuperó hasta ser superior al 96% después de eliminar el exceso de biomasa cuando se aplicó una recirculación a una velocidad elevada del líquido.

Kumar et al. (2009) estudiaron el rendimiento de un biorreactor de membrana plana para eliminar tolueno. Para ello, utilizaron una membrana compuesta con una capa de soporte porosa de poliacrilonitrilo de $185 \mu\text{m}$ y una fina capa densa de recubrimiento de

polidimetilsiloxano de 0.3 μm de espesor. Llevaron a cabo experimentos en discontinuo con el fin de seleccionar el inóculo adecuado, consistente en lodos procedentes del tratamiento de aguas de un matadero, de tres fuentes distintas de inóculo, con una velocidad de consumo de tolueno de $118 \pm 23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ VSS L}^{-1}$. La máxima capacidad de eliminación, basada en el volumen del reactor del lado de la corriente gaseosa fue de $609 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$, mientras que esta capacidad de eliminación basada en la superficie de la membrana fue de $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Estos valores son superiores a obtenidos con biofiltros, ya que como máximo se han obtenido eliminaciones de $342 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (Singh et al., 2006), mientras que con biofiltros percoladores se llegó a obtener una eliminación de $416 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (Byoung-In et al., 2008).

Kumar et al. (2010a) estudiaron el efecto que la presencia de metanol ejerce en la eliminación de vapores de sulfuro de dimetilo (DMS) mediante un biorreactor de membrana compuesta de una capa porosa de 0.3 μm de espesor de polidimetilsiloxano y una capa fina densa de poliacrilonitrilo de 185 μm de espesor. Para formar la biopelícula se inoculó un cultivo de *Hyphomicrobium* VS. Los resultados que obtuvieron mostraron que la presencia de metanol tiene un efecto positivo, del orden de 1.3 veces más elevado, en la biodegradación de DMA. En el caso donde no se adicionó metanol se observó una disminución en el rendimiento del biorreactor de membrana, por lo que para mantener altas velocidades de eliminación de DMS era necesario adicionar metanol. Estos autores obtuvieron una capacidad máxima de eliminación de DMS de $6.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ con una dosis óptima de metanol de 1.1 a 2.3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Además, estos resultados mostraron que la capacidad de eliminación era superior a los que se obtienen con biofiltros y biofiltros de percolación (Zhang et al., 1991; Pol et al., 1994; Smet et al., 1996a,b; De Bo et al., 2003; Sercu et al., 2005a,b).

Para la eliminación de vapores de óxido nítrico se puede utilizar un biorreactor de membrana de fibras huecas (Kumar et al., 2010b). Estos autores presentan una modelización del proceso, habiendo obtenido eficiencias de eliminación del óxido nítrico entre un 35 y 75%. La eficiencia de eliminación aumenta con el aumento de la velocidad de circulación de la fase líquida desde alrededor de 0.8 a 2 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$, obteniendo la máxima eficiencia de eliminación para una velocidad de 1.5 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Álvarez-Hornos et al. (2012) utilizaron un biorreactor de membrana para eliminar acetato de etilo, n-hexano y tolueno presentes en aire contaminado. La membrana utilizada era de polidimetilsiloxano (PDMS) como material de la capa densa hidrofóbica con un espesor medio de $1.5 \mu\text{m}$ y de poliacrilonitrilo (PAN) como capa de soporte con un espesor de $50 \mu\text{m}$. utilizaron una membrana plana sobre la que se había formado una película de microorganismos provenientes de lodos activados de una depuradora de aguas residuales. Las concentraciones totales de COV variaron desde 500 a $2500 \text{ mg C Nm}^{-3}$; mientras que los tiempos de residencia estuvieron en el intervalo de 15 a 60 s . Las eficiencias de eliminación fueron superiores al 99% con cargas de entrada de hasta $200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$, con tiempos de residencia tan bajos como 15 s para el acetato de etilo. La máxima capacidad de eliminación de tolueno (alrededor del 66%) se obtuvo con tiempos de residencia 60 s . Sin embargo, el sistema fue incapaz de degradar n-hexano cuando se suministró una mezcla $1:1:1$ de acetato de etilo:n-hexano:tolueno. En el caso de acetato de etilo, utilizando una membrana compuesta similar a la anterior, pero con un espesor de $0.3 \mu\text{m}$ para la capa densa de PDMS se lograron eficiencias de eliminación del contaminante superiores al 95% con cargas inferiores a $200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ y tiempos de residencia tan cortos como 15 s (Álvarez-Hornos et al., 2011). La membrana biológica se obtuvo inoculando un cultivo microbiano previamente adaptado al acetato de etilo. Para la aclimatación de los microorganismos se alimentó de forma continua una corriente de $0.5 \text{ cm}^3\cdot\text{h}^{-1}$ acetato de etilo durante un período de al menos 2 meses a un reactor sembrado con el lodo activado de una planta de tratamiento de aguas residuales. El coeficiente de rendimiento estimado, determinado a partir de la producción de dióxido de carbono, resultó ser de 0.82 g de biomasa sintetizada por cada gramo de acetato de etilo degradado.

Lebrero et al. (2013) han utilizado un reactor de membrana biológica plana para tratar corrientes gaseosas contaminadas con acetona, tolueno, limoneno y hexano a bajas concentraciones, en el intervalo de 1.3 a $3.2 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, para tiempos de residencia entre 7 y 60 s . En un experimento preliminar sin película adherida evaluaron la transferencia de materia de estos componentes orgánicos volátiles a través de la membrana, observando que el limoneno y hexano presentaron una menor transferencia. La presencia de una película de microorganismos en la membrana aumentó de forma significativa la transferencia de los compuestos orgánicos volátiles. Para la formación

de la película de microorganismos se inoculó lodo activado aerobio de una planta de tratamiento de aguas residuales. En el caso de acetona y tolueno se consiguió eliminar hasta un 93% independientemente del tiempo de residencia. Para el hexano solamente se logró una eliminación del 24%, y por ello, el biorreactor fue reinoculado con una mezcla microbiana hidrofóbica. Esto permitió un ligero aumento en la eliminación del hexano, hasta un 27%; sin embargo, se logró una eliminación del 90% para el limoneno para un tiempo de residencia de 7 s.

Tal como se ha expuesto en este apartado, se deduce que los procesos de tratamiento con membranas biológicas es una alternativa excelente para la eliminación de compuestos contaminantes contenidos en corrientes de aire. Los tipos de membranas utilizadas difieren de un trabajo a otro; sin embargo, si se utilizan únicamente membranas porosas se puede presentar una alta probabilidad que el crecimiento de la masa microbiana obture los poros de la membrana. Esto provoca una disminución de la transferencia de materia, del componente a eliminar, desde la fase gaseosa a la biopelícula. Por ello, la mejor opción es utilizar membranas compuestas, formadas por una capa de soporte porosa de fluoruro de polivinilideno (PVDF) o de poliacrilonitrilo (PAN) de entre 50 y 200 μm de espesor y de una capa densa de polidimetilsiloxano (PDMS) de entre 0,3 y 3 μm de espesor. Para la formación de la biopelícula sobre la capa densa de la membrana se pueden utilizar lodos activados de una planta de tratamiento de aguas residuales.

En la Tabla 3-a y 3-b, se muestra una recopilación de los diferentes parámetros de diseño y operación de los distintos tipos de biorreactores que diferentes investigadores han utilizado en la eliminación de COV's contenidos en un aire contaminado.

Tabla 3-a. Recopilación bibliográfica de los diferentes parámetros de diseño y operación de distintos biorreactores de membrana.

Año	Autor	Tipología de membranas					Caudales y concentraciones						Suministrador membrana	
		Materiales	Grueso membrana	Tamaño poro	P Trabajo	Configuraciones	Compuestos	Concentraciones	Rango caudales	Tiempo residencia	Áreas contacto	EC(g/m3h)		Volúmenes
2013	Lebrero	PDMS/PAN	0,3 µm / 50 µm			2 Canales (fibra hueca)	acetona tolueno limoneno n-hexano	30-4650 mg m ⁻³			40 cm ²		16 mL (8+8)	GKSS Forschungszentrum Geesthacht (Germany)
2012	Álvarez-Hornos	PDMS/PAN	1,5 µm / 50 µm			5 Canales (fibra hueca)	Toluene etilacetato toluene etilacetato n-hexano	3 g m ⁻³	200 g m ⁻³ h ⁻¹	60 s	40 cm ²	75		GKSS Forschungszentrum Geesthacht (Germany)
2011	Álvarez-Hornos	PDMS/PAN	0,3 µm / 50 µm			4 Canales (fibra hueca)	etilacetato		270g/m3 h	15-60 s	40 cm ²	49-250		GKSS Forschungszentrum Geesthacht (Germany)
2010	Kumar	PDMS/PAN	0,3 µm / 185 µm		P atm	Perspex reactor	MeOH			0-34 s	40 cm ²	258	16 mL (8+8)	GKSS Research centre Geesthacht (germany)
2010	Beggel	PVTMS/PVTMS	5 µm / 120 µm		1 bar	Módulo MC	CO ₂	0.3 mol CO ₂ L ⁻¹						
2009	Kumar	PDMS/PAN	0,3 µm / 185 µm		P atm	2 reactores, 4 canales cada parte	tolueno	0,31-3,68 g m ⁻³			40 cm ²	609	16 mL (8+8)	GKSS Research centre Geesthacht (germany)
2008	Luvsanjamba	PDMS/PVDF	2 µm / 240 µm		P atm	2 reactores	dimetilsulfat		14, 20,40,50, 60 L/min	36, 24, 12, 10 i 8 s	40 cm ²	54	16 mL (8+8)	GKSS Research centre Geesthacht (germany)
2008	Kumar	PDMS/PAN	0,3 µm / 185 µm			2 reactores	tolueno	0.21 - 4.1 g m ⁻³	1.2-26.7 kg m ⁻³ d ⁻¹	2-28 s		600		KKSS Germany
2008b	Kumar	PDMS/PAN	0,3 µm / 185 µm			2 reactores	tolueno				40 cm ²			
2008	Dingemans	porous PTFE	62 µm	0,2 µm										sartorius N.V. (Vilvoorde, Belgium)
		Porous PTFE/HDPE	1:69/2:172	1:0,22/2 N.A.										Millipore N.V. (Brussels, Belgium)
		Porous PP/PVDF	TOTAL 240	N.A.										GKSS GmbH (Geesthacht, Germany)
		PP/PVDF/PDMS	TOTAL 240	N.A.										GKSS GmbH (Geesthacht, Germany)
		Poliester/PAN/PDMS	TOTAL 2181	N.A.										GKSS GmbH (Geesthacht, Germany)
2007	Kumar	PDMS/PAN	0,3 µm / 185 µm			2 reactores de metacrilato iguales	tolueno		17-240 cm ³ min ⁻¹	2-28 s	40 cm ²	10-483		
2005	England	silicona					tolueno					220		cole parmer Incorporated
2005	Kim&Kim	PE	1 µm	0,126 µm		fibra hueca	tolueno	200 ppmv		1,34; 0,9 s		Máx. 70%		Sambo Globe, Korea

Tabla 3-b. Continuación Tabla 3-a; Recopilación bibliográfica de los diferentes parámetros de diseño y operación de distintos biorreactores de membrana.

Año	Autor	Materiales	Tipología de membranas				Caudales y concentraciones						Subministrador membrana	
			Grueso membrana	Tamaño poro	P Trabajo	Configuraciones	Compuestos	Concentraciones	Rango caudales	Tiempo residencia	Áreas contacto	EC(g/m3h)		Volúmenes
2004	Jacobs	PDMS/PDVF	1 µm / 210 µm			2 reactores, 4 canales cada parte	tolueno			2-24 s	40 cm ²	397		GKSS Forschungszentrum Geesthacht (Germany)
2003	Fitch	PP				2 reactores	benceno	550 ppm	3,9-13 mg m ⁻² min 20-240 cm ³ min ⁻¹	1,4-3,3 s		4,8-58		Fischer, Fair Lawn, New Jersey
2003	Jacobs	PDMS/PAN	1 µm / 210 µm			4 canales 2 reactores de metacrilato iguales	tolueno			2-24 s	40 cm ²			GKSS Research centre Geesthacht (germany)
2003	de Bo	6 tipos de membranas					dimetilsulfat	g m ⁻³		24 s	40 cm ²	200	16 mL (8+8)	GKSS Research centre Geesthacht (germany)
	MBR1	PDMS/Zrf	17 µm / 175 µm					0.037, 1.55 g m ⁻³		24 s				GKSS Research centre Geesthacht (germany)
	MBR2	PDMS/Zrf	17 µm / 175 µm					0.036-0.95 g m ⁻³		8/24 s				GKSS Research centre Geesthacht (germany)
	MBR3	PDMS/PVDF	1 µm / 210 µm					0.034 g m ⁻³		24 s				GKSS Research centre Geesthacht (germany)
	MBR4	PDMS/PVDF	1 µm / 210 µm					0.041-1.63 g m ⁻³		8/24 s				GKSS Research centre Geesthacht (germany)
	MBR5	PDMS/PVDF	1 µm / 210 µm					0.021-1.26 g m ⁻³		24 s				GKSS Research centre Geesthacht (germany)
	MBR6	PDMS/PVDF	2,5 µm / 210 µm					0.020-1.19 g m ⁻³		4-24 s				GKSS Research centre Geesthacht (germany)
2001	Attaway	PDMS/PAN	0,3 µm				BTEX			4,3-13 s		360		Spectrum Microgon, Laguna Hills, California
2000	Dolasa	PP					tolueno	133 - 200 ppm.		3-8 s		32-72		
1999	Ergas	PP				flat membrane	tolueno			0,9-1,8 s		16-42		
1998	Ergas	PP		0,05 µm	0-0,5 psi	fibra hueca	tolueno	200-1000ppmv				0-50		Spectrum Microgon, Laguna Hills, California (P/N CG2M-040-01N)
1997	Ergas	PE				fobra hueca						948		

BTEX: benceno, tolueno, etilbenceno, xienoè; PDMS: polidimetilsiloxano; PVDF: biftuoruro de polivilideno; PP: polipropienoè; PE: polietienoè; PAN: poliacrilonitrilo; Zrf: polisulfona que contiene rellenos de ZrO₂; MeOH: metanol; CO₂ dióxido de carbono.

1.3.3. Fenómenos que tienen lugar en el proceso de descontaminación de corrientes gaseosas por membranas

En los procesos de tratamiento de contaminantes contenidos en una fase gaseosa, mediante la utilización de membranas biológicas, es imprescindible que los microorganismos tengan acceso al contaminante, con el fin de poderlo metabolizar. El proceso global consiste en varias etapas simultáneas, incluyendo las transferencias de materia adecuadas y la propia reacción biológica de degradación del contaminante.

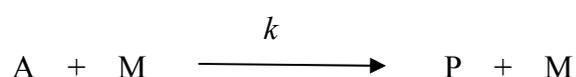
El contaminante se halla inmerso en el seno de la corriente gaseosa, mientras que los microorganismos se hallan fijados sobre una membrana sumergida en una solución acuosa con los nutrientes necesarios para que los microorganismos puedan crecer adecuadamente. De esta forma existe una transferencia del contaminante desde el seno de la fase gaseosa hasta el seno de la fase líquida, y desde aquí hasta la superficie del microorganismo, donde será metabolizado por el mismo.

En el caso de membranas biológicas, previo a la transferencia del contaminante desde la fase gaseosa a la líquida, es necesario que el contaminante alcance la superficie interna de la membrana, y luego se difunda a través de ella hasta alcanzar la superficie externa de la membrana, donde se hallan fijados los microorganismos en el seno de la solución líquida de nutrientes.

1.3.3.1. Biodegradación

Se considera que la etapa de biodegradación es la reacción microbiana en la que el componente contaminante es metabolizado por el microorganismo fijado en forma de película sobre la superficie de la membrana.

Para el estudio cinético de este tipo de reacciones es conveniente adoptar un criterio que pueda definir de modo adecuado el proceso que se está llevando a cabo. El mecanismo de reacción propuesto es el siguiente:



en la que A es el sustrato, M el microorganismo y P el producto obtenido en el metabolismo del microorganismo.

En el estudio de cualquier reacción química es importante conocer la estequiometría de la misma. En el caso del crecimiento microbiano para obtener los coeficientes estequiométricos es necesario conocer la composición elemental del microorganismo involucrado en la reacción, o lo que es lo mismo la fórmula empírica del propio microorganismo. En cada una de estas fórmulas empíricas de los microorganismos, por convenio se expresa en función de un único átomo de carbono. En la Tabla 4 se muestra la fórmula empírica de diferentes microorganismos.

Tabla 4. Fórmula empírica para ciertos microorganismos. *Fuente:* Gòdia y López (1998)

Microorganismos	Nutriente limitante	Fórmula empírica
<i>Areobacter aerogenes</i>		CH _{1,78} N _{0,24} O _{0,33}
<i>Klebsiella aerogenes</i>	Glicerol	CH _{1,74} N _{0,22} O _{0,43}
<i>Candida utilis</i>	Glucosa	CH _{1,84} N _{0,20} O _{0,56}
<i>Candida utilis</i>	Etanol	CH _{1,84} N _{0,20} O _{0,55}
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Glucosa	CH _{1,70} N _{0,17} O _{0,46}

Al igual que en otros tipos de reacciones, uno de los aspectos importantes de las reacciones microbianas, es definir la cinética de la reacción. En el caso de que el

sustrato sea el componente limitante de la reacción, por analogía con las reacciones enzimáticas, se define la velocidad de reacción de formación de masa microbiana según una expresión conocida como ecuación de Monod:

$$r_M = \frac{k C_M C_A}{K_{M_0} + C_A} \quad (3)$$

en la que C_A , y C_M son las concentraciones de sustrato y microorganismos, respectivamente, y K_{M_0} es la denominada constante de Monod.

La ecuación de Monod a veces se escribe de la forma:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{C_A}{K_{M_0} + C_A} \quad (4)$$

en la que μ se denomina velocidad específica de crecimiento microbiano, mientras que μ_{\max} es el valor máximo que puede alcanzar esta velocidad, y se presenta cuando la concentración de sustrato es mucho mayor que la constante de Monod ($C_A \gg K_{M_0}$).

La ecuación de Monod permite realizar unos cálculos adecuados de las cinéticas de crecimiento microbiano. Sin embargo, no siempre permite obtener un buen ajuste de los datos experimentales. Por ello, en la bibliografía se pueden encontrar otros modelos, como los expuestos a continuación:

- Modelo de Tessier:

$$\mu = \mu_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{C_A}{K_M}\right) \right] \quad (5)$$

- Modelo de Moser:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{C_A^m}{K_M + C_A^m} \quad (6)$$

- Modelo de Contois:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{C_A}{K C_M + C_A} \quad (7)$$

1.3.3.2. Transporte interfacial de contaminantes

Generalmente, el mecanismo que se suele aplicar para estudiar la transferencia desde el seno de una fase gaseosa hasta otra líquida, es la teoría de la doble película (Figura 8). El modelo de la doble película supone que la transferencia de materia en la masa global de cada fase se realiza por corrientes convectivas, no existiendo gradientes de concentración dentro de cada fase, excepto en las proximidades de la interfase. Se supone que en ambos lados de la interfase existe una delgada película estática de fluido (subcapas laminares), a través de la cual la transferencia se realiza únicamente por difusión molecular. La dirección de la transferencia de materia a través de la interfase no depende de la diferencia de concentraciones, sino de la relación de equilibrio. En la interfase las composiciones de gas y del líquido están en equilibrio. La presión parcial del gas es algo superior a la del líquido con el que está en equilibrio. Si P es la presión parcial del gas, la transferencia del componente gaseoso tiene lugar desde la fase gaseosa a presión P hasta el seno del líquido con una concentración C . A medida que se acerca a la interfase, la presión parcial disminuye hasta P_i , que es la correspondiente a la interfase, siendo C_i la concentración en la interfase para la corriente líquida. La concentración en el seno del líquido disminuye desde C_i hasta C .

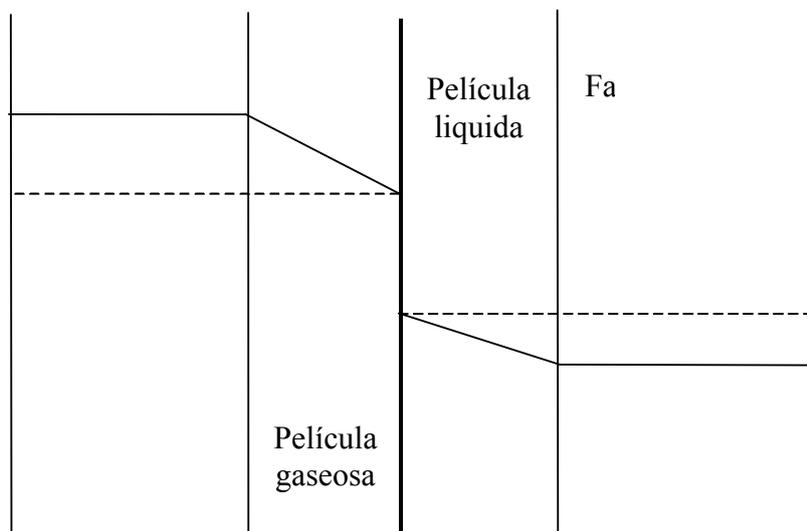


Figura 8. Perfiles de concentración de un componente en la doble película.

En el proceso de transferencia de materia desde la fase gaseosa a la líquida, el componente en fase gas que se transfiere experimenta un proceso de absorción. En

estado estacionario, la densidad de flujo de materia a través de la película gaseosa será la misma que la transferencia a través de la película de líquido. Por tanto, la ecuación general para la transferencia de materia será:

$$N_A = k_g (P - P_i) = k_l (C_i - C) \quad (8)$$

en la que P es la presión parcial del componente en fase gaseosa, P_i la correspondiente a la interfase, mientras que C es la concentración de dicho componente en el seno del líquido y C_i en la interfase. En la Figura 9 se representan estas composiciones en un diagrama presión-concentración.

Reordenando la ecuación anterior, la pendiente de la línea de unión, que permite determinar las concentraciones de la interfase conocidas las de las fases gaseosa y líquida, será:

$$\frac{P - P_i}{C - C_i} = - \frac{k_l}{k_g} \quad (9)$$

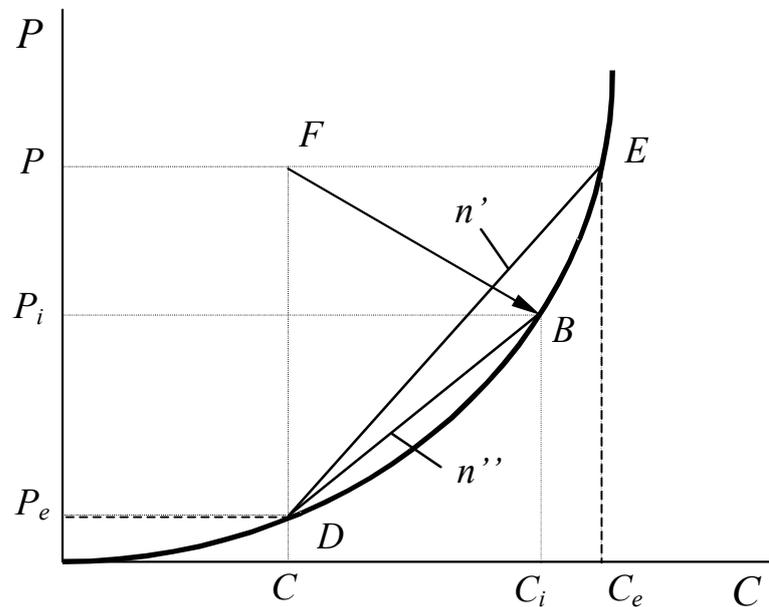


Figura 9. Relación para los coeficientes de materia.

El punto F representa las condiciones en la masa global del gas y del líquido. El punto E representa una concentración C_e en el líquido que está en equilibrio con la presión

parcial P en el seno del gas. El punto B representa la concentración C_i en la interfase líquida que está en equilibrio con la presión parcial P_i de la interfase gaseosa. El punto D representa una presión P_e en la fase gaseosa que está en equilibrio con una concentración C en fase líquida.

La fuerza impulsora que provoca la transferencia de materia en la fase gaseosa es: $(P - P_i)$. La fuerza impulsora de transferencia de materia en la fase líquida es: $(C_i - C)$.

Si se conoce el punto F , que da las concentraciones en el seno de las fases gaseosa y líquida (C, P) , trazando una recta de pendiente $-k_l/k_g$ se obtendrá en el corte con la curva de equilibrio el punto B, que da las composiciones de las interfases gas y líquido (C_i, P_i) .

Para poder determinar k_g y k_l se deben conocer los valores de la concentración en la interfase, lo cual es muy difícil de medir, por lo que resulta más adecuado utilizar los coeficientes globales de transferencia de materia en fase gas (K_G) y en fase líquida (K_L). La densidad de flujo de materia en función de estos coeficientes globales se expresará de la siguiente forma:

$$N_A = K_G(P - P_e) = K_L(C_e - C) \quad (10)$$

Para obtener las relaciones entre los distintos coeficientes de transferencia se debe observar en la Figura 9 las pendientes de las rectas que unen el punto $D(C, P_e)$ con los puntos $B(C_i, P_i)$ y $E(C_e, P)$:

$$\text{Pendiente recta DB:} \quad n' = \frac{P_i - P_e}{C_i - C} \quad (11)$$

$$\text{Pendiente recta DE:} \quad n'' = \frac{P - P_e}{C_e - C} \quad (12)$$

De las ecuaciones (8) y (10), la densidad de flujo de materia se puede expresar de la forma:

$$N_A = \frac{P - P_i}{\frac{1}{k_g}} = \frac{C_i - C}{\frac{1}{k_l}} = \frac{P - P_e}{\frac{1}{K_G}} = \frac{C_e - C}{\frac{1}{K_L}} \quad (13)$$

si se tienen presentes los valores de las pendientes n' y n'' , dados en las ecuaciones (11) y (12), al combinar con esta última ecuación se obtiene:

$$N_A = \frac{P - P_i}{\frac{1}{k_g}} = \frac{P_i - P_e}{\frac{n'}{k_l}} = \frac{P - P_e}{\frac{1}{K_G}} = \frac{P - P_e}{\frac{n''}{K_L}} \quad (14)$$

de donde, al tener en cuenta las propiedades de las fracciones, se obtiene la relación:

$$\frac{1}{k_g} + \frac{n'}{k_l} = \frac{1}{K_G} = \frac{n''}{K_L} \quad (15)$$

Cuando se cumple la ley de Henry: $n' = n'' = H$, siendo H la constante de Henry.

Si las fases líquida y gaseosa se comportan de forma ideal se cumple la ley de Raoult. En el caso que la solución líquida no se comporte de forma ideal, no se puede aplicar esta ley; sin embargo, para concentraciones bajas de soluto en el líquido (soluciones diluidas) se cumple la ley de Henry:

$$P_i = H C_i \quad (16)$$

En muchos casos, la ley de Henry es válida cuando la presión parcial es inferior a una atmósfera. Pero, para presiones superiores, la ley de Henry es sólo aplicable en un intervalo restringido de concentraciones.

La constante de Henry varía mucho con la temperatura, y en general, dicha variación se puede aproximar a una relación del tipo:

$$\log H = A + \frac{B}{T} \quad (17)$$

en la que T es la temperatura absoluta, mientras que A y B son constantes.

Como ya se ha indicado, la ley de Henry se aplica en soluciones diluidas, cuya fracción molar en soluto sea inferior a 0.1. Esta ley es muy utilizada en los cálculos de las condiciones de equilibrio cuando se está transfiriendo un componente desde una fase gaseosa a otra líquida.

1.3.3.2.1. Coeficiente global de transferencia de materia

Para un biorreactor de membrana de fibras huecas, si q_T es el caudal volumétrico total que se desea tratar, por el interior de cada una de las fibras circulan un caudal $q_G = q_T/n$, siendo n el número de fibras huecas que contiene el biorreactor. Se supone que el caudal global se distribuye de modo uniforme entre todas las fibras. En la Figura 10 se muestra un esquema de una fibra hueca, de longitud L , con diámetros internos y externo d_i y d_e , respectivamente. El componente contaminante se transfiere desde la fase gas a la líquida, a través de la membrana porosa.

La transferencia del componente desde el seno de la fase gas hasta la superficie de la membrana será:

$$\dot{m}_{Componente} = A_i k_g (C_G - C_{GM}) \quad (18)$$

siendo:

$\dot{m}_{Componente}$ = caudal de componente que se transfiera (mg/s)

k_g = coeficiente de transferencia de materia en fase gas (m/s)

A_i = área interna de la membrana (m^2) ($A_i = \pi d_i L$)

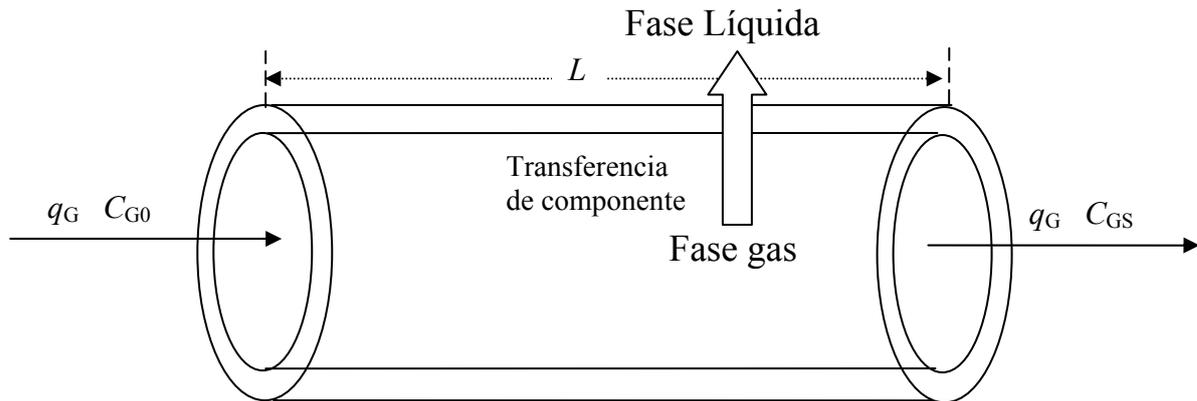


Figura 10. Esquema de una fibra hueca.

Se asume que el componente se transfiere a través de los poros de la membrana. En la superficie interna de la membrana existe una concentración en fase gas (C_{GM}), mientras que en la superficie externa existirá una concentración en fase líquida (C_{LM}). El caudal de transferencia de componente a través de la membrana se expresará como:

$$\dot{m}_{Componente} = A_m k_m (C_{GM} - C_{LM}) \quad (19)$$

siendo:

$\dot{m}_{Componente}$ = caudal de componente que se transfiera (mg/s)

k_m = coeficiente de transferencia de materia a través d la membrana (m/s)

A_m = área media (m^2)

El componente debe transferirse desde la superficie de la membrana hasta el seno de la fase líquida, donde existe una composición C_L . En estado estacionario, el caudal de componente transferido debe ser igual en todas las fases. Además, al tratarse de fibras huecas se puede considerar que los diámetros interno y externo de las fibras es similar ($d_i \approx d_e$), y las áreas serán aproximadamente iguales. Si se define un coeficiente global de transferencia de componente desde el seno de la fase gas al seno de la fase líquida, el caudal de transferencia de materia se puede expresar como:

$$\dot{m}_{Componente} = AK_M (C_G - C_L) \quad (20)$$

siendo:

$\dot{m}_{Componente}$ = caudal de componente que se transfiera (mg/s)

K_M = coeficiente global de transferencia de materia (m/s)

A = área de transferencia (m^2)

Si se supone que la curva de equilibrio entre la fase gas es una recta, es decir, se cumple la ley de Henry, al combinar las ecuaciones de transferencia de componente en las diferentes fases con la ecuación 15, se obtiene que el coeficiente global de transferencia de materia cumple:

$$\frac{1}{K_M} = \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_m} + \frac{H}{k_l} \quad (21)$$

1.3.3.2.2. Determinación del coeficiente global de transferencia de materia en un experimento abiótico

Si se considera un diferencial de volumen en una fibra hueca, donde se transfiere un componente desde la fase gas a la líquida, a través de una membrana porosa (Figura 11), se puede realizar un balance de componente en este diferencial de volumen.

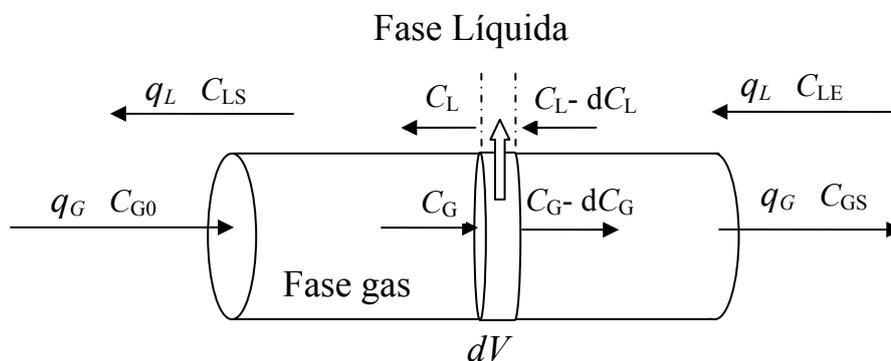


Figura 11. Transferencia de componente desde la fase gas a la líquida.

El área de transferencia desde la fase gas a la líquida para el diferencial de volumen (dV) es:

$$dA = \pi d dx$$

siendo:

d = diámetro medio de la membrana

dx = diferencial de longitud de la membrana para dV

El caudal de componente (en realidad diferencial de caudal de componente) que se transfiere desde el seno de la fase gaseosa al seno de la fase líquida a través del diferencial de área de membrana será:

$$d \dot{m}_{\text{Componente}} = dA K_M (C_G - C_L) = \pi d dx K_M (C_G - C_L) \quad (22)$$

Al realizar un balance de materia en una sección dA de la membrana, para la fase líquida, se obtiene:

$$q_L (C_L - dC_L) + d \dot{m}_{\text{Transferido}} = q_L C_L \quad (23)$$

siendo q_L el caudal volumétrico de la fase líquida que circula por el exterior de las fibras huecas.

Teniendo en cuenta el caudal de componente transferido a través del área de la fibra, se obtiene:

$$q_L dC_L = \pi d dx K_M (C_G - C_L) \quad (24)$$

Ecuación que se puede expresar en forma de variables separadas:

$$\frac{dC_L}{(C_G - C_L)} = \frac{\pi d K_M}{q_L} dx \quad (25)$$

Para integrar esta ecuación es necesario expresar la concentración de componente en el seno de la fase gas (C_G) en función de la concentración de componente en el seno de

la fase líquida (C_L). Para ello, se realiza un balance de componente entre un extremo de la fibra hueca y la sección considerada (ver Figura 5):

$$q_G C_G + q_L C_{LE} = q_G C_{GS} + q_L C_L \quad (26)$$

En la que C_{LE} es la concentración de componente en fase líquida a la entrada, mientras que C_G es la concentración de componente en fase gas en la sección considerada, siendo q_G y q_L los caudales volumétricos de las corrientes gaseosa y líquida, respectivamente.

