



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**Filtración con Membrana de Aguas que  
Contienen Crudo Liviano.  
Adquisición de Datos por Computadora**

Proyecto de Grado

Autor: Rafael Humberto Pinto Peralta

Tutor: Leonardo Rennola  
Tutor: Carlos L. Salas

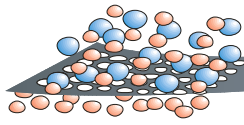
Mérida – Venezuela, Septiembre de 2008



[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

*A mis padres y hermanos,  
por el gran apoyo brindado.*

Reconocimiento-No comercial-Sin derivar

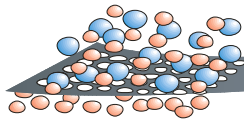


***Título del Proyecto:*** Filtración con Membrana de Aguas que Contienen Crudo Liviano. Adquisición de Datos por Computadora

---

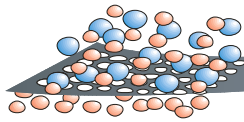
## **RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación, se estudió la ultrafiltración de un sistema disperso de crudo Apure en agua, utilizando una membrana plana de Polisulfona. Se instaló un sistema de adquisición de datos por computadora, para controlar y monitorear el flujo de permeado en la filtración, esto se logró utilizando una tarjeta de adquisición de datos (NI PCI-MIO-16XE-50) y el software LabView 8.0<sup>®</sup> ambos de la misma casa National Instrument. Se evaluó el efecto que se produce en el flujo de permeado al variar el pH y la concentración de electrolitos, observándose que para un medio ácido o básico se promueve un aumento en el flujo de permeado, a diferencia de un medio neutro, que evidenció una mayor afinidad hacia la membrana, debido a que se observó mayor adsorción de crudo, provocando un mayor ensuciamiento y taponamiento de la misma. Se observó que al aumentar la concentración de Sodio del medio, aumenta considerablemente el flujo de permeado, ya que es posible el desplazamiento de las fracciones hidrofílicas hacia la interfase, debido a la alta polaridad que adquiere el medio acuoso, predominando las fuerzas de repulsión electrostática sobre las fuerzas de atracción de Van der Waals.



## INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	4
<b>CAPITULO I. EL PETRÓLEO</b>	
I.1 Que es el Petróleo.....	5
I.2 Composición Química.....	5
I.3 Característica Físicas y Químicas del Petróleo.....	6
I.4 Tipos de Crudo.....	10
<b>CAPITULO II. QUE ES UNA EMULSIÓN</b>	
II.1 Definiciones.....	13
II.2 Composición de una Emulsión.....	13
II.3 Tipo de Emulsión.....	14
II.4 Propiedades.....	15
II.4.1. <i>Conductividad</i> .....	15
II.4.2. <i>Viscosidad</i> .....	16
II.4.3. <i>Estabilidad</i> .....	17
II.4.4. <i>Tamaño de Gota</i> .....	17
<b>CAPITULO III. EFLUENTES INDUSTRIALES</b>	
III.1. Tratamiento de Efluentes Industriales.....	18
III.2. Factores Específicos de Contaminación.....	18
III.3 Caracterización de los Efluentes.....	19
III.4. Tratamientos Separados.....	20
III.5. Tratamientos Preliminares.....	21
III.6. Tratamientos Fisicoquímicos.....	21
III.7. Eliminación de la D.Q.O. no biodegradable.....	23
III.8 Efluentes Oleosos de la Industria Petrolera.....	23
<b>CAPITULO IV. PROCESO DE SEPARACIÓN CON MEMBRANAS</b>	
IV.1. Definición de Membrana.....	25
IV.2 Definición de Operación de Membrana.....	25
IV.3 Clasificación y tipos de Membranas.....	27
IV.3.1. <i>Según su Naturaleza Química</i> .....	27
IV.3.2 <i>Según su Mecanismo de Separación</i> .....	28
IV.3.3 <i>Según de acuerdo a su morfología</i> .....	29
IV.3.4 <i>Según su Afinidad</i> .....	30
IV.4 La Filtración.....	30
IV.5 Tipo de Filtración.....	31
IV.5.1. <i>Filtración Normal</i> .....	31
IV.5.2. <i>Filtración Tangencial</i> .....	32
IV.6 Módulos de Filtración con Membranas.....	32



IV.6.1. Planas.....	33
IV.6.2. Tubulares.....	33
IV.6.3. Fibras Huecas.....	34
IV.6.4 Espirales.....	34
IV.7. Tipos de procesos de filtrado con el uso de Membranas.....	35
IV.7.1 Microfiltración.....	35
IV.7.1.1 <i>Aplicaciones de la Microfiltración en tratamientos de aguas</i> .....	36
IV.7.1.2 <i>Selección del Módulo de MF</i> .....	37
IV.7.1.3 <i>Operación y mantenimiento de la MF</i> .....	39
IV.7.2. Ultrafiltración.....	40
IV.7.2.1 <i>Aplicaciones</i> .....	41
IV.7.2.2. <i>Operaciones y mantenimiento de Ultrafiltración</i> .....	44
IV.7.3 Ósmosis Inversa.....	45
IV.7.3.1. <i>Características del Proceso</i> .....	46
IV.7.3.2 <i>Aplicaciones</i> .....	47
IV.7.4 Nanofiltración.....	48
IV.7.5 Diálisis.....	49
IV.7.6. Electrodialisis.....	49
IV.7.6.1 Proceso de Electrodialisis Inversa.....	50
IV.8 Flujo de perneado a través de una membrana.....	51
IV.9 Polarización de la concentración en procesos de Filtración.....	52
IV.10 Factor de Rechazo.....	55
IV.11 Control y Eliminación de la Polarización.....	55

## **CAPITULO V. ADQUISICIÓN DE DATOS**

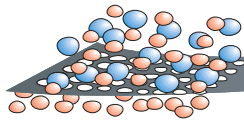
V.1. Adquisición de Datos.....	56
V.1.1. Ventajas.....	56
V.1.2. Usos.....	57
V.1.3. ¿ Como adquirir datos con un PC?.....	57
V.1.4. Tarjeta recolectora de datos.....	57
V.1.5. ¿Cómo leer variables con una tarjeta recolectora de datos?.....	59
V.2. ¿Qué es la Comunicación Serial?.....	60
V.3 ¿Qué es RS-232?.....	62

## **CAPITULO VI. ANTECEDENTES**

VI.1. Trabajos previos.....	63
-----------------------------	----

## **CAPITULO VII. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

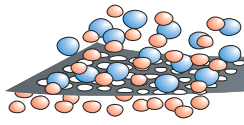
VII.1 Creación de la Interfaz para la adquisición de datos.....	66
VII.2 Método para determinar el contenido de crudo disperso en el agua.....	72
VII.3 Preparación de la Dispersión y medios acuosos.....	74
VII.4 Filtración con membranas.....	76
VII.5 Procedimiento de lavado del equipo piloto de filtración.....	78
VII.6 Determinación de la concentración de crudo en el permeado.....	79



## **CAPITULO VIII DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

VIII.1 Método para determinar el contenido de crudo disperso en el agua.....	80
VIII.1.1 Determinación de la relación del solvente.....	80
VIII.1.2 Determinación de la relación óptima entre el solvente y muestra problema.....	81
VIII.2 Filtración de la Dispersión.....	83
VIII.2.1 Ensuciamiento y reducción del diámetro de poro de la membrana en el proceso de filtrado.....	83
VIII.2.2. Efecto del pH sobre el flujo de permeado.....	87
VIII.2.3. Efecto de la concentración de Sodio sobre el flujo de permeado.....	89
VIII.2.4. Efecto al variar la concentración inicial de crudo sobre el flujo de permeado.....	92
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>94</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>97</b>

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



## INTRODUCCIÓN

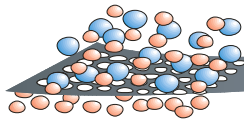
En los países desarrollados el 59 % del consumo total del agua es destinado a consumo industrial, el 30% a consumo agrícola y un 11% a gastos domésticos, según consta en el primer informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos del mundo, Agua para todos, agua para la vida [1]

El agua es tanto un derecho como una responsabilidad, y tiene valor económico, social y ambiental. Cada ciudadano, cada empresa, ha de tomar conciencia de que el agua dulce de calidad es un recurso natural, cada vez más escaso tanto a nivel superficial como subterráneo, necesario no sólo para el desarrollo económico, sino imprescindible como soporte de cualquier forma de vida en la naturaleza. No cabe duda de que la industria es motor de crecimiento económico y, por lo tanto, clave del progreso social. Sin embargo, demasiado a menudo la necesidad de maximizar el proceso productivo, hace que se excluya de la planificación, la protección del Medio Ambiente.

El adecuado tratamiento de aguas residuales industriales y su posterior reutilización para múltiples usos contribuye a un consumo sostenible del agua y a la regeneración ambiental del dominio público hidráulico y marítimo y de sus ecosistemas. Sin olvidar que el agua de calidad es una materia prima crítica para la industria.

Los hidrocarburos son un tipo de contaminante que afecta la calidad del agua de manera importante. Los derrames de petróleo, cada día son más frecuentes en los océanos, dejan estelas de contaminación con efectos a muy largo plazo. La formación de una película impermeable sobre el agua en las zonas de derrame afecta rápida y directamente a las aves y a los mamíferos acuáticos ya que obstruye el intercambio gaseoso y desvía los rayos luminosos que aprovecha el fitoplancton para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis.

La contaminación por petróleo es generada accidental o deliberadamente desde diferentes fuentes. Algunos investigadores consideran que la contaminación por petróleo proviene de los accidentes de los buque-tanques y de las fugas en los equipos de perforación marina, sin embargo, otros consideran que es cuestión de propaganda, ya que casi el 50 % del petróleo que llega a los



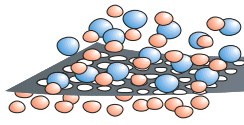
mares y los océanos proviene de tierra firme, del que es arrojado al suelo por las personas en las ciudades y en zonas industriales que luego son arrastrados por las corrientes fluviales hasta terminar en los océanos.

Se calcula que alrededor de 1500 millones de toneladas al año son transportadas a través de los mares y que en el proceso de carga y descarga se pierde el 0.1 % de ese petróleo. Además es práctica común que los tanques cisterna utilicen como lastre agua de mar y la regresen contaminada con petróleo. Otros buques-tanques bombean el petróleo de desecho al mar en forma de desperdicio. Se calcula que por estas dos formas se arrojan al mar 3.5 millones de toneladas de petróleo. Otra forma de contaminación por petróleo del mar proviene de la perforación de pozos de gas y petróleo en las aguas costeras y de las fugas de las tuberías subacuáticas.

En la explotación del petróleo se derrama cerca de la mitad en el área de perforación, lo que implica grandes pérdidas y contaminación del aire, agua y suelo. Sin embargo, el volumen de petróleo por derrames ocasionales es menor que el volumen de petróleo arrojado desde los pozos durante las operaciones normales, del lavado de los buque-tanques con agua marina, del transporte de petróleo en los buque-tanques y del agua contaminada con petróleo arrastrado por el océano. También los brotes naturales de petróleo liberan grandes cantidades al océano en varios sitios. Hoy en día la mayoría de las refinerías y terminales petrolíferas cuentan con planes de contingencia contra la contaminación.

Parte del proyecto también estuvo enfocado en como combatir la contaminación de agua con hidrocarburos, por medio del proceso de filtración con membranas, donde se utilizó un sistema de adquisición de datos por computadora, para llevar un mejor monitoreo y control del proceso.

La transmisión de información desde los sistemas primitivos hasta los modernos, ha tomado papeles relevantes para todo tipo de procesos, en la actualidad el mundo ha venido desarrollándose progresivamente en el ámbito tecnológico, donde la electrónica y la microelectrónica han motivado a que todo lo que rodea a la vida humana se este automatizando, por ejemplo: la industria, el hogar, los comercios, la agricultura, la ganadería, el transporte, las comunicaciones, etc.



En todo ese proceso de automatización el microprocesador y el microcontrolador juegan un papel de suma importancia. Ellos han permitido el desarrollo de sistemas inteligentes que resuelven los más diversos problemas, son los llamados Sistemas de Adquisición de Datos.