De la ecuación anterior es posible expresar la concentración de componente en fase gas en función de la concentración en fase líquida:

$$C_G = \frac{q_L}{q_G} C_L + \left(C_{GS} - \frac{q_L}{q_G} C_{LE} \right) \quad (27)$$

Por lo tanto:

$$C_G - C_L = \frac{q_L}{q_G} C_L + \left(C_{GS} - \frac{q_L}{q_G} C_{LE} \right) - C_L = a C_L + b \quad (28)$$

En la que:

$$a = \frac{q_L - q_G}{q_G} \quad b = C_{GS} - \frac{q_L}{q_G} C_{LE} \quad (29)$$

Por lo tanto, al sustituir en la ecuación (25), se obtiene:

$$\frac{dC_L}{a C_L + b} = \frac{\pi d K_M}{q_L} dx \quad (30)$$

Esta ecuación se puede integrar con las siguientes condiciones límite:

- Para $x = 0$ $C_L = C_{LE}$
- Para $x = L$ $C_L = C_{LS}$

Obteniendo:

$$\frac{\pi d K_M}{q_L} Lx = \frac{1}{a} \left[\ln \left(\frac{a C_{LS} + b}{a C_{LE} + b} \right) \right] \quad (31)$$

Teniendo en cuenta la definición de los parámetros a y b (ecuaciones 29), y que el área de transferencia es el área lateral de la fibra ($A = \pi dL$), se puede despejar el coeficiente global de transferencia de componente desde el seno de la fase gaseosa al seno de la fase líquida. De esta forma, se obtiene:

$$K_M = \frac{q_L q_G}{A(q_L - q_G)} \ln \left[\frac{q_G C_{GS} + (q_L - q_G) C_{LS} - q_L C_{LE}}{q_G (C_{GS} - C_{LE})} \right] \quad (32)$$

Ergas et al. (1999) determinaron coeficientes de transferencia de materia previo a la formación de la biopelícula de microorganismos sobre la membrana. Utilizaron un biorreactor de membrana de fibras huecas, para estudiar la eliminación de tolueno de la fase gaseosa. Observaron que los coeficientes de materia aumentaron con el aumento de la velocidad de la fase líquida. Así, obtuvieron valores de estas constantes en el intervalo de aproximadamente 5×10^{-6} a $3.5 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, para velocidades de la fase líquida comprendidas entre 0.002 a $0.017 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Para un biorreactor tubular de látex, en el que se eliminaba benceno de una corriente gaseosa se obtuvieron valores del coeficiente de transferencia de materia menores de $3 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Fitch et al., 2003). Para eliminar benceno con un biorreactor de fibra hueca, estos mismos autores dan valores del coeficiente de transferencia de materia aproximadamente entre 3×10^{-7} y $5.5 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Dingemas et al. (2008) estudiaron la transferencia de materia tricloroetileno (TCE), tolueno (TOL) y sulfuro de dimetilo (DMS) contenidos en una corriente de N_2 , utilizando diferentes membranas porosas compuestas, determinando los coeficientes globales de transferencia de materia desde la fase gaseosa a la líquida. Con membranas cuya capa porosa era de polipropileno/fluoruro de polivinilideno con una fina capa densa de polidimetilsiloxano, obtuvieron valores de los coeficientes de transferencia de

materia de 2.55×10^{-3} , 2.82×10^{-3} y $2.90 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para TCE, TOL y DMS, respectivamente. Estos mismos autores trabajaron con membranas cuya capa porosa era de poliéster/poliacrilonitrilo y una película densa de polidimetilsiloxano, en cuyo caso obtuvieron valores superiores de los coeficientes de transferencia de materia 2.28×10^{-3} , 4.55×10^{-3} y $4.81 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para TCE, TOL y DMS, respectivamente. Al estudiar la contribución de la fase densa sobre la resistencia total a la transferencia de materia, observaron que esta contribución era pequeña para ambas membranas compuestas. Al comparar con otros trabajos de la literatura (Beuscher y Gooding, 1998, 1999; De Bo et al., 2000) se vio que los mayores coeficientes de transferencia de materia obtenidos en este trabajo de la película fina de PDMS de las membranas compuestas eran debidos principalmente a la mejora de las características de la transferencia de materia de la capa porosa.

En un biorreactor de membrana plana compuesta para eliminar tolueno de una corriente gaseosa, en un experimento abiótico, se obtuvo un valor del coeficiente global de transferencia de materia de $2.8 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Kumar et al., 2008b, 2009). Además, también determinaron los valores de los coeficientes de transferencia de materia a través de la membrana, de transferencia de materia en fase gas y de materia en fase líquida, obteniendo los valores de 4×10^{-3} , 16×10^{-3} y $3 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.3.3.2.3. Coeficiente global de transferencia con reacción biológica

Para que los microorganismos puedan metabolizar el contaminante es preciso que llegue desde el seno de la fase gaseosa. Si se supone que los microorganismos pueden acceder directamente al componente contaminante que se encuentra en el seno de la fase líquida, entonces, se puede utilizar una cinética tipo Monod, que describa de forma adecuada esta etapa en el proceso global de eliminación del contaminante. La ecuación de Monod (Ecuación 3) es una expresión de la velocidad intensiva de reacción (r), que posee unidades de caudal de materia que reacciona por unidad de volumen. Sin embargo, los microorganismos forman una película sobre el área externa de la membrana. Por ello, es conveniente expresar la velocidad intensiva por unidad de superficie:

$$r_S = \frac{V}{A} r = \frac{V}{A} \mu_{\max} \frac{C_L}{K_{M_o} + C_L} \quad (33)$$

La cantidad de componente que reacciona por unidad de tiempo será:

$$r_S A = V \mu_{\max} \frac{C_L}{K_{M_o} + C_L} \quad (34)$$

Esta cantidad de componente que es metabolizada por los microorganismos de la biopelícula es la que llega desde el seno de la fase gaseosa a través de la pared de la membrana, de modo que se cumple:

$$\dot{m}_{Componente} = A K_M (C_G - C_L) = V \mu_{\max} \frac{C_L}{K_{M_o} + C_L} \quad (35)$$

Tal como se ha observado en los apartados precedentes, la transferencia de componente es lineal con respecto a la concentración para las resistencias a través de la fase gas, de la membrana y de la fase líquida. Sin embargo, tal como se observa en esta última expresión, la etapa de reacción microbiana sigue una cinética tipo Monod, por lo que es complejo que se pueda obtener una expresión global de fácil aplicación, que incluya tanto las etapas de transferencia de materia como la de reacción microbiana. Por ello será necesario linealizar esta expresión de la cinética de Monod, y una forma de linealizar una función es por Taylor.

La linealización de una función puede llevarse a cabo mediante una aproximación por Taylor, alrededor de una concentración determinada (C_L^0) (Levenspiel, 1986). De modo que si $f(C)$ es una función no lineal, se cumple:

$$f(C) \approx f(C_L^0) + (C_L - C_L^0) f'(C_L^0) + \text{Términos superiores (despreciables)}$$

En el caso que la función sea la ecuación de Monod:

$$f(C) = \mu_{\max} \frac{C_L}{K_{Mo} + C_L} \quad (36)$$

$$f(C_L^0) = \mu_{\max} \frac{C_L^0}{K_{Mo} + C_L^0} = K_1 C_L^0 \quad (37)$$

$$f'(C_L^0) = \mu_{\max} \frac{K_{Mo}}{(K_{Mo} + C_L^0)^2} \quad (38)$$

Por lo tanto, para un valor medio de la concentración en fase líquida C_L^0 , se cumplirá que la velocidad intensiva de reacción microbiana se puede expresar como:

$$r(C_L^0) = \mu_{\max} \frac{C_L^0}{K_{Mo} + C_L^0} + \mu_{\max} \frac{K_{Mo}}{(K_{Mo} + C_L^0)^2} (C_L - C_L^0) \quad (39)$$

Ecuación que se puede expresar como:

$$r(C_L^0) = K_2 \left[C_L - \left(\frac{K_2 - K_1}{K_2} \right) C_L^0 \right] = K_2 (C_L - K_3 C_L^0) \quad (40)$$

Donde las constantes K_1 , K_2 y K_3 están definidas como:

$$K_1 = \frac{\mu_{\max}}{K_{Mo} + C_L^0} \quad (41)$$

$$K_2 = \frac{\mu_{\max} K_{Mo}}{(K_{Mo} + C_L^0)^2} = \frac{K_1 K_{Mo}}{K_{Mo} + C_L^0} \quad (42)$$

$$K_3 = \frac{K_2 - K_1}{K_2} \quad (43)$$

Por lo tanto la velocidad intensiva de reacción microbiana, expresada en función de la superficie de contacto, para una concentración de sustrato C_L^0 en la fase líquida, se puede expresar como:

$$r_s(C_L^0)A_e = V K_2 (C_L - K_3 C_L^0) \quad (44)$$

De este modo, el caudal de componente que reacciona se puede expresar como:

$$m_{\text{Reacciona}} = V K_2 (C_L - K_3 C_L^0) = \frac{C_L - K_3 C_L^0}{\frac{1}{V K_2}} \quad (45)$$

Al igualar los caudales de componente que se transfieren desde la fase gaseosa a la líquida (ecuación 20) con esta última ecuación se obtiene:

$$\dot{m}_{\text{Componente}} = \frac{C_G - C_L}{\frac{1}{AK_M}} = \frac{C_L - K_3 C_L^0}{\frac{1}{V K_2}} = \frac{C_G - K_3 C_L^0}{\frac{1}{AK_M} + \frac{1}{V K_2}} \quad (46)$$

Por lo que se puede obtener una constante global de transferencia (K_{GLOBAL}) que incluya las resistencias de la transferencia de materia, de la membrana y de la propia reacción microbiana. De este modo, la cantidad de componente eliminado de la fase gaseosa se expresará como:

$$\dot{m}_{\text{Componente}} = K_{\text{GLOBAL}} (C_G - K_3 C_L^0) \quad (47)$$

Siendo la constante global:

$$\frac{1}{K_{\text{GLOBAL}}} = \frac{1}{K_M} + \frac{1}{\frac{V}{A} K_2} = \frac{1}{k_g} + \frac{1}{k_m} + \frac{H}{k_l} + \frac{1}{\frac{V}{A} K_2} \quad (48)$$

1.3.3.3. Difusión

Una vez que el contaminante ha llegado a la superficie interna de la membrana la atraviesa para poder llegar a la fase líquida, donde se hallan fijados los microorganismos sobre la superficie externa de la membrana. Se puede considerar que la transferencia de materia del contaminante a través de la membrana se realiza mediante un mecanismo de difusión por el interior de los poros de la propia membrana. Para un componente i que se esté transfiriendo, se puede definir una constante global de transferencia de materia a través de la membrana según la expresión (Dingemans et al., 2008):

$$k_{m,i} = \frac{D_{\text{Eff},i} \varepsilon}{\tau \delta_m} \quad (49)$$

en la que:

$k_{m,i}$ = constante de transferencia de materia del componente i a través de la membrana

$D_{\text{Eff},i}$ = coeficiente efectivo de difusión de materia (m^2/s)

ε = porosidad de la membrana

δ_m = espesor de la membrana (m)

τ = tortuosidad de los canales de la membrana

La tortuosidad de los canales de una membrana porosa se puede estimar mediante la siguiente ecuación (Dingemans et al., 2008):

$$\tau = \frac{(2 - \varepsilon)^2}{\varepsilon} \quad (50)$$

Para mezclas binarias, la difusividad efectiva del componente i depende de la difusividad molecular del componente i a través del otro componente j de la mezcla binaria ($D_{\text{Molecular } i \text{ en } j}$), y de la difusividad de Knudsen ($D_{K,i}$) a través de los poros de la membrana.

Cuando el componente i se transfiere a través de los poros de la membrana se obtiene que la difusividad efectiva es mucho más pequeña que la correspondiente a la difusión en un fluido libre, puesto que la forma con la que el componente debe viajar es a través de un canal más tortuoso, la distancia que las moléculas deben atravesar aumenta; además, el sólido restringe el área transversal de paso. En el caso de que el tamaño de los poros del sólido sea del orden de la mitad de camino de las moléculas que se difunden, aparece la denominada difusión de Knudsen en que las moléculas chocan preferiblemente con las paredes de los poros en lugar de hacerlo unas contra las otras. Para un componente i , la difusividad de Knudsen se puede obtener a partir de la ecuación:

$$D_{K,i} = \frac{d_p}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_i}} \quad (51)$$

donde

d_p = diámetro del poro (m)

M_i = masa molecular del componente i considerado

T = Temperatura absoluta (K)

R = constante de gases

La difusividad efectiva está correlacionada con las difusividades moleculares y de Knudsen según la ecuación:

$$\frac{1}{D_{Eff,i}} = \frac{1}{D_{M,i en j}} + \frac{1}{D_{K,i}} \quad (52)$$

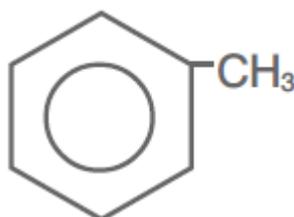
Dependiendo del medio en el que se difunden, los valores de la difusividad pueden cambiar apreciablemente. De este modo, para compuestos de bajo peso molecular, su difusividad en fase gas es del orden de $1 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, mientras que en fase líquida sus valores suelen ser del orden de $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. En las biopelículas los valores de la difusividad pueden llegar a ser mucho menores, ya que, por ejemplo, la difusividad de contaminantes en suelos y sedimentos son hasta 12 órdenes de magnitud inferiores que en agua pura (Kraakman y Rocha-Rios, 2011).

1.4. Contaminante hidrófobo de estudio (Tolueno)

En el presente trabajo se pretende estudiar la eliminación de tolueno contenido en una corriente gaseosa de aire. Se ha escogido el tolueno como compuesto modelo debido a que su biodegradación está bien descrita en la literatura (Ergas et al., 1999). A continuación se muestra un resumen de sus propiedades y utilización por la industria. Esta información ha sido tomada de la página Web de Minambiente (2013).

Fórmula Molecular: $C_6H_5CH_3 - C_7H_8$

Fórmula Estructural:



CAS: 108-88-3

Número UN: 1294

Clase de Riesgo Principal UN: 3

El Tolueno es el nombre común para el metilbenceno. Se conoce como metilbencol o fenilmetano; en la industria se conoce comúnmente como moluol o metil menceno.

1.4.1. Propiedades del tolueno

A temperatura y presión ambiente el tolueno es un líquido transparente, volátil e inflamable que forma mezclas explosivas con el aire. Es un hidrocarburo de la serie aromática. Posee olor dulce e irritante, característico en compuestos con anillos bencénicos. Está presente en el petróleo crudo, que es por mucho la fuente principal de donde se obtiene; también se genera en el proceso de manufactura del coque a partir de carbón, formando parte del alquitrán y como producto del metabolismo del árbol de Tolú donde se encuentra formando resinas.

El tolueno está clasificado como un compuesto orgánico volátil (COV). Los vapores de esta sustancia son peligrosos para la salud humana; además sus propiedades de inflamabilidad a temperaturas mayores de 5 °C representan un alto peligro para la generación de fuego en condiciones atmosféricas de presión y temperatura.

El tolueno es un disolvente de muchos productos aromáticos, pero es muy poco soluble en agua, de donde se separa y asciende gracias a su menor densidad. Es soluble en alcohol, benceno y éter.

Es un compuesto químico muy usado en la fabricación de una gran diversidad de productos como el trinitrotolueno, el ácido benzoico, colorantes y muchos otros. Los mayores usuarios de tolueno en el mundo son compañías que se dedican a la preparación de benceno, que es su producto principal.

1.4.1.1. Propiedades Químicas

El Tolueno no reacciona con ácidos o bases diluidos. No es una sustancia corrosiva. En la atmósfera reacciona rápidamente con radicales Hidroxilo y forma una gran variedad de productos de oxidación.

Reacciona vigorosamente con agentes oxidantes fuertes y puede generar calor o hacer ignición y explotar. Los contenedores de Tolueno pueden explotar por causa de un aumento no controlado en la temperatura de almacenamiento. Cuando el Tolueno se ve envuelto en fuego o existe Tolueno en combustión se pueden generar gases y vapores tóxicos como monóxido o Dióxido de Carbono. Debido a sus buenas propiedades como solvente, puede atacar algunos tipos de plástico, caucho y la mayoría de recubrimientos.

1.4.1.2. Propiedades Físicas

En la Tabla 5 se muestran las propiedades físicas del tolueno.

Tabla 5 Propiedades físicas del tolueno.

Propiedad	Valor
Peso Molecular (g/mol)	92.13
Estado físico	Líquido
Punto de ebullición (°C)(760 mmHg)	110.6
Punto de fusión (°C)	-95
Presión de vapor (mmHg)	22; 20°C
Velocidad de evaporación (Acetato de butilo=1)	2'24
Gravedad específica (Agua=1)	0.87
Densidad del vapor (Aire=1)	3.14
pH	No reportado
Solubilidad en agua	0.07 %; 23°C
Límites de inflamabilidad (%Vol)	1.2 % - 7.1 %
Temperatura de auto ignición (°C)	480
Punto de inflamación (°C)	4.4 copa cerrada

1.4.2. Producción, aplicaciones y usos

1.4.2.1. Producción

El tolueno es un compuesto químico intermedio de gran importancia comercial en la generación de un sinnúmero de productos y que se maneja en cantidades muy altas en el mundo; se comercializa tanto en forma purificada como incluido en mezclas con otras sustancias derivadas del petróleo. Hasta la Segunda Guerra Mundial la fuente principal de obtención de tolueno era el carbón, del que se obtenía como subproducto por el proceso de coquización en los alquitranes. A partir de entonces la fuente preferida de obtención corresponde al petróleo, de donde se obtiene cerca del 96% del volumen total que se maneja en el mundo.

La obtención de tolueno a partir del petróleo se da de forma principal (alrededor de un 87%) por reformado catalítico de fracciones del crudo que contienen metilciclohexano y en forma secundaria (9%) por separación en el proceso de pirólisis

de gasolina en equipos de craqueo con vapor durante la manufactura de etileno y propileno. Otras fuentes menores (4%) de obtención de tolueno corresponden por ejemplo a la producción de estireno, donde se genera como subproducto. El alto contenido de impurezas que normalmente se obtienen junto con el tolueno, en los diversos procesos de producción, hacen necesaria una serie de etapas de purificación que pueden incluir destilación azeotrópica con hidrocarburos parafínicos, nafténicos o alcoholes. El benceno es una de las principales impurezas que se hallan junto con el Tolueno en los diferentes procesos de obtención; el tolueno altamente purificado contiene menos del 0,01% de benceno, mientras que los grados industrial y 90/120 pueden contener hasta 25%.

1.4.2.2. Aplicaciones y usos

Uno de los usos más importantes del tolueno es la producción de benceno de diversos grados para una amplia gama de aplicaciones. Es un excelente disolvente para lacas, barnices, pinturas y adhesivos, teniendo en esta aplicación un mejor uso que otros solventes aromáticos como el benceno o el xileno. El tolueno que se produce en forma de mezclas se usa como aditivo de gasolinas para mejorar su uso aumentando el octanaje; su forma pura se usa en la síntesis de otros químicos, como solvente y como aditivo en productos cosméticos. Los principales derivados en la síntesis química a partir del tolueno incluyen el toluen-diisocianato, el ácido benzoico, el benzaldehído, el xileno, cloruro de toluensulfonilo, nylon, intermediarios de pigmentos, germicidas y otros.

Otros usos varios lo incluyen en la elaboración de trinitrotolueno (TNT), en fármacos, perfumería, como agente de separación en procesos de extracción con solventes y como aditivo en productos anticongelantes.

1.4.3. Efectos sobre la salud

Puede causar cáncer, resulta nocivo por ingestión y por inhalación, se inflama fácilmente, resulta tóxico para los organismos acuáticos, puede provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente acuático.

Las personas pueden estar expuestas a tolueno en ambientes laborales o en el medio ambiente, después de derrames o emisiones en el aire, el agua, el suelo o en aguas subterráneas. La exposición al tolueno se genera a partir de diversas fuentes, dentro de las que se anotan el agua de consumo, la comida, el aire y productos como esmaltes para uñas, soluciones de caucho, pinturas, pegamentos y otras aplicaciones donde se usa como disolvente. La respiración de gases producto de la combustión incompleta en motores de vehículos a gasolina también constituye una fuente de exposición al tolueno en el aire. Las personas con mayores riesgos de exposición a esta sustancia son aquellas que trabajan con gasolina, keroseno, aceites minerales y lacas. El humo del cigarrillo es una fuente de tolueno que puede tener efectos crónicos sobre fumadores y sobre las personas cercanas a ellos que lo respiran involuntariamente; personas que fuman un paquete de cigarrillos al día consumen en total alrededor de 1 mg de tolueno adicional al de cualquier otra exposición.

El tolueno puede ingresar al cuerpo humano cuando se respiran sus vapores o cuando se ingieren alimentos o bebidas contaminados. Cuando se trabaja con disolventes que contienen tolueno, esta sustancia puede pasar a través de la piel directamente a la corriente sanguínea; una vez en el cuerpo, el tolueno sufre diferentes cambios específicos para cada persona de acuerdo con factores como edad, sexo, composición corporal y estados de salud. De forma general, cerca del 75% del tolueno que ingresa al cuerpo, después de una exposición, se devuelve al medio en el transcurso de 12 horas por vía urinaria o respiratoria. El tolueno que permanece en el organismo se degrada en otros materiales, se metaboliza y se elimina de tal manera que el tolueno no es una sustancia que se acumule en el organismo.

La inhalación de grandes cantidades de tolueno por períodos de tiempo cortos afecta de forma adversa el sistema nervioso, los riñones, el hígado y el corazón. Los efectos adversos que se presentan dependen del tiempo y cantidad o concentración en la exposición; éstos pueden incluir temblores musculares, hormigueo en los dedos, fuertes dolores de cabeza, convulsiones, somnolencia, ausencia de sensaciones, pérdida de la consciencia y muerte de la persona expuesta.

El tolueno es una sustancia de rápida absorción por vía pulmonar y gastrointestinal. La absorción por la piel es menor (1%) comparada con la absorción en pulmones para casos de presencia de vapores de tolueno en el ambiente, no obstante, representa una vía de irritación local y de entrada directa a la sangre. De acuerdo con estudios de inhalación realizados sobre animales, se sabe que el tolueno, una vez ingresa al organismo de un mamífero, se dirige a la grasa corporal, huesos, nervios de la columna vertebral, médula espinal y cerebro; en menor grado se difunde hasta la sangre, el hígado y los riñones. El tolueno en el cuerpo humano se transforma en alcohol benzílico resultado de la hidroxilación del grupo metilo; oxidaciones posteriores lo conducen a benzaldehído y ácido benzoico que se combina con glicerina dando como resultado ácido hipúrico o con el ácido glucorónico y formando glucoronil benzoilo. El 60% o 70% del tolueno absorbido por el organismo se excreta por la orina en forma de ácido hipúrico; entre el 10% y el 30% del tolueno absorbido se transforma y elimina por medio del glucoronil benzoilo; otra cantidad equivalente a la anterior de tTolueno se elimina sin alteraciones por la respiración.

La exposición a tolueno por inhalación es la forma más común de exposición en la mayoría de los casos, tanto en ambientes industriales como en domésticos, ya que se usa de manera muy difundida como disolvente en pinturas, lacas y pegantes de donde se evapora con rapidez; también existe algún grado de exposición en personas que respiran gases producto de la combustión de combustibles derivados del petróleo generados por motores de vehículos. Individuos que viven cerca a lugares de disposición de desechos están más expuestos al tolueno y a otros compuestos químicos en el aire que aquellas personas en áreas limpias. Ya en el aire, el tolueno se puede oler a partir de concentraciones alrededor de las 8 ppm, que es un valor muchas veces menor a los valores considerados como peligrosos por diferentes instituciones internacionales y, por tal razón, se considera que el olor es una buena forma de advertencia ante peligros respiratorios que se puedan presentar con esta sustancia. Los casos más graves de exposición aguda se generan por acción de accidentes industriales en lugares donde el tolueno se manipula de alguna manera o en personas que aspiran pegamentos que contienen tolueno como disolvente; en estos casos las concentraciones de tolueno en el aire pueden llegar a alcanzar con facilidad valores de 20.000 o 30.000 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Los vapores del tolueno son más pesados que el aire y tienden a permanecer en niveles cercanos al suelo; de esta manera, pueden causar asfixia en lugares cerrados, pobremente ventilados o en áreas bajas donde se puede acumular.

Los efectos más importantes y peligrosos de exposición al tolueno corresponden a efectos sistémicos más que a efectos de contacto directo en comparación con otras sustancias como ácidos, bases o sustancias corrosivas, aunque si se presentan efectos irritantes de alguna importancia. Los efectos principales, tanto de manera aguda como crónica, debidos a una exposición de tolueno corresponden a desórdenes en el sistema nervioso central; dependiendo de la persona expuesta se puede presentar excitación, euforia, irritabilidad, cambios rápidos del estado de ánimo, convulsiones, coma o la muerte. Algunos efectos son reversibles como la fatiga, dolor de cabeza, pérdida de la habilidad manual y narcosis y, por tanto, desaparecen una vez se termina la exposición. Los efectos adversos que se pueden presentar por causa de una exposición por inhalación a tolueno dependen de diferentes factores en el momento del contacto, los principales son la concentración de tolueno en el aire, el tiempo de exposición y la frecuencia respiratoria del individuo, todos ellos son igualmente importantes para definir la gravedad de las secuelas que se pueden generar.

Las personas expuestas a 200 ppm durante 8 horas presentaron fatiga, debilidad, confusión, lacrimación e irritaciones musculares; a 600 ppm durante 8 horas también se presentó euforia, dolor de cabeza, mareo, dilatación de pupilas y náusea; a 800 ppm durante 8 horas los síntomas fueron más pronunciados y los efectos posteriores incluyeron fatiga muscular e insomnio por varios días. De forma aguda por exposiciones de 100 ppm seis horas al día durante cuatro días se presentan efectos en el sistema nervioso central (dolor de cabeza, mareo, intoxicación) e irritación ocular. Exposición durante 8 horas al día en los mismos cuatro días a la semana provoca los mismos efectos anteriores y otros más graves, que incluyen euforia, pupilas dilatadas, convulsiones y náusea. Exposiciones a concentraciones de entre 10.000 y 30.000 ppm causa narcosis y muerte. La exposición aguda a tolueno puede irritar las membranas mucosas del tracto respiratorio. Con exposiciones masivas pueden suceder acumulaciones de fluido en los pulmones y detención de la respiración.

Exposición a niveles bajos o moderados puede causar cansancio, confusión, debilidad, acciones parecidas a personas embriagadas, náusea, pérdida del apetito y trastornos de la visión y la escucha. Estos síntomas desaparecen cuando cesa la exposición.

Niños expuestos a iguales niveles de tolueno que adultos pueden absorber una mayor dosis a causa de su mayor relación superficie pulmonar a peso corporal y mayor cantidad de volumen de aire respirado por unidad de tiempo. Además, pueden estar expuestos a mayores concentraciones que los adultos en la misma ubicación a causa de su menor estatura y los mayores niveles de tolueno encontrados a nivel del suelo.

La aspiración frecuente de vapores de tolueno como las que se presentan cuando se huele pegamento o pintura puede causar daños permanentes en el cerebro. Como resultado de ello, los seres humanos pueden desarrollar problemas con el lenguaje, la escucha y la visión. También se puede presentar pérdida del control muscular, pérdida de la memoria y disminución en habilidad mental. De forma crónica se presentan cambios degenerativos en la materia gris, se presentan cambios en las funciones cognitivas, neuro musculares, auditivas y fallas en la discriminación del color en la visión. Personas que huelen pegamentos con tolueno como disolvente de forma crónica se encuentran dentro del grupo de más alto riesgo de mortalidad y por lo regular las muertes de estas personas causadas por el tolueno se deben a arritmias cardíacas, depresión del sistema nervioso central, asfixia y fallos hepáticos o renales.

Exposiciones laborales repetidas en periodos de años a niveles de 750 mg/m^3 y 1500 mg/m^3 causa efectos neurológicos crónicos irreversibles como encefalopatía, atrofia óptica, desórdenes del equilibrio. Mujeres expuestas de forma crónica a sustancias aromáticas como tolueno o benceno presentan trastornos del ciclo menstrual, mujeres que inhalan grandes cantidades de tolueno durante el embarazo de forma repetida tienen riesgo de dar a luz bebés con defectos corporales o con retraso mental.

El contacto directo y prolongado con tolueno en forma líquida o sus vapores genera irritación de la piel, la nariz y de los ojos; estos efectos no se presentan por lo regular en personas expuestas a niveles que se presentan de forma común en el medio ambiente.

Además de los efectos producto del contacto mismo con el tolueno, se sabe que por exposición prolongada o repetida a altas concentraciones provoca desórdenes en el desarrollo de fetos en mujeres en embarazo.

En humanos, el contacto dérmico con tolueno de forma prolongada puede causar daños en la piel, porque elimina los lípidos allí presentes, causando resequedad, agrietamiento y dermatitis; a estos efectos puede seguir un rompimiento y caída de la piel expuesta. Los trabajadores y empleados que trabajan con las manos desnudas manipulando disolventes en los que está presente el tolueno desarrollan problemas cutáneos en las manos. El contacto repetido de la piel con tolueno provoca disminución del grosor natural de la epidermis.

A concentraciones menores de 100 ppm de forma crónica, empleados y trabajadores que manejan pinturas y pegantes en solución con Tolueno presentan déficit en la percepción y distinción de colores.

Dosis repetidas de tolueno causan efectos adversos en el sistema nervioso central y además puede comprometer las funciones del hígado y de los riñones, causando por ejemplo crecimiento anormal del tamaño del hígado (hepatomegalia).

Toda persona que entre en contacto con un material químico peligroso no solo debe estar atento a realizar medidas preventivas, sino también debe conocer acerca de los procedimientos de emergencia, que pueden ayudar a evitar que un incidente menor se transforme en una catástrofe.

No se debe inducir el vómito a las víctimas que han ingerido esta sustancia. La boca se debe lavar con abundante agua. Luego de la ingestión, la víctima se debe remitir siempre a un centro asistencial para que reciba ayuda médica lo más pronto posible.

1.4.4. Niveles permisibles de exposición ocupacional

- TLV (TWA; 8 horas; ACGIH): 50 ppm (1996)

- **PEL** (TWA; 8 horas; OSHA para la industria general): 200 ppm (Fecha de estudio no reportada)
- **PEL** (TWA; 8 horas; OSHA para la industria de la construcción): 200 ppm (Fecha de estudio no reportada)
- **IDLH** (NIOSH): 500 ppm (Fecha de estudio no reportada)
- **STEL** (TWA; 15 minutos; OSHA): 500 ppm (Fecha de estudio no reportada)

TLV: Threshold Limit Value (Valor Límite Umbral).

PEL: Permissible Exposure Limit (Límite Permissible de Exposición).

IDLH: Immediately Dangerous to Life and Health (Peligroso Inmediatamente para la vida y la Salud).

STEL: Short Time Exposure Limit (Límite de Exposición en Periodos Cortos)

1.4.5 Comportamiento en el aire ambiente

Casi todo el tolueno que ingresa al medio ambiente se dirige en últimas al aire, ya sea de forma directa o a través de otras fuentes como el suelo o el agua. Se puede liberar de manera doméstica a partir del secado de esmaltes y endurecedores de uñas y en el humo del cigarrillo, pero esta cantidad es muy pequeña comparada con las restantes. De fuentes industriales se generan en cantidades significativas por acción de pérdidas en los procesos de producción y fugas en el almacenamiento, de esta forma se libera cerca del 2% del total; su uso como disolvente de pinturas, lacas y pegamentos genera un 33% del total del tolueno liberado a la atmósfera. La fuente de emisión principal de tolueno la constituye la evaporación a partir de gasolina y otros combustibles, que contienen entre un 5 y un 7% de tolueno, por acción de derrames o por emisión de motores debido a mala combustión, aquí el porcentaje liberado corresponde al 65%. La importancia de las fuentes mencionadas puede variar de país a país y de región a región dependiendo de los niveles de industrialización y de consumo de combustibles en cada uno.

Las concentraciones de tolueno en áreas remotas y alejadas de la civilización son muy bajas, pero en zonas urbanas se puede encontrar entre 1,6 y 6,6 ppb, aunque pueden ser mayores, dependiendo de la presencia de fuentes de emisión fuertes como

industrias o zonas de alto tráfico vehicular, pero por lo regular no exceden 1 ppm. (Environmental Protection Agency (EPA), 2003).

Aunque la gran mayoría de las personas no entra en contacto con elevadas concentraciones de tolueno durante su vida, algunos grupos de personas sí lo están en ambientes laborales o por la acción del abuso en la inhalación de pegamentos; las concentraciones a las que se exponen este tipo de personas son del orden de 300 mg/m^3 , pero pueden ser mayores o menores dependiendo del caso específico (Organización Mundial de la Salud (OMS), 1986).

El tolueno en el aire se degrada por acción de radicales hidroxilo, que lo transforman en cresol y benzaldehído, que a su vez sufren rompimiento de anillo aromático y generan hidrocarburos simples; el proceso completo tarda entre 13 y 104 horas, dependiendo de las condiciones atmosféricas. El tolueno también se oxida por reacción con dióxido de nitrógeno, oxígeno y ozono, pero estas reacciones no son tan importantes como aquellas con radicales hidroxilo. Las reacciones de descomposición de sustancias por acción de radiaciones solares no son importantes dentro de las formas de degradación del tolueno (Environmental Protection Agency. Toluene Chemical Summary, 1994).



2. Objetivos y plan de trabajo

El principal objetivo del presente trabajo es el montaje y puesta a punto de una instalación de un biorreactor de membrana con una biopelícula para eliminar contaminantes contenidos en una fase gaseosa. Será necesario plantear el modelo matemático que describa la transferencia de materia del contaminante desde la fase gaseosa hasta la biopelícula donde va a ser metabolizado. Se deberán determinar los parámetros de operación que permitan obtener altas eficiencias de eliminación del contaminante, pensando en poder escalar el prototipo a escala industrial.

Este objetivo principal se puede desglosar en los siguientes objetivos parciales:

1. Seleccionar la membrana que mejores resultados pueda dar con el contaminante que se desea eliminar. Como contaminante modelo se utilizará tolueno ya que su biodegradación está bien determinada en la literatura.
2. Diseñar el montaje de la instalación con todos los componentes esenciales, así como los accesorios que permitan controlar todo el proceso.
3. Plantear el proceso de determinación del coeficiente global de transferencia de materia del contaminante desde la fase gaseosa a la líquida en un experimento abiótico.
4. Plantear el proceso de determinación de las constantes cinéticas de la ecuación de Monod.
5. Plantear el proceso de determinación de los parámetros óptimos de operación para obtener una eficiencia máxima de eliminación del contaminante.
6. Desarrollo de un modelo matemático que describa de forma adecuada los resultados experimentales que se deban llevar a cabo en un futuro.

Para conseguir estos objetivos será necesario llevar a cabo el siguiente plan de trabajo.

1. Realizar una revisión bibliografía para conocer el estado del arte de esta tecnología.
2. Diseñar el montaje de la planta de tratamiento.
3. Plantear la puesta a punto de la instalación y experimentos preliminares.
4. Plantear la puesta a punto del método analítico de la determinación de tolueno.

5. Proponer diferentes tipos de experimentos para el tratamiento de eliminación de tolueno de una corriente gaseosa, así como la obtención de todos los parámetros de transferencia de materia involucrados.
6. Presentación de un presupuesto de los costes aproximados de la instalación, material, reactivos y de operación.

3. Montaje experimental

Con el fin de estudiar el diseño y la puesta a punto de un biorreactor de membrana para la eliminación del tolueno contenido en una fase gaseosa es necesario utilizar un montaje experimental que como parte fundamental contendrá un reactor biológico de membrana de fibra hueca. En la Figura 12 se muestra un esquema de la instalación experimental propuesta.

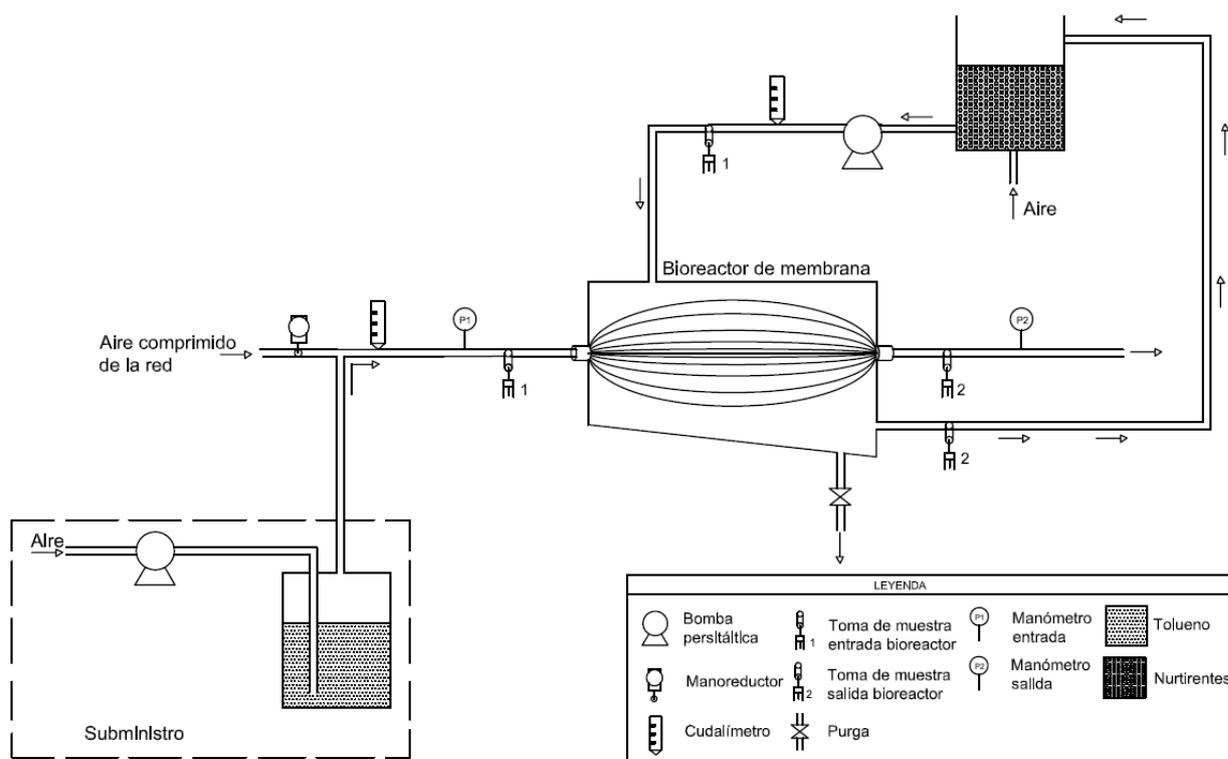


Figura 12. Esquema de la instalación experimental de un biorreactor de membrana de fibras huecas (Figura ampliada en Anexo).

Para obtener una corriente gaseosa contaminada con tolueno se dispone de un depósito cerrado que contiene tolueno líquido, se hace borbotear una corriente de aire a través del tolueno líquido, de forma que se obtiene una corriente gaseosa saturada de tolueno. El caudal de aire se regula mediante una bomba peristáltica Magdos LT-10 (Jesco, Lutz –Jesco). Esto permite obtener una concentración determinada de tolueno en

la corriente que va a entrar en el reactor biológico de membrana, circulando por el interior de las fibras huecas.

Por otro lado, si el frasco lavador que contiene el tolueno líquido se sumerge en un baño de agua a diferentes temperaturas, es posible obtener corrientes gaseosas con diferente concentración de tolueno. Otra forma de conseguir corrientes gaseosas con diferente contenido en tolueno, es utilizar caudales de aire distintos, ya que un mayor caudal de aire que circula por la tubería ejercerá un mayor efecto de succión del tolueno a través del capilar debido al efecto Venturi.

Las membranas disponibles del biorreactor son del tipo de fibra hueca de polipropileno. El biorreactor contiene 1800 fibras huecas de diámetro interno 1.8 mm y una longitud de 80 cm con una superficie de contacto fase gaseosa/biopelícula de 46 cm² con un tamaño de poro de 0.2 μm (ver ficha técnica MICRODYN® - MD 150 CP 2N en Anexo). También existen otras dos tipos de membranas de fibras huecas disponibles (MICRODYN® - MD 020 CP-2N y MICRODYN® - MD 020 TP-2N), cuyas características técnicas se muestran en el Anexo. El conjunto de fibras se hallan contenidas en el interior de una carcasa de metacrilato con una inclinación de 20°. Para medir la caída de presión que experimenta la fase gaseosa al atravesar el conjunto de fibras es necesario instalar dos manómetros digitales Serie 506 (Instrumentos Testo S.A.), uno a la entrada y el otro a la salida del biorreactor de fibras huecas. Con el fin de obtener el caudal de fase gaseosa se utiliza un caudalímetro de lectura directa del tipo OVAL (Lana Sarrate S.A.). En los puntos de entrada y salida del biorreactor se ha colocado unas válvulas y Tes en la tubería que transporta el gas contaminado, que permite tomar las muestras del gas antes y después del tratamiento biológico. Para determinar el contenido de tolueno del gas contaminado y del gas una vez ha sido tratado biológicamente se utiliza un detector fotoionizador multiPID 2 (Dräger Safety). Cada diez experimentos, y con el fin de corroborar los análisis realizados con el detector PID, se llevarán a cabo los análisis de tolueno con un cromatógrafo de gases Perkin Elmer Clarus 500. Asimismo, en los puntos de entrada y salida del biorreactor para la solución de nutrientes, se hallan colocadas dos tomas de muestras para dicha solución.

Debido a que los microorganismos presentan una temperatura óptima de crecimiento, el módulo del biorreactor de membrana sería conveniente que se situara en el interior de una cámara o baño termostático. De este modo se podría controlar mucho mejor todo el proceso de eliminación del tolueno del biorreactor.

Por el exterior de las fibras se fijaría una biopelícula de microorganismos provenientes de los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales compuesto por un consorcio de microorganismos.

La instalación dispone de un depósito con una solución acuosa que contiene los nutrientes necesarios para los microorganismos fijados sobre la fibra hueca. De acuerdo con England et al. (2005), la solución de nutrientes está formada con diferentes compuestos y concentraciones, que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Solución de nutrientes (Según England et al., 2005)

Nutriente	Concentración (mg·L⁻¹)
NH ₄ Cl	800
KH ₂ PO ₄	250
Na ₂ HPO ₄	326
KNO ₃	505
CaCl ₂ ·2H ₂ O	15,0
MgSO ₄	16,1
FeSO ₄ ·7H ₂ O	7,0
MnCl ₂	5,0
H ₃ BO ₃	0,5
ZnSO ₄	1,05
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0,5
NiCl ₂ ·6H ₂ O	0,45
CuCl ₂ ·2H ₂ O	0,3
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	10,0

Esta solución se bombea a través del biorreactor de las fibras huecas, circulando por el exterior de las mismas. Se utiliza una bomba peristáltica para hacer circular la

solución de nutrientes y con el fin de evitar las pulsaciones de la bomba a la salida de la misma se utiliza un frasco amortiguador, permitiendo con ello un flujo continuo de la solución de nutrientes. La bomba peristáltica permite que pueda ser regulada para obtener un caudal de nutriente adecuado y que no arrastre la biopelícula depositada en el exterior de las fibras huecas. Sin embargo, a veces resulta pertinente hacer circular un caudal que pueda arrastrar el exceso de biomasa que se forma alrededor de las fibras.

Cada cinco experimentos se tomarán muestras en el depósito que contiene los nutrientes con el fin de asegurar que la concentración de los mismos es la adecuada y superior a las necesidades metabólicas de los microorganismos.

El depósito de nutrientes lleva acoplado un tubo por el que se puede borbotear oxígeno con el fin de asegurar que la concentración de este componente sea adecuada para que los microorganismos de la biopelícula puedan disponer de él, y no existan condiciones de anaerobiosis.

4. Descripción y diseño de experimentos

4.1. Experimentos abióticos. Determinación de la constante global de transferencia de materia

Con el fin de determinar la constante global de transferencia de materia del contaminante (tolueno) de la fase gaseosa se plantea una serie experimental con membranas sin biopelícula. Por el interior de las fibras huecas se hace circular una corriente de aire que contiene tolueno con una concentración de $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. Se trabajará a diferentes caudales de aire, comprendidos entre 20 y $240 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Por el exterior de las membranas se hace circular la solución de nutrientes con un caudal volumétrico de $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. Con el fin de asegurar que se llega a las condiciones estacionarias se toman muestras de las corrientes de entrada y salida de cada corriente (gaseosa y líquida) al cabo de 4 horas. Se analizan los contenidos de contaminante de cada una de las corrientes. A partir de estas concentraciones y de los caudales volumétricos de la fase gaseosa y líquida es posible determinar el coeficiente global de transferencia de materia, utilizando la ecuación 32, obtenida en el apartado 1.3.3.2.2.:

$$K_M = \frac{q_L q_G}{A(q_L - q_G)} \ln \left[\frac{q_G C_{GS} + (q_L - q_G) C_{LS} - q_L C_{LE}}{q_G (C_{GS} - C_{LE})} \right] \quad (32)$$

Los valores de los coeficientes globales deberían ser independientes del caudal utilizado, y es por ello que se utilizan diferentes caudales experimentales (Dingemans et al., 2008).

4.2. Formación de la biopelícula

Para la formación de la biopelícula sobre la superficie externa de las fibras huecas se utilizan lodos activados de una planta de tratamiento de aguas residuales (Estació Depuradora d'Aigües Residuals de Manresa, el Bages). La inoculación y formación de

la biopelícula se llevará a cabo haciendo recircular 250 mL de inóculo a lo largo de la superficie externa de las membranas durante 2-3 días.

Tal como indican Álvarez-Hornos et al. (2011), con el fin de determinar si el inóculo es capaz de metabolizar el tolueno como fuente primaria de substrato se llevaron a cabo experimentos en discontinuo. Para ello, se tomaron dos botellas de 120 mL, a una de las cuales se pusieron 15 mL de solución nutriente (como botella de control) y en la otra se pusieron 10 mL de solución nutriente y 5 mL del cultivo microbiano. Las botellas se sellaron con tapones de rosca forrados de Teflon®-Mininert®. En cada una de las botellas se inyectó tolueno puro y se midió la concentración de tolueno cada 30 minutos.

4.3. Experimentos con el biorreactor. Determinación de los parámetros de la ecuación de Monod

Una vez formada la biopelícula sobre la pared externa de las fibras huecas, se llevarán a cabo diferentes experimentos con este biorreactor. Para ello, se utilizarán cinco caudales de la corriente gaseosa, comprendidos entre 20 y 240 mL·min⁻¹, que son los mismos que se han utilizado en los experimentos abióticos. Esto permite trabajar con diferentes tiempos de residencia. La corriente gaseosa que entra al biorreactor contendrá una concentración de tolueno de 10 mg·L⁻¹ (C_{GE}). Por el exterior de las fibras huecas se hace circular la corriente líquida de nutrientes con un caudal de 10 mL·min⁻¹, que se corresponde con el utilizado en los experimentos abióticos. En cada uno de los experimentos, con diferente caudal de la fase gaseosa, se determinará el contenido de tolueno de la corriente gaseosa que abandona la fibra hueca (C_{GS}). El caudal de componente eliminado de la fase gaseosa será:

$$\dot{m}_{Componente} = q_G (C_{GE} - C_{GS}) \quad (53)$$

Este será el caudal de componente (tolueno) que se transfiere desde la fase gaseosa a la líquida.

Se tomará un valor medio de la concentración de tolueno en la fase gaseosa. A partir del valor de la constante global de transferencia de materia (K_M), obtenida en el apartado 4.1 (Ecuación 32), del área lateral de la fibra hueca (A), teniendo en cuenta la ecuación 20 es posible obtener la concentración media de tolueno en fase líquida:

$$C_L = C_G - \frac{\dot{m}_{Componente}}{AK_M} \quad (54)$$

El valor obtenido es el valor de concentración de tolueno que los microorganismos de la película tienen disponible como concentración de sustrato.

Asumiendo que el caudal de tolueno transferido desde la fase gaseosa a la líquida es el que es metabolizado por los microorganismos de la biopelícula es posible determinar el valor medio de la velocidad intensiva de reacción (r). A partir de un balance sencillo de componente (tolueno) se obtiene:

$$AK_M(C_G - C_L) = Vr \quad (55)$$

Para los experimentos planteados a diferentes caudales de alimentación de la corriente gaseosa se podrán obtener diferentes valores medios de esta velocidad de reacción, así como la concentración media de sustrato (C_L) en fase líquida, disponible para los microorganismos de la biopelícula.

La ecuación de Monod se puede reordenar de modo que se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{\mu_{max}} + \frac{K_{Mo}}{\mu_{max}} \frac{1}{C_L} \quad (56)$$

A partir de los valores medios de las velocidades de reacción y de concentración de sustrato en fase líquida, se pueden representar gráficamente los valores de $1/r$ frente a C_L , que se corresponde a una recta cuya pendiente es $\frac{K_{Mo}}{\mu_{max}}$ y ordenada en el origen

$\frac{1}{\mu_{\max}}$. De estos valores es posible obtener la constante de Monod (K_{M0}) y de la velocidad específica de reacción máxima (μ_{\max}).

4.4. Determinación experimental de la constante de Henry

La constante de Henry se utiliza para el cálculo de la concentración de tolueno en el medio mineral de acuerdo con lo que describen Dewulf et al. (1995). La determinación de la constante de Henry se basa en el método de EPICS (Equilibration Partitioning In Closed System) (Lincoff y Gosset, 1984), que fue modificado posteriormente (Gosset, 1987).

Este método EPIC modificado se basa en la adición de masas de un soluto volátil (tolueno) a dos botellas selladas incubadas a una temperatura constante con un contenido diferente de líquido. Para ello, se pesan dos masas M_1 y M_2 de tolueno y se añaden a dos botellas que contienen un volumen de solución de nutrientes V_{L1} y V_{L2} , respectivamente y unos volúmenes de espacio de cabeza V_{G1} y V_{G2} . De modo que se cumple:

$$M_1 = C_{G1} \left(\frac{V_{L1}}{H} + V_{G1} \right) \quad (57)$$

$$M_2 = C_{G2} \left(\frac{V_{L2}}{H} + V_{G2} \right) \quad (58)$$

Donde C_{G1} y C_{G2} son las concentraciones de tolueno en la fase gas y H es la constante de Henry. Dividiendo la ecuación 57 por M_1 y la ecuación 58 por M_2 , se obtiene:

$$H = \frac{V_{L2} - \frac{C_{G1}M_2}{C_{G2}M_1}V_{L1}}{\frac{C_{G1}M_2}{C_{G2}M_1}V_{G1} - V_{G2}} \quad (59)$$



La constante de Henry se puede determinar si se conocen los volúmenes V_{L1} , V_{L2} , V_{G1} y V_{G2} , mediante la pesada de las masas M_1 y M_2 añadidas y determinando las concentraciones en el espacio de cabeza C_{G1} y C_{G2} .



5. Métodos analíticos

A continuación se describen los métodos analíticos para evaluar la concentración de los diferentes componentes que intervienen en el proceso global.

5.1. Determinación de tolueno

Será necesario determinar el contenido de tolueno de la fase gaseosa y de la fase líquida, en las corrientes de entrada y salida de la instalación. El tolueno de la fase gaseosa se determina mediante un detector fotoionizador MultiPID 2 y para verificar el valor de la medida cada cinco experimentos se realizará una medición mediante cromatografía gaseosa, utilizando un cromatógrafo Perkin Elmer Clarus 500, equipado con una columna capilar N65110C0, Perkin Elmer y un detector de ionización de llama (FID). Para facilitar los análisis posteriores se toman muestras de la fase gaseosa a la entrada y a la salida de las membranas utilizando bolsas Tedlar®. Las concentraciones de tolueno se miden por triplicado de cada una de las bolsas donde se han tomado las muestras.

Para la determinación del tolueno en fase líquida se toman muestras de 1 mL con una jeringuilla de plástico. Estas muestras se llevan a un vial de 4.5 mL con tapón de rosca forrado Teflon®-Mininert®, que se coloca en un baño termostático a 30°C. Al cabo de 2 horas se toma una muestra de de 1 mL del espacio gaseoso de cabeza y se inyecta al cromatógrafo de gases.

5.2. Determinación de pH

El pH de la corriente líquida se mide mediante un pH-metro Crison equipado con un electrodo Hanna Instruments.

5.3. Análisis de nutrientes

El contenido en nitratos y fosfatos de la solución de nutrientes se evaluará cada 5 experimentos mediante cromatografía iónica DIONEX (CI) ICS 1000 con automuestreador AS 40 (DIONEX).

5.4. Determinación de la concentración de oxígeno disuelto

El contenido en oxígeno disuelto dentro del tanque de nutrientes y en la entrada y salida del reactor de la fase líquida, se mide mediante una sonda Cellox 325.

6. Planificación temporal y presupuesto aproximado del trabajo

6.1. Planificación temporal del trabajo

Mediante el diagrama de Gantt se detalla la planificación hecha sobre el proyecto, el tiempo requerido para cada tarea y la dependencia que existen entre ellas (Figura 13).

Se estima que la duración total del trabajo es de 350 horas.

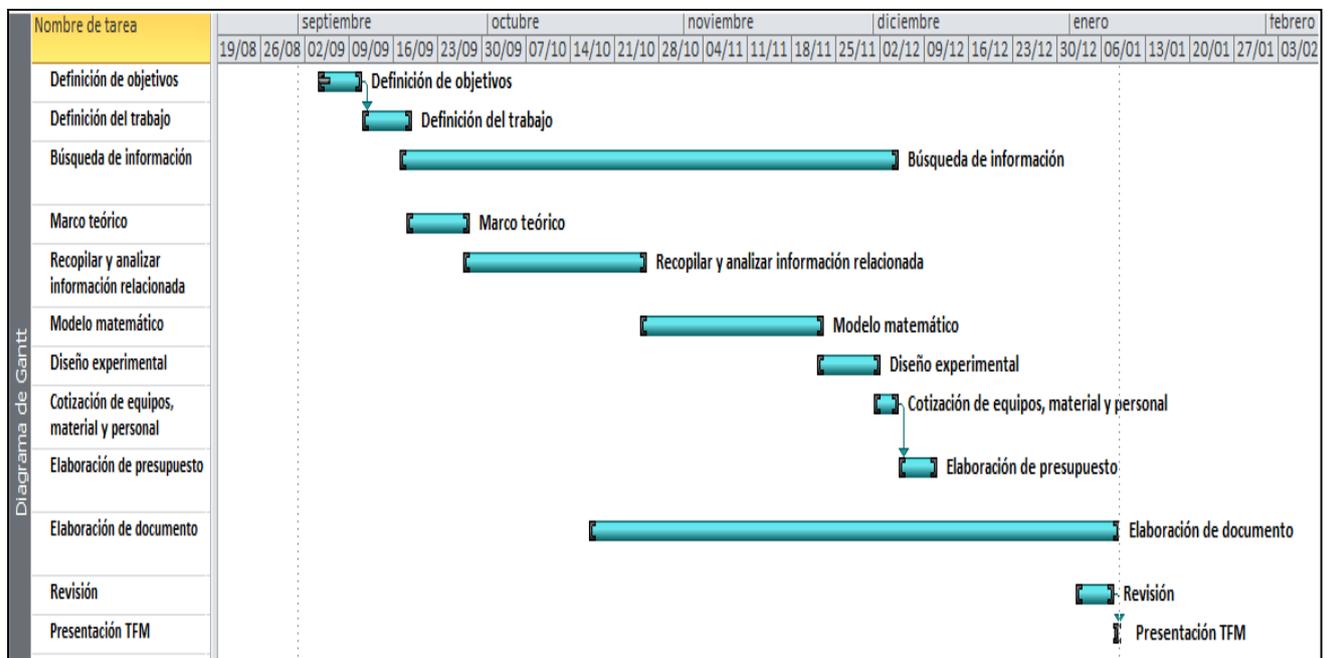


Figura 13. Diagrama de Gantt de la planificación del Trabajo final de máster (TFM).

6.2. Presupuesto aproximado del trabajo

A continuación en las Tablas 7, 8, 9, 10 y 11 se muestran los costes aproximados de las diferentes partidas, ya sean costes de inmovilizado, funcionamiento, fungibles como material y reactivos, así como de personal. Se ha de tener presente que el coste del presupuesto puede variar en función de los experimentos que se lleven a cabo.

Tabla 7. Presupuesto aproximado de fungibles.

Reactivos	Fórmula molecular	Número CAS	Casa comercial	Precio Unitario (€)	Cantidad	Precio Total (€)
Cloruro de amonio	NH ₄ Cl	12125-02-9	Scharlab	29,00	1 kg	29,00
Dihidrogeno fosfato de sodio	KH ₂ PO ₄	7778-77-0	Scharlab	33,00	1 kg	33,00
Hidrogeno fosfato de disodio anhidro	Na ₂ HPO ₄	7558-79-4	Scharlab	102,00	1 kg	102,00
Nitrato de potasio	KNO ₃	7757-79-1	Scharlab	28,00	1 kg	28,00
Cloruro de calcio dihidratado	CaCl ₂ ·2H ₂ O	10035-04-8	Scharlab	37,00	1 kg	37,00
Sulfato de magnesio anhidro	MgSO ₄	7487-88-9	Scharlab	31,00	1 kg	31,00
Sulfato de hierro heptahidratado	FeSO ₄ ·7H ₂ O	7782-63-0	Scharlab	32,00	1 kg	32,00
Cloruro de manganeso anhidro	MnCl ₂	7773-01-5	Scharlab	32,03	1 kg	32,03
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	10043-35-3	Scharlab	31,00	1 kg	31,00
Sulfato de zinc heptahidratado	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	7446-20-0	Scharlab	32,00	1 kg	32,00
Cloruro de cobalto hexahidratado	CoCl ₂ ·6H ₂ O	7791-13-1	Scharlab	213,00	1 kg	213,00
Cloruro de níquel hexahidratado	NiCl ₂ ·6H ₂ O	7791-20-0	Scharlab	109,00	1 kg	109,00
Cloruro de cobre dihidratado	CuCl ₂ ·2H ₂ O	10125-13-0	Scharlab	104,00	1 kg	104,00
Molibdato de sodio dihidratado	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	10102-40-6	Scharlab	306,00	1 kg	306,00
Tolueno	C ₆ H ₅ CH ₃ -C ₇ H ₈	108-88-3	Alco	17,50	1000 mL	17,50
Bolsa Teflon Plus 1-10 mL	-	-	Fischer Scientific	250,80	4 unids.	1.003,20
Bolsa Teflon 47 L con válvula	-	-	Fischer Scientific	69,65	4 unids.	278,61
Tubo Masterflex #25,50'	-	-	Hucoa-Erlöss	120,34	1 unid.	120,34
Tubo silicona 6x10 mm, 1 m	-	-	Hucoa-Erlöss	2,32	1 unid	2,32
Filtro aire Septum de silicona/ptfe.GL-45	-	-	Tecnical	297,19	1 unid	297,19
			Trallero&Schlee	2,20	6 unids.	13,20
						2.851,39
						IVA 21%
						598,79
SUBTOTAL						3.450,18

Tabla 8. Presupuesto aproximado del material inmovilizado de la instalación.

Material	Empresa	Cantidad	Precio Unitario (€)	Precio Total (€)
Frasco lavador gases	Afora	2	139,51	279,03
Cabezal Placa Lav. Gases	Afora	2	103,88	207,77
Válvula 012 79101200	Fluitrol Systems	1	16,79	16,79
Válvula 08 79100800	Fluitrol Systems	1	15,62	15,62
Rotámetro 21501-4 10-140 NLH	Fluitrol Systems	1	279,82	279,82
Pipeta automática research	Hucoa-Erlöss	1	217,80	217,80
Caudalímetro de lectura directa	Lana Sarrate	1	330,00	330,00
Bomba peristáltica Magdos LT-10	Jesco	1	767,25	767,25
Manorreductor GL	Hucoa-Erlöss	1	101,73	101,73
Manómetro digital	Testo	2	143,00	286,00
Metacrilato (por m ²)	Perspex	2	288,00	576,00
				4.792,65
IVA 21%				1.006,46
SUBTOTAL				5.799,11

Tabla 9. Presupuesto aproximado de los equipos y su utilización.

Equipo	Empresa	Valor adquisición (€)	Vida útil (años)	Horas utilización	Coste (€)
Cromatógrafo de gases	Perkin Elmer	21.250,24	10	400	97,03
Cromatógrafo de iónico	Dionex ICS 1000	30708,38	10	150	52,58
pH-metro	Crison	279	5	30	0,19
MULTIPIID 2	Drägersafety	3.395,75	8	200	9,69
Membrana MD 150 CP 2N	Ecotec	5.850	1	6480	4.327,40
Medidor CellOx.325	Vertex	959.00	1	200	21,90
					4.508,79
IVA 21%					946,85
SUBTOTAL					5.455,64

Tabla 10. Presupuesto aproximado de costes de personal para cromatógrafo de gases. Fuente: Basado en los precios públicos de la Universidad de Murcia.

Cromatógrafo de gases		Horas	Precio (€/h)	Coste (€)
Unidad de laboratorio	Técnico superior	0,25	68,80	17,20
	Colaborador	3,50	20,30	71,05
	Uso laboratorio	5	9,83	49,15
Unidad del equipo	Uso de equipo	3,50	43,90	153,65
	Operador	4,00	56,72	226,88
				517,93
IVA 21%				108,77
SUBTOTAL				626,70

Tabla 11. Presupuesto aproximado de costes de personal para cromatografía iónica. Basado en los precios públicos de la Universidad de Murcia.

Cromatógrafo iónico		Horas	Precio (€/h)	Coste (€)
Unidad de laboratorio	Técnico superior	0,25	68,80	17,20
	Colaborador	2,00	20,30	40,60
	Uso laboratorio	5	9,83	49,15
Unidad del equipo	Uso de equipo	2,50	52,10	130,25
	Operador	3,00	56,72	170,16
				407,36
IVA 21%				85,55
SUBTOTAL				492,91

Las dos tablas anteriores representan el coste que supone tener a una persona realizando los análisis, por cada experimento realizado.

La suma de todas las partidas presupuestarias supone un coste total del trabajo de 15.824,54 euros.

7. Conclusiones

La realización de este trabajo ha permitido cumplir los objetivos inicialmente propuestos:

1. Se ha planteado la metodología para la determinación de la constante global de transferencia de materia del componente a eliminar (tolueno) desde el seno de la fase gaseosa al seno de la fase líquida.
2. Se ha planteado la metodología para determinar los parámetros de la ecuación de Monod para el contaminante a eliminar (tolueno).
3. Se ha planteado la metodología para la determinación de la constante de Henry para el sistema propuesto (tolueno gas/tolueno solución acuosa).
4. Se ha propuesto un diseño de una planta a escala laboratorio para la eliminación de tolueno contenido en una fase gaseosa mediante la utilización de un biorreactor de membrana de fibras huecas.

En vista de todo lo expuesto en los apartados anteriores se presentan las siguientes conclusiones.

1. La eliminación de componentes contaminantes en fase gaseosa mediante la tecnología de membranas de fibra hueca con una película de microorganismos, es un proceso poco estudiado a nivel de planta piloto e industrial, aunque los diferentes trabajos encontrados en la bibliografía, muestran que puede llegar a ser un proceso viable.
2. Es necesario llevar a cabo experimentos específicos con cada tipo de contaminante e instalación, con el fin de determinar los parámetros de un funcionamiento óptimo de la instalación.
3. De los datos bibliográficos se deduce que la mejor membrana para este tipo de instalación sería una membrana compuesta por una capa de soporte porosa de fluoruro de polivinilideno (PVDF) o de poliacrilonitrilo (PAN) de entre 50 y 200

μm de espesor y de una capa densa de polidimetilsiloxano (PDMS) de entre 0,3 y 3 μm de espesor.

4. Los costes totales de instalación y operación para llevar a cabo un estudio experimental con un biorreactor de membranas de fibra hueca para la eliminación de tolueno de una fase gaseosa se estiman que son de 15.824,54 euros.

8. Plan de trabajo futuro

Una vez realizado el trabajo de bibliografía, el planteamiento de un modelo matemático coherente y la proposición de un dispositivo experimental, junto con las determinaciones analíticas pertinentes y un presupuesto aproximado, se puede proponer un plan de trabajo para el futuro. Se llevaría a cabo el montaje y puesta a punto de una instalación de un biorreactor de membrana con biopelícula para eliminar contaminantes contenidos en una fase gaseosa. Se deberán determinar los parámetros de operación que permitan obtener altas eficiencias de eliminación del contaminante.

Este plan de trabajo se puede desglosar en diferentes puntos:

1. Seleccionar la membrana que mejores resultados pueda dar con el contaminante que se desea eliminar. Como contaminante modelo se utilizará tolueno ya que su biodegradación está bien determinada en la literatura.
2. Montaje de la instalación con todos los componentes esenciales, así como los accesorios que permitan controlar todo el proceso.
3. Determinación del valor del coeficiente global de transferencia de materia del contaminante desde la fase gaseosa a la líquida en un experimento abiótico.
4. Determinación de los parámetros óptimos de operación para obtener una eficiencia óptima de eliminación del contaminante
5. Desarrollo de un modelo matemático para que describa de forma adecuada los resultados experimentales obtenidos.

Para conseguir llevar a cabo los puntos anteriormente descritos se deberá:

1. Realizar el montaje de la planta de tratamiento.
2. Puesta a punto de la instalación y experimentos preliminares.
3. Puesta a punto del método analítico de la determinación de tolueno.
4. Tratamiento del aire que contiene tolueno.
5. Obtención de resultados y discusión de los mismos.



9. Nomenclatura

A	Parámetro (ver Ec. 33)
A	Parámetro (ver Ec. 12)
A_e	Área externa de la membrana (m^2)
A_i	Área interna de la membrana (m^2)
A_m	Área media de la membrana (m^2)
B	Parámetro (ver Ec. 33)
C	Concentración ($mol \cdot m^{-3}$) ($kg \cdot m^{-3}$)
C_G	Concentración en fase gas ($mol \cdot m^{-3}$) ($kg \cdot m^{-3}$)
C_L	Concentración en fase líquida ($mol \cdot m^{-3}$) ($kg \cdot m^{-3}$)
C_L^0	Concentración media en fase líquida ($mol \cdot m^{-3}$) ($kg \cdot m^{-3}$)
d_e	Diámetro externo de la fibra hueca (m)
d_i	Diámetro interno de la fibra hueca (m)
d_p	Diámetro del poro de membrana (m)
$D_{Eff, i}$	Coefficiente efectivo de difusión de materia (difusividad) ($m^2 \cdot s^{-1}$)
$D_{K, i}$	Difusividad de Knudsen para el componente i
$D_{M, i \text{ en } j}$	Difusividad molecular del componente i a través de j
H	Constante de Henry
k	Constante reacción de Monod
k_g	Coefficiente de transferencia de materia en fase gas ($m \cdot s^{-1}$)
k_l	Coefficiente de transferencia de materia en fase líquida ($m \cdot s^{-1}$)
$k_{m, i}$	Constante de transferencia de materia del componente i a través de la membrana
K_G	Coefficiente global de transferencia de materia en fase gas ($m \cdot s^{-1}$)
K_L	Coefficiente global de transferencia de materia en fase líquida ($m \cdot s^{-1}$)
K_M	Coefficiente global de transferencia de materia ($m \cdot s^{-1}$)
K_{MO}	Constante de Monod ($mol \cdot m^{-3}$)
K_1	Constante (ver Ec. 45)
K_2	Constante (ver Ec. 46)
K_3	Constante (ver Ec. 47)
L	Longitud de las fibras huecas (m)

$\dot{m}_{Componente}$	Caudal másico de componente ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)
M_i	Masa molecular del componente i ($\text{kg}\cdot\text{kmol}^{-1}$)
N	Número de fibras huecas
N'	Pendiente recta Fig. 3
n''	Pendiente recta Fig 3
N_A	Densidad de flujo del componente que se transfiere ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
P	Presión total (atm) (Pa)
P_i	Presión parcial componente i (atm) (Pa)
Q	Caudal volumétrico ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
r	Velocidad intensiva de reacción ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)
r_S	Velocidad intensiva de reacción referida al área ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
R	Constante de gases ($8,314 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) gases ($8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
R	Coefficiente retención de una membrana (ver Ec. 1)
T	Temperatura absoluta (K)
V	Volumen (m^3)

Subíndices

A	Substrato
E	Equilibrio
E	Entrada
g, G	Gas
i	Componente i o interfase
j	Componente j
l, L	Líquido
M	Microorganismos
max	Máxima
P	Permeado
R	Retenido
S	Salida
T	Total

Letras griegas

α_{ij}	Factor de separación de una membrana (ver Ec. 2)
δ_m	Espesor de la membrana (m)
ε	Porosidad de la membrana
μ	Velocidad específica de crecimiento microbiano ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
τ	Tortuosidad de los canales de la membrana



10. Bibliografía

- Álvarez-Hornos, F.J.; Volckaert, D.; Heynderickx, P.M.; van Langenhove, H. (2011). Performance of a composite membrane bioreactor for the removal of ethyl acetate from waste air. *Bioresource Technology*, 102, 8893-8898.
- Álvarez-Hornos, F.J.; Volckaert, D.; Heynderickx, P.M.; van Langenhove, H. (2012). Removal of ethyl acetate, n-hexane and toluene from waste air in membrane bioreactor under continuous and intermittent feeding conditions. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 87, 739-745.
- Armon, R.; Laot, N.; Lev, O.; Shuval, H.; Fattal, B. (2000). Controlling biofilm formation by hydrogen peroxide and silver combined disinfectant. *Water Science and Technology*, 42, 187-193.
- Attaway, H.; Gooding, C.; Schmidt, M. (2001). Biodegradation of BTEX vapors in a silicone membrane bioreactor system. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 26, 316-325
- Beuscher, U.; Gooding, C.H. (1998). The permeation of binary gas mixtures through support structures of composite membranes. *J. Membr. Sci.*, 150, 57
- Beuscher, U.; Gooding, C.H. (1999). The influence of the porous support layer of composite membranes on the separation of binary gas mixtures. *J. Membr. Sci.*, 152, 99.
- Byoung-In, S.; Yoo, E.S.; Kim, J.B.; Rittmann, B.E. (2008). Effect of carrier size on the performance of a three-phase circulating bed biofilm reactor for removing toluene in gas stream. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 18, 1121-1129.
- Cai, Z.; Kim, D.; Sorial, G.A. (2004). Evaluation of trickle-bed air biofilter performance for MEK removal. *Journal of Hazardous Material*, 114, 153-158.
- Chen, X.; Stewart, P.S. (2000). Biofilm removal caused by chemical treatments. *Water Research*, 34, 4229-4233.
- Cox, H.J.; y Deshusses, M.A. (1999). Chemical removal of biomass from waste air biotrickling filters: Screening of chemicals of potential interest. *Water Research*, 33, 2382-2392.
- De Bo, I.; Pruuost, P.; De Steene, I.; van Langenhove, H. (2000). Selection of a membrane type and material to incorporate in a membrane bioreactor for waste gas

- treatment- In. Proceedings of the Fourth ISEB Symposium, Noordwijkerhout. The Netherlands, p. 544
- De Bo, I.; Heyman, J.; Vincke, J.; Verstraete, W.; van Langenhove, H. (2003). Dimethyl silfide removal from synthetic waste gas using a flat Poly(dimethylsiloxane)-coated composite membrane bioreactor. *Environmental Science and Technology*, 37(18), 4228-4234.
- Dewulf, J.; Drijvers, D.; van Longenhove, H. (1995). Measurements of Henry's law constant as function of temperature and salinity for the low temperature range. *Atmos. Environ.*, 29, 323-331.
- Devanny, J.S.; Deshusses, M.A.; Webster, T.S. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control*. Lewis Publishers, New York.
- Dingemans, M., Dewulf, J.; Braeckman, L.; van Langenhove, H.; Friess, K.; Hynek, V.; Sipek, M. (2008). Mass transfer characteristics for COV permeation through flat sheet porous and composite membranes: The impact of the different membrane layers on the overall membrane resistance. *Journal of Membrane Science*, 322, 234-242.
- Dolasa, A.R.; Ergas, S.J. (2000). Membrane bioreactor for cometabolism of trichloroethene air emissions. *J. Environ. Eng.*, 26, 969-973.
- Dorado Castaño, A.D. (2009) *Biofiltració de contaminants gasosos en aire: caracterització de paràmetres clau per l'estudi i modelització del creixement de biomassa*. Tesis doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Minera i dels Recursos Naturals.
- England, E.; Fitch, M.W.; Morrill, M.; Roberts, M. (2005). Toluene removal in membrane bioreactors under recirculating and non-recirculating liquid conditions. *Clean Techn. Environ.*, 7, 259-269.
- Environmental Protection Agency (EPA). Toluene Fact Sheet [en línea]. Agosto de (1994) [consultado 31 de diciembre de 2013]. Disponible en http://www.epa.gov/opptintr/chemfact/f_toluen.txt
- Environmental Protection Agency. Toluene Chemical Summary [en línea]. Agosto de (1994) [consultado 31 de diciembre de 2013]. Disponible en http://www.epa.gov/opptintr/chemfact/s_toluen.txt

- Ergas, S.J.; Shumway, L.; Fitch, M.W.; Neemann, J.J. (1999). Membrane process for biological treatment of contaminated gas streams. *Biotechnology and Bioengineering*, 63(4), 431-441.
- Fitch, M.; Neemann, J.; England, E. (2003). Mass transfer and benzene removal from air using latex rubber tubing and a hollow fiber membrane module. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 104(3), 199-214
- Gòdia, F. and López, J. (1998). Cinética microbiana. In: *Ingeniería Bioquímica*. Ed.: F. Gòdia y J. López. Editorial Síntesis, Madrid.
- Gosset, J.M. (1987). Measurement of Henry's law constants for C₁ and C₂ chlorinated hydrocarbons. *Environ. Sci. Technol.*, 21, 202-208
- Iborra, I.; Alcaina, M.I.; Álvarez, S. (2013). Membrane Processes in Juice Production. En: *Juice Processing: Quality, Safety and Value-added Opportunities*. CRC Press, Boca Raton
- Jacobs, P.; De Bo, I.; Demeester, K.; Verstraete, W.; van Langenhove, H. (2004). Toluene removal from waste air using a flat composite membrane bioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*, 85(1), 68-77.
- Kennes, C.; Thalasso, F. (1998). Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 66, 300-304.
- Kim, D.-J.; Kim, H. (2005). Degradation of toluene vapor in a hydrophobic polyethylene hollow fiber membrane bioreactor with *Pseudomonas putida*. *Process Biochemistry*, 40, 2015-2020.
- Kraakman, N.J.R.; Rocha-Rios, J. (2011). Review of mass transfer aspects for biological gas treatment. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 91, 873-886
- Kumar, A.; Dewulf, J.; van Langenhove, H. (2008a). Membrane-based biological gas treatment. *Chemical Engineering Journal*, 136, 82-91.
- Kumar, A.; Dewulf, J.; Luvsanjamba, M.; van Langenhove, H. (2008b). Continuous operation of membrane bioreactor treating toluene vapors by *Burkholderia vietnamiensis* G4. *Chemical Engineering Journal*, 140, 193-200.
- Kumar, A.; Dewulf, J.; Verduyssen, A.; van Langenhove, H. (2009a). Performance of a composite membrane bioreactor treating toluene vapors: Inoculum selection, reactor performance and behavior under transient conditions. *Bioresource Technology*, 100, 2381-2387.
- Kumar, A.; Ergas, S.J.; Yuan, X.; Fitch, M.; Min K-N.; Dewulf, J.; van Langenhove, H. (2010). Modeling of a hollow fiber membrane biofilm reactor for nitric oxide

- renoval: Model development and experimental validation. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 85, 423-428.
- Kumar, A.; Chilongo, T.; Dewulf, J.; Ergas, S.J.; van Langenhove, H. (2010b). Gaseous dimetil sulphide renoval in a membrane biofilm reactor: Effect of methanol on reactor performance. *Bioresource Technology*, 101, 8955-8959.
- Kumar, A.; Volckaerrt, D.; Pérez, R.; Muñoz, R.; van Langenhove, H. (2013). A membrane birreactor for the simultaneous tratment of acetone, toluene, limonene and hexane at trace level concentrations. *Water Research*, 47, 2199-2212.
- Laurenzis, A.; Heits, H.; Wubker, S.M.; Heinze, U.; Friedrich, C.; Werner, U. (1998). Continuous biological waste treatment in a stirred trickle-bed reactor with discontinuous removal of biomass. *Biotechnology and Bioengineering*, 57, 497-503.
- Lebrero, R.; Volckaert, D.; Pérez, R.; Muñoz, R.; van Langenhove, H. (2013). A membrane bioreactor forr the simultaneous treatment of acetone, toluene, limonene and hexane at trace level concentrations. *Water Resarch*, 47, 2199-2212.
- Levenspiel, O. (1986). *El Omnilibro de los Reactores Químicos*. Ed. Reverté, Barcelona.
- Lincoff, A.H.; Gosset, J.M (1984). The determination of Henry's constant for volatile organics by equilibrium partitioning in close Systems. En *Gas Transfer at Water Surfaces* (Editado por Brutsaert W. y Jirka, G.H.). Reidel, Dordrecht.
- Luvsanjamba, M.; Kumar, A.; van Langenhove, H. (2008). Removal of dimethyl sulfide in a thermophilic membrane birreactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 83, 1218-1225.
- Minambiente. (2013). *Guías para Manejo Seguro y Gestión Ambiental de 25 Sustancias Químicas. 4.25 Tolueno*. [consultado 31 de diciembre de 2013]. Disponible en <http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia25.pdf>
- Molina, T. (2012). Conferència sobre Canvi Climàtic, en Institut Estudis Ilerdencs, Lleida.
- Mortgat, B. (2001). Traitement biologique des odeurs et COV. *Environnement et Techniques*, 203, 39-42.
- Mudliar, S.; Girri, B.; Padoley, K.; satpute, D.; Dixit, R.; Bhatt, P.; Pandey, R.; Juwarkar, A.; Vaidya, A. (2010). Bioreactors for treatment of VOCs and odours – A review. *Journnal of Environmental Management*, 91, 1039-1054.