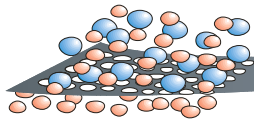
La adquisición de datos, es la toma de muestras del mundo real para generar datos que pueden ser manipulados por un ordenador. Estos sistemas aportan un gran número de ventajas como flexibilidad de procesamiento, posibilidad de realizar las tareas en tiempo real o en análisis posteriores, gran capacidad de almacenamiento, rápido acceso a la información y toma de decisión, posibilidad de emular una gran cantidad de dispositivos de medición y activar varios instrumentos al mismo tiempo, facilidad de automatización, etc.

Los sistemas de adquisición de datos se utilizan en la industria, la investigación científica, el control de máquinas y de producción, la detección de fallas y el control de calidad entre otras aplicaciones.

Una de las grandes ventajas en utilizar un sistema de adquisición de datos por computadora, es que muchos de los instrumentos de medición son altamente costosos en comparación a la instrumentación virtual, donde esta combina software y hardware modular externa al computador, para emular cualquier instrumento de medición que este a su alcance, con el fin de minimizar gastos y costos, por tiempo que pueden aparecer durante el proceso en desarrollo.

Otras de las grandes ventajas e importancia de los sistemas de adquisición de datos por computadora es que se puede tener la capacidad de monitorear y controlar las condiciones de un proceso a grandes distancias, a través del envío de datos o señales por red o internet.

En el proyecto se va a estudiar el efecto de la variación del pH y la concentración de electrolitos en el flujo de permeado a través de una membrana de ultrafiltración de polisulfona con la ayuda de un sistema de adquisición de datos.



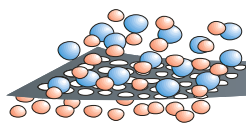
## OBJETIVOS

### Objetivo General

Estudiar la variación en el flujo de permeado en la filtración de emulsiones diluidas de crudo en agua, a través de una membrana de ultrafiltración de polisulfona considerando las variaciones de pH y salinidad del medio, utilizando un sistema de adquisición de datos por computadora.

### Objetivos Específicos

- Instalación del sistema de adquisición de datos al equipo Minitan de filtración con membranas planas, y conexión a la computadora.
- Estudiar las variaciones en el flujo de permeado en filtración de emulsiones diluidas de crudo para diferentes concentraciones de electrolitos ( $10^{-3}$  y  $10^{-1}$  M) a presión constante y pH de 4, 7 y 10.
- Estudiar el efecto sobre el flujo de permeado al variar la concentración de crudo en el agua.



## EL PETRÓLEO

La etimología de la palabra **petróleo**, **petro**=roca y **oleum**=aceite, gramaticalmente significa aceite de roca. Si este aceite se analiza para verificar su constitución química-orgánica, por contener el elemento carbono (C) en sus moléculas, se encontrará una extensa variedad de compuestos formados con el hidrógeno (H) denominados **hidrocarburos**. Los hidrocarburos son gaseosos, líquidos, semisólidos y sólidos, como aparecen en sitios de la superficie terrestre, o gaseosos y líquidos en las formaciones geológicas en el subsuelo.[2]

### I.1. ¿QUÉ ES EL PETRÓLEO?

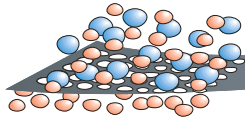
Es una mezcla de hidrocarburos (hidrógeno y carbono principalmente) que se obtiene de la naturaleza y que luego es refinado para obtener combustibles, lubricantes y materias primas para la fabricación de plásticos y otros compuestos. El proceso de refinado se realiza por medio de una destilación fraccionada y consiste en calentar el petróleo en una columna de fraccionamiento y separar los productos al condensarse a una determinada temperatura.

### I.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA.

El petróleo está compuesto por una mezcla de cientos de hidrocarburos, cuya estructura y número de átomos de carbono varía, confiriéndole diferentes propiedades que lo caracterizan y determinan su comportamiento, tales componentes pueden utilizarse como combustible, lubricante, ceras o solventes, cuya composición básica se puede apreciar en la tabla I.1. En la mayoría de los casos contienen compuestos orgánicos de azufre, oxígeno y nitrógeno, al igual que metales como vanadio, níquel y sodio.

Tabla I.1 Composición básica del petróleo [2]

Composición	
Compuesto	Composición en masa (%)
Carbono	83 - 87
Hidrógeno	11 - 14
Azufre	0 - 2
Nitrógeno	0,2

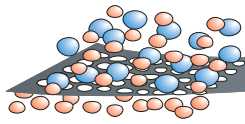


### **I.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL PETRÓLEO**

Todos los petróleos: livianos, medianos, pesados y extrapesados, generalmente llamados crudos en el argot diario petrolero, tienen características y propiedades físicas y químicas que a la vista sirven para distinguir y apreciar someramente unos de otros. Las principales características tienen que ser determinadas por análisis de laboratorio.

Entre las características están:

- **Color:** Generalmente se piensa que todos los crudos son de color negro, lo cual ha dado origen a cierta sinonimia y calificativos: “oro negro”, “más negro que petróleo crudo”. Sin embargo, por transmisión de la luz, los crudos pueden tener color amarillo pálido, tonos de rojo y marrón hasta llegar a negro. Por reflexión de la luz pueden aparecer verdes, amarillos con tonos de azul, rojo, marrón o negro. Los crudos pesados y extrapesados son negros casi en su totalidad. Crudos con altísimo contenido de cera son livianos y de color amarillo; por la noche al bajar bastante la temperatura tienden a solidificarse notablemente y durante el día, cuando arceja el sol, muestran cierto hervor en el tanque. El crudo más liviano o **condensado** llega a tener un color blanquecino, lechoso y a veces se usa en el campo como gasolina cruda.[2]
- **Olor:** El olor de los crudos es aromático como el de la gasolina, del querosén u otros derivados. Si el crudo contiene azufre tiene un olor fuerte y hasta repugnante, como huevo podrido. Si contiene sulfuro de hidrógeno, los vapores son irritantes, tóxicos y hasta mortíferos. Generalmente es común en la industria designar a los crudos como **dulces** o **agrios**. Esta clasificación tiene un significado determinante entre petroleros vendedores y compradores de crudos porque inmediatamente enfoca ciertas características fundamentales del tipo de petróleo objeto de posible negociación. [2]
- **Densidad:** Los crudos pueden ser menos densos que el agua (livianos y medianos) o más densos que el agua (pesados y extrapesados). De allí que la densidad pueda tener un valor de 0,75 a 1,1. Estos dos intervalos equivalen a 57,2 y -3 °API. La densidad, la gravedad específica o los grados API (API es la abreviatura de **American Petroleum Institute**) denotan la relación correspondiente de peso específico de los crudos con respecto al agua. [2]

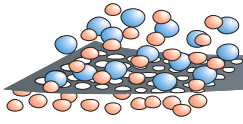


Los grados API son:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\text{g} \cdot \text{e}_{60^{\circ}\text{F}}} - 131,5 \quad (\text{I.1})$$

Sus valores se agrupan en un intervalo que va desde los 3° API hasta los 57° API.

- **Sabor:** El sabor de un crudo es una propiedad que se torna importante cuando el contenido de sal es bastante alto. Esta circunstancia requiere que el crudo sea tratado adecuadamente en las instalaciones de producción del campo para ajustarle la sal al mínimo (gramos por metro cúbico) aceptable por compradores y las refinerías.[2]
- **Índice de refracción:** Se define como la relación de la velocidad de la luz al pasar de uno a otro cuerpo. Medido con un refractómetro, los hidrocarburos acusan valores de índice de refracción de 1,39 a 1,49..[2]
- **Coefficiente de expansión:** Varía ente 0,00036 y 0,00096. (Temperatura, °C por volumen).[2]
- **Punto de ebullición:** No es constante, al mezclar su punto de ebullición se encuentra dentro de un intervalo que depende de sus constituyentes. El punto de ebullición varía desde algo menos que la temperatura atmosférica hasta temperaturas igual o por encima de 300 °C. [2]
- **Punto de congelación:** Varía desde 15,5 °C hasta la temperatura de -45 °C. Depende de las propiedades y características de cada crudo o derivado. Este factor es de importancia al considerar el transporte de los hidrocarburos y las estaciones, principalmente el invierno y las tierras gélidas.[2]
- **Punto de deflagración:** Varía desde -12 °C hasta 110 °C. Reacción vigorosa que produce calor acompañado de llamas y/o chispas.[2]
- **Punto de quema:** Varía desde 2 °C hasta 155 °C.[2]

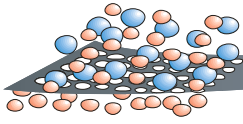


- **Poder calorífico:** Puede ser entre 8.500 a 11.350 calorías/gramo. En BTU/libra puede ser de 15.350 a 22.000.[2]
- **Calor específico:** Varía entre 0,40 y 0,52. El promedio de la mayoría de los crudos es de 0,45. Es la relación de la cantidad de calor requerida para elevar su temperatura un grado respecto a la requerida para elevar un grado la temperatura de igual volumen o masa de agua.[2]
- **Calor latente de vaporización:** Para la mayoría de los hidrocarburos parafínicos y metileno acuosos entre 70 a 90 kilocalorías/ kilogramo o 130 a 160 BTU/libra.[2]
- **Viscosidad:** La viscosidad es una de las características más importantes de los hidrocarburos en los aspectos operacionales de producción, transporte, refinación y petroquímica. La viscosidad, que indica la resistencia que opone el crudo al flujo interno, se obtiene por varios métodos y se le designa por varios valores de medición. El Poise o centiPoise (0,01 Poise) se define como la fuerza requerida en dinas para mover un plano de un centímetro cuadrado de área, sobre otro de igual área y separado un centímetro de distancia entre sí, con el espacio entre ambos planos relleno del líquido investigado, para obtener un desplazamiento de un centímetro en un segundo.

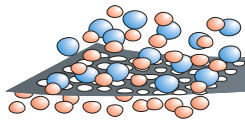
La viscosidad de los crudos en el yacimiento puede ser de 0,2 hasta más de 1.000 centiPoise. Es muy importante el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los crudos, en el yacimiento o en la superficie, especialmente concerniente a crudos pesados y extrapesados.

- **Viscosidad relativa** es la relación de la viscosidad del fluido respecto a la del agua. A 20 °C la viscosidad del agua pura es 1,002 centiPoise.[2]
- **Viscosidad cinemática** es equivalente a la viscosidad expresada en centipoises dividida por la gravedad específica, a la misma temperatura. Se designa en Stokes o centiStokes, y se puede calcular por medio de la siguiente expresión, [2]

$$\text{Viscosidad Cinemática} = \text{Viscosidad absoluta} / \text{Densidad} \quad (\text{I.2})$$



- **Viscosidad Universal Saybolt** representa el tiempo en segundos para que un flujo de 60 centímetros cúbicos salga de un recipiente tubular por medio de un orificio, debidamente calibrado y dispuesto en el fondo del recipiente, el cual se ha mantenido a temperatura constante.[2]
- **Contenido de Azufre**: La cantidad de azufre contenida en un crudo es importante porque es responsable del efecto corrosivo de los crudos y sus productos, en equipos de refinería y sistemas. Así, la presencia del azufre en las naftas (producto intermedio para la producción de gasolinas) que alimentan las plantas de reformación, es perjudicial porque inactiva a los catalizadores. La gasolina sulfurosa además de atacar el sistema de combustión de los automóviles y al motor, contamina la atmósfera con los productos de la combustión (“Lluvia ácida”).
- **Contenido de agua**: La presencia de agua y otros materiales es un indicador del grado de suciedad del crudo. El contenido de sal no se limita solamente a la presencia de NaCl, sino de todas las sales, pero que se interpreta en términos de NaCl. Es indeseable la presencia de sales por su tendencia a cristalizar y obstruir los tubos conductores de líquidos, además al calentarse se descomponen haciéndose corrosivas.
- **Contenido de asfaltenos**: Los asfaltenos no son una especie química, sino una familia de compuestos que presentan solo un comportamiento global característico (estructura molecular extremadamente compleja), sin embargo, algunos de los componentes que los conforman son: níquel, vanadio e hierro, unidos a sistemas de hidrocarburos aromáticos por nitrógeno, azufre y oxígeno. El término asfaltenos se agrupa a los componentes que quedan como fracción insoluble luego de tratar una mezcla en determinadas condiciones (solventes, temperatura, etc.) La composición de esta fracción insoluble varía dependiendo del tipo de crudo y la característica común que los hace importantes en el estudio de los reservorios y en la producción de petróleo, es que suelen originar precipitados que dañan el medio poroso o bloquean cañerías de conducción. En general, desde el punto de vista de la producción de



petróleo, comparten muchas características con las parafinas (ambas fracciones generan depósitos sólidos) pero las propiedades de solubilidad y respuesta a los tratamientos térmicos o bacterianos son netamente diferentes.