- Organización Mundial de la Salud (OMS). Environmental Health Criteria 52, Toluene [en línea]. (1986) [consultado 31 de diciembre de 2013]. Disponible en <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc52.htm>
- Ottengraf, S.P.P. (1987). Biological systems for waste gas elimination. *Trends in Biotechnology*, 5, 132-136.
- Parvatiyar, M.G.; Govind, R.; Bishop, D.F. (1996a). Biodegradation of toluene in a membrane biofilter. *Journal of Membrane Science*, 119, 17-24.
- Parvatiyar, M.G.; Govind, R.; Bishop, D.F. (1996b). Treatment of trichloroethylene (TCE) in a membrane biofilter. *Biotechnology and Bioengineering*, 50, 57-64.
- Pol, A.; Op den Camp, H.J.M.; Mees, S.G.M., Kerrsten, M.a.S.H.; Drift, C. (1994). Isolation of a dimethylsulfide-utilizing *Hyphomicrobium* species and its application in biofiltration of polluted air. *Biodegradation*, 5, 105-112.
- Reij, M.W.; de Gooijer, K.D.; de Bont, J.A.M.; Hartmans, S. (1995). Membrane bioreactor with porous hydrophobic membrane as a gas-liquid contactor for waste gas treatment. *Biotechnology and Bioengineering*, 45, 105-115.
- Reij, M.W.; Hartmans, S. (1996). Propene removal from synthetic waste gas using a hollow-fibre membrane bioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 45, 730-736.
- Reij, M.W.; Hamann, E.K.; Hartmans, S. (1997). Biofiltration of air containing low concentration of propene using a membrane bioreactor. *Biotechnol. Prog.*, 13, 380-386.
- Reij, M.W.; Keuremtjies, J.T.F.; Hartmans, S. (1997). Membrane bioreactors for waste treatment. *Journal of Biotechnology*, 59, 155-167.
- Sercu, B.; Nuñez, D.; Aroca, G.; Boon, N.; Verstrate, W.; van Langenhove, H. (2005a). Inoculation and start-up of a biotrickling filter removing dimethyl sulfide. *Chem. Eng. J.*, 113, 127-134.
- Sercu, B.; Nuñez, D.; van Langenhove, H.; Aroca, G.; Verstrate, W. (2005b). Operational and microbiological aspects of a bioaugmented two-stage biotrickling filter removing hydrogen sulfide and dimethyl sulfide. *Biotechnol. Bioeng.*, 90, 259-269.
- Shareefdeen, Z.; Singh, A. (2005). *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Ed. Springer, Berlin, Heidelberg, Nueva York.

- Smet, E.; Casaya, G.; van Longenhove, H.; Verstrate, W. (1996a). The effect of inoculation and type of carrier material used don the biofiltration of metil sílfides. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 45, 293-298.
- Smet, E.; van Longenhove, H.; Verstrate, W. (1996b). Long-term stability of a biofilter treating dimetil sílfide. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 46, 191-196.
- Singh, R.S.; Agnihotrim S.S.; Upadhyay, S.N. (2006), Removal of toluene vapour using agro-waste as biofilter media. *Bioresurrce Technology*, 97, 2296-2301
- Smith, F.L.; Sorial, G.A.; Suidan, M.T.; Breen, A.W.; Biswas, P.; Brenner, R.C. (1996). Development of two biomass control strategies for extended, stable operation of highly efficient biofilters with high toluene loadings. *Environmental Science and Technology*, 30, 1744-1751.
- Susanto, H.; Franzkab, S.; Ulbrichta, M. (2007). Dextran fouling of polyethersulfone ultrafiltration membranes—Causes, extent and consequences. *Journal of Membrane Science* 296: 147–155.
- Wagner, J. (2001). *Membrane Filtration Handbook*. Practical Tips and Hints. Sc. Chem. Eng. Second Edition, Revision 2. Printed by Osmonics, Inc.
- Wu, G.; Leroux, A.; Bresinsky, R.; Heitz, R. (1999). Peat based toluene biofiltration: A new approach to the control of nutrients and pH. *Environmental Technology*, 20, 367-376.
- Wubker, S.M.; Laurenzis, A.; Werner, U. (1997). Controlled biomass formation and kinetics of toluene degradation in a bioscruber and in a reactor with a periodically moved trickle-bed. *Biotechnology and Bioengineering*, 55, 686-692.
- Zhang, L.; Hirai, M.; Shoda, M. (1991). Removal Characteristics of dimetil sílfide, methanethiol and hydrogen-sulfide by *Hyphomicrobium* sp. 155 isolated from peat biofilter. *J. Ferment. Bioeng.*, 72, 392-396.

Recursos electrónicos:

Universidad de Murcia [en línea]. [Consultado 31 de diciembre de 2013]. Disponible en <http://www.um.es/sai/documentos/tarifas>

11. Anexos

- Esquema ampliado de la instalación experimental de un biorreactor de membrana de fibras huecas

- Ficha de seguridad del tolueno

- Ficha técnica de las membranas de fibras huecas:
 - * D_MD150_CP_2N
 - * D_MD020_CP_2N
 - * D_MD020_TP_2N

- Ficha técnica del pH-metro

- Ficha técnica del detector fotoionizador multiPID 2

- Ficha técnica del sensor de oxígeno disuelto Cellox 325

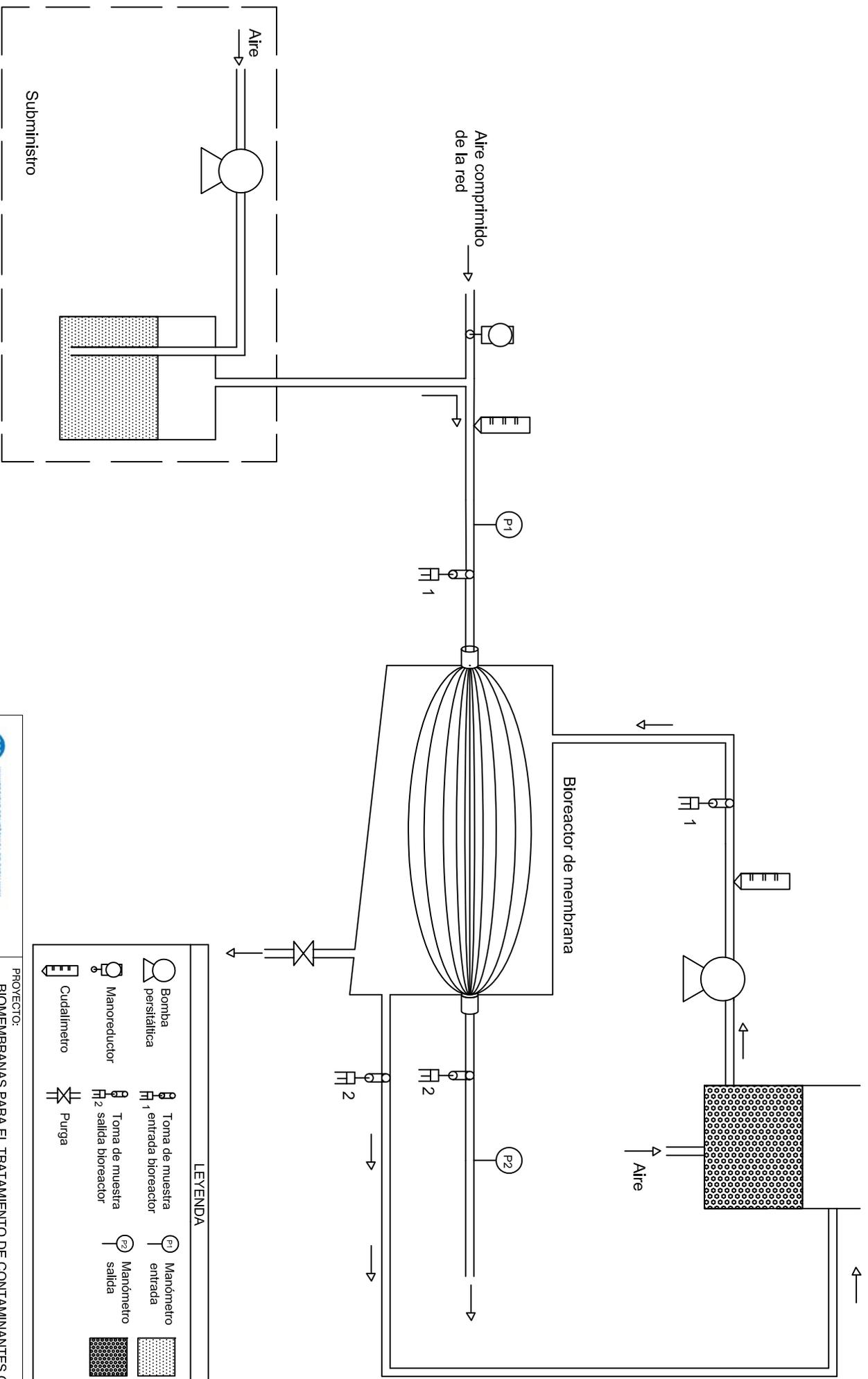
- Ficha técnica del caudalímetro

- Ficha técnica del detector bomba peristáltica Magdos LT-10

- Ficha técnica del detector manorreductor

- Ficha técnica del manómetro digital

- Ficha técnica pipeta automática research



LEVENDA			
	Bomba peristáltica		Manómetro entrada
	Manómetro		Manómetro salida
	Cudalímetro		Purga
	Tolueno		Nutrientes
	Toma de muestra		Toma de muestra salida bioreactor
	H1, entrada bioreactor		H2, salida bioreactor

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA Escola Politècnica Superior d'Enginyeria		PROJECTE: BIOMEMBRANAS PARA EL TRATAMIENTO DE CONTAMINANTES GASEOSOS	
ESCALA:	S/E	Nº PLANO:	1
PLANO:	ESQUEMA PROPUESTA DISPOSITIVO EXPERIMENTAL		
DATA:	10/01/14	TITULAR:	RAQUEL IBARZ MARTÍNEZ

Fichas Internacionales de Seguridad Química

TOLUENO		ICSC: 0078
Octubre 2002		
Metilbenceno Fenilmetano	Toluol	
CAS: 108-88-3	C₆H₅CH₃ / C₇H₈	
RTECS: XS5250000	Masa molecular: 92,1	
NU: 1294		
CE Índice Anexo I: 601-021-00-3		
CE / EINECS: 203-625-9		

TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SÍNTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Altamente inflamable.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Polvo, AFFF, espuma, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas vapor/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Evitar la generación de cargas electrostáticas (p. ej., mediante conexión a tierra). NO utilizar aire comprimido para llenar, vaciar o manipular. Utilícense herramientas manuales no generadoras de chispas.	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.

EXPOSICIÓN		¡HIGIENE ESTRICTA! ¡EVITAR LA EXPOSICIÓN DE MUJERES (EMBARAZADAS)!	
Inhalación	Tos. Dolor de garganta. Vértigo. Somnolencia. Dolor de cabeza. Náuseas. Pérdida del conocimiento.	Ventilación, extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Piel seca. Enrojecimiento.	Guantes de protección.	Quitar las ropas contaminadas. Aclarar y lavar la piel con agua y jabón. Proporcionar asistencia médica.
Ojos	Enrojecimiento. Dolor.	Gafas ajustadas de seguridad	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad), después proporcionar asistencia médica.
Ingestión	Sensación de quemazón. Dolor abdominal. (Ver Inhalación).	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca. NO provocar el vómito. Proporcionar asistencia médica.

DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO
¡Evacuar la zona de peligro en caso de grandes derrames! Consultar a un experto en caso de grandes derrames. Eliminar toda fuente de ignición. Ventilar. Recoger el líquido procedente de la fuga en recipientes precintables. Absorber el líquido residual en arena o absorbente inerte y trasladarlo a un lugar seguro. NO verterlo en el alcantarillado. NO permitir que este producto químico se incorpore al ambiente. Protección personal: equipo autónomo de respiración en caso de grandes derrames.	Clasificación UE Símbolo: F, Xn R: 11-38-48/20-63-65-67 S: (2-)36/37-46-62 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 3 Grupo de Envasado NU: II
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO
Ficha de Emergencia de Transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-30S1294. Código NFPA: H2; F3; R0;	A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes.

IPCS
International Programme on Chemical Safety



Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2003

VÉASE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

Fichas Internacionales de Seguridad Química

TOLUENO**ICSC: 0078**

DATOS IMPORTANTES

ESTADO FÍSICO; ASPECTO:

Líquido incoloro, de olor característico.

PELIGROS FÍSICOS:

El vapor se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas. Como resultado del flujo, agitación, etc., se pueden generar cargas electrostáticas.

PELIGROS QUÍMICOS:

Reacciona violentamente con oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión.

LÍMITES DE EXPOSICIÓN:

TLV: 50 ppm como TWA; (piel); A4 (no clasificable como cancerígeno humano); BEI establecido; (ACGIH 2004).
MAK: Riesgo para el embarazo: grupo C; (DFG 2004).
LEP UE: 192 mg/m³, 50 ppm como TWA; 384 mg/m³, 100 ppm como STEL (piel) (EU 2006).

VÍAS DE EXPOSICIÓN:

La sustancia se puede absorber por inhalación, a través de la piel y por ingestión.

RIESGO DE INHALACIÓN:

Por evaporación de esta sustancia a 20 °C se puede alcanzar bastante rápidamente una concentración nociva en el aire.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN:

La sustancia irrita los ojos y el tracto respiratorio. La sustancia puede afectar al sistema nervioso central. La ingestión del líquido puede dar lugar a la aspiración del mismo por los pulmones y a la consiguiente neumonitis química. La exposición a altas concentraciones puede producir arritmia cardíaca y pérdida del conocimiento.

EFFECTOS DE EXPOSICIÓN PROLONGADA O REPETIDA:

El líquido desengrasa la piel. La sustancia puede afectar a sistema nervioso central. La exposición a esta sustancia puede potenciar el daño auditivo causado por la exposición a ruido. La experimentación animal muestra que esta sustancia posiblemente cause efectos tóxicos en la reproducción humana.

PROPIEDADES FÍSICAS

Punto de ebullición: 111 °C
Punto de fusión: -95 °C
Densidad relativa (agua = 1): 0,87
Solubilidad en agua: ninguna
Presión de vapor, kPa a 25 °C: 3,8
Densidad relativa de vapor (aire = 1): 3,1

Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20 °C (aire = 1): 1,01
Punto de inflamación: 4 °C c.c.
Temperatura de autoignición: 480 °C
Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 1,1-7,1
Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: 2,69

DATOS AMBIENTALES

La sustancia es tóxica para los organismos acuáticos.

NOTAS

Está indicado un examen médico periódico dependiendo del grado de exposición. El consumo de bebidas alcohólicas aumenta el efecto nocivo.
Esta ficha ha sido parcialmente actualizada en octubre de 2004: ver Clasificación UE, Respuesta de Emergencia, y en octubre de 2006: ver Límites de exposición.

INFORMACIÓN ADICIONAL

Límites de exposición profesional (INSHT 2011):

VLA-ED: 50 ppm; 192 mg/m³

VLA-EC: 100 ppm, 384 mg/m³

VLB: 0,5 mg/L en orina de o-cresol; 1,6 g/g creatinina en orina de ácido hipúrico; 0,05 mg/L en sangre.

Notas: vía dérmica. Esta sustancia tiene establecidas restricciones a la fabricación, comercialización o al uso especificadas en el Reglamento REACH.

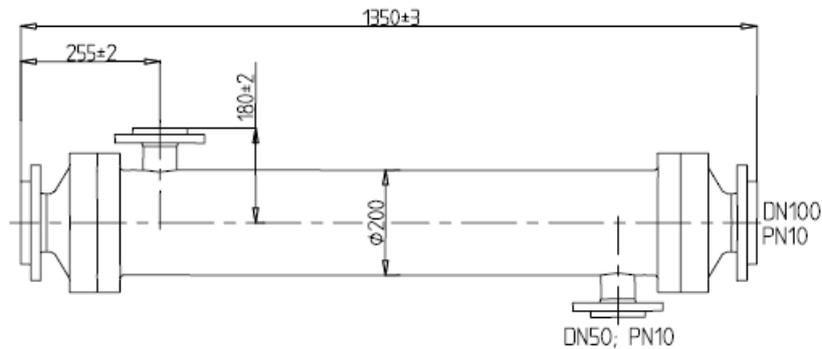
Nota legal

Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.

MICRODYN[®] - MD 150 CP 2N

- Filtermodule / Filter Modules -

Datenblatt / Data Sheet



alle Maße in mm

all dimensions in mm

Anschlüsse

Konzentrat	Flanschverbindung DN 100, DIN 2501
Filtrat	Flanschverbindung DN 50, DIN 2501

Connectors

Concentrate	Backing Flange DN 100, DIN 2501
Permeate	Backing Flange DN 50, DIN 2501

Material

Gehäuse	Polypropylen
Membran	Polypropylen
Vergussmasse	Polyurethan
Dichtung	EPDM

Material

Housing	Polypropylene
Membrane	Polypropylene
Potting	Polyurethane
Sealing	EPDM

Membran- und Moduldaten

Anzahl der Kapillare		1800
Innendurchmesser	mm	1,8
Porengröße	µm	0,2
Filterfläche innen	m ²	10,0
Anströmfläche	cm ²	46,0

Membrane and Module Data

Number of capillaries		1800
Inner diameter	mm	1.8
Pore size	µm	0.2
Membrane area inside	m ²	10.0
Free flow area	cm ²	46.0

Betriebsdaten für die Membran

Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 25 °C	bar	1,6
Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 40 °C	bar	1,4
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 25 °C	bar	1,0
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 40 °C	bar	0,5
Betriebstemperatur	°C	5 - 40
Pumpenvolumen für eine Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s	l/h	16400

Membrane Operational Data

Max. transmembrane pressure inside to outside at 25 °C	bar	1.6
Max. transmembrane pressure inside to outside at 40 °C	bar	1.4
Max. backpulse pressure above outlet pressure at 25 °C	bar	1.0
Max. backpulse pressure above outlet pressure at 40 °C	bar	0.5
Processing temperature	°C	5 - 40
Feed flow rate at axial velocity of 1 m/s	l/h	16400

Betriebsdaten für das Gehäuse

Max. Druck	bar	3
------------	-----	---

Housing Operational Data

Max. pressure	bar	3
---------------	-----	---

MICRODYN-NADIR behält sich das Recht vor, Angaben ohne vorherige Ankündigung anzupassen.
We reserve the right to change specifications without prior notification.

MICRODYN-NADIR GmbH
Industriepark Kalle-Albert
Rheingaustraße 190 – 196
D-65203 Wiesbaden

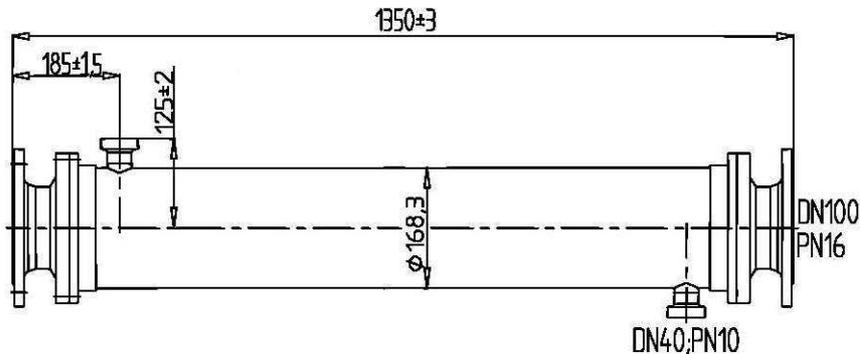
Telefon: +49 (0) 611/962-6001
Telefax: +49 (0) 611/962-9237
E-Mail: info@microdyn-nadir.de
Internet: www.microdyn-nadir.de



MICRODYN[®] - MD 150 CS 2N

- Filtermodule / Filter Modules -

Datenblatt / Data Sheet



alle Maße in mm

all dimensions in mm

Anschlüsse			Connectors		
Konzentrat		Flansch DN100, PN16, DIN 2633	Concentrate		Flange DN100, PN 16, DIN 2633
Filtrat		Rohrverschraubung DN 40, DIN 11851	Permeate		Union DN 40, DIN 11851
Material			Material		
Gehäuse		Edelstahl 1.4571	Housing		Stainless steel 1.4571
Membran		Polypropylen	Membrane		Polypropylene
Vergussmasse		Polyurethan	Potting		Polyurethane
Dichtung		EPDM	Sealing		EPDM
Membran- und Moduldaten			Membrane and Module Data		
Anzahl der Kapillare		1800	Number of capillaries		1800
Innendurchmesser	mm	1,8	Inner diameter	mm	1.8
Porengröße	µm	0,2	Pore size	µm	0.2
Filterfläche innen	m ²	10,0	Membrane area inside	m ²	10.0
Anströmfläche	cm ²	46,0	Free flow area	cm ²	46.0
Betriebsdaten für die Membran			Membrane Operational Data		
Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 25 °C	bar	1,6	Max. transmembrane pressure inside to outside at 25 °C	bar	1.6
Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 40 °C	bar	1,4	Max. transmembrane pressure inside to outside at 40 °C	bar	1.4
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 25 °C	bar	1,0	Max. backpulse pressure above outlet pressure at 25 °C	bar	1.0
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 40 °C	bar	0,5	Max. backpulse pressure above outlet pressure at 40 °C	bar	0.5
Betriebstemperatur	°C	5 - 40	Processing temperature	°C	5 - 40
Pumpenvolumen für eine Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s	l/h	16400	Feed flow rate at axial velocity of 1 m/s	l/h	16400
Betriebsdaten für das Gehäuse			Housing Operational Data		
Max. Druck	bar	3	Max. pressure	bar	3

MICRODYN-NADIR behält sich das Recht vor, Angaben ohne vorherige Ankündigung anzupassen.
We reserve the right to change specifications without prior notification.

MICRODYN-NADIR GmbH
Industriepark Kalle-Albert
Rheingaustraße 190 – 196
D-65203 Wiesbaden

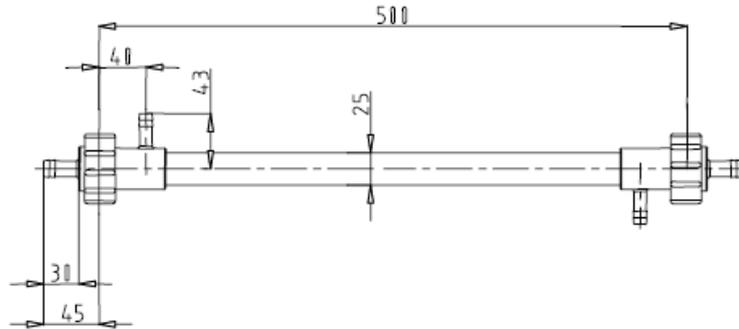
Telefon: +49 (0) 611/962-6001
Telefax: +49 (0) 611/962-9237
E-Mail: info@microdyn-nadir.de
Internet: www.microdyn-nadir.de



MICRODYN[®] - MD 020 CP 2N

- Filtermodule / Filter Modules -

Datenblatt / Data Sheet



alle Maße in mm

all dimensions in mm

Anschlüsse

Konzentrat	Schlauchtülle Ø12mm
Filtrat	Schlauchtülle Ø10mm

Connectors

Concentrate	Hose nozzle Ø12mm
Permeate	Hose nozzle Ø10mm

Material

Gehäuse	Polypropylen
Membran	Polypropylen
Vergussmasse	Polyurethan

Material

Housing	Polypropylene
Membrane	Polypropylene
Potting	Polyurethane

Membran- und Moduldaten

Anzahl der Kapillaren		40
Innendurchmesser	mm	1,8
Porengröße	µm	0,2
Filterfläche innen	m ²	0,1
Anströmfläche	cm ²	1,0

Membrane and Module Data

Number of capillaries		40
Inner diameter	mm	1.8
Pore size	µm	0.2
Membrane area inside	m ²	0.1
Free flow area	cm ²	1.0

Betriebsdaten für die Membran

Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 25 °C	bar	1,6
Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 40 °C	bar	1,4
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 25 °C	bar	1,0
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 40 °C	bar	0,5
Betriebstemperatur	°C	5 - 40
Pumpenvolumen für eine Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s	l/h	360

Membrane Operational Data

Max. transmembrane pressure inside to outside at 25 °C	bar	1.6
Max. transmembrane pressure inside to outside at 40 °C	bar	1.4
Max. backpulse pressure above outlet pressure at 25 °C	bar	1.0
Max. backpulse pressure above outlet pressure at 40 °C	bar	0.5
Processing temperature	°C	5 - 40
Feed flow rate at axial velocity of 1 m/s	l/h	360

Betriebsdaten für das Gehäuse

Max. Druck	bar	3
------------	-----	---

Housing Operational Data

Max. pressure	bar	3
---------------	-----	---

MICRODYN-NADIR behält sich das Recht vor, Angaben ohne vorherige Ankündigung anzupassen.
We reserve the right to change specifications without prior notification.

MICRODYN-NADIR GmbH
Industriepark Kalle-Albert
Rheingaustraße 190 – 196
D-65203 Wiesbaden

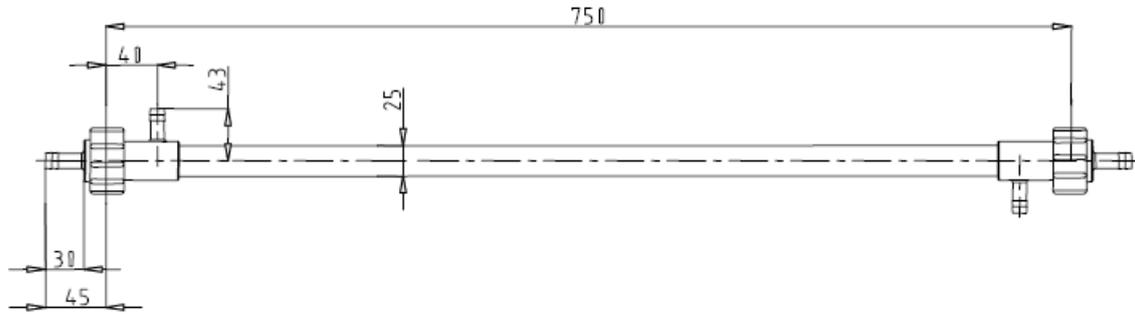
Telefon: +49 (0) 611/962-6001
Telefax: +49 (0) 611/962-9237
E-Mail: info@microdyn-nadir.de
Internet: www.microdyn-nadir.de



MICRODYN® - MD 020 TP 2N

- Filtermodule / Filter Modules -

Datenblatt / Data Sheet



alle Maße in mm

all dimensions in mm

Anschlüsse

Konzentrat	Schlauchtülle Ø12mm
Filtrat	Schlauchtülle Ø10mm

Connectors

Concentrate	Hose nozzle Ø12mm
Permeate	Hose nozzle Ø10mm

Material

Gehäuse	Polypropylen
Membran	Polypropylen
Dichtung	EPDM

Material

Housing	Polypropylene
Membrane	Polypropylene
Sealing	EPDM

Membran- und Moduldaten

Anzahl der Rohre		3
Innendurchmesser	mm	5,5
Porengröße	µm	0,2
Filterfläche innen	m ²	0,036
Anströmfläche	cm ²	0,72

Membrane and Module Data

Number of tubes		3
Inner diameter	mm	5.5
Pore size	µm	0.2
Membrane area inside	m ²	0.036
Free flow area	cm ²	0.72

Betriebsdaten für die Membran

Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 25 °C	bar	3,0
Max. transmembraner Druck von innen nach außen bei 60 °C	bar	2,0
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 25 °C	bar	2,0
Max. transmembraner Rückspüldruck über Ausgangsdruck bei 40 °C	bar	1,5
Betriebstemperatur	°C	5 - 60
Pumpenvolumen für eine Strömungsgeschwindigkeit von 1 m/s	l/h	255

Membrane Operational Data

Max. transmembrane pressure inside to outside at 25 °C	bar	3.0
Max. transmembrane pressure inside to outside at 60 °C	bar	2.0
Max. backpulse pressure above outlet pressure at 25 °C	bar	2.0
Max. backpulse pressure above outlet pressure at 40 °C	bar	1.5
Processing temperature	°C	5 - 60
Feed flow rate at axial velocity of 1 m/s	l/h	255

Betriebsdaten für das Gehäuse

Max. Druck	bar	3
------------	-----	---

Housing Operational Data

Max. pressure	bar	3
---------------	-----	---

MICRODYN-NADIR behält sich das Recht vor, Angaben ohne vorherige Ankündigung anzupassen.
We reserve the right to change specifications without prior notification.

MICRODYN-NADIR GmbH
Industriepark Kalle-Albert
Rheingaustraße 190 – 196
D-65203 Wiesbaden

Telefon: +49 (0) 611/962-6001
Telefax: +49 (0) 611/962-9237
E-Mail: info@microdyn-nadir.de
Internet: www.microdyn-nadir.de





Maletín de transporte.
Con todos los elementos
necesarios para trabajar.

Teclado intuitivo
de calidad industrial.

Conector MP-5.
Multipin de 5 contactos.

Display LCD
retroiluminado.

Instrumento ergonómico y robusto con estanqueidad IP67; resistente en todas las condiciones de trabajo.
El PH 25+ destaca por su simplicidad de manejo, gran calidad y excelente precio.

Maletín de transporte que incluye todos los accesorios necesarios para una correcta medición.
El instrumento se sostiene en posición semi-levantada y los sensores y frascos en posición vertical, facilitando la calibración y medida.

Disponible en versiones KIT que incluyen, además de la maleta y los accesorios, un sensor.
Una gama de sensores de gran calidad que cubre todo tipo de aplicaciones, desde aguas limpias hasta muestras viscosas y "sucias".

En CRISON encontrará un soporte técnico profesional y altamente especializado.
Los instrumentos portátiles CRISON tienen 5 años de garantía y el respaldo de un ágil servicio post-venta.

Distribuidor CRISON autorizado:

Especificaciones

Variables medidas	pH	mV	Temperatura
Escalas	-2.00...19.99	± 1400	-20...150 °C (-4... 302 °F)
Resolución (±1 dígito)	0.01	1/0.1	0.1 °C (0.1 °F)
Error de medida (±1 dígito)	≤ 0.01	≤ 1	≤ 0.2 °C (≤ 0.4 °F)
Reproducibilidad (±1 dígito)	± 0.01	± 1	± 0.1 °C (± 0.1 °F)

Impedancia de entrada

> 10¹² Ω. El cambio de alta a baja impedancia se realiza en el conector del electrodo.

Compensación de temperatura

Manual o mediante sensor de temperatura Pt1000 integrado.

Calibración de pH

Con 1, 2 o 3 tampones a escoger entre los valores: 2.00, 4.01, 7.00, 9.21 y 10.01 (a 25 °C).

El instrumento reconoce de forma automática los valores de pH de los tampones a distintas temperaturas.

Calibración manual a un valor cualquiera.

Calibrado teórico (configuración de fábrica).

Calibración redox

Con 1 patrón, 220 mV (a 25 °C).

Reconoce de forma automática los valores de mV del patrón a distintas temperaturas.

Calibración manual a un valor cualquiera.

Calibrado teórico (configuración de fábrica).

Reajuste de temperatura

Corrección de la desviación de la sonda C.A.T. a 25°C y 85°C

Modos de medida

Por estabilidad y en continuo.

Conector

MP-5, multipín de 5 contactos.

Pantalla

De cristal líquido, retroiluminada, con pictogramas.

Teclado

De membrana, 6 teclas.

Condiciones ambientales

Temperatura de funcionamiento: de 0°C a 50°C

Temperatura de almacenamiento: de -15°C a 65°C

80% de humedad relativa (sin condensación).

Directivas baja tensión y CEM

Según CE, UNE-EN 61010-1 y UNE-EN 61326-1.

Gestión de energía

Desconexión automática tras 5 minutos de inactividad (esta opción puede ser desactivada por el usuario).

Alimentación

3 pilas de 1.5V, tipo AA. Autonomía de más de 500 horas.

Contenedor

Material carcasa ABS. Grado de protección IP 67.

Parámetros físicos

Peso 300 g. Dimensiones 186 x 73 x 38 mm.

Especificaciones sujetas a cambios sin previo aviso.



Electrodos recomendados

- Electrodo de cable fijo y mango ergonómico.
- Con conector MP-5 (5 contactos).
- Cubren la mayoría de las aplicaciones.
- El protector de almacenamiento se rosca directamente en el mango.
- Versiones **T** con sensor de temperatura Pt 1000 incorporado.

50 50 y 50 50 **T**, Low Cost.

De uso general, cuerpo de plástico.

pH 0 ... 14, Temp. 0 ... 80 °C.

50 51 y 50 51 **T**, Medios difíciles.

Diafragma abierto, cuerpo de vidrio.

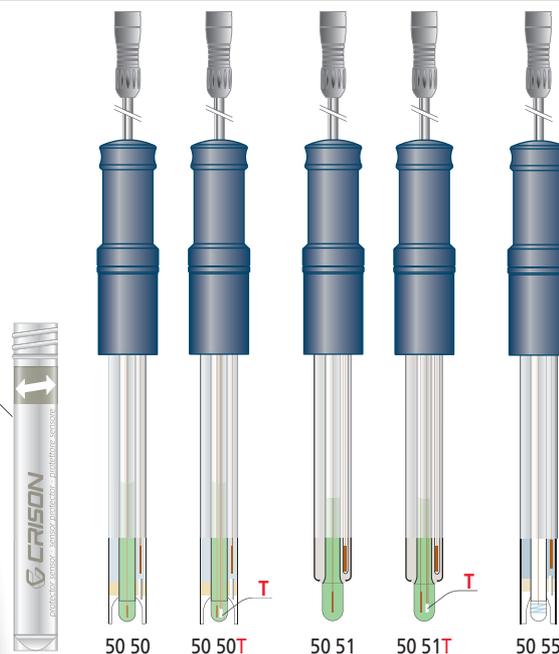
pH 2 ... 14, Temp. 0 ... 80 °C.

50 55, Redox.

Electrodos de platino (**Pt**), cuerpo de plástico.

± 2000 mV, Temp. 0 ... 80 °C.

Protector de almacenamiento



i
Solicite información sobre electrodos de penetración y otras aplicaciones

T= sensor de temperatura

Cómo pedirlo

Código	Descripción	Accesorios incluidos
25 02	PH 25+, con accesorios, sin electrodo.	
25 50	Kit completo: PH 25+, con accesorios y electrodo 50 50	• Maletín de transporte.
25 50 T	Kit completo: PH 25+, con accesorios y electrodo + sensor temperatura 50 50 T	• Disoluciones: pH 4, pH 7, pH 9, KCl y Redox 220 mV.
25 51	Kit completo: PH 25+, con accesorios + electrodo 50 51	• Tubos para calibración.
25 51 T	Kit completo: PH 25+, con accesorios y electrodo + sensor temperatura 50 51 T	• Frascos para muestra y lavado de sensores
25 55	Kit completo: PH 25+, con accesorios + electrodo 50 55 (Redox).	• Protector de trabajo (sólo con electrodos 50 51, 50 52 y sus versiones T).
		• Manual del usuario.

Dräger Multi-PID 2

El Dräger Multi-PID 2 es la siguiente generación de detectores fiables de fotoionización para compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Su innovadora tecnología PID combina alta sensibilidad y robustez con adecuación para diferentes aplicaciones como muestreo de tierra, agua o detección de fugas y medidas en espacios confinados.



Amplio rango de medida

Equipado con una lámpara UV estándar de 10.6 eV el Dräger Multi-PID 2 cubre un rango de medida de 0 a 2.000 ppm. Una sonda de dilución adicional amplía el rango de medida hasta 20.000 ppm.

Extensa biblioteca de gases

La biblioteca de gases incorporada contiene hasta 70 sustancias. Otras 60 sustancias están identificadas y pueden sustituirse en la librería. Para componentes adicionales específicos del cliente, el factor de respuesta puede ser cuantificado por el laboratorio de aplicación de Dräger.

Gran pantalla

El display con iluminación de fondo con sus grandes letras es fácil de leer. Toda la información aparece en una pantalla. El ajuste del idioma del display y la estructura del menú puede preajustarse a inglés, alemán, francés, español o italiano.

Diferentes funciones de alarma

El Dräger Multi-PID 2 está equipado con una potente alarma sonora y un LED para avisar si se han alcanzado niveles peligrosos de sustancias (p.ej. pico, Stel o TWA). Adicionalmente hay integrados en el equipo una bomba y una alarma de flujo.

Tecla de calibración

Con sólo una tecla se accede inmediatamente a las funciones de calibración. Esto permite al usuario realizar una calibración sin entrar en el menú principal.

Almacenamiento de datos incorporado

Un datalogger interno está incluido en el equipo. El paquete de software "GasVision" permite la fácil evaluación de los datos medidos. La característica "datalogging" permite al usuario registrar 15.000 puntos de muestra que pueden descargarse en un PC.

Tubos pre-filtro

Posibilita el uso de tubos pre-filtro. Un adaptador de fácil conexión rápidamente permite que el tubo sea fijado al equipo. El equipo puede así medir específicamente benceno cuando este modo está activado o indicar altos niveles de humedad cuando el tubo pre-filtro para humedad está colocado.

Certificados mundiales

El Dräger Multi-PID 2 se puede usar mundialmente con estos certificados: ATEX, MET y marca CE.



ST-8379-2006

Dräger Multi-PID 2
Ideal para detectar VOCs a niveles muy bajos.



ST-9273-2006

ST-9274-2006

Tubos pre-filtro
Se pueden realizar mediciones específicas de benceno.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Monitor de fotoionización para detectar componentes orgánicos volátiles en el ambiente

Medida (alto x ancho x fondo, máx.)	230 x 110 x 80 mm, ancho en asa 67 mm, 9" x 4.25" x 3", ancho en asa 2.6"	
Peso (aprox.)	860 g; 19 pounds	
Condiciones ambientales	Temperatura	0 a +40° C, +32 a +105° F
	Humedad	0 a 95% h.rel., sin condensación
Generalidades	Humedad del aire	10% hasta 90% h.r., sin condensación
Vida normal de la batería	NiCd	8 horas, batería recargable
Alarma sonora	> 80 dB (A) a una distancia de 30 cm	

Certificados

ATEX	II 2G Eex ib IIC T4: 0 < Ta < + 40° C
MET	Clase I, div. 1, grupo A, B, C, D T4
Marca CE	Compatibilidad electromagnética (directiva 89/336/CE)

LISTA DE REFERENCIAS PARA PEDIDOS

Dräger Multi-PID 2*	83 18 320	Juego de cables para ordenador	83 17 667
Cargador EE.UU., 110 V AC	64 05 428	Pack de baterías de repuesto	83 17 670
Cargador universal 110 -230 V	83 17 661	Lámpara 11,7 eV para detector	83 18 307
Maleta kit de campo **	83 17 663	Adaptador para coche de 12 V DC	83 18 317
Maleta de transporte	83 17 664	Adaptador para tubo pre-filtro	83 19 093
Gas de calibración (100 ppm i-Buteno)	68 10 687	Tubo pre-filtro para benceno	83 03 511
Regulador para gas de calibración	83 10 688	Tubo pre-filtro para humedad	83 03 531

* Cada equipo incluye: una lámpara 10,6 eV para detector, batería recargable, sonda de muestra de teflon reforzado de 17 cm (6.7"), correa para la muñeca, multi-herramienta para el cambio de la lámpara, manual de uso, tarjeta de referencia laminada para usuario, filtros agua/ partículas (10 uds.)

** La maleta del kit de campo incluye: maleta de transporte, gas de calibración, regulador para gas de calibración, juego de cables para ordenador, pack de baterías de repuesto

Dräger Safety Hispania S.A.
C/ Xaudaró, 5
28034 Madrid
Tel +34 91 358 02 44
Fax +34 91 729 48 99
consultasseguridad@draeger.es
www.draeger.com

Tel. de atención al cliente
902 11 64 24

DELEGACIONES

CATALUÑA
c/ Garrotxa 10-12 bajos 1-2
Edificio Océano I
Parque Negocios Mas Blau
08820 - El Prat de Llobregat
(Barcelona)
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 93 478 22 65

VALENCIA
Ronda Narcís Monturiol, 19-1
Parcela 122
Parque Tecnológico
46980 - Paterna
(Valencia)
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 96 346 14 36

LAS PALMAS
c/ Matías Padrón, 102 bajo
35004 - Las Palmas
de Gran Canaria
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 928 29 24 36

PAÍS VASCO
c/ Arene Azpi, 71 - bajo
48990 - Getxo (Vizcaya)
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 94 430 87 62

ANDALUCÍA
Edificio Arena 3 (Planta baja)
Avda. de la Innovación s/n
41020 Sevilla
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 95 463 87 35

GALICIA
c/ Rafael Alberti, 20 - bajo
15008 - La Coruña
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 981 13 47 32

ARAGÓN
c/ Andrés Gay Sangrós, 4-6
50009 - Zaragoza
Tel.: 902 11 64 24
Fax: 976 75 25 14

ASTURIAS
Dräger Safety Hispania, S.A.
902 11 64 24

TENERIFE
Dräger Safety Hispania, S.A.
902 11 64 24

MURCIA
Dräger Safety Hispania, S.A.
902 11 64 24

MÁLAGA
Dräger Safety Hispania, S.A.
902 11 64 24

VALLADOLID
Dräger Safety Hispania, S.A.
902 11 64 24

Instrucciones de operación

CellOx[®] 325



Sensor de oxígeno

Copyright

© Weilheim 2009, WTW GmbH

La reimpresión - aún parcial - está permitida únicamente con la autorización expresa y por escrito de la WTW GmbH, Weilheim.

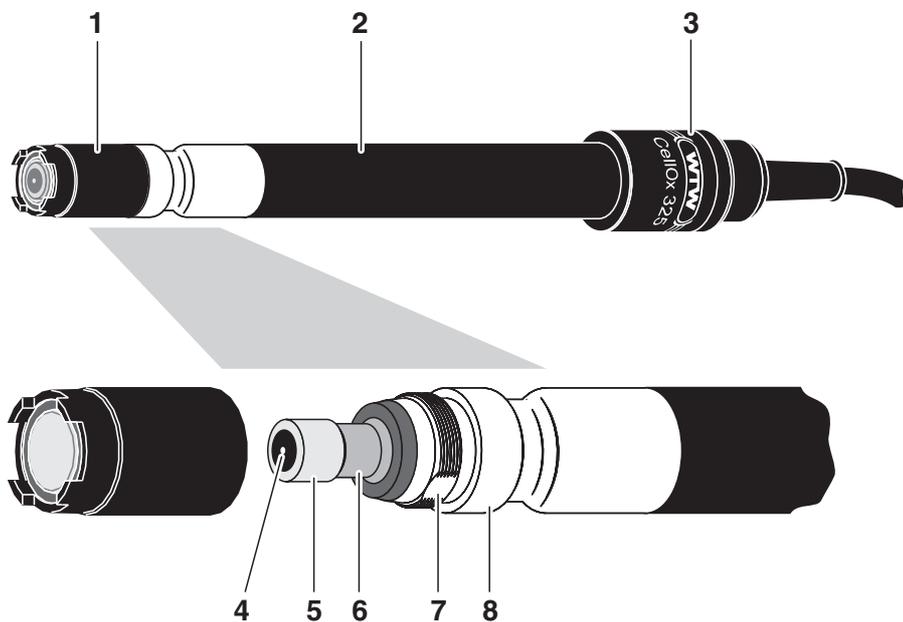
Printed in Germany.

Índice

1	Sumario	54
2	Seguridad	55
3	Puesta en funcionamiento	55
4	Medición / funcionamiento	56
4.1	Calibración	56
4.2	Medir	56
4.3	Almacenamiento	56
5	Mantenimiento, limpieza, repuestos necesarios	57
5.1	Instrucciones generales para el mantenimiento	57
5.2	Limpieza exterior	57
5.3	Cambiar la solución electrolítica y el cabezal de la membrana	58
5.4	Limpiar el electrodo	61
5.5	Controlar que el sensor no tenga corriente cero	63
5.6	Eliminación de materiales residuales	63
6	Diagnóstico y corrección de fallas	64
7	Especificaciones técnicas	65
8	Piezas de desgaste y accesorios	67

1 Sumario

Diseño



1	Cabezal de la membrana WP 90 (lleno con solución electrolítica)
2	Vástago
3	Cabezal tapón
4	Electrodo de oro, de trabajo (cátodo)
5	Aislador
6	Contraelectrodo de plomo (ánodo)
7	Superficie de aireación
8	Sensor térmico y electrodo auxiliar

Campos de aplicación recomendados

- Mediciones sobre terreno en ríos, lagos y aguas residuales
- Aplicaciones en laboratorios de investigación de aguas
- Mediciones BSB (demanda biológica de oxígeno DBO)

2 Seguridad

El presente manual de instrucciones contiene observaciones especiales que deben ser consideradas al trabajar con el sensor de oxígeno.

Mantenga este manual de instrucciones siempre en las cercanías del sensor.

Cualificación especial del usuario

La capa de la membrana del sensor de oxígeno contiene una pequeña cantidad de solución electrolítica alcalina. Todos los trabajos de mantenimiento que requieren el manejo con la solución electrolítica deberán ser efectuados sólo por personas que dominan el trabajo con productos químicos.

Observaciones de seguridad

En los diferentes capítulos del presente manual las indicaciones de seguridad como la siguiente hacen referencia a riesgos:



ATENCIÓN

identifica observaciones de seguridad que Ud. debe respetar para evitar eventuales daños a personas y daños materiales al instrumento y cargas al medio ambiente.

3 Puesta en funcionamiento

Partes incluidas

- Sensor de oxígeno CellOx® 325, en condiciones de funcionamiento, lleno con solución electrolítica
- Recipiente de calibración y almacenaje OxiCal®-SL
- Caja de accesorios ZBK-325, compuesto por:
 - 3 cabezales de repuesto WP-90
 - Solución electrolítica ELY/G
 - Solución de limpieza RL/G
 - Folio de pulir SF 300
- Instrucciones de operación



Observación

El cabezal de la membrana instalado de fábrica sirve en primer lugar de protección durante el transporte y puede tener una vida útil residual reducida, dependiendo de las condiciones de transporte y la duración del almacenaje. Si el sistema de medición ya no puede ser calibrado (error indicado en el instrumento), proceda por favor como se explica en el párrafo CAMBIAR LA SOLUCIÓN ELECTROLÍTICA Y EL CABEZAL DE LA MEMBRANA.

Restablecer las condiciones de funcionamiento para la medición

Conectar el sensor al instrumento de medición. El sensor está inmediatamente en condiciones de funcionamiento, listo para medir. No es necesario polarizar el sensor.

4 Medición / funcionamiento

4.1 Calibración



Observación

Por favor lea lo concerniente a la calibración en el manual de instrucciones del instrumento de medición.

4.2 Medir

Observe la profundidad mínima de inmersión y el flujo mínimo necesario (vea el capítulo 7 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS).

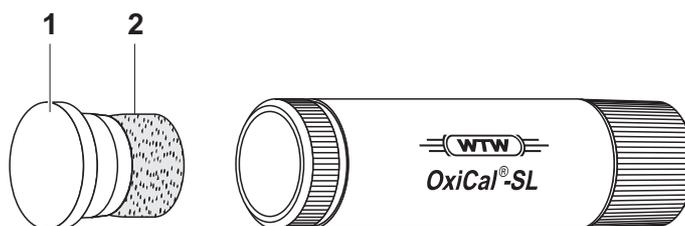
El flujo mínimo se logra de diferentes maneras, por ejemplo:

- La velocidad de flujo del agua corriente a ser medida ya es suficiente (estanques aireados, cañerías de agua, arroyos)
- Desplazar el sensor lentamente por el agua a mano (lagos, estanques o depósitos de agua), o bien,
- Utilizar agitadores auxiliares, por ejemplo agitador magnético con juego de elementos agitadores (vea el capítulo 8 PIEZAS DE DESGASTE Y ACCESORIOS)

4.3 Almacenamiento

Guarde siempre el sensor en el recipiente de calibración y almacenamiento a una temperatura de 0 a +50 °C (32 a 122 °F). Mantenga la esponja del recipiente de calibración y almacenamiento siempre húmeda.

Recipiente de
calibración y
almacenamiento
OxiCal®-SL



Humedecer la esponja:

- Quitar la tapa (1).
- Sacar la esponja (2), humedecerla y luego estrujarla ligeramente.
- Colocar nuevamente la esponja y cerrar el recipiente de calibración y almacenamiento con la tapa.

5 Mantenimiento, limpieza, repuestos necesarios

5.1 Instrucciones generales para el mantenimiento

Para su seguridad personal



Al manipular con soluciones electrolíticas y soluciones de limpieza, tener presentes las siguientes instrucciones de seguridad:

ATENCIÓN

La solución electrolítica ELY/G y la solución de limpieza RL-G irritan los ojos y la piel. Observe los siguientes puntos al manipular con soluciones:

- Emplear guantes de seguridad adecuados, asimismo gafas protectoras y protectores faciales.
- Si su piel ha entrado en contacto con la solución, lavarla a fondo y cambiar la ropa mojada inmediatamente.
- Si ha entrado con contacto con los ojos, enjuagarlos a fondo con agua y consultar al médico.
- Observar las hojas de datos de seguridad.



ATENCIÓN

Quitar el sensor del instrumento para llevar a cabo el mantenimiento.



Observación

En el capítulo 8 PIEZAS DE DESGASTE Y ACCESORIOS encontrará Ud. toda la información necesaria para el pedido de piezas de repuesto y productos para el mantenimiento

5.2 Limpieza exterior

Detergentes

Impurezas/contaminación	Procedimientos de limpieza
Concreción calcárea	sumergir las partes afectadas durante 1 minuto en ácido acético (solución de partes en volumen = 10 %)
Grasas/aceites	enjuagar con agua tibia y detergente de tipo comercial

Después de la limpieza, enjuagar a fondo con agua desionizada y en caso dado, volver a calibrar.

5.3 Cambiar la solución electrolítica y el cabezal de la membrana



Información general

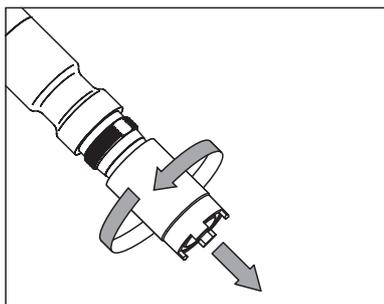
ATENCIÓN

Antes de comenzar con el trabajo tenga presente las INDICACIONES GENERALES PARA EL MANTENIMIENTO en la página 57.

WTW entrega el sensor en condiciones de funcionamiento (vea el párrafo 3). La solución electrolítica y el cabezal de la membrana deben ser cambiados sólo si:

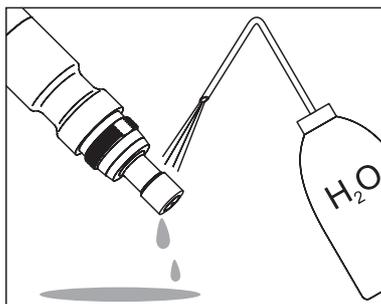
- se produce un error de calibración debido a la membrana demasiado sucia
- la membrana está deteriorada
- la solución electrolítica se ha gastado
- el instrumento de medición indica algún escape

Cambiar la solución electrolítica y el cabezal de la membrana

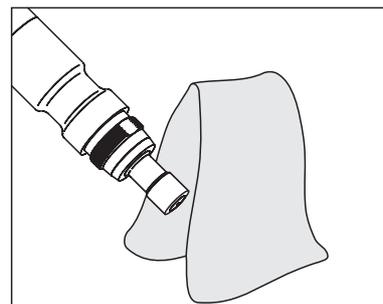


Desatornillar el cabezal de la membrana.

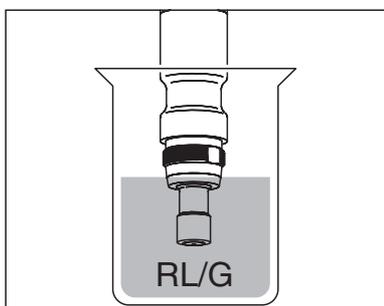
Cuidado: Solución electrolítica! Al eliminar el cabezal y la solución electrolítica, tenga presente el párrafo 5.6.



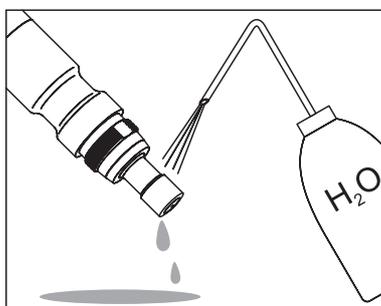
Enjuagar el cabezal del sensor con agua desionizada.



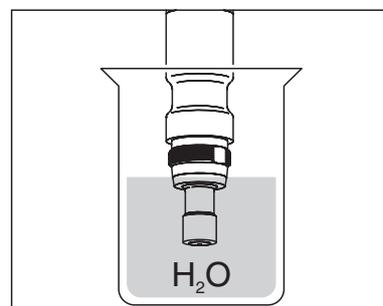
Frotar el contraelectrodo cuidadosamente con un paño de papel sin pelusas y secarlo.



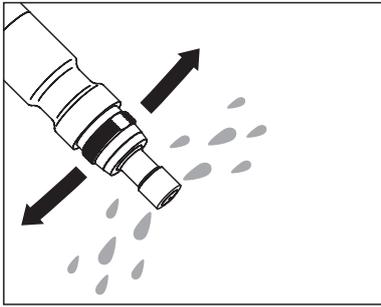
Sumergir el cabezal del sensor incluyendo el contraelectrodo en la solución de limpieza RL/G. Dejar en reposo durante 1 a 3 minutos.



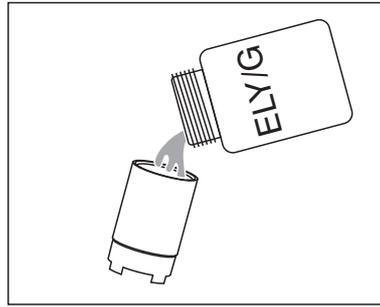
Enjuagar a fondo el cabezal del sensor con agua desionizada.



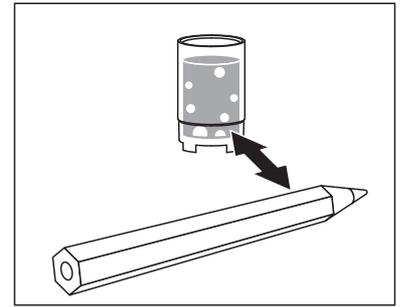
Dejar el contraelectrodo en reposo por lo menos durante 10 minutos en el baño de agua desionizada.



Sacudir cuidadosamente las gotas de agua.



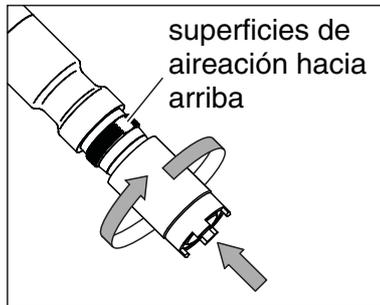
Llenar el nuevo cabezal de la membrana con la solución electrolítica ELY/G.



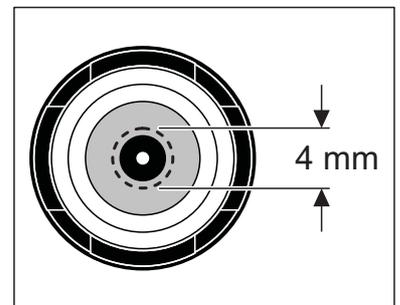
Eliminar las burbujas con suaves golpecitos. También se pueden evitar las burbujas vaciando la primera carga de solución y volviendo a llenar



Enjuagar a fondo el cabezal del sensor con la solución electrolítica.



Mantener el sensor en posición inclinada y atornillar el cabezal de la membrana sin demasiada fuerza, utilizando un paño de papel. La solución electrolítica sobrante sale por la superficie de evacuación.



Verificar la carga: Observar la superficie frontal. Dentro del círculo marcado de rayas interrumpidas no deben verse burbujas de aire. Las burbujas de aire fuera de esta zona no tienen influencia alguna.



En condición de funcionamiento para medir

Observación

Al medir bajo alta presión, la carga tiene que estar completamente libre de burbujas.



El sensor se encuentra en condiciones de funcionamiento después de aprox. 30 a 50 minutos. A continuación calibrar el sensor.

Observación

Recomendamos dejar el sensor en reposo durante la noche y calibrarlo a continuación, si se van a efectuar mediciones de muy baja concentración de oxígeno (saturación < 0,5 %).

5.4 Limpiar el electrodo



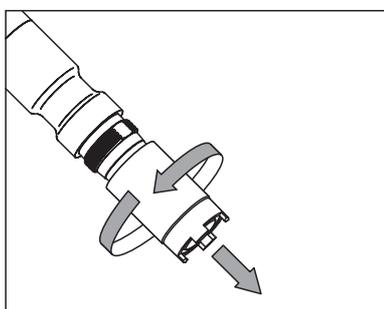
Información general

ATENCIÓN

Antes de comenzar con el trabajo tenga presente las INDICACIONES GENERALES PARA EL MANTENIMIENTO en la página 57.

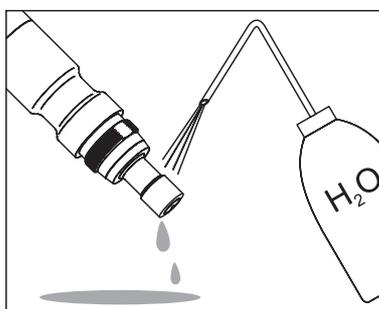
La limpieza es necesaria sólo cuando el sensor presenta pendientes exageradas (es decir, cuando el sensor no puede ser calibrado), y cuando el error no puede ser corregido cambiando el cabezal de la membrana y la solución electrolítica.

Limpiar el electrodo

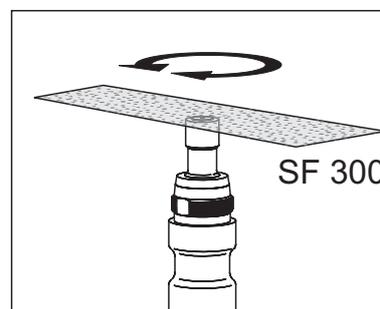


Desatornillar el cabezal de la membrana.

Cuidado: Solución electrolítica!
Al eliminar el cabezal y la solución electrolítica, tenga presente el párrafo 5.6.



Enjuagar el cabezal del sensor con agua desionizada.

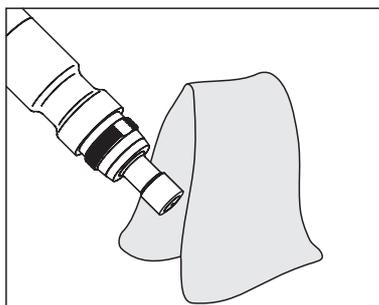


Eliminar las incrustaciones e impurezas del electrodo de oro frotando con el lado más áspero del folio-lija SF 300 **mojado**, aplicando leve presión.

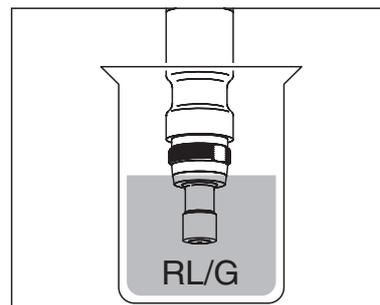
Cuidado: No emplear papel de lija de tipo comercial ni tampoco un pincel de fibra de vidrio!



Enjuagar el cabezal del sensor con agua desionizada.

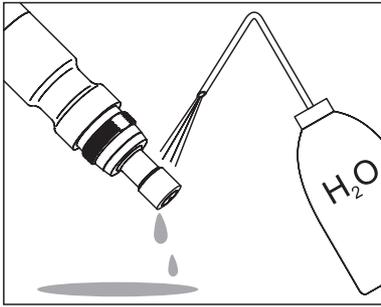


Eliminar la capa blanca del contraelectrodo empleando un paño de papel sin pelusas .

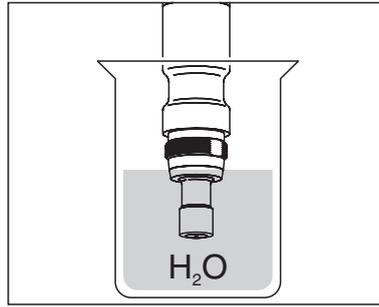


Sumergir el cabezal del sensor incluyendo el contraelectrodo en la solución de limpieza RL/G.

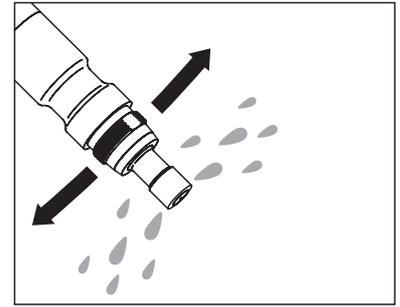
Dejar en reposo durante 1 a 3 minutos.



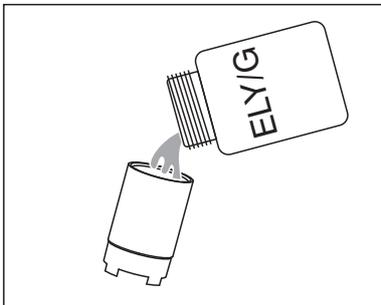
Enjuagar a fondo el cabezal del sensor con agua desionizada.



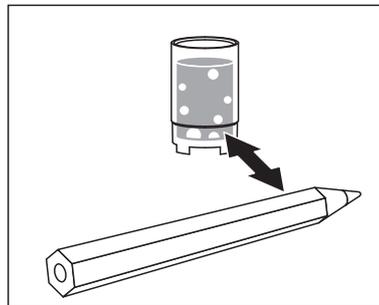
Dejar el contraelectrodo en reposo por lo menos durante 10 minutos en el baño de agua desionizada.



Sacudir cuidadosamente las gotas de agua.



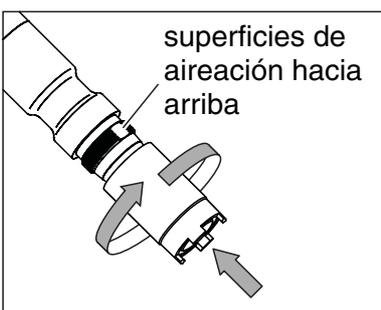
Llenar el nuevo cabezal de la membrana con la solución electrolítica ELY/G.



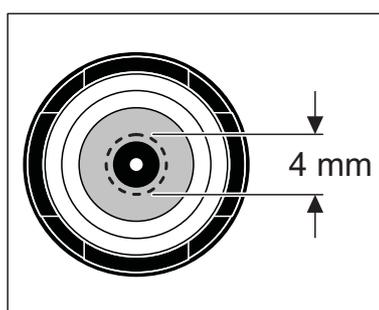
Eliminar las burbujas con suaves golpecitos. También se pueden evitar las burbujas vaciando la primera carga de solución y volviendo a llenar



Enjuagar el cabezal del sensor con la solución electrolítica.



Mantener el sensor en posición inclinada y atornillar el cabezal de la membrana sin demasiada fuerza, utilizando un paño de papel. La solución electrolítica sobrante sale por la superficie de evacuación.



Verificar la carga: Observar la superficie frontal. Dentro del círculo marcado de rayas interrumpidas no deben verse burbujas de aire. Las burbujas de aire fuera de esta zona no tienen influencia alguna.



Observación

Al medir bajo alta presión, la carga tiene que estar completamente libre de burbujas.

En condición de funcionamiento para medir



El sensor se encuentra en condiciones de funcionamiento después de aprox. 30 a 50 minutos. A continuación calibrar el sensor.

Observación

Recomendamos dejar el sensor en reposo durante la noche y calibrarlo a continuación, si se van a efectuar mediciones de muy baja concentración de oxígeno (saturación < 0,5 %).

5.5 Controlar que el sensor no tenga corriente cero

El sensor no tiene corriente cero. Sólo cuando el sensor no funciona correctamente y el mal funcionamiento no puede ser corregido cambiando la solución electrolítica y el cabezal de la membrana ni limpiando el electrodo, es necesario controlar que el sensor no tenga corriente cero.

Hay dos maneras de controlar que el sensor no tenga corriente cero:

- Medición de la atmósfera de nitrógeno (método recomendado)
- Medición en una solución de sulfuro sódico según DIN EN 25814/ ISO 5814.



ATENCIÓN

Al verificar el sensor según la DIN EN 25814/ISO 5814 no dejarlo por más de 2 minutos en la solución de sulfuro sódico. Peligro que el sensor sea contaminado!

Criterio de control

El sensor está en buenas condiciones cuando el instrumento de medición muestra después de 2 minutos una saturación de oxígeno < 1 %.

5.6 Eliminación de materiales residuales



ATENCIÓN

La solución electrolítica ELY/G irrita los ojos y la piel. Al trabajar con la solución electrolítica ELY/G tenga presente las siguientes observaciones para su seguridad:

- Emplear guantes de seguridad adecuados, asimismo gafas protectoras y protectores faciales.
- Si su piel ha entrado en contacto con la solución, lavarla a fondo y cambiar la ropa mojada inmediatamente.
- Si ha entrado con contacto con los ojos, enjuagarlos a fondo con agua y consultar al médico.

● **Tenga presente la hoja de datos de seguridad.**

Sensor y cabezal de la membrana

Para eliminar el cabezal de la membrana, desatornillelo y enjuague el sensor y el cabezal con agua. Recomendamos eliminar el sensor sin su cabezal, como chatarra electrónica. El cabezal de la membrana puede ser eliminado con la basura doméstica.

Solución electrolítica

Eliminación conforme a la hoja de datos de seguridad.

6 Diagnóstico y corrección de fallas

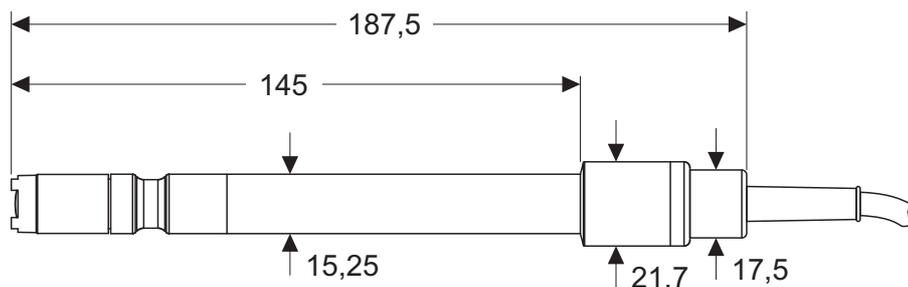
Síntoma de la falla	Causa probable	Solución del problema
El sensor está al aire y la indicación es 0.0 mg/l o bien, 0 % O ₂	<ul style="list-style-type: none"> – falla la conexión entre el medidor y el sensor – el cabezal de la membrana no tiene electrolito – el cable está defectuoso 	<ul style="list-style-type: none"> – verificar la conexión entre el instrumento de medición y el sensor – cambiar el cabezal de la membrana y llenarlo nuevamente (vea el párrafo 5.3) – enviar el sensor a la reparación
El sensor no puede ser calibrado	<ul style="list-style-type: none"> – el cabezal de la membrana está sucio o contaminado – el electrolito está gastado 	<ul style="list-style-type: none"> – cambiar el cabezal de la membrana y llenarlo nuevamente (vea el párrafo 5.3). Dejar en reposo durante 30 a 50 minutos y calibrarlo nuevamente.
Aún después de cambiar el electrolito y el cabezal, no se puede calibrar sensor	<ul style="list-style-type: none"> – electrodos o sucios o bien, el sensor está contaminado 	<ul style="list-style-type: none"> – limpiar los electrodos (vea el párrafo 5.4)
Indicación de un escape	<ul style="list-style-type: none"> – el cabezal de la membrana no está suficientemente apretado – membrana perforada 	<ul style="list-style-type: none"> – apretar firmemente el cabezal de la membrana – cambiar el cabezal de la membrana y llenarlo nuevamente (vea el párrafo 5.3)
La indicación de la temperatura es errónea	<ul style="list-style-type: none"> – sensor térmico defectuoso 	<ul style="list-style-type: none"> – enviar el sensor a la reparación
El sensor está deteriorado mecánicamente		<ul style="list-style-type: none"> – enviar el sensor a la reparación
El instrumento de medición muestra <i>OFL</i> (se ha sobrepasado el rango de indicación)	<ul style="list-style-type: none"> – cortocircuito entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo 	<ul style="list-style-type: none"> – limpiar los electrodos (vea el párrafo 5.4). Si el instrumento de medición continúa indicando <i>OFL</i>, enviar el sensor a la reparación.