### I.4 TIPOS DE CRUDO

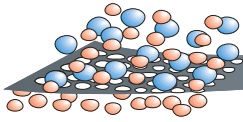
Los tipos de petróleo pueden ser determinados de distintos modos en función al criterio que se desee considerar como predominante, siendo los más comunes:

#### *I.4.1 Por su Composición Química*

Este tipo de clasificación depende estrictamente de la presencia de ciertos componentes químicos en el petróleo, así como de la unión de éstos en elementos más complejos. Su importancia radica en las características particulares que cada uno de estos elementos le añade al petróleo. Así tenemos que se puede clasificar en:

- **Parafínico**: cuyo componente principal es el compuesto químico llamado parafina. Son muy fluidos y de color claro. Proporcionan una mayor cantidad de nafta (usada para obtener solventes de pintura, productos de lavado al seco o gasolinas) y lubricantes que los otros tipos de petróleo en el proceso de refinación.
- **Nafténicos**: siendo sus componentes principales los naftenos y los hidrocarburos aromáticos. Son petróleos muy viscosos y de coloración oscura. Generan una gran cantidad de residuos tras el proceso de refinación.
- **Mixtos**: es decir, con presencia de ambos tipos de compuestos.

Como los crudos y los productos tienen muchas características distintivas, físicas y químicas, la tipificación no es sencilla. Sin embargo, la ecuación del factor de caracterización se ha convertido en una aplicación universal por su sencillez y relación con otras propiedades, que permite identificar o caracterizar el tipo de crudo en cuanto a su composición química, y se puede calcular por medio de la siguiente expresión,



$$K = \frac{\sqrt[3]{T_B}}{g \cdot e_{60^\circ F}} \quad (I.3)$$

Donde;

K : Factor de caracterización

$T_B$ : La temperatura volumétrica media, es la temperatura de ebullición de un componente hipotético con características equivalente a la mezcla de hidrocarburos analizada.

$g.e$ : Gravedad específica a la temperatura de 60 °F

Para valores de K mayor de 12 nos indica que el crudo presenta una base parafínica, entre 10,6 y 12 una base naftenica y menor de 10,6 una base aromática.

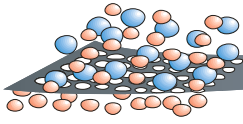
#### ***1.4.2 Por su Densidad***

La Gravedad API se basa en la comparación de la densidad del petróleo con la densidad del agua, es decir, se busca determinar si el petróleo es más liviano o pesado que ésta última. La clasificación propuesta por el Instituto de Petróleo Americano indica que a una mayor gravedad API el petróleo será más liviano, como se puede ver en la tabla I.2.

Cabe indicar que los petróleos ligeros son también los más requeridos en el mercado, y al mismo tiempo los de mayor precio, ya que los costos tanto de extracción como de refinación son menores en comparación con petróleos pesados. Así, se da una relación directa entre la gravedad API y la calidad del petróleo, petróleos más ligeros tienen una mayor calidad, y requieren de menores costos para ser aprovechados que aquellos más pesados.

**Tabla I.2.** Tipos de crudo de acuerdo a su densidad y °API

Tipo de Crudo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	°API
Extrapesado	> 1,0	< 10
Pesado	1,0 – 0,92	10,0 – 22,3
Mediano	0,92 – 0,87	22,3 - 31,1
Liviano	0,87 – 0,83	31,1 – 39
Condensado	< 0,83	> 39



### ***1.4.3 Por la presencia de azufre***

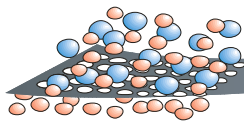
Como se menciona en un inicio, el azufre es uno de los componentes que están presentes en los hidrocarburos. Pero su presencia en los hidrocarburos implica la necesidad de mayores procesos de refinamiento, y por ende un mayor costo final, razón por la cual la presencia de azufre es también un determinante del valor comercial del petróleo.

Así, tenemos que el petróleo puede clasificarse de 2 formas:

- **Petróleo Dulce** (Sweet Crude Oil), es aquel que contiene menos de 0.5% de contenido de azufre. Es un petróleo de alta calidad y es ampliamente usado para ser procesado como gasolina.

- **Petróleo Agrio** (Sour Crude Oil), es aquel que contiene al menos 1% de contenido de azufre en su composición. Debido a la mayor presencia de azufre su costo de refinamiento es mayor, razón por la cual es usado mayormente en productos destilados como el diesel, dado su menor costo de tratamiento.

Las tres formas generales de categorización antes mencionadas nos permiten establecer criterios básicos para determinar la calidad del petróleo, las cuales influirán finalmente en la determinación de los precios de cada uno de ellos.



## ¿QUE ES UNA EMULSIÓN?

### II.1. DEFINICIONES

Se llama **dispersión** a un sistema polifásico en el cual una fase se encuentra en forma fragmentada (fase dispersada) dentro de otra (fase continua). Existen varios tipos de sistemas dispersados y cada uno tiene una denominación particular.[3]

Consideramos aquí las dispersiones cuya fase continua es un líquido. Una dispersión de gas en un líquido es una **espuma**, mientras que una dispersión de un líquido en otro inmiscible con él es una **emulsión**. Finalmente una dispersión de un sólido en un líquido se llama una **suspensión**.

Cuando se habla de dispersión es importante destacar el tamaño de los fragmentos de la fase dispersada. En efecto, el comportamiento de la dispersión y su efecto depende en buena parte del tamaño de los fragmentos. Se entiende por fragmento una cierta cantidad de materia gaseosa, líquida o sólida, que se llama burbuja, gota o partícula si son de tamaño macroscópico.

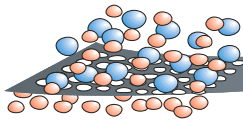
Si los fragmentos son de tamaño inferior al micrómetro pero netamente superior al tamaño de una molécula, las dispersiones se llaman **coloides**. Las soluciones coloidales son aquellas que contienen fragmentos de materia dispersada que son, de un lado demasiado grande para que se trate de una solución convencional, y de otro lado demasiados pequeños para que se separen por sedimentación en el campo de la gravedad.[3]

### II.2. COMPOSICION DE UNA EMULSIÓN

En forma general se usará el término emulsión para referirse a una macro-emulsión. Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersada en la otra, y cuya estructura es estabilizada por un agente tensoactivo llamado emulsionante.[3]

La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un período de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años.

En ausencia de surfactante, la dispersión líquido-líquido coalesce rápidamente (ejemplo aceite y vinagre). En presencia de un agente emulsionante, la emulsión puede presentar una cierta segregación gravitacional pero la coalescencia de las gotas es notablemente retardada, aun cuando se tocan.



Las cantidades relativas de fase dispersa y de fase continua (referidas también como fase interna y fase externa) influyen notablemente sobre las propiedades. Debajo de 20% de fase interna se habla de una emulsión de bajo contenido de fase interna. En tales emulsiones se puede considerar que hay poca interacción de las gotas entre si, lo que permite modelizar ciertos comportamientos.

Al otro extremo están las emulsiones de alto contenido de fase interna, en las cuales las gotas de la fase interna ocupan más del 60-70% del volumen. En tales emulsiones las interacciones entre gotas dominan los efectos. Más allá de 75%, las gotas están literalmente al contacto y la emulsión se torna muy viscosa.

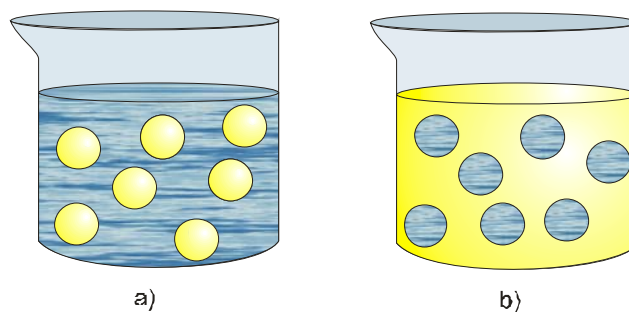
La concentración del agente emulsionante es variable, pero en la práctica existen dos límites. Debajo de una concentración mínima del orden de algunos miles de ppm (0,1% por ejemplo), no hay bastante emulsionante para estabilizar la emulsión. Más allá de algunos porcentos (5% por ejemplo), no se gana nada aumentando la concentración del surfactante.

En las aplicaciones prácticas se encuentra una concentración de emulsionante en el rango 0,2 - 3%. Por razones de eficiencia y de costo se usa en general un emulsionante compuesto de una mezcla de varios surfactantes.

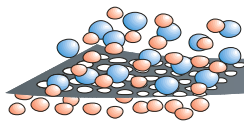
### II.3. TIPO DE EMULSIÓN

En la mayoría de los casos en los cuales se hace una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica. Se usarán las abreviaturas W (water) y O (oil). Si la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersadas en agua (W), se le llamará emulsión O/W, como se observa en la figura II.1a, la emulsión normal para todas la aplicaciones con excepción de la producción del petróleo, en la cual se denomina emulsión inversa.[3]

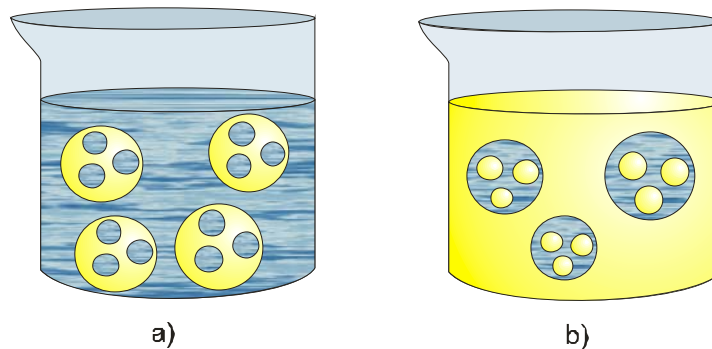
Si la fase dispersada es el agua, se llama una emulsión W/O, emulsión normal para los petroleros, inversas para los demás, como se observa en la figura II.1b



**Figura II.1** a) Emulsión de tipo O/W; b) Emulsión de tipo W/O



Pueden existir casos más complejos. Por ejemplo, si las gotas de aceite de una emulsión O/W contienen en su interior gotitas de agua, se dice que se tiene una emulsión múltiple de tipo W/O/W y de forma contraria O/W/O, tal como se aprecia en la figura II.2. Las emulsiones múltiples se encuentran en forma espontánea en ciertas circunstancias, o pueden prepararse a propósito. [3]



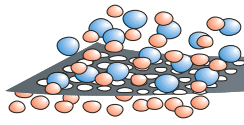
**Figura II.2** a) Emulsión de tipo W/O/W; b) Emulsión de tipo O/W/O

El tipo de emulsión que se forme depende de varios factores. Si la relación entre el volumen de las fases es muy grande o muy pequeña, la fase que se encuentre en menor proporción generalmente constituye la fase dispersa.

#### **II.4. PROPIEDADES**

La utilidad práctica de las emulsiones está definida principalmente por las propiedades físicas que presente. Estas propiedades dependen de numerosos factores que pueden ser manipulados en la mayoría de los casos para conferirle a la emulsión las características necesarias para un proceso determinado. Las emulsiones en general se encuentran presentes en mucho de los productos que utilizamos en nuestra vida cotidiana y entre sí presentan propiedades muy variadas que inclusive pueden llegar a ser antagónicas. Entre las propiedades fundamentales de una emulsión destacan las siguientes:

**II.4.1. Conductividad:** La conductividad de la emulsión depende esencialmente de la naturaleza de la fase continua o externa, puesto que es esta fase la que va a transportar las cargas. En efecto, la fase discontinua no tiene continuidad entre los electrodos.[3]



Por lo tanto una emulsión de fase continua agua (con electrolito) O/W posee una alta conductividad, mientras que una emulsión de fase externa orgánica W/O posee una baja conductividad. Esta característica permite deducir inmediatamente el tipo de una emulsión de un dato de conductividad aun bastante aproximado. [3]

La conductividad de una emulsión de O/W ha sido calculada por Bruggeman como:

$$k = k_w(1 - \Phi)^{3/2} = k_w f^{3/2} \quad (\text{II.1})$$

Donde  $\phi$  indica la fracción volumétrica de fase interna,  $f$  la fracción de fase externa, y  $k_w$  es la conductividad de la fase acuosa.