7 Especificaciones técnicas

Características generales

Principio de medición	Sensor galvánico con membrana
Compensación de temperatura	Compensación IMT (cálculo por el instrumento de medición)
Sensor térmico	NTC 30 integrado (30 kΩ a 25 °C / 77 °F)

Dimensiones (en mm)



Peso 170 g (con cable de 1,5 m)

Materiales

Electrodo de trabajo	oro
Contraelectrodo	plomo
– Vástago – Cabezal tapón – Conexión roscada del cable – Cabezal de la membrana	POM
Membrana	FEP, 13 μm
Cabezal del sensor	Epoxy, PEEK
Carcaza del termistor (termoresistencia)	VA-Stahl 1.4571
Empaquetaduras o juntas	FPM (Viton)

Cable de conexión

Longitudes	1,5 ... 20 m
Diámetro	6 mm
Radio mínimo de flexión admisible	tendido fijo: 50 mm aplicación libre: 80 mm
Tipo de enchufe	Buje, 8 polos

Resistencia a la presión

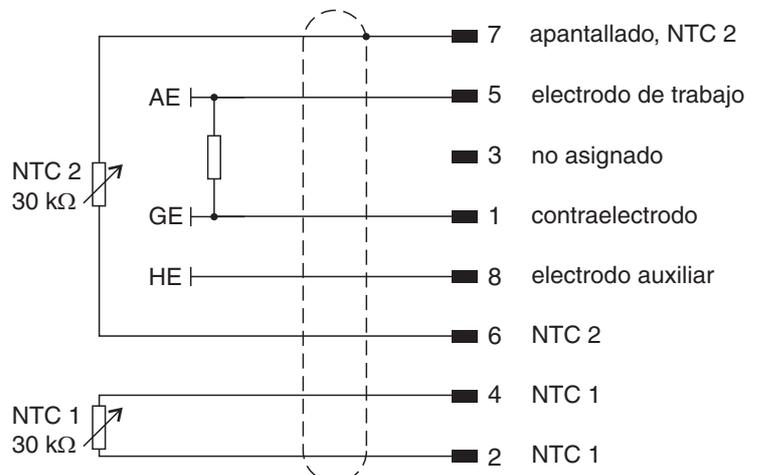
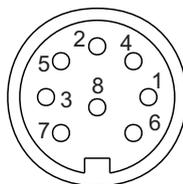
Sensor	IP 68 (6 bar)
Cable del sensor	IP 68 (2 bar)
Enchufe	IP 67 (enchufado)

La CellOx® 325 cumple con los requerimientos según el artículo 3(3) de la normativa 97/23/EG ("Normativa de instrumentos de presión").

Condiciones de medición	Rangos de medición a 20 °C (68 °F)	0 ... 50 mg/l O ₂ Saturación de 0 ... 600 % O ₂ Presión parcial de 0 ... 1250 mbar O ₂
	Rango de temperatura	0 ... 50 °C (32 ... 122 °F)
	Presión máxima admisible	6·10 ⁵ Pa (6 bar)
	Profundidad de inmersión	min. 6 cm max. 20 m (dependiendo de la longitud del cable)
	Posición de trabajo	cualquiera
	Velocidad de la corriente	> 3 cm/s al 10 % de exactitud de medición 10 cm/s al 5 % exactitud de medición 18 cm/s al 1 % exactitud de medición
Condiciones de almacenamiento	Almacenamiento recomendado	en el recipiente de calibración y almacenamiento OxiCal®-SL (humedecido)
	Temperatura de almacenamiento	0 ... 50 °C (32 ... 122 °F)
Datos característicos en el momento de la entrega	Señal cero	< 0,1 % del valor de saturación
	Tiempo de reacción a 20 °C (68 °F)	t ₉₀ (90 % del valor final después de) < 10 s t ₉₅ (95 % del valor final después de) < 16 s t ₉₉ (99 % del valor final después de) < 60 s
	Consumo propio de oxígeno a 20 °C (68 °F)	0,008 µg·h ⁻¹ (mg/l) ⁻¹
	Deriva	aprox. 3 % por mes en condiciones de funcionamiento
	Tiempo de reacción de la medición de temperatura	t ₉₉ (99 % del valor final después de) < 60 s
	Exactitud de la medición de temperatura	± 0,2 K
	Período de servicio	mínimo 6 meses con una carga de electrolito

Ocupación / asignación de las conexiones

enchufe, vista delantera:



8 Piezas de desgaste y accesorios

Piezas de desgaste y productos para el mantenimiento

Descripción	Modelo	No. de pedido
Juego de cabezales de la membrana (3 unidades)	WP 90/3	202 725
Solución electrolítica	ELY/G	205 217
Solución de limpieza para el contraelectrodo de plomo	RL/G	205 204
Folio-lijas	SF 300	203 680
Caja de accesorios, compuesto por: – 3 cabezales de repuesto WP 90 – Solución electrolítica ELY/G – Solución de limpieza RL/G – Folio de pulir SF 300	ZBK 325	202 706

Accesorios

Descripción	Modelo	No. de pedido
Recipiente de calibración y almacenamiento	OxiCal®-SL	205 362
Agitador magnético	Oxi-Stirrer 300	203 810
El agitador completo garantiza, junto con el Oxi-Stirrer 300, una corriente de velocidad definida y constante para el sensor	RZ 300	203 824
Juego de embudos - para la determinación de la demanda biológica de oxígeno DBO en botellas de Winkler	TS 19	205 710
Botella tipo "Karlsruher Flasche" - apropiada para la determinación de la demanda biológica de oxígeno (BSB)	KF 12	205 700
Anillo de fijación, recomendado para la medición con la botella tipo "Karlsruher Flasche"	FR 19	205 712
Aditivo de circulación para la medición de oxígeno sin presión, en volúmenes de 25 hasta 65 ml/min.	d201	203 730
Refuerzo de plástico	A 325/K	903 830
Agitador a pila para mediciones a gran profundidad - sólo en combinación con el refuerzo de plástico A 325/K	BR 325	203 826



Observación

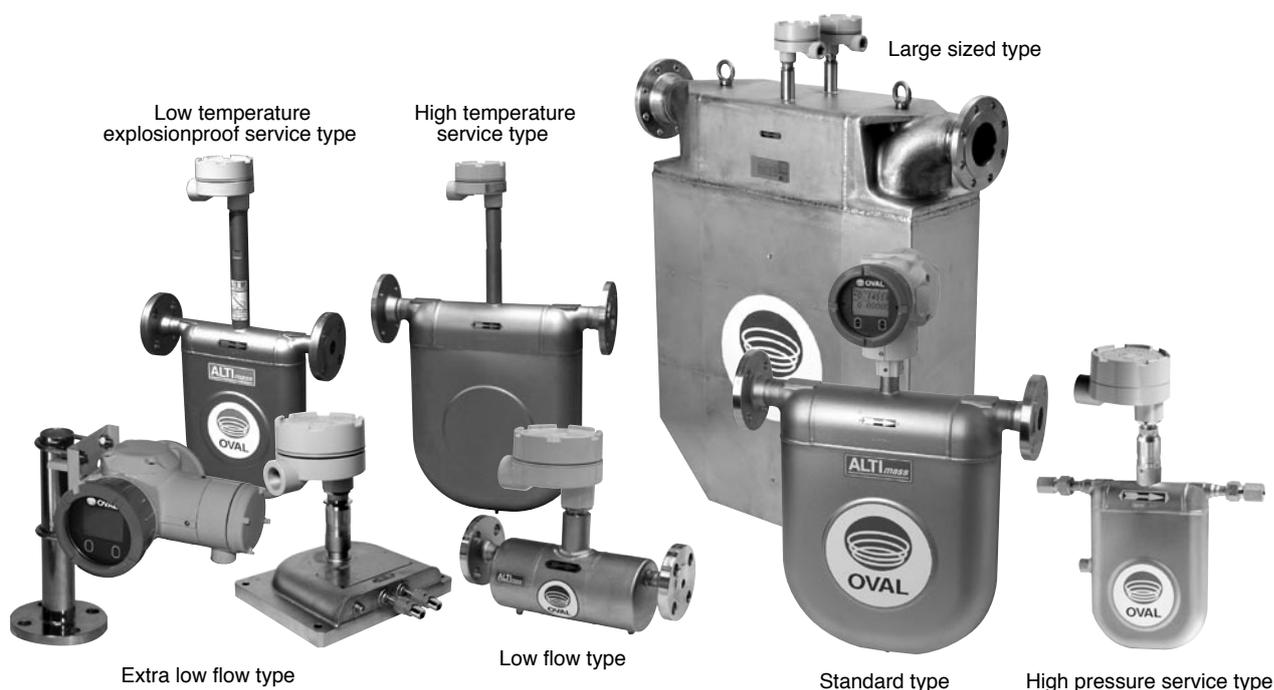
En el catálogo de WTW o en el internet encontrará Ud. más accesorios.



High Performance Coriolis Flowmeters

ALTI^{mass} Type U

GENERAL SPECIFICATION
GS.No.GBN120E-9



■ GENERAL

Equipped with a sophisticated transmitter (self diagnosis feature, large size display, and field reconfiguration capability using a touch panel), “ALTI^{mass} Type U” is an all round high performance Coriolis flowmeter capable of direct mass flow measurement at a high degree of accuracy. Particularly worth noting are its functionality in applications where measurement of extra low flows, short-duration filling process, etc. besides routine flowrate measurement.

■ FEATURES

1. Increased self-diagnostic capabilities: checking for cable faults, pipeline vibration, and monitoring transmitter temperatures, to name a few.
2. You can reconfigure transmitter parameters using a finger touch on the touch panel (also through communication).
3. Improved zero stability.
4. Accurate liquid density: ± 0.0005 g/mL (CA003 to CA080)
5. Fast response: One digit improved from conventional models.
6. Two alarm indicators provided
7. Increased output signals
Pulse output (dual outputs), current output (dual outputs), and status output (single output)
8. Enhanced maintenance functions
Error logging, storing factory shipping data, and downloading programs
9. Readily expandable for additional applications
(Improved communication capability, comprehensive maintenance capability, and enhanced expandable functions)

■ GENERAL SPECIFICATIONS

1. Sensor unit

● CA00A, CA001 and CA003

Item		Description		
Model		CA00A	CA001	CA003
Nominal size		1/4"		10mm, 3/8 (*1), DN15
Materials	Wetted parts	SUS316L		SUS316L, SUS316L+Alloy C, AlloyC (*2)
	Housing	SUS304		
	O-rings	Fluorine rubber (std.: FKM), PTFE (option)		—
Process connection		R 1/4		JIS 10, 20, 30, 40, 63K RF/ASME(JPI)150, 300, 600RF/ DIN PN10, 16, 25, 40RF(*3), IDF Ferrule(*4), Screw
Applicable fluid		Liquid and gas		
Density range		0 to 2.0 g/mL		
Temperature range		-200 to +200°C		
Tube withstand (at 20°C)		—		Wetted parts materials: SUS316L Max. 10MPa, Alloy C Max. 15MPa (Depends on flange rating)
Max. operating pressure	Liquid	15MPa at 20°C		
	Gas	0.98MPa		
Sensor housing withstand (MPa) (*5)		—		7.2
Flow direction		Bidirectional		
Explosionproof configuration		TIIS Ex ib IIB T3, T4		ATEX II2G Ex ib IIB T2, T3, T4 Gb
Enclosure protection class		IP66		

*1: 1/2" for ASME and JPI flanged sensors.

*2: When wetted parts are made from Alloy C, only screw type connection is adopted as standard.

*3: DIN flanges are available only to meters of the wet part material, "SUS316L" and "SUS316+Alloy C".

*4: For application to foods, this product does not comply with CE marking.

*5: This pressure does not represents the maximum working pressure in the pressure vessel ratings. It represents, based upon comparison between the results of breakdown test conducted at OVAL (distorted enclosures are permissible) and the breakdown pressure in the FEM analysis, the one quarter (1/4) of the pressure obtained, whichever is lower (safer).

*: For products conforming to the high pressure gas safety regulations and CE marking, consult our representative.
(High Pressure Gas Safety Act is not applicable to CA00A and CA001.)

*: Remotely located transmitter only.

● CA006 to CA080

Item		Description						
Model		CA006	CA010	CA015	CA025	CA040	CA050	CA080
Nominal size		10mm, 3/8"(*1), DIN15	15mm, 1/2", DN15		25mm, 1", DN25	40mm, 1-1/2", DN40	50mm, 2", DN50	80mm, 3", DN80
Materials	Wetted parts	SUS316L, SUS316L + Alloy C, Alloy C						
	Housing	SUS304						
Process connection		JIS 10, 20, 30, 40, 63K RF/ASME(JPI)150, 300, 600RF/DIN PN10, 16, 25, 40RF(*2), IDF Ferrule(*3), Screw						
Applicable fluids		Liquid and gas						
Density range		0 to 2.0 g/mL						
Temperature range		-200 to +200°C (*6)						
Tube withstand (at 20°C)		9.4MPa						
Max. operating pressure		Max. 9.4 MPa (Depends on flange rating)						
Sensor housing withstand (MPa) (*4)		3.8	3.0	2.2	1.6	1.8		1.4
Flow direction		Bidirectional						
Explosionproof configuration		TIIS Ex ib IIB T2, T3, T4 (*5)		ATEX II2G Ex ib IIB				
Enclosure protection class		IP66						

*1: 1/2" for ASME and JPI flanged sensors.

*2: DIN flanges are available only to meters of the wet part material, "SUS316L" and "SUS316+Alloy C".

*3: For application to foods, this product does not comply with CE marking.

*4: This pressure does not represents the maximum working pressure in the pressure vessel ratings. It represents, based upon comparison between the results of breakdown test conducted at OVAL (distorted enclosures are permissible) and the breakdown pressure in the FEM analysis, the one quarter (1/4) of the pressure obtained, whichever is lower (safer).

*: For products conforming to the high pressure gas safety regulations and CE marking, consult our representative.

*5: Temperature grade T2 and T3 applies only to separately mounted type CA006 through CA080.

Integrally mounted type is applicable temperature grade T4.

*6: In case of explosionproof model, the integrally mounted type can support -20 to +80°C. In case of non-explosionproof type, the maximum measurement temperature is 130°C. However, the product must be used within the maximum ambient temperature of 45°C.

● CA100 and CA150

Item		Description	
Model		CA100	CA150
Nominal size		100mm, 4", DN100	150mm, 6", DN150
Materials	Wetted parts	SUS316L	
	Housing	SUS304	
Process connection		JIS 10, 20, 30K RF/ASME(JPI) 150, 300, 600RF/DIN PN10, 16, 25, 40RF	
Applicable fluids		Liquid	
Density range		0.3 to 2.0 g/mL	
Viscosity range		Max. 1000mPa·s	
Temperature range		-200 to +200°C	
Tube withstand (at 20°C)		13.56MPa (For reference: 9.39MPa at 200°C)	
Max. operating pressure		Depends on flange rating	
Flow direction		Bidirectional	
Explosionproof configuration		TIIS Ex ib IIB T3, T4 ATEX II2G Ex ib IIB T2, T3, T4 Gb	
Enclosure protection class		IP66	

※: Compliance with high pressure gas regulations is not applicable.

※: Remotely located transmitter only.

● High pressure service model (CA010 and CA015)

Item		Description	
Model		CA010(High pressure service)	CA015(High pressure service)
Materials	Wetted parts	Flow tube: Alloy C, Manifold: Alloy C equivalent (CX2MW)	
	Housing	SUS304	
Process connection		Screw Rc3/8	Screw Rc3/4
Applicable fluid		Liquid and gas	
Density range		0.3 to 2.0 g/mL	
Temperature range		Integrally mounted: -20 to +90°C, Separately mounted: -200 to +200°C	
Max. operating pressure		36MPa at room temperature	43MPa at room temperature
Sensor housing withstands (MPa) (※1)		3.0MPa	2.2MPa
Flow direction		Bidirectional	
Explosionproof configuration		TIIS Ex ib IIB T2, T3, T4 (※2) ATEX II2G Ex ib IIB T2, T3, T4 Gb	
Enclosure protection class		IP66	

※1: This pressure does not represents the maximum working pressure in the pressure vessel ratings. The value is the one quarter (1/4) of the lower (safer) pressure obtained when the results of breakdown test at OVAL (distorted enclosures are permissible) and the breakdown pressure in the FEM analysis are compared.

※: For products conforming to the high pressure gas safety regulations and CE marking, consult our representative.

※2: Temperature grade T2 and T3 applies only to separately mounted type.

Integrally mounted type is applicable temperature grade T4 only.

● High temperature service model (CA025, CA040 and CA050)

Item		Description		
Model		CA025 (High temperature model)	CA040 (High temperature model)	CA050 (High temperature model)
Nominal size		25mm, 1", DN25	40mm, 1-1/2", DN40	50mm, 2", DN50
Materials	Wetted parts	SUS316L		
	Housing	SUS304		
Process connection		JIS 10, 20, 30, 40, 63K RF, ASME/JPI 150, 300, 600RF/DIN PN10, 16, 25, 40RF		
Applicable fluids		Liquid		
Density range		0.3 to 2.0 g/mL		
Temperature range (※1)		-40 to +350°C		
Tube withstand (at 20°C)		9.4MPa		
Max. operating pressure		Depends on flange rating		
Sensor housing withstand (MPa) (※2)		1.6	1.8	
Flow direction		Bidirectional		
Explosionproof configuration		TIIS Ex ib IIB T1		
Enclosure protection class		IP66		

Heat Tracer Specifications (Option)

Applicable fluids	Hot water, Saturated steam, Overheated steam
Heat retention fluid max. output pressure	0.98MPa
Joint port for heat retention fluid	φ10 stainless tube
Recommended joint	Tube joint manufactured by Swagelok Company

※1: Allowable ambient temperature permitted for the sensor unit is up to 50°C

※2: This pressure does not represent the maximum working pressure. The value is the one quarter (1/4) of the lower (safer) pressure obtained when the results of breakdown test at OVAL (distorted enclosures are permissible) and the breakdown pressure in the FEM analysis are compared.

※: Compliance with high pressure gas regulations is not applicable.

※: Remotely located transmitter only.

※: Correspondence is not to the cooling use.

● Low temperature explosionproof service model (CA025 to CA080)

Item		Description			
Model		CA025 (Low temp. exp. model)	CA040 (Low temp. exp. model)	CA050 (Low temp. exp. model)	CA080 (Low temp. exp. model)
Nominal size		25mm, 1", DN25	40mm, 1-1/2", DN40	50mm, 2", DN50	80mm, 3", DN80
Materials	Wetted parts	SUS316L, SUS316L + Alloy C, Alloy C			
	Housing	SUS304			
Process connection (*1)		JIS 10, 20, 30, 40, 63K RF, ASME/JPI 150, 300, 600RF/DIN PN10, 16, 25, 40RF (*2), IDF IDF Ferrule (*3)			
Applicable fluids		Liquid and gas			
Density range		0 to 2.0 g/mL			
Temperature range		-200 to +50°C (Separately mounted only)			
Tube withstand (at 20°C)		9.4MPa			
Max. operating pressure		Depends on flange rating			
Sensor housing withstand (MPa) (*4)		1.6	1.8	1.4	
Flow direction		Bidirectional			
Explosionproof configuration		TIIS Ex ib IIB T5			
Enclosure protection class		IP66			

*1: When "SUS316L" or "SUS316L+Alloy C" is selected for the materials of wetted parts, the flange material is termed as "SUS316".

*2: For the material of DIN flange, you cannot select "Alloy C".

*3: For application to foods, this product does not comply with CE marking.

*4: This pressure does not represent the maximum working pressure in the pressure vessel ratings. It represents, based upon comparison between the results of breakdown test conducted at OVAL (distorted enclosures are permissible) and the breakdown pressure in the FEM analysis, the one quarter (1/4) of the pressure obtained, whichever is lower (safer).

*: For products conforming to the high pressure gas safety regulations and CE marking, consult our representative.

● Explosionproof Specifications for Sensor unit

(1) TIIS Explosionproof Explosionproof code : Ex ib IIB ① (① : Temperature class) (Example : Ex ib IIB T2) [Unit in °C]

Model		CA00A	CA001	CA003	CA006	CA010	CA015	CA025	CA040	CA050	CA080	CA100	CA150	
①	Temp. class (Metered fluid temperature)	T1	—	—	200	200	200	200	200	200	200	—	—	
		T2	—	—	—	—	—	—	350	350	350	—	—	
		T3	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
		T4	80	80	90	80	80	80	80	70	70	80	90	90
		T5	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	—	—

*: Metered fluid temperature is T1 to T4:-20°C, T5:-200°C

(2) ATEX Explosionproof

T2	200°C
T3	150°C
T4	80°C

2. Transmitter specifications

Item	Description
Model	PA0K
Power supply	85 to 264VAC 50/60Hz or 20 to 30VDC
Power consumption	Max. 15W
Ambient temperature	-40 to +55°C (*1)
Transmission length (separate type)	Max. 200m (Dedicated cable used) (*2)
Applicable EU directive	EMC Directive: 2004/108/EC, ATEX Directive: 94/9/EC
Applicable EN standards	EMC: EN55011: 1998/A1: 1999/A2: 2002 Group 1, Class B EN61000-6-2: 2001/EN061326-1: 2006 ATEX: EN60079-0: 2009 EN60079-1: 2007 EN60079-11: 2011
Explosionproof enclosure	TIIS Ex d [ib] IIB T4 : Integrally mounted, Ex d [ib] IIB T6 : Remotely mounted ATEX II2G Ex d ib IIB T4 Gb : Integrally mounted, II2G Ex d [ib] IIB T6 Gb : Remotely mounted
Dust and waterproof configuration	IP66
Transmitter configuration	Integral or remotely mounted
Finish	Sensor: Munsell 10B8/4, Covers (front and rear): 2.5PB4/10
Display	LCD display provided (128x64 dots), backlit (white, orange) Infrared light sensors: 2, LED: 2 (green, red)
Weight	Integrally mounted model 3.6kg approx., Remotely mounted model 5.0kg approx.
Communication interface	Bell 202 (under HART protocol) (*3) Option : RS-485 Modbus protocol, Baudrate : 9600bps, 19200bps, 38400bps Transmission mode : RTU or ASCII, Response time : 25 to 50 ms Note : In Modbus communication, set SW3-4 on the maintenance board to ON (only Bell 202 is valid with SW3-4 set to OFF).
Operation	Additional damping: flow 0.8sec, density 4sec, temperature 2.5sec. Low flow cutoff (default) : 0.6% or less of max. service flowrate
Pulse output	Open collector output (10V min. to 30Vmax., 50mA DC), or Voltage pulse ("Low Level": 1.5V max. "High Level": 15V min., Output impedance 2.2kΩ), Setting range: 0.1 to 10000Hz (max. output 11000Hz)
Analog output	4 to 20mADC (max. load 600Ω) Select two outputs from instant flowrate (mass or volume) temperature, and density.
Status output	Open collector output (Max.30V, 50mADC) Select one output from error (*4), flow direction, or high/low alarm (default is error)
Status input	Contact-closure input (Form "a" contact) Short: 200Ω max., Open: 100kΩ min. Select one output from remote zero, total reset, 0% signal lock, or function off (default is function off).

*1: Below -20°C, the display and infrared optical sensor may exhibit a slow response.

*2: If it exceeds 200 meters, consult the factory.

*3: Analog output 1 only is compatible with Bell202 specification.

*4: Of error outputs, "zero in progress" status output can be set up.

*: Due to the incorporation of a circuit protection device conforming to EMC requirements, insulation resistance and dielectric strength tests are unacceptable.

*: Non-explosionproof transmitter does not comply with CE marking.

■ GENERAL PERFORMANCE

● Standard model (CA00A, CA001 and CA003)

Item		Description			
Model		CA00A	CA001	CA003	
Flowrate	Normal flow range	0 to 40 g/min	0 to 150 g/min	0 to 72 kg/h	
	Allowable flow range	0 to 60 g/min	0 to 225 g/min	0 to 144 kg/h (180 ※1)	
	Min. range	0 to 2 g/min	0 to 7.5 g/min	0 to 3.6 kg/h	
	Min. measurable rate	0.4 g/min	1.5 g/min	0.72 kg/h (0.9 ※1)	
	Accuracy in factory calibration	Liquids	[±0.2% ± zero stability error] of RD		[±0.1% ± zero stability error] of RD
		Gases	[±0.5% ± zero stability error] of RD		
	Repeatability	Liquids	[±0.05% ± 1/2 zero stability error] of RD		
Gases		[±0.25% ± 1/2 zero stability error] of RD			
Zero stability		0.006 g/min	0.0225 g/min	0.0018 kg/h	
Density (Liquids)	Measuring range	0.3 to 2g/mL			
	Accuracy in factory calibration (option)	±0.003 g/mL		±0.0005 g/mL	
Analog accuracy		±0.1% of FS added to each accuracy			

※1: When maximum allowable range 180 kg/h is adopted, the minimum flow rate is 0.9 kg/h.

● Standard model (CA006 to CA150), Low temperature explosionproof service model (CA025 to CA080)

Item		Description									
Model		CA006	CA010	CA015	CA025	CA040	CA050	CA080	CA100	CA150	
Flowrate	Normal flow range (kg/h)	0 to 360	0 to 1200	0 to 3600	0 to 10800	0 to 39000	0 to 120000	0 to 342000			
	Allowable flow range (kg/h)	0 to 720	0 to 2400	0 to 7200	0 to 21600	0 to 78000	0 to 240000	0 to 372000			
	Min. range (kg/h)	0 to 18	0 to 60	0 to 180	0 to 540	0 to 1950	0 to 6000	0 to 17100			
	Min. measurable rate (kg/h)	3.6	12	36	108	390	1200	3420			
	Accuracy in factory calibration	Liquids	[±0.1% ± zero stability error] of RD								
		Gases	[±0.5% ± zero stability error] of RD								
	Repeatability	Liquids	[±0.05% ± 1/2 zero stability error] of RD								
Gases		[±0.25% ± 1/2 zero stability error] of RD									
Zero stability (kg/h)		0.036	0.12	0.18	0.54	1.95	6	34.2			
Density (Liquids)	Measuring range	0.3 to 2g/mL									
	Accuracy in factory calibration (option)	±0.0005g/mL						±0.001g/mL			
Analog accuracy		±0.1% of FS added to each accuracy									

● High pressure service model (CA010 and CA015)

Item		Description		
Model		CA010 (High press. type)	CA015 (High press. type)	
Flowrate	Normal flow range (kg/h)	0 to 840	0 to 2550	
	Allowable flow range (kg/h)	0 to 1680	0 to 5100	
	Min. range (kg/h)	0 to 120	0 to 390	
	Min. measurable rate (kg/h)	24	78	
	Accuracy in factory calibration	Liquids	[±0.2% ± zero stability error] of RD	
		Gases	Normal flowrate over [±0.3% ± zero stability error] of RD	
	Repeatability	Liquids	[±0.1% ± 1/2 zero stability error] of RD	
Gases		[±0.25% ± 1/2 zero stability error] of RD		
Zero stability (kg/h)		0.21	0.636	
Density (Liquids)	Measuring range	0.3 to 2g/mL		
	Accuracy in factory calibration (option)	±0.004g/mL		
Analog accuracy		±0.1% of FS added to each accuracy		

● High temperature service model (CA025, CA040 and CA050)

Item		Description		
Model		CA025 (High Temp. type)	CA040 (High Temp. type)	CA050 (High Temp. type)
Flowrate (Liquids)	Normal flow range (kg/h)	0 to 10800	0 to 39000	
	Allowable flow range (kg/h)	0 to 21600	0 to 78000	
	Min. range (kg/h)	0 to 540	0 to 1950	
	Min. measurable rate (kg/h)	108	390	
	Accuracy in factory calibration	[±0.1% ± zero stability error] of RD		
	Repeatability	[±0.05% ± 1/2 zero stability error] of RD		
	Zero stability (kg/h)	1.08		3.9
Density (Liquids)	Measuring range	0.3 to 2g/mL		
	Accuracy in factory calibration (option)	±0.003g/mL		
Analog accuracy		±0.1% of FS added to each accuracy		

Zero stability error= $\frac{\text{Zero stability}}{\text{Flow rate at the moment}} \times 100\%$

※: Zero stability and flowrate during the test should read in the same measurement unit.

※: For volume fowrate measurement in custom or custody transfer application, contact us.

※: In gas measurement, the max. permissible flow velocity varies with the type of gas and some may be beyond the bounds of measurement. If such is the case, seek our technical assistance.

■ DISPLAY

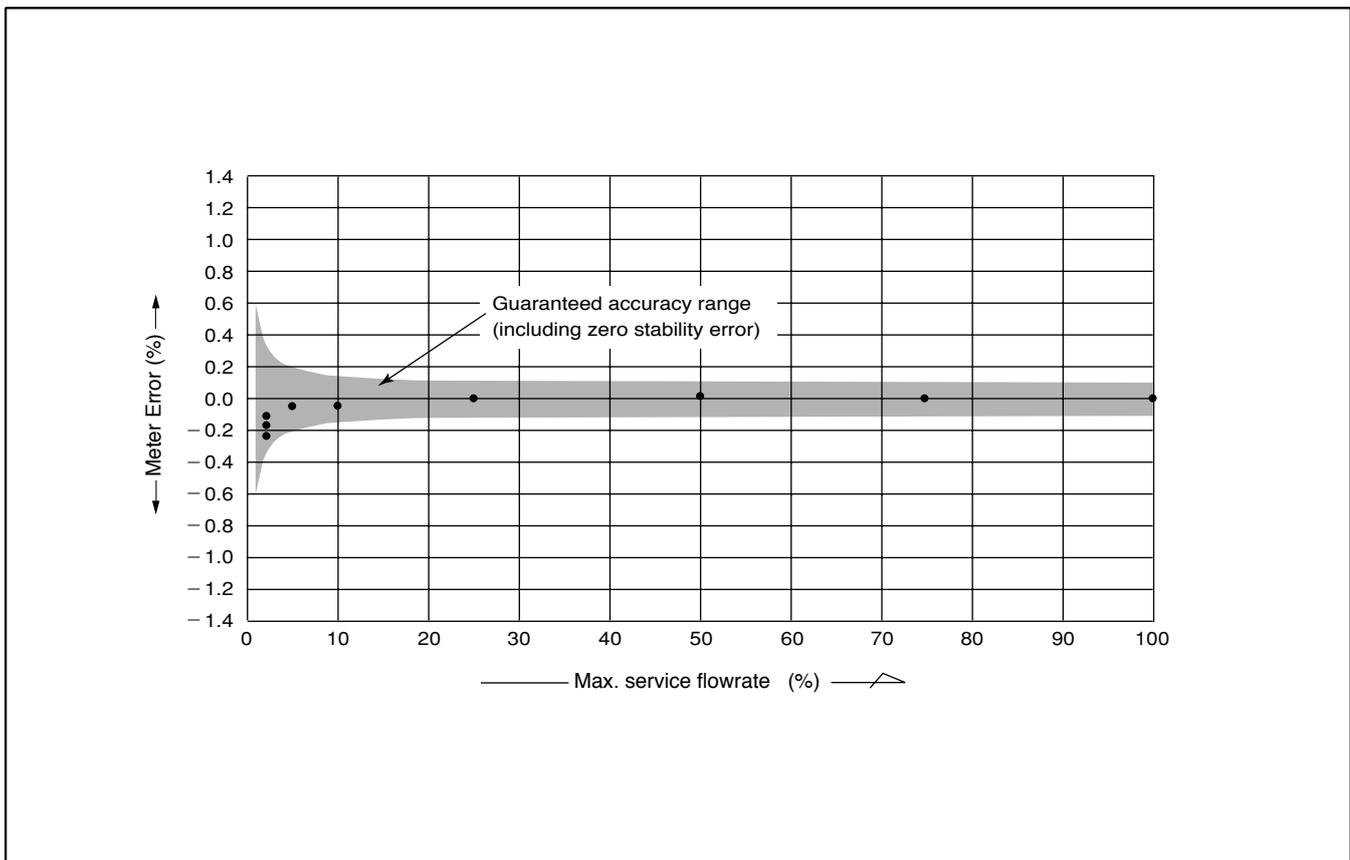
Available display modes

- ① Instantaneous mass flow rate
- ② Instantaneous volume flow rate
- ③ Density
- ④ Temperature
- ⑤ Totalized flow 1 (mass or volume) (no unit)
- ⑥ Totalized flow 2 (mass or volume) (no unit)
- ⑦ Totalized flow 1 (mass or volume) (has units)
- ⑧ Totalized flow 2 (mass or volume) (has units)
- ⑨ Analog output 1 (% instant flowrate)
- ⑩ Analog output 2 (% instant flowrate)
- ⑪ Status information
- ⑫ Mode select (param. setting)

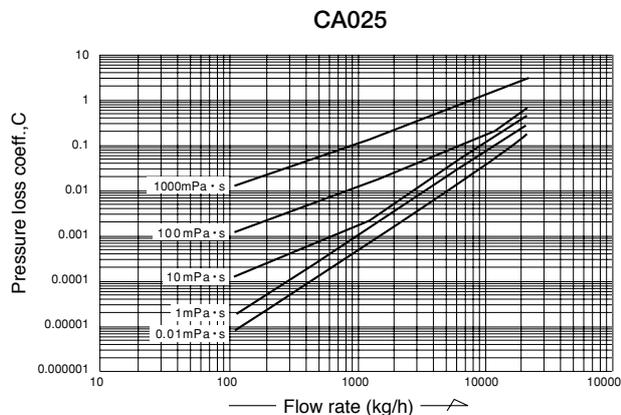
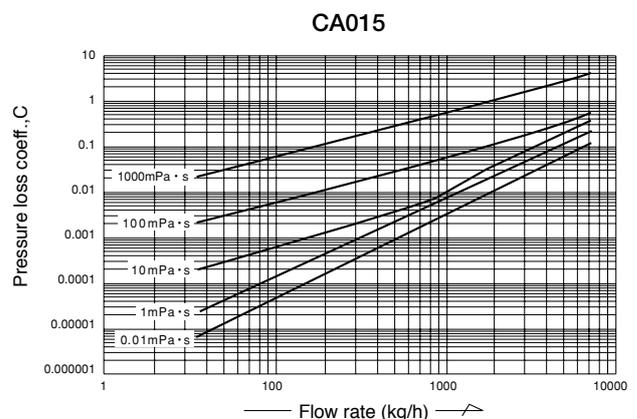
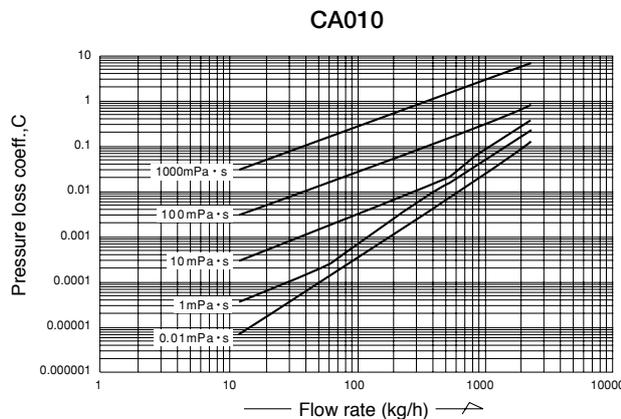
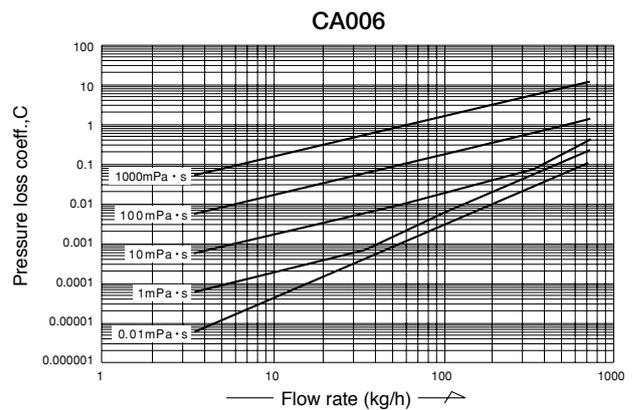
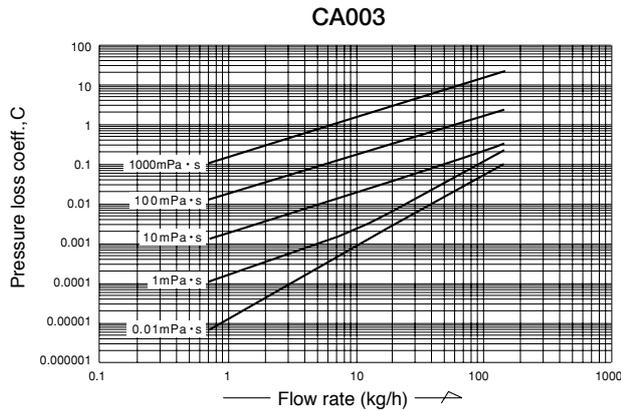
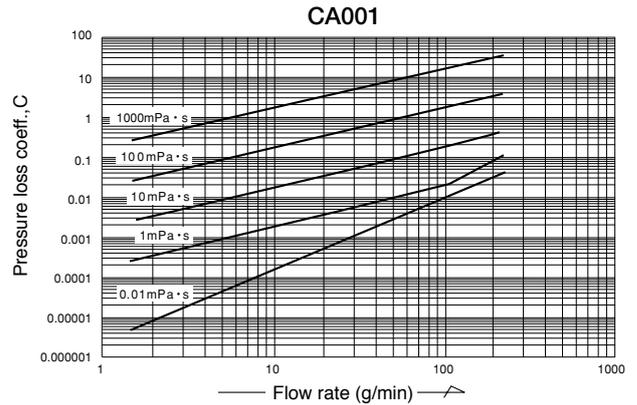
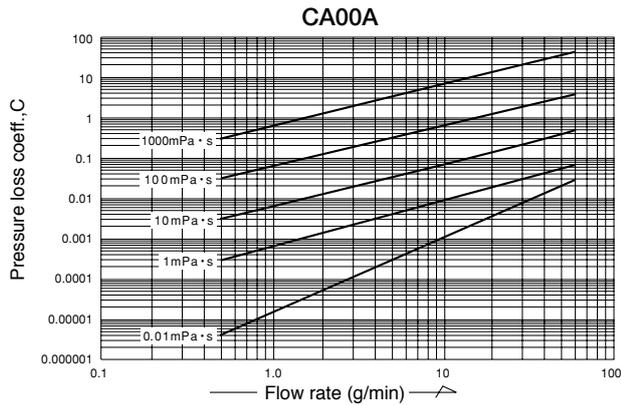
A tap of a finger on this glass faceplate area (infrared light sensor) selects the desired display modes.

※LCD backlight in two colors: white and orange.
Changes according to flowmeter status.
Backlight goes out automatically when the optical sensor does not respond at all for a set time period.

■ METER ERROR



■ PRESSURE LOSSES



How to determine pressure loss

1. Find the pressure loss factor C from flow rate (g/min or kg/h) and viscosity (mPa·s) of parameter. Dividing the obtained value C by specific gravity d (1 for water) gives the pressure loss. That is,

$$\Delta P = \frac{C}{d} \text{ (MPa)}$$

2. For high viscosity liquids not shown in these graphs, calculate the pressure loss by the following formula:

$$\Delta P_2 = C \times \frac{\mu_2}{\mu_1} \times \frac{1}{d}$$

where ΔP_2 : Pressure loss of high viscosity liquid (MPa)

μ_1 : Max. viscosity shown in the graph (mPa·s)

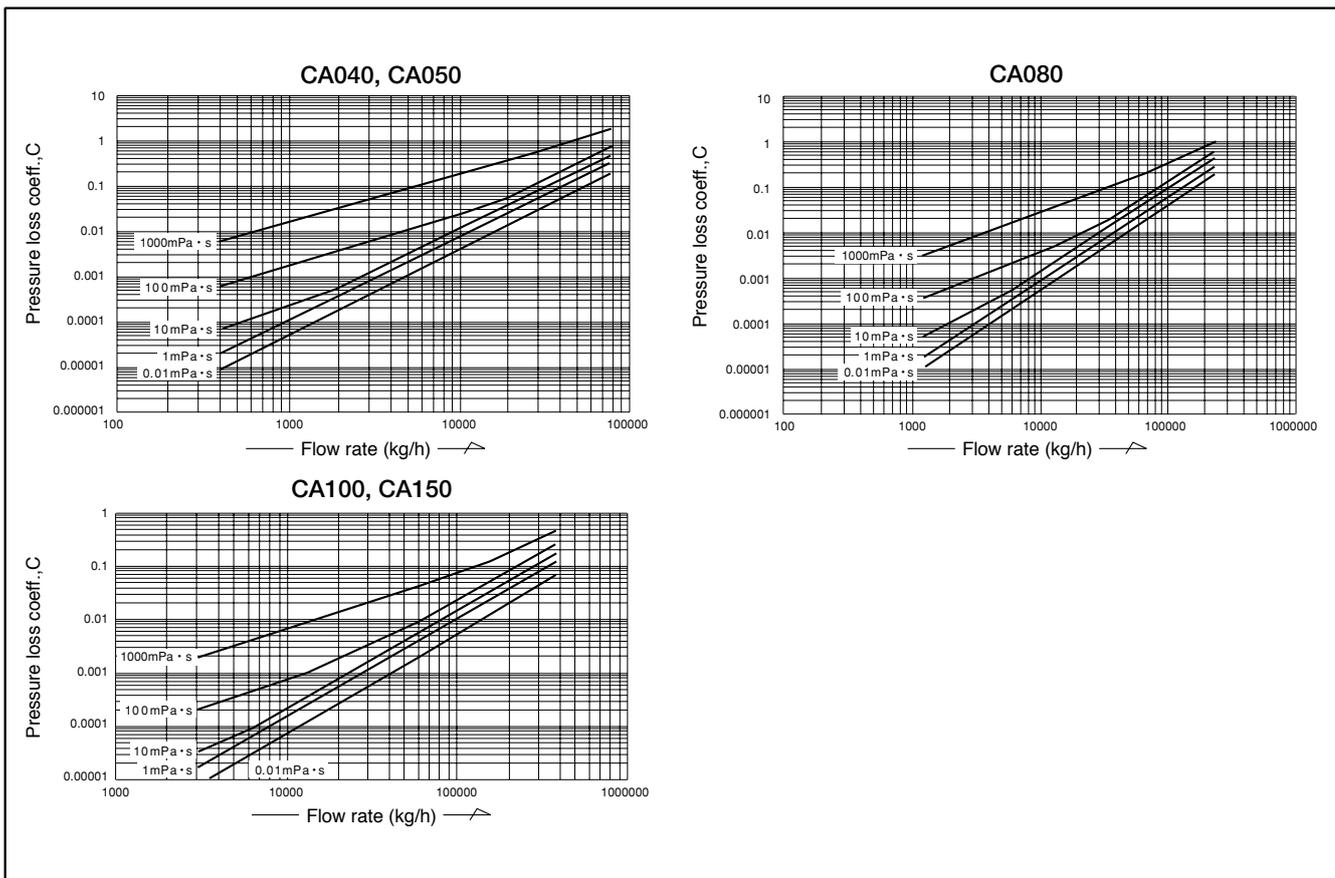
μ_2 : Viscosity of high-viscosity liquid (mPa·s)

d : Specific gravity of high-viscosity liquid (1 for water)

C : Pressure loss factor found from the max.

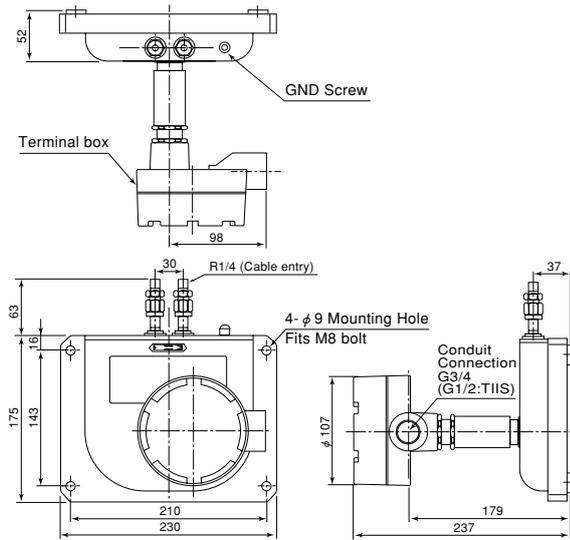
viscosity curve at a given flow rate (g/min or kg/h).

■ PRESSURE LOSSES



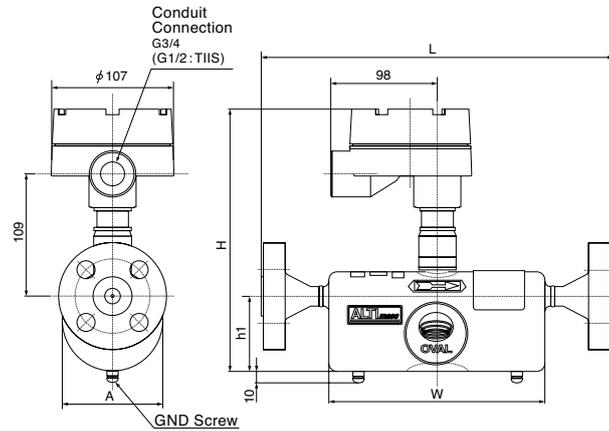
■ DIMENSIONS [Unit in mm]

- Sensor unit
- CA00A and CA001



Weight: 9kg (Approx.)

- Sensor unit CA003
- Transmitter separately mounted / flange connection type



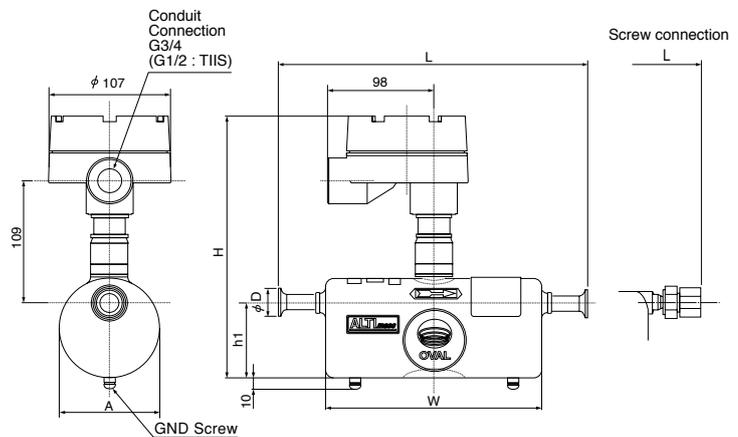
Model	JIS						ASME, JPI			DIN		H	h1	A	W	Approx. Weight kg (JIS 10K)		
	Nom. size mm	10K	20K	30K	40K	63K	Nom. size inch	150	300	600	Nom. size DN						PN10, 16	PN25, 40
CA003	10	275	275	293	293	313	1/2"	301	310	322	15	275	281	230	67	89.1	192	5.0

※: This table is applied to material code "S" and "M". In case of code "H", please consult our representative.

※: As long as flange O.D. and bolt holes remain the same while flange rating may differ, the flange thickness with the higher rating is chosen in the above.

※: DIN flanges are available only to meters of the material code, "S" and "M".

- Transmitter separately mounted / ferrule or screw connection type

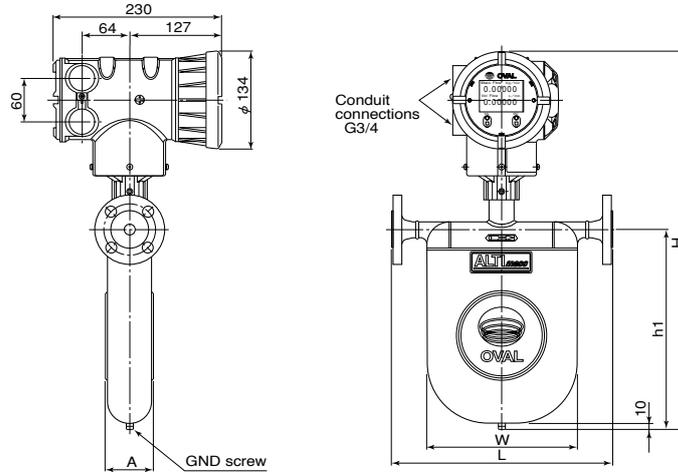


Model	Ferrule		L	H	h1	A	W	φ D	Approx. Weight (kg)
	Nom. size	Connection							
CA003	10	Ferrule 10A	265	230	67	89.1	192	34	4.5

Model	Screw Connection	L	Approx. Weight (kg)

■ DIMENSIONS [Unit in mm]

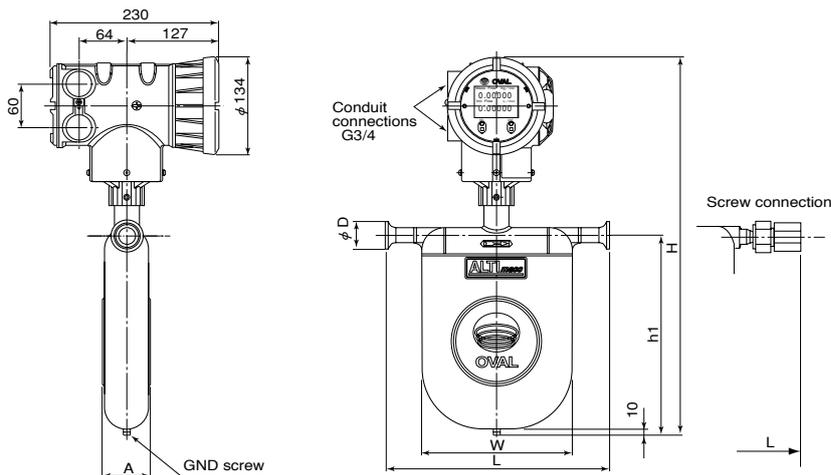
- Sensor unit CA006 to CA080
- Transmitter integrally mounted / flange connection type



Model	JIS						ASME, JPI				DIN			H	h1	A	W	Approx. Weight kg (JIS 10K)
	Nom. size mm	10K	20K	30K	40K	63K	Nom. size inch	150	300	600	Nom. size DN	PN10, 16	PN25, 40					
CA006	10	242	242	260	260	280	1/2"	268	277	289	15	241	247	434	180	53	148	7.8
CA010	15	256	256	276	276	294	1/2"	282	291	303	15	256	261	472	218	53	163	7.8
CA015	15	299	299	319	319	343	1/2"	325	334	347	15	299	305	522	268	65	205	8.8
CA025	25	380	380	400	400	422	1"	411	424	437	25	376	380	589	329	83	262	13.3
CA040	40	513	513	541	541	585	1-1/2"	547	560	575	40	507	513	720	452	121	385	25.8
CA050	50	513	523	561	561	595	2"	550	563	582	50	513	519					25.8
CA080	80	657	675	725	725	771	3"	699	717	737	80	659	675	889	602	174	510	48.8

※: This table is applied to material code "S" and "M". In case of code "H", please consult our representative.
 ※: As long as flange O.D. and bolt holes remain the same while flange rating may differ, the flange thickness with the higher rating is chosen in the above.
 ※: DIN flanges are available only to meters of the material code, "S" and "M".

- Transmitter integrally mounted / ferrule or screw connection type

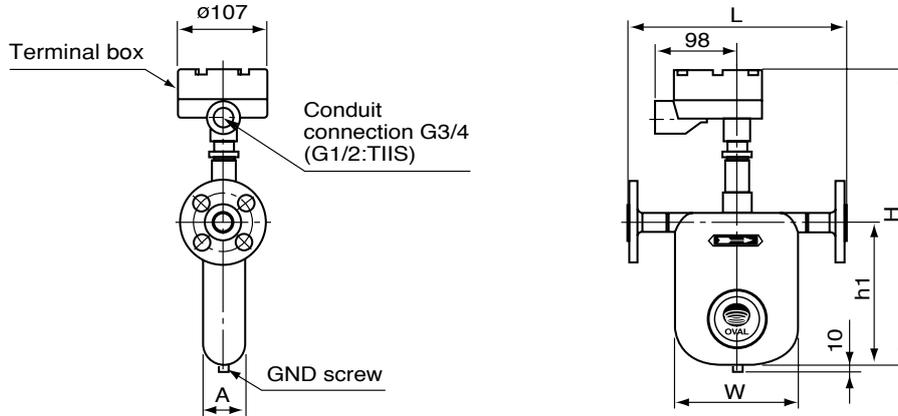


Model	Ferrule Connection		L	H	h1	A	W	φ D	Approx. Weight (kg)
	Nom. size	Connection							
CA006	10	Ferrule 10A	231.5	434	180	53	148	34	5.7
CA010	15	Ferrule 15A	246	472	218	53	163	34	6.3
CA015	15	Ferrule 15A	289	522	268	65	205	34	7.1
CA025	25	Ferrule 25 (ISO), IDF 1S	370	589	329	83	262	50.5	10.7
CA040	40	Ferrule 38 (ISO), IDF 1.5S	493	720	452	121	385	50.5	19.2
CA050	50	Ferrule 51 (ISO), IDF 2S						64	
CA080	80	Ferrule 76.1 (ISO), IDF 3S	658.5	889	602	174	510	91	50.8

Model	Screw Connection		L	Approx. Weight (kg)
	Connection			
CA006	Rc 3/8		296	5.7
CA010	Rc 3/8		312	6.3
CA015	Rc 3/4		382	7.1

■ DIMENSIONS [Unit in mm]

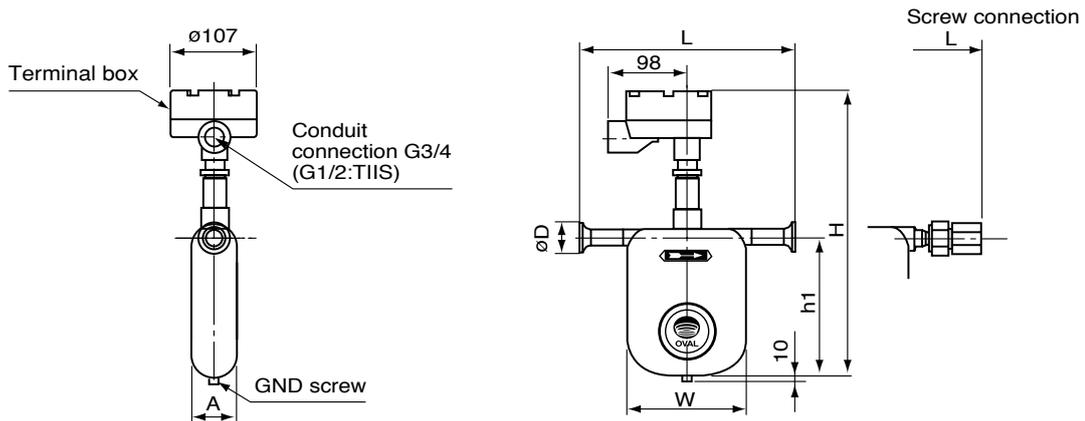
- Sensor unit CA006 to CA080
- Transmitter separately mounted / flange connection type



Model	JIS						ASME, JPI			DIN			H	h1	A	W	Approx. Weight kg (JIS 10K)	
	Nom. size mm	10K	20K	30K	40K	63K	Nom. size inch	150	300	600	Nom. size DN	PN10, 16						PN25, 40
		L						L				L						
CA006	10	242	242	260	260	280	1/2"	268	277	289	15	241	247	368	180	53	148	4.0
CA010	15	256	256	276	276	294	1/2"	282	291	303	15	256	261	406	218	53	163	4.7
CA015	15	299	299	319	319	343	1/2"	325	334	347	15	299	305	456	268	65	205	5.6
CA025	25	380	380	400	400	422	1"	411	424	437	25	376	380	524	329	83	262	10.4
CA040	40	513	513	541	541	585	1-1/2"	547	560	575	40	507	513	654	452	121	385	19.8
CA050	50	513	523	561	561	595	2"	550	563	582	50	513	519					20.2
CA080	80	657	675	725	725	771	3"	699	717	737	80	659	675	824	602	174	510	53.6

*: This table is applied to material code "S" and "M". In case of code "H", please consult our representative.
 *: As long as flange O.D. and bolt holes remain the same while flange rating may differ, the flange thickness with the higher rating is chosen in the above.
 *: DIN flanges are available only to meters of the material code, "S" and "M".

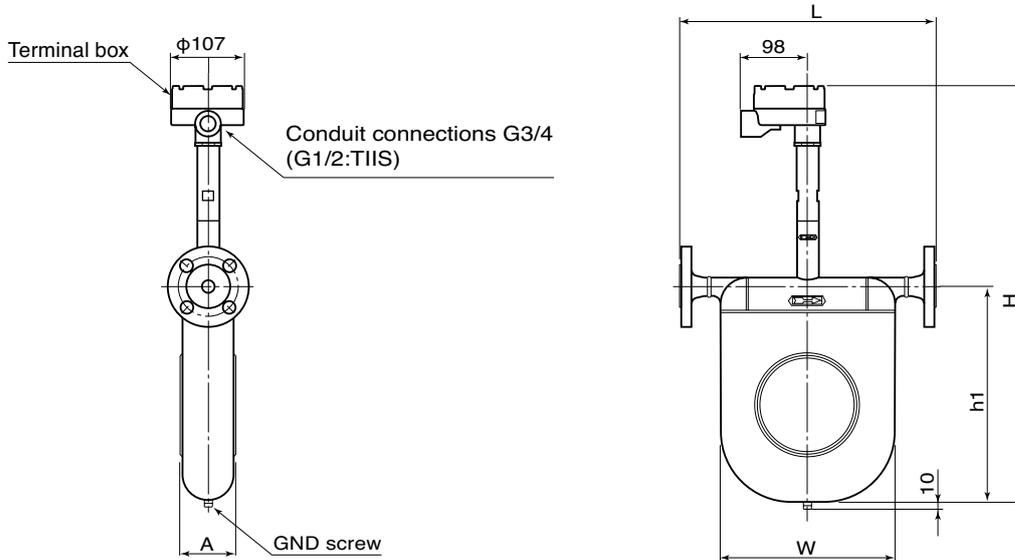
- Transmitter separately mounted / ferrule or screw connection type



Model	Ferrule		L	H	h1	A	W	φ D	Approx. Weight (kg)	Model	Screw	L	Approx. Weight (kg)
	Nom. size	Connection									Connection		
CA006	10	Ferrule 10A	231.5	368	180	53	148	34	2.8	CA006	Rc 3/8	296	2.8
CA010	15	Ferrule 15A	246	406	218	53	163	34	3.4	CA010	Rc 3/8	312	3.4
CA015	15	Ferrule 15A	289	456	268	65	205	34	4.2	CA015	Rc 3/4	382	4.2
CA025	25	Ferrule 25 (ISO), IDF 1S	370	524	329	83	262	50.5	7.8				
CA040	40	Ferrule 38 (ISO), IDF 1.5S	493	654	452	121	385	50.5	16.3				
CA050	50	Ferrule 51 (ISO), IDF 2S						64					
CA080	80	Ferrule 76.1 (ISO), IDF 3S	658.5	824	602	174	510	91	47.9				

■ DIMENSIONS [Unit in mm]

- Sensor unit CA025 (High temperature service model) to CA050 (High temperature service model)
- Transmitter separately mounted / flange connection type

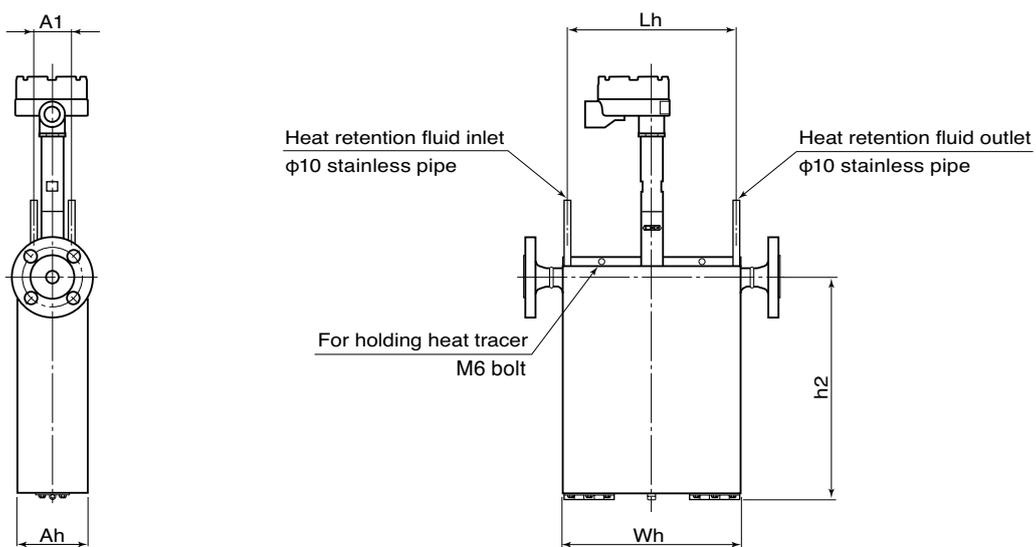


High temperature service model

Model	JIS					ASME, JPI			DIN			H	h1	A	W	Approx. weight kg (JIS 10K)		
	Nom. size mm	10K	20K	30K	40K	Nom. size inch	150	300	600	Nom. size DN	PN10, 16						PN25, 40	
		L					L				L							
CA025	25	380	380	400	400	422	1"	411	424	437	25	376	380	638	329	83	262	10.9
CA040	40	513	513	541	541	585	1-1/2"	547	560	575	40	507	513	768	452	121	385	20.3
CA050	50	513	523	561	561	595	2"	550	563	582	50	513	519					20.7

*: As long as flange O.D. and bolt holes remain the same while flange rating may differ, the flange thickness with the higher rating is chosen in the above.
 *: DIN flanges are available only to meters of the material code, "S" and "M".

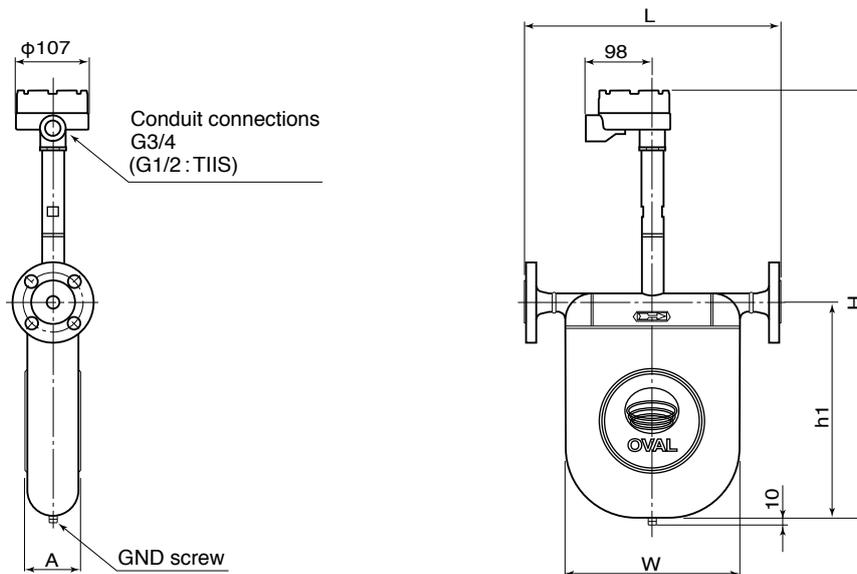
● Sensor unit with Heat Tracer : CA025 to CA050



Sensor unit model	Nom. size	With Heat Tracer	Lh	h2	Ah	A1	Wh	Approx. weight kg (JIS 10K)
CA025	25(1")	HT1-025A	254	340	106	56	268	16.9
CA040	40(1-1/2")	HT1-040A	376	464	144	70	390	31.8
CA050	50(2")							32.2

■ DIMENSIONS [Unit in mm]

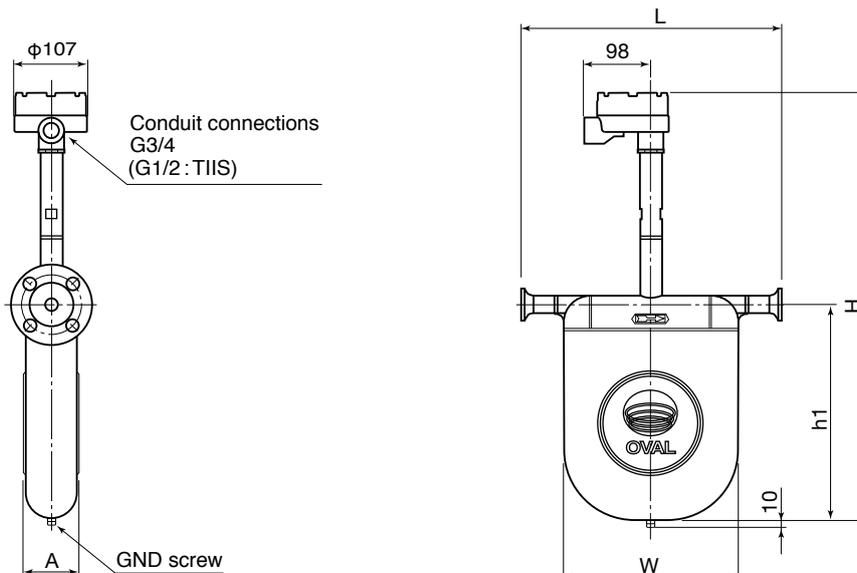
- Sensor unit CA025 (Low temperature explosionproof service model) to CA080 (Low temperature explosionproof service model)
- Transmitter separately mounted / flange connection type



Model	JIS						ASME, JPI				DIN			H	h1	A	W	Approx. weight kg (JIS 10K)
	Nom. size mm	10K	20K	30K	40K	63K	Nom. size inch	150	300	600	Nom. size DN	PN10, 16	PN25, 40					
		L						L				L						
CA025	25	380	380	400	400	422	1"	411	424	437	25	376	380	660	329	83	262	10.9
CA040	40	513	513	541	541	585	1-1/2"	547	560	575	40	507	513	790	452	121	385	20.3
CA050	50	513	523	561	561	595	2"	550	563	582	50	513	519					20.7
CA080	80	657	675	725	725	771	3"	699	717	727	80	659	675	960	602	174	510	54.1

※: This table is applied to material code "S" and "M". In case of code "H", please consult our representative.
 ※: As long as flange O.D. and bolt holes remain the same while flange rating may differ, the flange thickness with the higher rating is chosen in the above.
 ※: DIN flanges are available only to meters of the material code, "S" and "M".

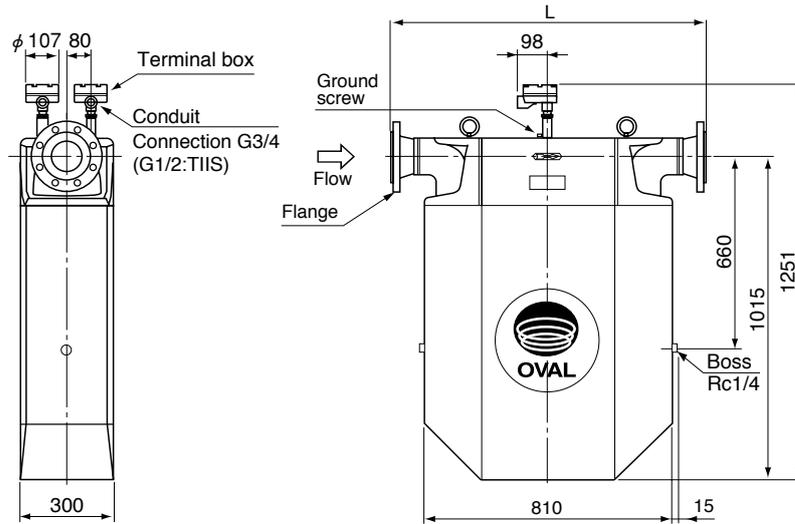
- Transmitter separately mounted / ferrule connection type



Model	Ferrule		L	H	h1	A	W	φ D	Approx. Weight (kg)
	Nom. size	Connection							
CA025	25	Ferrule 25 (ISO), IDF 1S	370	660	329	83	262	50.5	8.3
CA040	40	Ferrule 38 (ISO), IDF 1.5S	493	790	452	121	385	50.5	16.8
CA050	50	Ferrule 51 (ISO), IDF 2S						64	
CA080	80	Ferrule 76.1 (ISO), IDF 3S	658.5	960	602	174	510	91	48.4

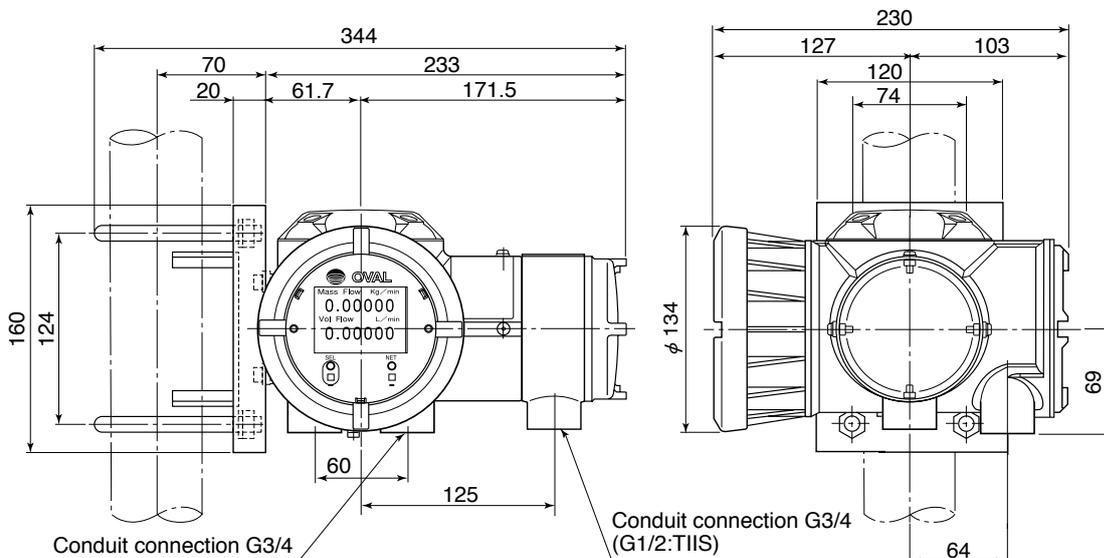
■ DIMENSIONS [Unit in mm]

- Sensor unit
- CA100 and CA150



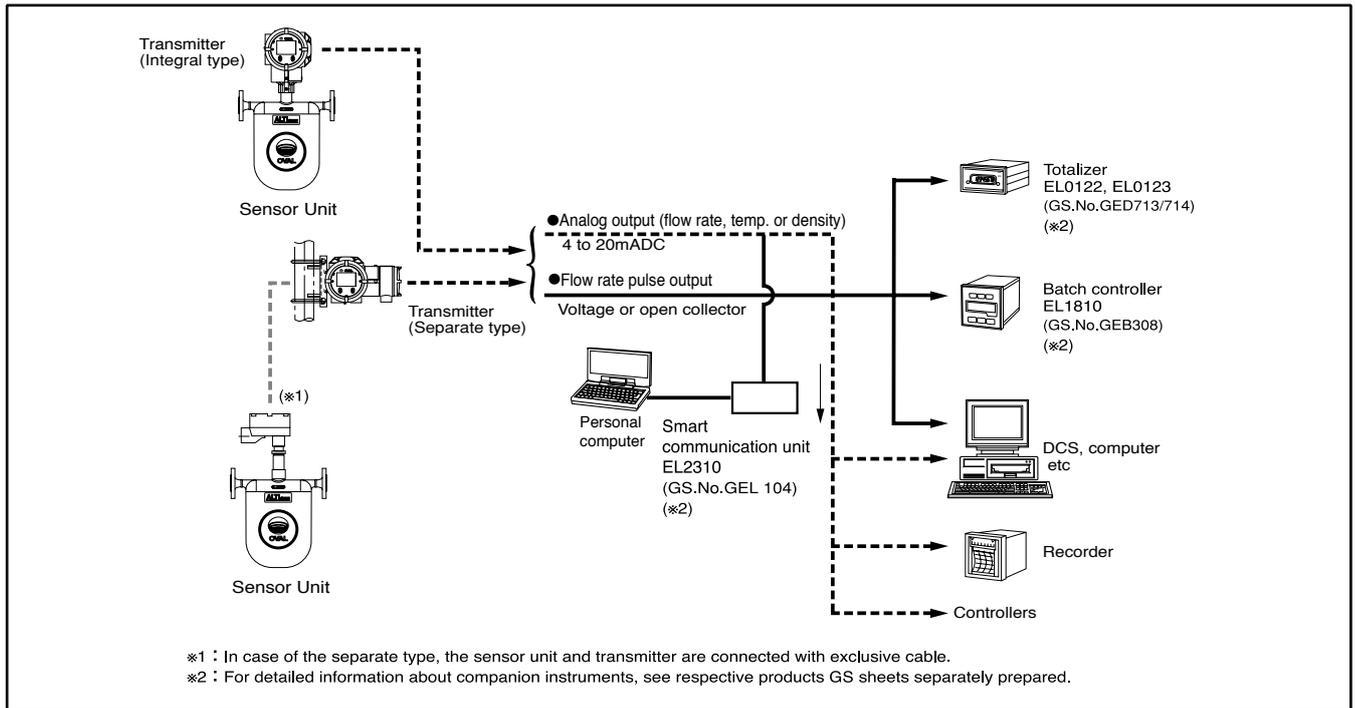
Model	Flange		L	Approx. weight kg
	Nom. size	Ratings		
CA100	100mm	JIS 10K	992	231
		JIS 20K	1006	235
		JIS 30K	1016	241
	4"	ASME, JPI 150	1018	237
		ASME, JPI 300	1036	245
		ASME, JPI 600	1082	255
DN100	PN10, 16	968	231	
	PN25, 40	994	241	
CA150	150mm	JIS 10K	1300	246
		JIS 20K	1320	253
		JIS 30K	1330	265
	6"	ASME, JPI 150	1318	248
		ASME, JPI 300	1338	265
		ASME, JPI 600	1388	292
	DN150	PN10, 16	1140	246
		PN25, 40	1290	265

● Remotely located transmitter

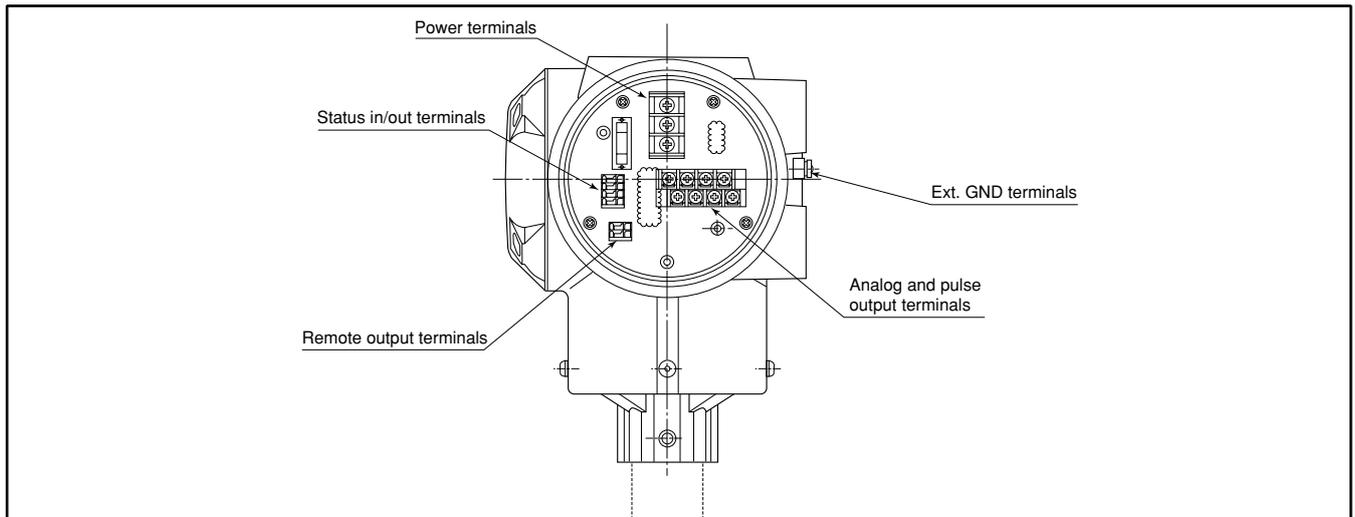


※: While stanchion mounting hardware are furnished as standard accessories, the customer is to furnish the stanchion.