Para emulsiones W/O en las cuales la conductividad de la fase aceite es mucho menor que la del agua, se ha propuesto la expresión siguiente:

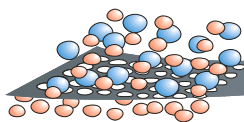
$$k = k_o \frac{(1 + \Phi)(2 + \Phi)}{(1 - \Phi)(2 - \Phi)} \quad (\text{II.2})$$

Donde  $k_o$  es la conductividad de la fase aceite.

#### **II.4.2. Viscosidad**

La viscosidad de una emulsión depende de numerosos factores, algunos con carácter físico más o menos determinado, otros de tipo físico-químico cuyo efecto empieza solamente a entenderse. Sherman da la siguiente lista de factores, por orden de importancia con excepción del último.[3]

- 1) Viscosidad de la fase externa ( $\eta_o$ )
- 2) Proporción volumétrica de la fase interna ( $\phi$  ó  $\emptyset$ )
- 3) Tamaño de las gotas de la fase interna
- 4) Viscosidad de la fase interna
- 5) Efectos electro-viscosos
- 6) Efecto del emulsionante, es decir de la formulación

**II.4.3. Estabilidad**

Una emulsión es por definición un sistema termodinámicamente inestable y tarde o temprano debe separarse en dos fases. Es relativamente fácil decir que una emulsión se ha roto, pero es difícil definir experimentalmente un valor de su estabilidad.

La única medida realmente absoluta de la estabilidad de una emulsión es la variación del número de gotas en función del tiempo. Tal información no se puede obtener experimentalmente sino mediante la variación de la distribución del tamaño de gota con el tiempo. Desde el punto de vista experimental tal medición implica bien sea que se tome una muestra, bien sea que se diluya el sistema completo con un gran exceso de fase externa.

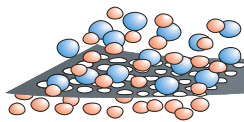
Por lo tanto la estabilidad de una emulsión se relaciona en general con el volumen de las fases separadas. Después de algún tiempo el sistema se separa típicamente en tres zonas: una zona central que contiene una nata o emulsión de alto contenido de fase interna y dos fases separadas: la interna (coalescida) y la externa (clarificada). Se ha demostrado recientemente que estos criterios dan resultados satisfactorios cuando se le da una interpretación adecuada.[3]

www.bdigital.ula.ve

**II.4.4. Tamaño de Gota**

Por lo general el diámetro de gota de una emulsión se encuentra por encima de los 0,2  $\mu\text{m}$ , inclusive puede llegar a ser superior a los 50  $\mu\text{m}$ . La estabilidad de una emulsión no es necesariamente función del tamaño de gota, aunque para cada emulsión específica debe existir un tamaño óptimo. Caracterizar una emulsión en términos del tamaño de gotas es muy común, sin embargo, generalmente resulta inapropiado porque inevitablemente existe una distribución del tamaño.

La distribución del tamaño de gota es un parámetro importante, puesto que tiene una influencia marcada en la viscosidad de la emulsión. Para las interacciones entre gotas de tipo electrostáticas, la viscosidad tiende a ser mayor mientras más pequeña sean las gotas, inclusive la viscosidad se incrementa cuando la distribución del tamaño es relativamente homogénea. [3]



## **EFLUENTES INDUSTRIALES**

### **III.1. TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES**

Mientras que todos los vertidos urbanos presentan impurezas minerales y orgánicas cuya naturaleza y concentración son bastantes similares de una ciudad a otra, y por ello sus líneas de tratamiento son análogas, los vertidos industriales, debido a su gran diversidad, necesitan una investigación propia para cada tipo de industria y la aplicación de procesos de tratamientos específicos.

Pueden citarse algunos factores principales que la contaminación industrial tiene en común con la contaminación de origen urbano, pero las vías de depuración, normalmente, deben definirse industria por industria.

Al enumerar las principales industrias, se ve que según las contaminaciones que producen, justifican tratamientos biológicos (parecidos a los de las aguas urbanas) o tratamientos estrictamente químicos (como en las industrias de ácidos) o mezclas de los dos tipos.

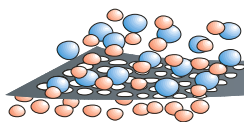
Las estaciones de tratamiento de aguas industriales se destinan a cumplir unas normas de vertido, que no se refieren únicamente a la de **D.B.O.** (Oxígeno disuelto y requerido por los organismos para la descomposición aeróbica de la materia orgánica presente en el agua), a la **D.Q.O.** (Cantidad requerida de Oxígeno para la descomposición química de un producto), y a los contenidos de materiales en suspensión, sino, también, a un cierto número de compuestos minerales y orgánicos. Por otra parte, estas normas se definen, en varios países, según las diversas ramas profesionales.

La definición de todo tratamiento deberá basarse en:

- el conocimiento de los diversos contaminantes;
- la caracterización de los efluentes;
- la organización de los desagües y la separación de los efluentes;

### **III.2. FACTORES ESPECÍFICOS DE CONTAMINACIÓN.**

Las aportaciones significativas de contaminación que se enumeran seguidamente, se han clasificado en función de los métodos de tratamiento que le son aplicables.[1]

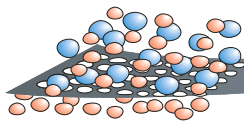


- **Elementos insolubles separables físicamente con o sin floculación:** materias grasas, flotantes (grasas, hidrocarburos alifáticos, alquitranes, aceites orgánicos, etc.). Materias sólidas en suspensión (arenas, óxidos, hidróxidos, pigmentos, azufre coloidal, látex, fibras, etc.).
- **Elementos orgánicos separables por adsorción:** colorantes, detergentes, compuestos macromoleculares diversos, compuestos fenolados.
- **Elementos separables por precipitación:** metales tóxicos o no, Fe, Cu, Zn, Ni, Be, Ti, Al, Pb, Hg, Cr, precipitables en una cierta zona de pH; sulfitos, fosfatos, sulfatos, fluoruros, por adición de  $\text{Ca}^{2+}$ .
- **Elementos que pueden precipitar en forma de sales insolubles de hierro o de complejos:** sulfuros, fosfatos, cianuros, sulfocianuros.
- **Elementos separables por desgasificación o stripping:**  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_4$ , alcoholes, fenoles y sulfuros.
- **Elementos que necesitan una reacción de oxidación-reducción:** cianuros, cromo hexavalente, sulfuros, cromo, nitrito.
- **Ácidos y bases:** ácido clorhídrico, nítrico, sulfúrico y fluorhídrico; bases diversas.
- **Elementos que pueden concentrarse por intercambio iónico o por ósmosis inversa:** radionucleidos tales como iodo, Mo, Cs; sales de ácidos y de bases fuertes; compuestos orgánicos ionizados (intercambio iónico) o no (osmosis inversa).
- **Elementos que se adaptan a un tratamiento biológico:** todos los elementos biodegradables por definición; por ejemplo, azúcares, proteínas, fenoles. Los tratamientos biológicos pueden aplicarse también, después de su aclimatación, a compuestos orgánicos tales como el formol, la anilina y ciertos detergentes.

### III.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS EFLUENTES.

Para la buena definición de una estación de tratamiento de aguas residuales, es necesario disponer de los siguientes datos, cuidadosamente establecidos:[1]

- Volúmenes diarios;
- Caudales horarios mínimo y máximo;
- Composición del agua de aportación a la fábrica;
- Fabricaciones continuas, discontinuas;
- Importancia y periodicidad de los puntos de contaminación;



- Posibilidad de separación de circuitos;
- Posibilidades de tratamientos o de recirculaciones locales o parciales;
- Contaminaciones secundarias, incluso débiles u ocasionales, que puedan afectar seriamente al funcionamiento de ciertos órganos de los equipos de tratamiento (colas, alquitranes, fibras, aceites, arenas, etc.).

Al realizar el proyecto de una fábrica, estos datos, recogidos después del análisis de las fabricaciones, deben compararse con informaciones procedentes de fábricas existentes.

Cuando se trata de acondicionar una fábrica ya existente, conviene realizar una comparación de las cantidades de contaminantes, detectados mediante un análisis continuo y sistemático de los efluentes, con los consumos de productos químicos de la fábrica.

### III.4. TRATAMIENTOS SEPARADOS.

A veces resulta conveniente aislar ciertos efluentes y someterlos a un tratamiento específico. Se impone esta forma de proceder siempre que el efluente que se obtiene de una unidad de fabricación presenta una de las siguientes características:[1]

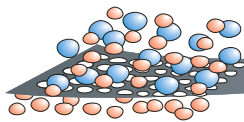
- Concentraciones muy elevadas de D.Q.O. o de D.B.O. debido a la presencia de compuestos solubles;
- Concentraciones medias o elevadas de  $H_2S$ , de  $NH_4$  o de elementos tóxicos.

En lugar de diluir estos efluentes, suele ser más económico utilizar uno de los siguientes procedimientos:

- Concentración con vistas a reutilizar el producto;
- Destrucción por pirólisis directa del líquido o del vapor procedente de su *stripping*;
- Extracción líquido-líquido.

Se citan tres ejemplos de reducción de la contaminación del efluente general de una fábrica:

- Regeneración de baños usados muy diversos (galvanoplastia mecánica), por eliminación discontinua o continua de sus impurezas en disolución o en suspensión;
- Tratamiento químico de licores de sales o de ácidos cuya concentración es superior al umbral de solubilidad de la sal de calcio correspondiente, que puede entonces precipitar;
- Tratamiento de aceites solubles por vía química, térmica o por **separación por membranas**.



### III.5. TRATAMIENTOS PRELIMINARES.

Las condiciones de tratamiento previo de los efluentes generales de fábricas son también más variadas que en el caso de aguas residuales urbanas.

Las operaciones de **desbaste** automático son deseables en la mayoría de las industrias e indispensables en algunas de ellas.

El **desarenado** sólo se realiza en algunos casos particulares; y el **desaceitado** se utiliza con bastante frecuencia: los hidrocarburos y aceites proceden a veces de fabricaciones, y sistemáticamente de los circuitos de engrase o de almacenamiento de carburante.

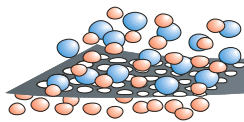
También se prevé frecuentemente la **regulación** del caudal hidráulico y de la carga contaminante, que puede llevarse a cabo:

- Mediante el empleo de **depósitos derivados**, en los que se almacena el agua de tormentas cuando la red es unitaria y cuando las lluvias, de volumen siempre menor que en áreas urbanas, arrastran y diluyen contaminantes. La finalidad de estos depósitos es, por lo tanto, la de evitar que la línea de tratamiento haya de dimensionarse en función de unas puntas excepcionales de caudal.
- Mediante el empleo de **depósitos de homogeneización**, en los que se almacena durante algunas horas, e incluso por espacio de varios días, la totalidad de los efluentes producidos por una unidad o por toda la fábrica. Es indispensable prever la agitación de estos depósitos. Su objetivo es el de reducir las puntadas de contaminación, con el fin de evitar sobrecargas de concentración perjudiciales para el funcionamiento regular de la línea de depuración. Con ello, se consigue, además, un cierto grado de previsión en la explotación.

Algunas veces se realizan operaciones previas de neutralización, de oxidación y de reducción, para tratar efluentes concentrados o tóxicos. En estas operaciones interviene la regulación de pH.

### III.6. TRATAMIENTOS FISICOQUÍMICOS.

La depuración fisicoquímica puede constituir, según el caso, una etapa intermedia o la etapa final del tratamiento total. Tiene una o varias finalidades:[1]



- Precipitación de metales o de sales tóxicas;
- Eliminación de aceites en emulsión y de materias diversas en suspensión;
- Clarificación con reducción simultánea de D.B.O. coloidal y de la D.Q.O. correspondiente.

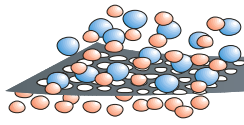
Este tratamiento implica la necesidad de mantener una zona de pH bastante reducida, y, según la naturaleza del proceso (precipitación, cristalización, adsorción o floculación), puede realizarse en reactores-decantadores o clarificadores muy diferentes:

1. Flotadores tales como el *Flotazur* o el *Sediflotazur*, para eliminar aceites o fibras;
2. Reactores, como el *Turbactor*, y reactores-decantadores, como el *Circulator*, el *Densator* o el *Turbocirculator*, para la precipitación de sales o hidróxidos;
3. Clarificadores-reactores de recirculación de fangos, como el *Turbocirculator*, el decantador laminar (*R.P.S.*), el *Accelerator*, en situaciones mixtas;
4. Clarificadores de lechos de fangos, como el *Pulsator* y el *superpulsator*, cuando es preciso separar un flóculo tenue o cuando se desea desarrollar las propiedades adsorbentes del lecho de fangos.