■ REMOTE MEASURING SYSTEM



■ WIRING DIAGRAM



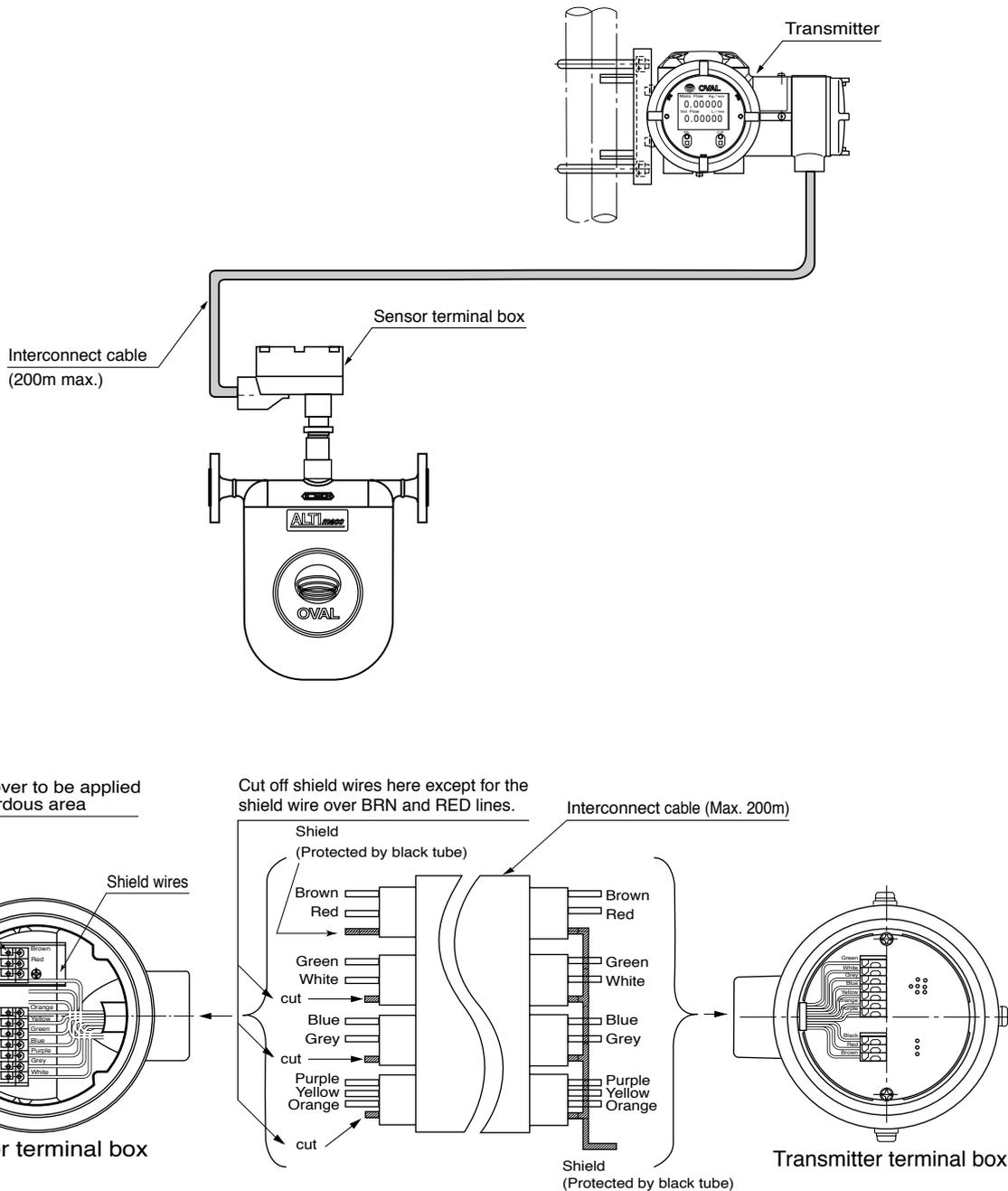
● Terminal identification and description

Item	Label	Description	Remarks
Signal	A1(+)	Analog output 1 (4 to 20mA)	1. Max. load resistance is 600Ω for analog output 1 and 2. 2. Pulse output (voltage pulse) transmission length is Max. 10m (at 10kHz) Max. 100m (at 1kHz) Max. 1km (at 100Hz) finished O.D: 0.75sq
	A1(-)		
	A2(+)	Analog output 2 (4 to 20mA)	
	A2(-)		
	P1(+)	Pulse output 1 (voltage/open collector output)	
	P1(-)		
	P2(+)	Pulse output 2 (voltage/open collector output)	
	P2(-)		
	S.I.(+)	Status input (contact input)	
	S.I.(-)		
S.O.(+)	Status output (open collector output)		
S.O.(-)			
Power	I/O(+)	Expanded in/out (Modbus communication, etc.)	Max. 1km at 0.65sq
	I/O(-)		
	L(+)	Power (with DC power: +)	
	FG	Earth ground	
	N(-)	Power (with DC power: -)	

NOTE: The common terminals for pulse outputs 1 and 2 and the status output of this instrument are not isolated. Therefore, if you want to connect an external device to each output terminal with a load (resistance) added to the minus side, no correct output might be obtained. Please be sure to use the external device with the load connected to the plus side.

■ WIRING

● Wiring between Sensor Unit and Separately Mounted Transmitter



NOTE 1. Do not fail to use dedicated interconnect cable.

2. Shield wire preparation

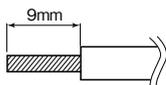
(1) Transmitter end:

As shown in the above figure, bundle shield wires colored in brown/red, green/white, blue/grey and purple/yellow/orange and cover the wires with a black tube. Then connect only one wire to the terminal box (black) taking care to avoid potential contact with the housing or conductive parts.

(2) Sensor end:

As shown in the figure, cover the brown/red shield wire with a black tube and connect it to the terminal box taking care to avoid potential contact with the housing or conductive parts. Clip all shield wires except brown/ red as shown in the above figure.

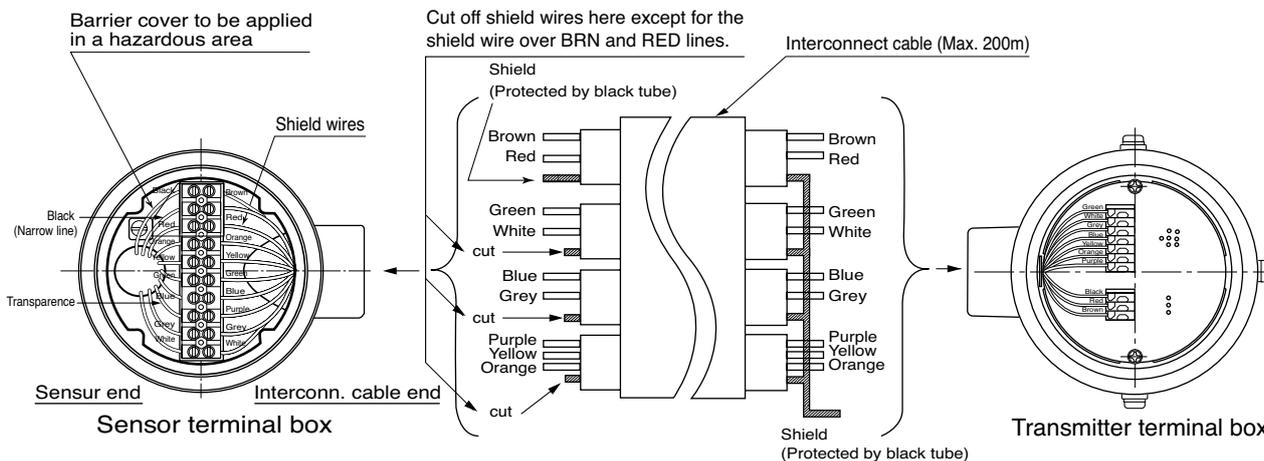
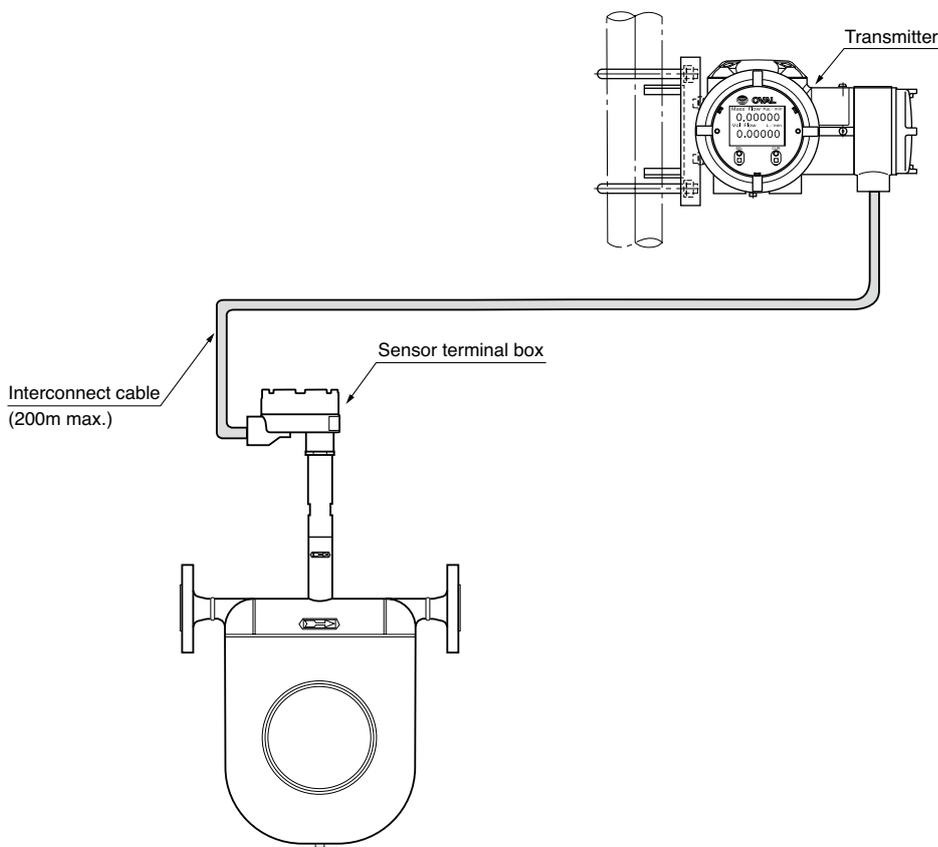
(3) Recommended cable end treatment:



※: Use of a stick type crimp terminal is not necessary.

■ WIRING (High temperature service model)

● Wiring between Sensor Unit and Separately Mounted Transmitter



NOTE 1. Do not fail to use dedicated interconnect cable.

2. Shield wire preparation

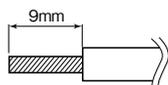
(1) Transmitter end:

As shown in the above figure, bundle shield wires colored in brown/red, green/white, blue/grey and purple/yellow/orange and cover the wires with a black tube. Then connect only one wire to the terminal box (black) taking care to avoid potential contact with the housing or conductive parts.

(2) Sensor end:

As shown in the figure, cover the brown/red shield wire with a black tube and connect it to the terminal box taking care to avoid potential contact with the housing or conductive parts. Clip all shield wires except brown/red as shown in the above figure.

(3) Recommended cable end treatment: Use of a stick type crimp terminal is not necessary.



※: Use of a stick type crimp terminal is not necessary.

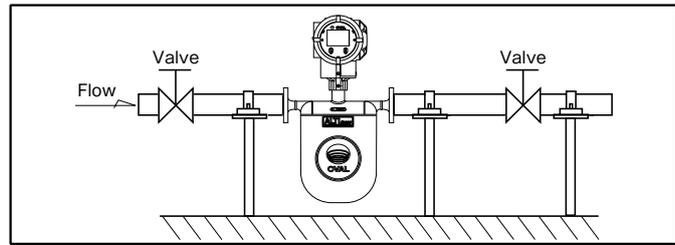
■ STANDARD INSTALLATION

1. Typical Installation (See figure at right.)

- 1) Avoid pipeline stresses on the meter.
- 2) The meter should be supported near and between connections to the process pipelines.
- 3) Avoid supporting the meter body directly.
- 4) Pipeline should be arranged such that the meter is constantly filled with the process fluid. Avoid, however, installing it in a pocket where slurries may build up.
- 5) Provide a valve downstream of the meter to allow zeroing by obtaining a true zero flow. We recommend to provide another valve upstream of the meter for servicing or maintenance.

2. Precautions at Installation

- 1) Locate the meter at least one meter from large transformers, motors, or other sources of electromagnetic induction. Also avoid installation near the sources of excessive vibration, such as motors and pumps.
- 2) In case of measurement of a process fluid which requires heat retention, heat trace may be applied directly to the sensor body. Heat trace should be held below 200°C. Explosionproof models require the temperature to be held below their maximum allowable levels.
- 3) To ensure consistent volume flow and density measurements, heat retention is suggested.
- 4) The sensor unit is of gastight construction. To prevent dew condensation inside in a low temperature application, it is filled with argon gas. For this reason, avoid dropping or giving it impact shocks.
- 5) In a horizontal run, install the sensor unit with the transmitter up as shown in the figure.



- 6) A control valve should be located downstream of the meter. In an arrangement where cavitation may possibly take place, locate it at least 5 meters away.
- 7) To ensure consistent and accurate measurement, the Coriolis flowmeter should be placed in an environment where pipeline oscillation is held below 0.3G.
- 8) Sudden temperature change may damage the performance of the flowmeter. Keep the temperature change of the fluid within ±12°C/min. for both heating and cooling.

3. Prevention of Cavitation

Cavitation can causes a loss of meter accuracy in measurement. Maintain line pressure that will not cause cavitation upstream and downstream of the meter for this reason. Avoid making such an arrangement as to open the line to the atmosphere immediately downstream of the meter. Care must be taken particularly with high steam pressure liquids. In practice, we recommend to keep the back pressure in the meter (downstream pressure) above the value calculated by the formula below:

$$P_d = 3\Delta P + 1.3P_v \text{ (MPa[absolute])}$$

P_d : Downstream pressure (MPa[absolute])

ΔP : Pressure loss across the meter (MPa)

P_v : Steam pressure of the process fluid at measurement (MPa[absolute])

4. Physical orientation

(1) CA003 thru CA150

Recommended physical orientation varies with the type of process fluid. [No. 2 in the figure below shows representative orientation for liquid service.]

	Horizontal run		Vertical run
	No.1	No.2	No.3
Orientation			
Fluids	<ul style="list-style-type: none"> ● Gases ● Slurries 	<ul style="list-style-type: none"> ● Liquids 	<ul style="list-style-type: none"> ● Slurries (requiring cleaning) ● Liquids ● Gases

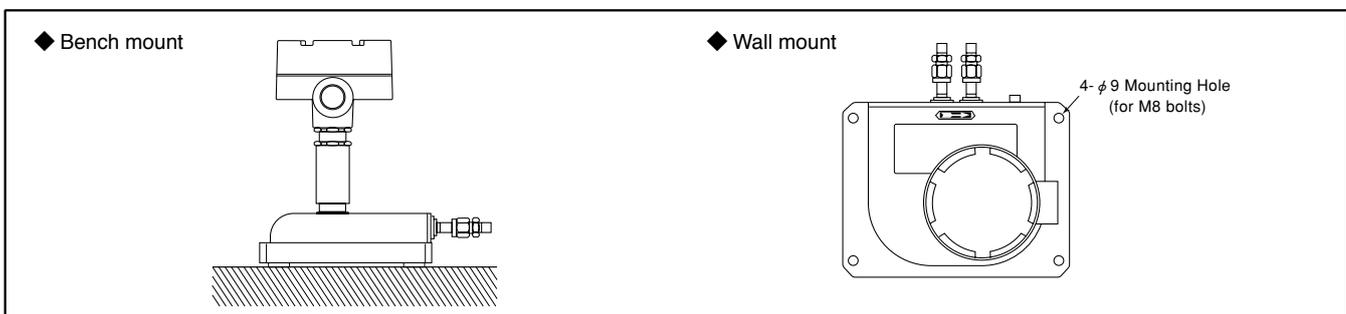
*1: For installation orientation in No. 1, we recommend the separately mounted transmitter. If the integrally mounted transmitter is your option, consult the factory.

*2: The measuring tube of the CA003 is in double-loop configuration without self-draining feature.

*: Do not forget to specify the physical orientation when you order.

(2) CA00A and CA001

The instrument can be installed either on the bench or on the wall. The following physical orientation is suggested. (In wall mounting, secure the instrument with bolts, using the mounting holes provided for the sensor unit.)



PRODUCT CODE EXPLANATION

Item	Code No.																		Description	Choice division						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱								
Model	C	A																ALTI ^{mass} Type U								
			0	0	A																Connection 1/4"					
			0	0	1																Connection 1/4"					
			0	0	3																Connection 10mm (3/8")					
			0	0	6																Connection 10mm (3/8")					
			0	1	0																Connection 15mm (1/2")					
			0	1	5																Connection 15mm (1/2")					
			0	2	5																Connection 25mm (1")					
			0	4	0																Connection 40mm (1 1/2")					
			0	5	0																Connection 50mm (2")					
			0	8	0																Connection 80mm (3")					
Nominal size	1	0	0																Connection 100mm (4")							
	1	5	0																Connection 150mm (6")							
Applicable fluid	L																			Liquid	○	○	○	○	○	
	G																			Gas	○	○	○	○	○	
Temperature rating (*1)	1																			Standard (max. 130°C)	×	×	○	○	○	
	2																			Standard (max. 200°C)	○	○	○	○	○	
	3																			High temperature service model (max. 350°C)	×	×	×	×	×	
	4																			Low temperature explosionproof service model (-200°C to 50°C)	×	×	×	×	×	
Pressure rating	1																			Standard	○	○	○	○	○	
	2																			High pressure service (*2)	×	×	×	×	×	
Material	S																			SUS316L	○	○	○	○	○	
	M																			SUS316L + Alloy C (*3)	×	○	○	○	○	
	H																			Alloy C	×	○	○	○	○	
Process connection	A																			Screw connection	○	○	○	○	×	
	B																			Ferrule connection	×	○	○	○	○	
	C																			JIS 10 K	×	○	○	○	○	
	D																			JIS 20 K	×	○	○	○	○	
	E																			JIS 30 K	×	○	○	○	○	
	F																			JIS 40 K	×	○	○	○	×	
	G																			JIS 63 K	×	○	○	○	×	
	H																			ASME 150	×	○	○	○	○	
	J																			ASME 300	×	○	○	○	○	
	K																			ASME 600	×	○	○	○	○	
	L																			JPI 150	×	○	○	○	○	
	M																			JPI 300	×	○	○	○	○	
	N																			JPI 600	×	○	○	○	○	
	P																			DIN PN10	×	○	○	○	○	
	Q																			DIN PN16	×	○	○	○	○	
	R																			DIN PN25	×	○	○	○	○	
S																			DIN PN40	×	○	○	○	○		
Z																			Others	×	○	○	○	○		
Transmitter configuration (*4)	1																			Integrally mounted	×	×	○	○	×	
	2																			Remotely mounted	○	○	○	○	○	
Power supply	1																			20 to 30VDC						
	2																			85 to 264VAC 50/60Hz						
Analog output	A																			Output 1: Mass flow, Output 2: Mass flow						
	B																			Output 1: Mass flow, Output 2: Density						
	C																			Output 1: Mass flow, Output 2: Temperature						
	D																			Output 1: Mass flow, Output 2: Volume flow (true density)						
	E																			Output 1: Mass flow, Output 2: Volume flow (fixed density)						
	F																			Output 1: Density, Output 2: Temperature						
	G																			Output 1: Volume flow (true density), Output 2: Density (true density)						
	H																			Output 1: Volume flow (fixed density), Output 2: Density						
	J																			Output 1: Volume flow (true density), Output 2: Temperature						
	K																			Output 1: Volume flow (fixed density), Output 2: Temperature						
Pulse output	A																			Output 1: Mass flow					Single pulse	
	B																			Output 1: Volume flow (true density)						
	C																			Output 1: Volume flow (fixed density)						
	D																			Output 1: Mass flow, Output 2: Mass flow						
	E																			Output 1: Mass flow, Output 2: Volume flow (true density)						
	F																			Output 1: Mass flow, Output 2: Volume flow (fixed density)						
	G																			Output 1: Volume flow (true density), Output 2: Volume flow (true density)						
	H																			Output 1: Volume flow (fixed density), Output 2: Volume flow (fixed density)						
Pulse output form	1																			Open collector pulse (default)						
	2																			Voltage pulse						
Communication interface	1																			Hybrid communication (Bell 202 under HART protocol)						
	4																			MODBUS communication (RS-485 Modbus protocol)						
Explosionproof specification	0																			Non-explosionproof						
	1																			TIIS (*5)						
	2																			ATEX (*5)						
	7																			NEPSI					In preparation	
Explosionproof temp. class	0																			Non-explosionproof						
	1																			Sensor unit temp. class T1; remote type transmitter only; CA025 thru 050 (High Temp. service model) only						
	2																			Sensor unit temp. class T2; remote type transmitter only; CA006 thru 080 only						
	3																			Sensor unit temp. class T3; remote type transmitter only						
	5																			Sensor unit temp. class T5 (-200 to 50°C); CA025 to CA080 (Low temperature explosionproof service model) only						

*1: With explosionproof specification (applied for), some temperature class related restrictions exist.
 *2: If "high pressure service" in pressure category is selected, "screw-in" process connection applies.
 *3: When major part material code "H" (Alloy C) is selected, the connection standard for CA003 is "screw-threaded connection". Only loose flange is adopted for CA006 through CA080 flange connections.
 *4: In applications where process fluid temperature exceeds 90°C, only "remotely mounted" transmitter is selectable.
 *5: Modbus is not supported.

■ PLEASE SUPPLY THE FOLLOWING INFORMATION WHEN YOU INQUIRE.

(Fill in the form below to the extent possible. Further details will be finalized in later consultation.)

• Fill in the blanks. Tick the boxes that apply.

1. Sensor unit	CA <input type="checkbox"/>
2. Process fluid (※1)	Name: _____ SP. gr : _____ Viscosity : _____ Concentration : _____ %
3. Flow range	Max. _____ Normal _____ Full scale _____ <input type="checkbox"/> kg/h <input type="checkbox"/> Others _____
4. Fluid temperature	Max. _____ °C Normal _____ °C Min. _____ °C
5. Operating pressure	Max. _____ MPa Normal _____ MPa Min. _____ MPa
6. Ambient temperature	Max. _____ °C Min. _____ °C
7. Fluid flow direction	<input type="checkbox"/> Left → Right <input type="checkbox"/> Right → Left <input type="checkbox"/> Bottom → Top (<input type="checkbox"/> Top → Bottom) Orientation: See sketch on page 14.
8. Nominal size	_____ mm or _____ inch
9. Required accuracy	± _____ % of reading ± _____ % of full scale
10. Process connection	<input type="checkbox"/> Flanged connection (Flange rating) <input type="checkbox"/> Ferrule connection <input type="checkbox"/> Screw connection
11. Explosionproof	<input type="checkbox"/> Not required <input type="checkbox"/> TIIS <input type="checkbox"/> ATEX
12. Power supply	<input type="checkbox"/> 20 to 30VAC <input type="checkbox"/> 85 to 264VAC (50/60Hz)
13. Output specifications	Pulse output
	<input type="checkbox"/> Volt. pulse: [0]: 1.5V [1]: 15VDC min. Out. impedance: 2.2kΩ <input type="checkbox"/> Open collector: Min. 10V to Max. 30VDC, 50mA <input type="checkbox"/> Output frequency: Any point from 0.1 to 10000Hz at full scale Two outputs from instant flowrate (mass or volume).
	Analog output
	4 to 20mA DC Max. load: 600Ω 2 outputs from instant. flow rate (mass, volume), temp. or density (option)
	Additional damping
Alarm output	Slug flow High _____ g/mL Low _____ g/mL
14. Companion receiver	<input type="checkbox"/> Totalizer <input type="checkbox"/> Indicator <input type="checkbox"/> Recorder <input type="checkbox"/> Flow controller <input type="checkbox"/> Batch controller <input type="checkbox"/> Density computer <input type="checkbox"/> Computer <input type="checkbox"/> Others
15. Transmission length	Sensor unit (_____) m Transmitter (_____) m Receiving instrument
16. Exclusive cable length	In case of separately- mounted type _____ m (Max. 200m)
17. In case of separate type transmitter	<input type="checkbox"/> Stanchion type w/bracket and 2" U bolts
18. No. of units required	
19. Application	
20. Other considerations	

※1: Special fluids, such as of high viscosity or slurries, should be stated precisely and in detail.

The specification as of Aug., 2012 is stated in this GS Sheet. Specifications and design are subject to change without notice.

Sales Representative:

P. Manuel Girona, 2 - 08034 Barcelona
T- 93 280 01 01; F- 93 280 01 01



www.lanasarrate.es
lanasarrate@lanasarrate.es

GS.No.GBN120E		
初版	改訂	印刷
09.07	12.08	12.06
(500)		

Robert Brown Associates, Inc.

6-C Mount Pleasant Road

Aston, Pennsylvania 19014

Toll Free: 800-777-6906 | Phone: 610-354-0200 | Fax: 610-354-0340

E-Mail: sales@rbapump.com | Web site: www.rbapump.com

Model/Part# 10208089, LT Series Chemical Metering Pump



SPECIFICATIONS

Type	LT10
Head	Standard
Capacity @ Max. Pressure	2.67
Construction	PVC/Viton/Glass
PE Tubing Connection	1/4" x 3/8"

MICRO-REGULADOR DE PRESIÓN ENCASTRABLE

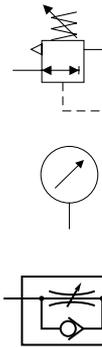
- Posibilidad de montaje en cuadro (taladro Ø12,2 mm)
- Zona de regulación 0,5 a 8 bar
- Cuerpo con 2 salidas laterales ØM5, a elegir

MANÓMETRO Ø40 mm

Racor trasero R1/8

MICRO-REDUCTOR DE CAUDAL

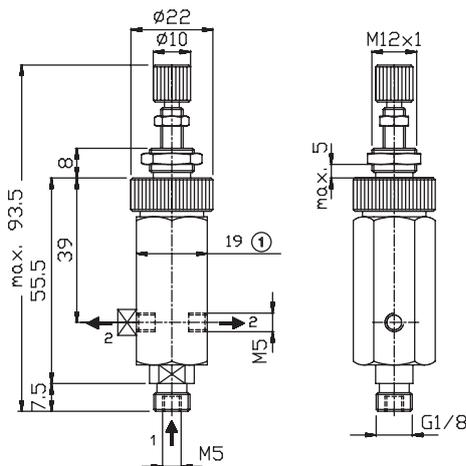
- en línea, encastrable ØM3
- reductor de caudal orientable, adaptable directamente en el cilindro, ØM3



Descripción	Racordaje	Zona de regulación (bar)	Caudal (l/mn - ANR)	Temperatura admisible	Materiales	CÓDIGOS
Micro-regulador de presión	Entrada : - M5 hembra G1/8 macho Salida : 2 x M5 hembra	0,5 - 8 ($p_{max} = 16$)	120 (con $p_1 = 8$ bar $p_2 = 6$ bar)	0°C, + 60°C	Cuerpo : Al + latón Piezas internas : Latón + Acero Junta : Nitrilo(NBR)	34201802
Manómetro Ø 40	R 1/8	0 - 10	—	-20°C, + 80°C	Cuerpo Poliéster negro	34300014
Reductor para manómetro	G 1/8-M5	—	—	—	Latón niquelado	34600372
Micro-Reductor de caudal	en línea M3	0 - 8	30	+5°C, +50°C	Cuerpo : Latón niquelado Vástago : Latón niquelado	34600320

REGULADOR DE PRESIÓN

Ø M5-G1/8

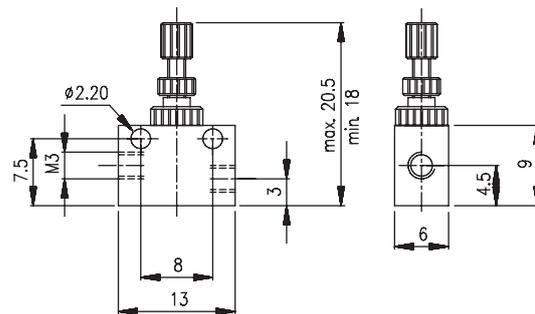


- Suministrado con 1 tornillo-tapón ØM5
- Peso : 90 g
- ① : cota entre caras

REDUCTOR DE CAUDAL Ø M3

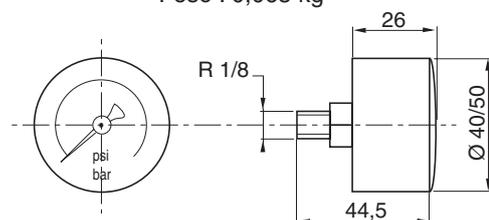
EN LÍNEA

Peso : 10 g



MANÓMETRO

Peso : 0,065 kg



Testo 608

The affordable standard testo 608-H1 hygrometer for continuous measurement of humidity, temperature and dew point.

The accurate testo 608-H2 alarm hygrometer with an accuracy of 2%RH and LED alarm function reliably warns you if limits have been exceeded.

Features:

- With td dew point calculation and max/min display
- Testo 608-H2, with LED alarm, warns if limits are exceeded
- Humidity sensor not affected by water



Specifications

Measuring range	Testo 608-H1: 10 to 95 %RH (0 to 50 °C) Testo 608-H2: 2 to 98 %RH (-10 to 70 °C)
Accuracy	Testo 608-H1: 10 to 95 %RH (0 to 50 °C) Testo 608-H2: 2 to 98 %RH (-10 to 70 °C)
Resolution	0,1 °C
Probe type	NTC temperature sensor, humidity sensor, capacitive
Dimensions	120x89x40 mm/4,7x3,5x1,6"
Storage temp.	-40 to 70 °C/ -40 to 160 °F
Operating temp.	Testo 608-H1: 0 to 50 °C Testo 608-H2: -10 to 70 °C
Battery type	9V Block battery/ approx. 8736 hours
Measuring cycle:	18 s
Warranty:	1 Year

Pipeta automática volumen fijo Research™



CARACTERÍSTICAS

Pipeta automática volumen fijo, Research™, Eppendorf®

Autoclavables (cuerpo inferior únicamente), IVD

Research®, volumen fijo

Distinción otorgada por el TÜV de Renania por su ergonomía y facilidad de uso, comprobada por los usuarios

Expulsor de puntas con botón separado; operación con una sola mano

Resistentes a productos corrosivos

Pantalla de 4 dígitos con protección de efecto lupa en modelos de volumen variable

Etiqueta de calibración que cumple con normas de BPL

Código	Tipo	Volumen (uL)	División (uL)	Exactitud	Precisión	Para puntas de pipeta (uL)	Código de color	Cantidad
20446133590	volumen fijo	10	-	+/-1,2 %	<=0,6 CV en %	200	amarillo	1
20446133595	volumen fijo	200	-	+/-0,6 %	<=0,2 CV en %	1000	azul	1
20446133596	volumen fijo	250	-	+/-0,6 %	<=0,2 CV en %	1000	azul	1
20446133592	volumen fijo	25	-	+/-1,0 %	<=0,3 CV en %	200	amarillo	1
20446133598	volumen fijo	1000	-	+/-0,6 %	<=0,2 CV en %	1000	azul	1
20446133594	volumen fijo	100	-	+/-0,6 %	<=0,2 CV en %	200	amarillo	1
20446133597	volumen fijo	500	-	+/-0,6 %	<=0,2 CV en %	1000	azul	1
20446133591	volumen fijo	20	-	+/-1,0 %	<=0,3 CV en %	200	amarillo	1
20446133593	volumen fijo	50	-	+/-0,7 %	<=0,3 CV en %	200	amarillo	1

I.C.T, S.L.

INSTRUMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA, S.L.

Tel. (+34) 902 193 170 · Fax (+34) 902 193 167

Web: <http://www.ictsl.net/> E-mail: comercial@ictsl.net



(C) 2012 - Quedan todos los derechos reservados

[Imprimir esta página](#)