La elección entre estos aparatos depende no sólo del proceso dominante que haya de efectuarse, sino también de otros parámetros propios de la industria considerada.

Según las circunstancias, esta depuración fisicoquímica puede ir precedida o seguida de uno de los procesos siguientes:

- **Neutralización;**
- **Oxidación o reducción;**
- **Desgasificación o stripping.**

**III.7. ELIMINACIÓN DE LA D.Q.O. NO BIODEGRADABLE.**

La depuración biológica constituye la vía más racional para la reducción de la D.B.O. y de su correspondiente D.Q.O.. Sin embargo, la aplicación de reglamentaciones cada vez más rigurosas puede hacer que sea necesaria la eliminación complementaria de la D.Q.O. no biodegradable, de color y de ciertos compuestos específicos.

Esta D.Q.O. se debe a compuestos orgánicos, en general disueltos y de naturaleza muy diversa: disolventes, hidrocarburos aromáticos, derivados nitrados y sulfonados, etc...

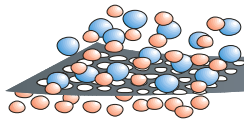
Los procedimientos usuales para la eliminación de esta D.Q.O. son los siguientes:

1. Adsorción a través de carbón activo con regeneración térmica o química o a través de adsorbentes diversos.
2. Ultrafiltración y ósmosis inversa.
3. Intercambio iónico.
4. Oxidaciones diversas (aire, oxígeno, ozono, cloro).

**III.8. EFLUENTES OLEOSOS DE LA INDUSTRIA PETROLERA**

Las tres condiciones necesarias para la formación de una emulsión son: 1) presencia de dos líquidos inmiscibles, 2) suficiente agitación par dispersar un líquido en otro en forma de gotas y 3) un agente emulsificante que prevea la estabilidad al sistema. El petróleo después de producido contiene agua emulsificada que proviene del agua asociada al crudo en el yacimiento y del proceso de recuperación mejorada (inyección de vapor, por ejemplo), su emulsificación es producto de la presencia de agentes surfactantes naturales en el crudo (asfaltenos) y de la agitación provocada por el bombeo, por el flujo a través de las tuberías y por la caída de presión producto de las válvulas, codos y demás accesorios.

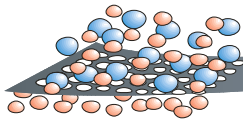
El contenido de agua en el crudo de producción es restringido, puesto que contiene sales inorgánicas tales como cloruros, sulfatos y carbonatos de calcio, sodio o magnesio que son corrosivas para los equipos de las refinerías, por tal motivo es separada directamente en el campo mediante el proceso de deshidratación que consiste en eliminar el agua libre y reducir el contenido



de agua dispersada. A la salida del pozo se agregan los agentes desemulsificantes al crudo para favorecer la desemulsificación, posteriormente se hace circular a través de un tanque gravitacional donde se produce la separación de tres fases (crudo, emulsión, agua), finalmente la emulsión se se puede introducir en el separador electrostático en el cual la diferencia de potencial aplicado produce la deformación de las gotas de agua ocasionando su coalescencia hasta alcanzar niveles aceptables.

Por otro lado en la refinería, inicialmente, se somete al crudo al proceso de desalación para reducir más el contenido de agua. El proceso consiste esencialmente en introducir cierta cantidad de agua dulce que se emulsiona con el crudo para formar una emulsión W/O con un contenido de agua suficiente para que se pueda producir una separación eficiente. La desalación permite además reducir el contenido de metales Fe, Ni, V y arsénico a valores que sean inofensivos para los catalizadores de reformación, de craqueo, etc. [4]

El agua que es separada mediante la deshidratación y desalación es un efluente del proceso y generalmente se deposita en lagunas de desechos donde se espera que se produzca su evaporación, sin embargo, antes de que esto suceda puede llevarse a cabo el fenómeno de precolación que consiste en la penetración del agua a través del suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas. Este fenómeno es indeseable, puesto que el agua contiene gotas de crudo emulsionado cuya concentración puede llegar a ser contaminante. Por consiguiente debe ser sometida a algún tratamiento que permita disminuir los niveles de esta sustancia y así cumplir con las normas ambientales. La primera alternativa que puede intentar aplicarse es la utilización de tanques de sedimentado donde se espera que el crudo coalesca prácticamente en su totalidad, sin embargo, el tamaño de gota es tan pequeño que probablemente no se produzca una separación satisfactoria. Por tal motivo el proceso de filtración con membranas (sistema de ultrafiltración, ósmosis inversa, microfiltración, etc) resulta prometedor en la separación de emulsiones, puesto que es un método con el cual se alcanza una alta eficiencia y un permeado de excelente calidad.



## PROCESO DE SEPARACION CON MEMBRANAS

### IV.1. DEFINICIÓN DE MEMBRANAS

Una membrana puede definirse como una película delgada que separa dos fases, y actúa como barrera selectiva ya que permite el paso selectivo de materia a través de la misma como se aprecia en la figura IV.1. El flujo de esta materia o sustancias puede venir determinado por diferentes fuerzas impulsoras, principalmente la: presión, concentración y potencial eléctrico. Esta selectividad permitirá enriquecer o empobrecer una corriente o carga en una o varias sustancias.

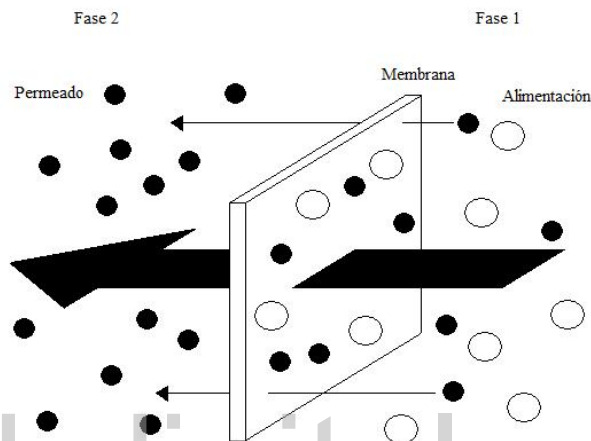


Figura IV.1 Definición de una membrana permselectiva. [5]

### IV.2. DEFINICIÓN DE OPERACIÓN DE MEMBRANA

El termino operación de membrana es más adecuado que el termino proceso de membrana. En general, se supone que un proceso consta de dos o más operaciones. Una operación de membrana puede definirse como una operación donde una corriente de alimentación es dividida en dos: un permeado conteniendo el material que ha pasado a través de la membrana y un retenido (rechazado), conteniendo las especies que no la atraviesan como se muestra en la figura I.1.

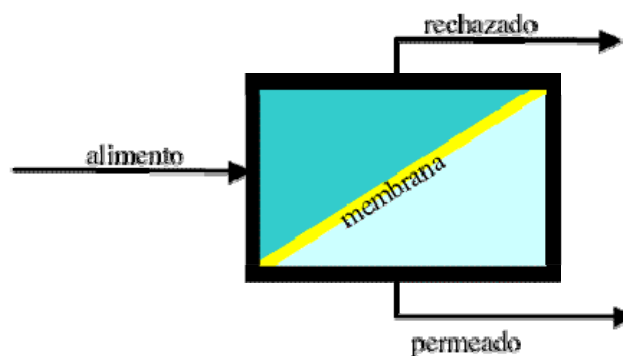
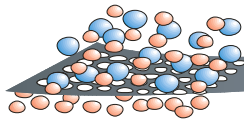


Figura IV.2. Proceso de separación con membranas



Entre las operaciones de separación, la membrana ofrece ventajas básicas:

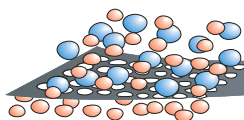
- Tratamiento suave: Normalmente se trabaja en condiciones suaves de temperaturas
- La separación tiene lugar a temperatura ambiente sin cambio de fase, lo que ofrece una ventaja energética comparada con la destilación.
- Los equipos suelen ser pequeños y compactos.
- La separación tiene lugar sin acumulación de productos dentro de la membrana. Las membranas están bien adaptadas para funcionar continuamente sin un ciclo de regeneración tal como ocurre con las operaciones de intercambio iónico.
- La separación no necesita la adición de productos químicos, como es el asentamiento y filtraje convencional.
- Facilidad de montaje, desmontaje y operación.
- Bajo coste relativo de energía: Normalmente el gasto energético principal es el de bombeo de sustancias.

Y también se tienen algunas desventajas las cuales son:

- Coste de inmovilizado: las membranas son caras
- Problemas de ensuciamiento: La membrana normalmente va perdiendo eficacia a lo largo de la operación.

En la siguiente tabla puede observarse la clasificación general de las operaciones de membranas considerando los siguientes parámetros:

- Fuerza impulsora de la separación.
- Mecanismo de separación.
- Estructura de membrana.
- Fases en contacto



**Tabla IV.1.** Operaciones básicas de membranas técnicamente relevantes en el tratamiento de agua [4]

Operación de membrana	Fuerza directora	Mecanismo de separación	Estructura de membrana	Fase	
				1*	2
Microfiltración	Presión	Cribado	Macroporos	L	L
Ultrafiltración	Presión	Cribado	Mesoporos	L	L
Nanofiltración	Presión	Cribado + (solución/difusión + exclusión)	Microporos	L	L
Osmosis Inversa	Presión	Solución/difusión + exclusión	Densa	L	L
Pervaporación	Actividad (presión parcial)	Solución – difusión	Densa	L	G
Destilación de membranas	Actividad (presión parcial)	Evaporación	Macroporos (membrana de gas)	L	L
Diálisis	Actividad (Concentración)	Difusión	Mesoporos	L	L
Electrodiálisis	Potencial Eléctrico	Intercambio Iónico	Intercambio Iónico	L	L

\* Fase 1 es la alimentación      L=Líquido      G=Gas

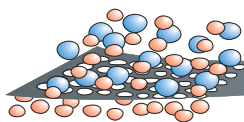
### IV.3. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE MEMBRANAS

En general las características físicas y químicas de las membranas son tan variadas que pueden ser clasificadas atendiendo a un único patrón, por tal motivo resulta apropiado realizar la clasificación tomando en cuenta su naturaleza química, su forma y el modelo de separación. [4]

#### IV.3.1. SEGÚN SU NATURALEZA QUÍMICA

Atendiendo a su naturaleza, las membranas se dividen en orgánicas, inorgánicas y mixtas. En general las orgánicas son más fáciles de procesar y por lo tanto más baratas, mientras que las inorgánicas suelen ser más caras pero presentan ventajas tales como la resistencia a agentes químicos agresivos.

- **Membranas Orgánicas:** Los materiales más comunes son las poliamidas (variantes del nylon), el acetato de celulosa y las polisulfonas, están formadas por materiales poliméricos. Como es de esperar, sus propiedades están íntimamente relacionadas con las propiedades particulares del polímero en cuestión, siendo un aspecto ventajoso de este tipo de membrana la gran gama de tamaños de poros que presentan. Estos polímeros tienen bajo coste, poca tendencia a la absorción y se utilizan no solo en todos los procesos de presión, sino también en hemodiálisis y permeado gaseoso. Por otro lado su uso se ve limitado debido a la fragilidad de las mismas como consecuencia de la poca resistencia a los solventes y pH extremos así como a las altas temperaturas y presiones.



- **Membranas Inorgánicas:** Las materias inorgánicas generalmente poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica en comparación con los polímeros orgánicos. Sin embargo tienen la desventaja de ser frágiles y más caros que las membranas orgánicas. Este tipo de membranas están representada principalmente de materiales cerámicos variados como óxidos y carburos de metales, tales como el aluminio, zirconio o titanio. Esto explica por qué su principal campo de aplicación está limitado a la industria química, para tratamiento de fluidos agresivos, a altas temperaturas y en las industrias farmacéuticas y lácteas donde se precisa esterilización térmica
- **Membranas Mixtas:** Las membranas mixtas están constituidas por una combinación de materiales orgánicos e inorgánicos que pretenden proveerla de las características más significativas de ambos; por ejemplo resistencia mecánica y algunas propiedades especiales como lipofobismo o hidrofobismo. Las ventajas que se tienen de las dos anteriores es un compromiso en las propiedades, por ejemplo se sube la resistencia mecánica con respecto a la orgánica, pero baja la resistencia térmica con respecto a la inorgánica.

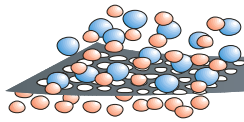
### IV.3.2. SEGÚN SU MECANISMO DE SEPARACIÓN

Fundamentalmente hay tres mecanismos de separación que dependen de alguna propiedad específica de los componentes que serán removidos o retenidos selectivamente por la membrana:

- Separación fundamental en grandes diferencias de tamaño
- Separación basada en las diferencias de solubilidad y difusividad de los materiales en la membrana
- Separación fundada en diferencias en la cargas de las especies a separar

La clasificación de las membranas basadas en el mecanismo de separación reduce a tres clases principales:

**Membranas Porosas:** Son aquellas cuya estructura está constituida por poros que presentan diferentes diámetros dependiendo de la operación de separación. En las membranas porosas se presentan poros finos. Utilizando la definición de tamaños de poros adoptada por la IUPAC (1985) tendremos:



- Macroporos, mayores de 50 nm.
- Mesoporos, en el rango de 2 a 50 nm
- Microporos, menores de 2nm.

**Membranas no Porosas:** Estas membranas pueden considerarse como densas. La separación esta basada en las diferencias de solubilidad y difusividad, es decir, la facilidad con que algunas moléculas se difunden a través de la membrana. La difusión de especies tiene lugar en el volumen libre que esta presente entre las cadenas macromoleculares del material de la membrana.

**Membranas de Intercambio Iónico:** Las membranas de intercambio iónico son un tipo especial de membranas no porosas. Consisten en geles muy hinchados portadores de carga positiva o negativas.

### IV.3.3. DE ACUERDO A SU MORFOLOGÍA

Estas se clasifican en: [5]

- **Membrana Homogéneas:** Estas presentan poros uniformes, es decir del mismo tamaño a través del espesor de la membrana, tal como se aprecia en la figura IV.3.1.

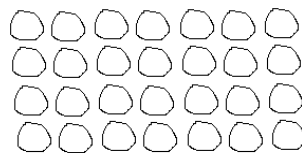


Figura IV.3.1. Membrana Homogénea [5]

- **Membranas Asimétricas:** Estas tienen la característica que los poros se van ensanchando a través del espesor de la membrana, tal como se observa en la figura IV.3.2.

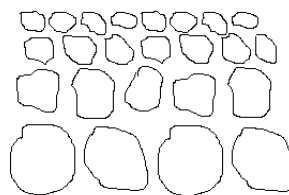
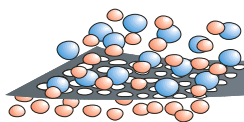


Figura IV.3.2. Membrana asimétrica [5]



- **Membranas Mixtas (Compuestas):** Son membranas que presentan o más capas, una capa superior y una subcapa que son de distintos materiales, y el diámetro de los poros es distinto para las diferentes capas, tal como se observa en la figura IV.3.3.

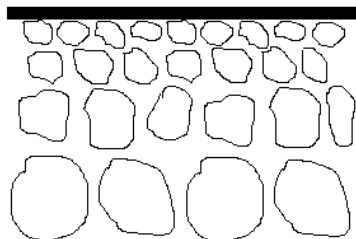


Figura IV.3.3. Membrana Mixta [5]

### IV.3.4. SEGÚN SU AFINIDAD

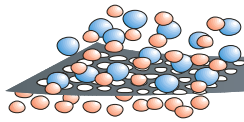
En Función de la naturaleza química de las membranas y de la afinidad que ellas presenten por determinados solventes, se tiene la siguiente clasificación:

- **Membranas Hidrofilicas:** Son aquellas que están constituidas por materiales con tendencia hacia los solventes polares siendo el agua el más común.
- **Membranas Hidrofóbicas:** Denominadas también membranas lipofílicas, son aquellas que están constituidas por materiales con una alta tendencia hacia los solventes no polares y un rechazo marcado por los solventes polares como el agua.

### IV.4. LA FILTRACIÓN

La filtración es una técnica, proceso tecnológico u operación unitaria de separación, por la cual se hace pasar una mezcla de sólidos y fluidos, gas o líquido, a través de un medio poroso o medio filtrante que puede formar parte de un dispositivo denominado filtro, donde se retiene la mayor parte del o de los componentes sólidos de la mezcla.

Las aplicaciones de los procesos de filtración son muy extensas, encontrándose en muchos ámbitos de la actividad humana, tanto en la vida doméstica como de la industria general, donde son particularmente importantes aquellos procesos industriales que requieren de las técnicas de ingeniería química.



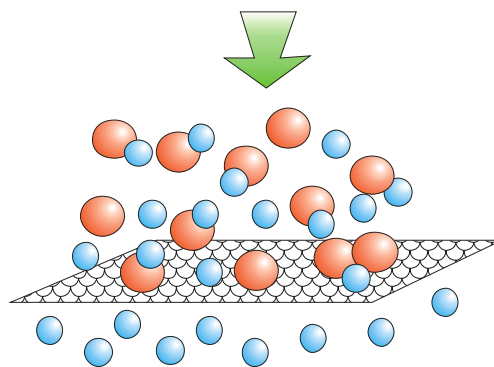
La filtración se ha desarrollado tradicionalmente desde un estudio de arte práctico, recibiendo una mayor atención teórica desde el siglo XX. La clasificación de los procesos de filtración y los equipos es diversa y en general, las categorías de clasificación no se excluyen unas de otras.

La variedad de dispositivos de filtración o filtros es tan extensa como las variedades de materiales porosos disponibles como medios filtrantes y las condiciones particulares de cada aplicación: desde sencillos dispositivos, como los filtros domésticos de café o los embudos de filtración para separaciones de laboratorio, hasta grandes sistemas complejos de elevada automatización como los empleados en las industrias petroquímicas y de refino para la recuperación de catalizadores de alto valor, o los sistemas de tratamiento de agua potable destinada al suministro urbano.

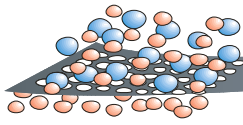
### IV.5. TIPO DE FILTRACIÓN

#### IV.5.1. Filtración Normal

Este tipo de filtración es útil cuando la cantidad de solución a filtrar es poca. La fuerza de presión impulsada a la corriente de alimentación que circula a través del medio filtrante es en forma perpendicular, de tal manera los sólidos son retenidos en la superficie de la membrana o en sus poros, y el resto pasa acompañando al filtrado.



**Figura IV.5.1.** Representación de una Filtración Normal



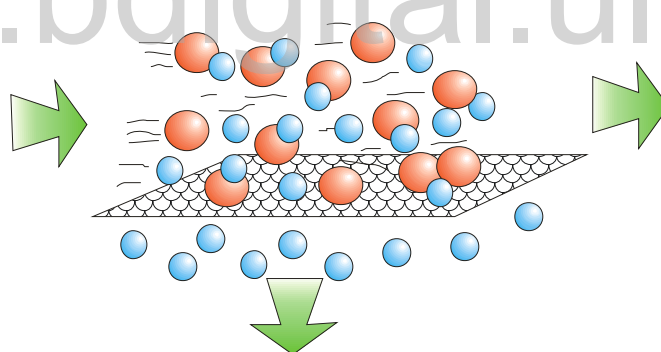
Este tipo de filtración no puede satisfacer algunas exigencias tales como:

- Filtrar partículas de tamaño muy pequeño
- Aprovechar o reutilizar el residuo de la filtración.
- Efectuar una filtración continua.
- Asegurar una calidad constante de la filtración.
- Efectuar una selección por el tipo de moléculas

#### **IV.5.2. Filtración Tangencial**

En este tipo de filtración el flujo de la materia a filtrar es paralelo al medio filtrante, lo que limita el crecimiento de la torta depositada. En comparación con la filtración normal este mecanismo tiene la ventaja de producir una torta mucho más delgada que ofrece menor resistencia permitiendo que el flujo de filtrado sea mayor y pueda mantenerse por periodos prolongados.

Estas ventajas son las que permiten una operación continua del proceso de filtración en sistemas cerrados en los que se produce la separación de partículas contenidas en suspensiones heterogéneas.

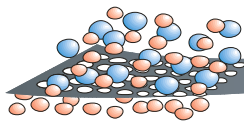


**Figura IV.5.2.** Representación de una filtración tangencial

#### **IV.6. MÓDULOS DE FILTRACIÓN CON MEMBRANAS.**

Las membranas para poder ser utilizadas requieren ser dispuestas en soporte denominado módulos cuyos objetivo es el de facilitar al proceso de separación la siguientes características

- Resistencia química y mecánica.
- Adaptabilidad a cualquier proceso de filtración.
- Facilidad de limpieza.
- Facilidad de ensamblaje.



### IV.6.1. Planas

Este tipo de módulo está formado por dos placas que sirven de soporte mecánico para cada membrana de cara plana. Su aspecto es muy similar a un filtro tipo prensa. La alimentación presurizada se introduce en el sistema y fluye a través del espacio existente entre la membrana y la cara de las placas. Parte del solvente permea la membrana y fluye por el interior de canales hacia un tubo central que está provisto con agujeros que reciben el permeado; el resto sale concentrado en las especies retenidas. La disposición de las placas permite hacer arreglos en series o paralelos. La sencillez del diseño de estas unidades facilita el desmontaje y la limpieza de las membranas.

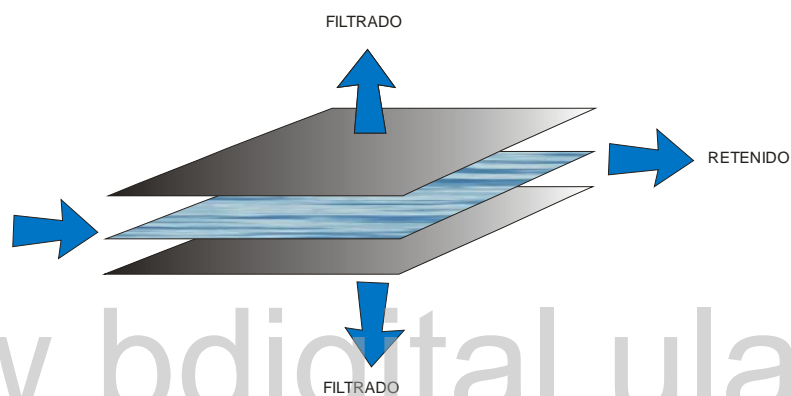


Figura IV.6.1. Módulo Plano

### IV.6.2 Tubulares

En este tipo de unidades las membranas se encuentran dispuestas en el interior de un tubo que le sirve de soporte como se observa en la figura IV.6.2. Estas cubiertas tubulares pueden ser de diversos materiales como plástico, cerámica y metal; poseen paredes porosas y permiten la presurización del sistema. El solvente alimentado permea la membrana y luego se filtra a través de las paredes del soporte para posteriormente ser almacenadas. Los módulos tubulares tienen la ventaja de que pueden disponerse en arreglos similares a los de un intercambiador de coraza y tubo, permitiendo así contar con mayor área de intercambio. La turbulencia generada por altas velocidades a las cuales circula el solvente a lo largo de estos tubos muy finos se traduce en una mayor tasa de corte que reduce la acumulación de solutos en la superficie de la membrana.

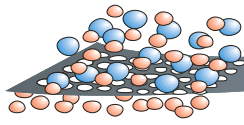


Figura IV.6.2. Membranas Tubulares

### IV.6.3. Fibras Huecas

Estos módulos están formados por muchísimos tubos que son casi tan finos como el cabello humano (100 a 200 micrones), tal como se aprecia en la sección de aumento en la figura IV.6.3, pero son huecos, con paredes de aproximadamente 25 micrones de espesor. Cilindros tan delgados como estos no necesitan una estructura que los soporten para resistir altas presiones sin que se produzca su colapso. Esta característica y el bajo costo de las fibras constituyen las ventajas principales de este tipo de módulo.

www.bdigital.ula.ve

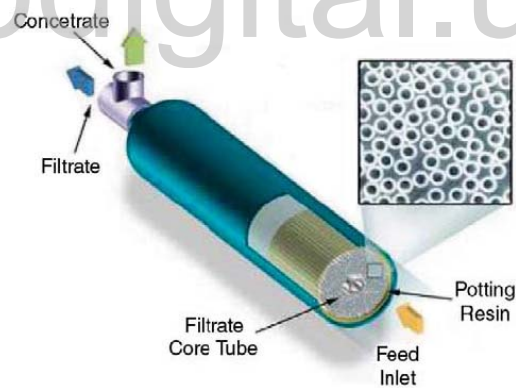


Figura IV.6.3. Módulo de Fibra Hueca

### IV.6.4. Espirales

Estas unidades están constituidas por membranas planas que envuelven a un tubo poroso donde se lleva a cabo el transporte del permeado. Entre cada una de las membranas se intercambian espaciadores corrugados o tipo malla, cuya función principal es la de actuar como soporte y crear turbulencia para reducir la concentración por polarización. La desventaja que se le atribuye a estos módulos es la dificultad en la limpieza de los mismos lo que conlleva a someter a un pretratamiento a la alimentación.

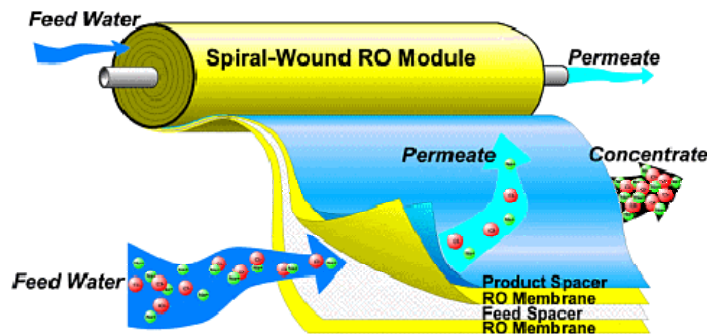
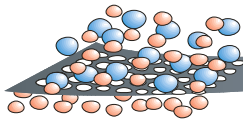


Figura IV.6.4. Módulo de espiral.

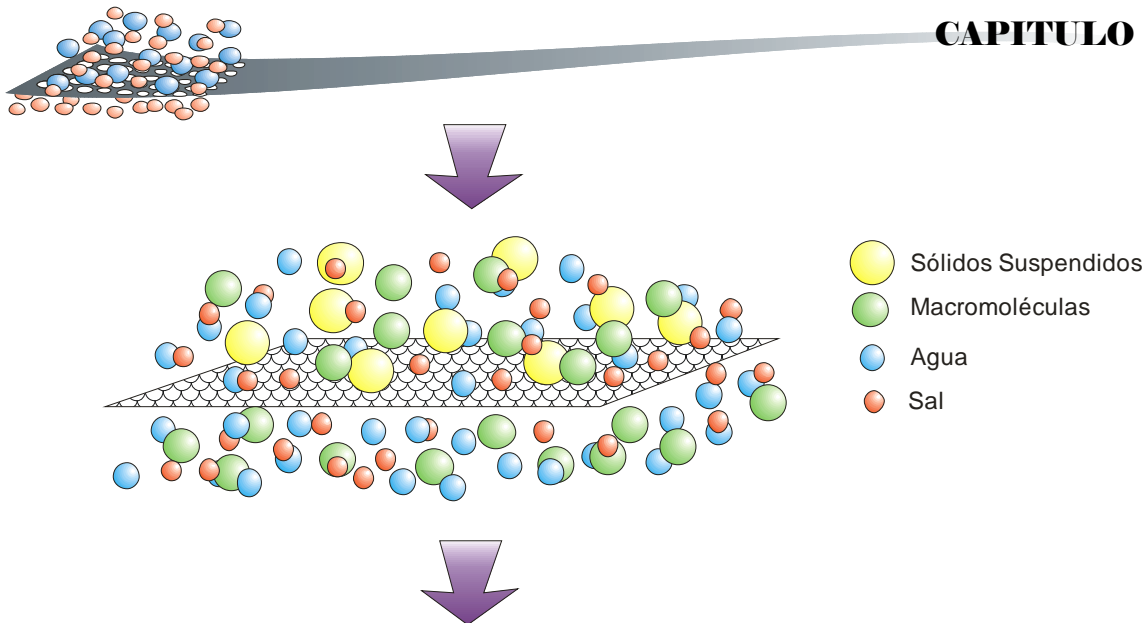
## IV.7. TIPO DE PROCESOS DE FILTRADO CON EL USO DE MEMBRANAS

La filtración a nivel de membranas es una operación que se lleva a cabo con membranas porosas. Su principio es totalmente equivalente al de una filtración "normal" con mallas. Las sustancias con un tamaño superior al de los poros no pasan al permeado y las más pequeñas sí. Dependiendo del tamaño las operaciones de filtración se dividen en microfiltración, ultrafiltración y nanofiltración. La delimitación de tamaños en la clasificación no es muy clara y los problemas de diseño y ecuaciones descriptivas son equivalentes en todos los casos. Más o menos la ultrafiltración se extiende desde 1 hasta 1000 nm. Para tamaños superiores hasta nivel macroscópico se habla de microfiltración.

También se encuentran los procesos de ósmosis inversa, ya que es uno de los procesos más populares y la electrodiálisis que se usa para separar iones de un medio líquido y del cual hablaremos detalladamente a continuación.

### IV.7.1. Microfiltración (MF)

La microfiltración es la más antigua de las cuatro tecnologías de membranas usadas por presión, y consiste en la separación de partículas muy finas u otras materias suspendidas, que presentan un radio de partícula de 0,1 a 1,5 micras, son separadas de un líquido. Este tipo de operación es capaz de quitar los sólidos suspendidos, las bacterias u otras impurezas. Las membranas usadas para la microfiltración tienen un tamaño de poro de 0.1 – 10  $\mu\text{m}$



**Figura IV.7.1.** Proceso de Microfiltración

#### IV.7.1.1. Aplicaciones de la microfiltración en tratamiento de aguas.

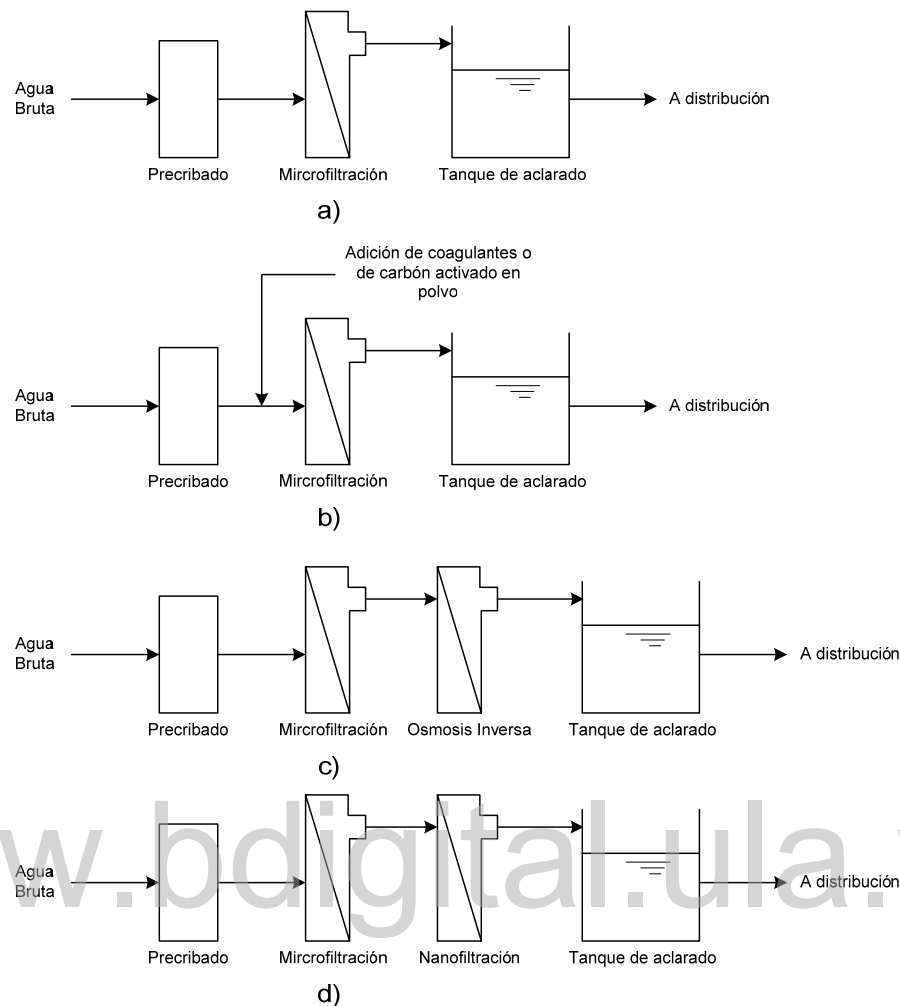
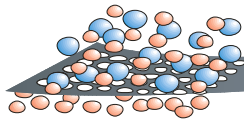
Hay varias aplicaciones de la MF en la industria del agua potable como se muestra en la figura IV.7.2. Los impulsos principales para un uso más amplio de la MF se debieron a los requerimientos más restrictivos para una mejor eliminación de partículas y microorganismos de los suministros de agua potable. Adicionalmente, hay un énfasis creciente en limitar las concentraciones y número de productos químicos que se aplican durante el tratamiento de agua. En algunas aplicaciones de MF para eliminación de partículas y microbios, no se añaden productos químicos durante el ciclo de producción de agua de proceso.[5]

Un tren típico de tratamiento para esta aplicación constaría simplemente de cribado, MF y desinfección. Para algunos sistemas de membranas tubulares, el cribado no es necesario.

Otra aplicación de esta tecnología es la eliminación de materia orgánica natural o sintética. En su operación normal, la MF elimina poca o ninguna materia orgánica; sin embargo, cuando se aplica en pretratamiento, pueden realizarse eliminaciones incrementadas de materia orgánica así como un retardo en el ensuciamiento de la membrana. Un tren de tratamiento constaría de precibado, pretratamiento, MF y desinfección.

Otras dos aplicaciones implican el uso de MF como pretratamiento para OI y NF. Ambas han sido tradicionalmente empleadas sobre aguas subterráneas para desalación o eliminación de dureza.

Otra aplicación de MF es en el proceso de deshidratación de los lodos y la eliminación de materia coloidal en corrientes de rechazo antes del tratamiento por OI.

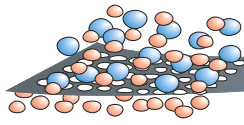


**Figura IV.7.2.** Esquemas de varias aplicaciones de MF: a) MF solamente; b) Eliminación de materia orgánica por pretratamiento de MF con coagulante o CPA; c) MF como pretratamiento de la OI; d) MF como pretratamiento de la NF. [5]

### IV.7.1.2. Selección del módulo de Microfiltración

Para el tratamiento del agua potable hay varias geometrías de membranas disponibles comercialmente:

- Arrollada en espiral
- Tubular
- De fibra fina hueca
- De fibra capilar hueca
- Disco Tubo.
- Plato Bastidor
- Cassette.



Para aplicaciones industriales del agua potable, la arrollada en espiral, tubular y fibra capilar hueca son las más comúnmente empleadas. Sin embargo, para MF, las configuraciones arrolladas en espiral no son normalmente empleadas debido a la naturaleza de la membrana de hoja plana, que presenta dificultades para mantener la superficie de la membrana limpia. De modo distinto a las membranas arrolladas en espiral, las configuraciones de fibra hueca y tubular permiten a la membrana ser retrolavadas, un mecanismo por el que se controla el ensuciamiento debido a las partículas y materiales orgánicos.[5]

A continuación se presentan unas series de ventajas y desventajas para los procesos de separación con membranas de fibra hueca y tubular:

### **Fibra Hueca**

#### **Ventajas:**

- Bajas velocidades de flujo cruzado, en el rango de 0 a 2,5 ms
- Con modelos de flujo interior-exterior, las tasas de restricción son altas debido a las pequeñas luces del interior de la fibra.
- Elevada relación área superficial / volumen o densidad de compactación de membranas.
- Las fibras pueden ser retrolavadas.
- Bajas presiones transmembrana, normalmente de 0,2 a 1 bar
- Baja caída de presión a través del módulo, en el rango de 0,1 a 1 bar.

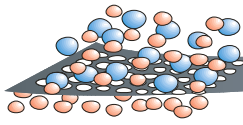
#### **Desventajas:**

- Las membranas de pequeño diámetro de tubo son susceptibles de cegarse, a no ser que se aplica un precibado.
- El gran número de fibras en el módulo presenta dificultades para detectar fallos de integridad, o sea fugas (o pérdidas) de la membrana en las grandes plantas.

### **Tubular**

#### **Ventajas:**

- Grandes diámetros de canales (1 a 2,5 cm) permiten tratamiento de aguas con altos contenido en sólidos y grandes partículas.



- Son posibles elevadas velocidad de flujo transversal (hasta 5 m/s), utilizadas para controlar el ensuciamiento.
- Los grandes diámetros de canales permiten una fácil limpieza, en algunos casos puede también utilizarse la limpieza mecánica.
- Las membranas cerámicas tubulares muestran buena resistencia mecánica.

### **Desventajas:**

- Baja relación área superficial/volumen o densidad de compactación de membranas.
- Las membranas cerámicas son más caras de coste por m<sup>2</sup> de área de filtración comparadas con otras configuraciones de membrana.

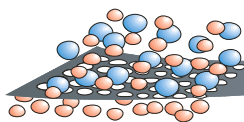
### **IV.7.1.3. Operación y mantenimiento de la Microfiltración**

Los sistemas son operados normalmente de dos maneras: a caudal constante de agua a través de la membrana con presión variable para mantener el caudal, o a presión constante a través de membranas con un caudal de agua transmembrana variable. En términos de operación del tratamiento del agua de planta, estos modos operativos se refieren como tasa constante y tasa declinante de filtración, respectivamente. El anterior es empleado normalmente para asegurar una tasa constante de producción.[5]

El mayor obstáculo para mantener una tasa constante de producción es la disminución del caudal a través de la membrana debido al ensuciamiento. Esto se debe a la deposición de materiales sobre la superficie de la membrana y/o en los poros. La reducción del caudal que puede restaurarse por medios mecánicos o químicos se denomina ensuciamiento reversible.

En MF hay tres métodos para mantener o restablecer el caudal permeado después de que las membranas se han ensuciado de manera reversible:

- Retrolavado de membrana: Para prevenir la continua acumulación de sólidos sobre la superficie de la membrana, se lleva a cabo el retrolavado de la membrana. De modo distinto a los medios convencionales de filtración, el ciclo de retrolavado lleva sólo unos pocos minutos. Para la mayoría de los sistemas de MF, el retrolavado tiene lugar durante 30 a 60 minutos de trabajo y se hace durante un tiempo de 1 a 3 minutos.



- **Pretratamiento de membrana:** El pretratamiento del agua de alimentación puede emplearse para incrementar el nivel de eliminación de varios constituyentes naturales del agua; también se utiliza para incrementar o mantener el caudal a través de la membrana y/o para retrasar el ensuciamiento. Los dos tipos más comunes de pretratamiento son adición de coagulante o de CPA. Los coagulantes metálicos son inyectados normalmente a través de una línea de alimentación de agua bruta, después de lo cual, el agua entra en un depósito para mezclado y coagulación. Los tiempos de retención en el depósito van desde 5 minutos a 1 hora, aproximadamente.
- **Limpieza de membrana:** A medida que la concentración de materiales se acumula sobre la superficie de la membrana, continúa incrementándose la pérdida de caudal a través de la misma. Cuando los materiales ensuciantes no pueden ser eliminados de la superficie de la membrana por retrolavado, se requiere la limpieza química. Hay una variedad de diferentes agentes que pueden emplearse para la limpieza química de las membranas de MF, incluyendo los detergentes, ácidos, bases, agentes oxidantes y enzimas.

### IV.7.2. Ultrafiltración (UF)

La ultrafiltración es una técnica que está basada en la habilidad que tiene una membrana para separar uno o varios solutos presentes en un solvente en función del peso molecular, la forma y cuando existe un gradiente de presión. Las membranas utilizadas en ultrafiltración son porosas y sólo permiten el rechazo de solutos gruesos (macromoléculas), microorganismos como virus y bacterias así como los sólidos suspendidos, puesto que, en general el rango de separación es de 10 a 100 ángstrom. La ultrafiltración es simplemente un proceso físico que no requiere reacción química, cambio de fase o dilución alguna.

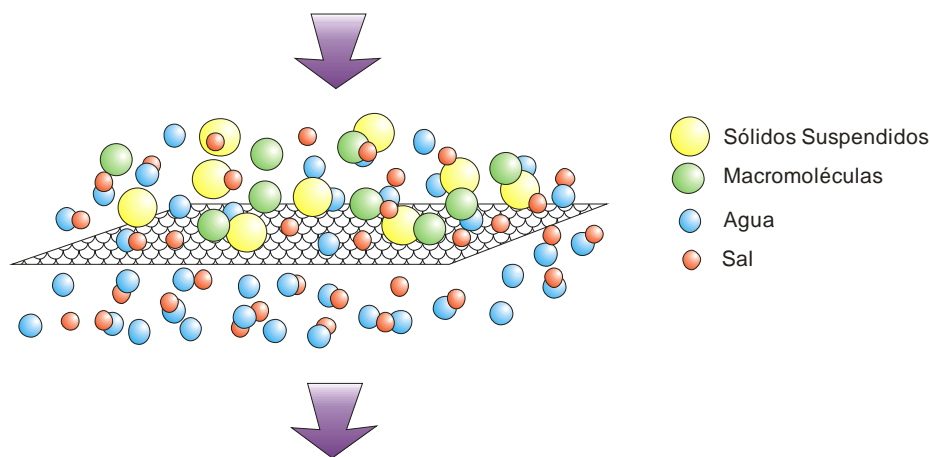
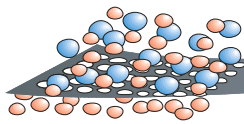


Figura IV.7.3. Proceso de Ultrafiltración



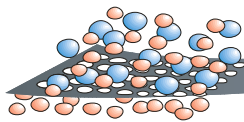
Aunque las primeras membranas de ultrafiltración eran preparadas de materiales celulósicos; las membranas modernas son hechas de una gran variedad de polímeros sintéticos entre los que se destacan el nylon, cloruro de vinilo, las polisulfonas, etc, que son mas resistentes a la degradación química y térmica. Éste tipo de operación tiene como aplicación el tratamiento de aguas, particularmente aquellas contaminadas con crudo, puesto que puede ser utilizada para concentrar el aceite emulsificado en agua en situaciones donde el efluente no puede ser tratado por los procesos convencionales de separación. El proceso producirá agua mucho más limpia que puede ser reutilizada en la planta o descargada al ambiente. Por otro lado el aceite concentrado puede ser reciclado y utilizado como combustible.

Debido a que mediante la *UF* se separan partículas relativamente grandes: macromoléculas y coloides, con valores de coeficientes de difusión ( $D_i$ ) pequeños, los valores de  $C_{im}/C_{ib}$  (factor de enriquecimiento, siendo  $C_{im}$ ,  $C_{ip}$  y  $C_{ib}$ , concentraciones del componente  $i$  en la superficie de la membrana, en el permeado y en el lado de la alimentación), pueden estar comprendidos entre 20 – 50, lo que significa que puede llegarse a altos valores de polarización de la concentración, creándose un gel adyacente a la membrana que puede reducir en segundos el flujo de permeado de  $1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$ , para el agua limpia, a  $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{min}$  en el caso de una dispersión coloidal.[1]

La eliminación de las sustancias que habitualmente ensucian a las membranas de ultrafiltración: restos de dispersiones coloidales y materiales gelatinosos, se lleva a cabo mediante ciclos de limpieza con una frecuencia y duración que dependerá de la operación de separación que se esté llevando a cabo. Las etapas de un ciclo de limpieza estándar podrían ser: *i*) enjuagados de las membranas con agua caliente y alta velocidad de flujo, *ii*) lavado con ácido o base, dependiendo de la naturaleza de la membrana *iii*) lavado del sistema con un detergente en caliente y *iv*) enjuagado del sistema con agua para eliminar los restos de detergente

#### **IV.7.2.1. Aplicaciones**

Los costes de capital y de operación de *UF*, son todavía demasiado altos para que pueda aplicarse como única tecnología de tratamiento de grandes caudales de agua residual, pero si tiene ya un importante campo de aplicación, en combinación con otras tecnologías, como es el caso de los reactores biológicos con membranas o como pretratamiento en los procesos de *OI*.



Como única tecnología se utiliza en el tratamiento de efluentes de aguas residuales de 2.5 – 25 m<sup>3</sup>/día, sobre todo en aquellos casos como el tratamiento del agua caliente y recuperación de proteínas en la industria de la alimentación; recuperación de partículas de pintura del agua de los procesos de pintado de piezas industriales; recuperación de polímeros sintéticos en la industria textil; recuperación de aceites presentes en las aguas de proceso de la industria metalúrgica, etc.; donde se plantea el doble objetivo de recuperar un producto valioso y/o reutilizar el agua.

Los costes de capital y de operación, para este tipo de plantas, se estiman en 0.5 – 1.25 US\$/L/día y 0.75 – 1 US\$/L/día, respectivamente. En la Tabla IV.7.1 se muestra la distribución media porcentual de los costes de capital y de operación de un proceso de UF.

**Tabla IV.7.1.a** Distribución porcentual de los costes de capital de un proceso de UF. [5]

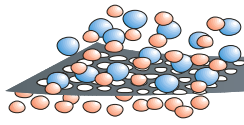
Coste de Capital	%
Bombas	30
Módulo de membranas	20
Estructuras	10
Tuberías y Válvulas	20
Sistema de control	20
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

**Tabla IV.7.1.b** Distribución porcentual de los costes de operacional de un proceso de UF. [5]

Coste de Operación	%
Sustitución de membranas	30-50
Limpieza	10-30
Energía	20-30
Mano de Obra	15
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

En un sistema de tratamiento de aguas residuales, los residuos son inicialmente transferidos de varias fuentes a un tanque de equalización. Diseñado para ser un tanque “pasivo”, el tanque de equalización es típicamente de un volumen tal que el tiempo de retención sea de un día. Este tanque desempeña tres funciones.

Primero, permite la separación del aceite libre, el aceite emulsionado y los sólidos sedimentables/lodo. El aceite libre flota hacia la superficie del tanque donde es desnatado continuamente por una desnatadora de aceite que consiste de una cuerda, tubo o cinta flotante. Los sólidos sedimentables se hunden hasta el fondo del tanque. Estos sólidos más pesados son bombeados o succionados periódicamente hacia fuera del tanque dependiendo de la cantidad. Los



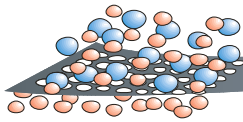
aceites libres son enviados al tanque de almacenamiento de concentrado del sistema para ser mezclados con concentrado de UF, o pueden ser recuperados separadamente como fluido valioso de alto BTU. Al reducir los aceites libres y los sólidos en este punto, se optimiza el rendimiento del sistema de membrana ubicado aguas abajo. La productividad de las membranas se mantiene alta, la mano de obra y la limpieza se reducen, y se extiende la duración del proceso entre limpiezas.

La segunda función del tanque de equalización es uniformar los cambios de flujo y composición de los residuos. Sin la equalización, un sistema de membranas tendría que ser diseñado para el peor de los casos, con los flujos más altos y/o alimentación máxima de sólidos—un sistema ineficiente que requiere costos adicionales de membrana y de sistema. La consistencia del permeado también podría comprometerse con cambios bruscos en la calidad de la alimentación a la UF.

La tercera función es la capacidad de almacenaje. Esto se utiliza durante el período en que las membranas operan en reducción de volumen de lote. El periodo puede durar de 2 a 12 horas, y la capacidad de acumulación de residuos durante el mismo deberá ser diseñada dentro del sistema.

Según los objetivos que se pretendan, el ahorro debido al tratamiento de las aguas residuales por *UF* se puede estimar en:

- **Reutilización de agua**, reducción del coste del consumo de agua de la red municipal de abastecimiento de 0.25 – 0.5 US\$/m<sup>3</sup> de agua reutilizada.
- **Tratamiento de agua caliente**, en aguas de estas características, donde la temperatura puede ser de hasta 50 °C, es posible el tratamiento por *UF* sin tener que enfriarla previamente. El ahorro puede ser de 1 US\$/m<sup>3</sup> de agua reutilizada, ya que además del ahorro en energía, los menores problemas de ensuciamiento también reducirán los costes por reposición de membranas.
- **Reducción de costes de tratamiento de efluentes industriales**, la reutilización del agua evita, en gran parte, el vertido de efluentes a la red pública de saneamiento y, en la misma medida, los costes de tratamiento relativos al cumplimiento de la normativa sobre límites de vertido. Tomando como base las industrias de alimentación y de automoción (pintado de carrocerías de coches) el ahorro se puede estimar en 0.25 – 2.5 US\$/m<sup>3</sup> de agua reutilizada, respectivamente.



• **Recuperación de productos**, la UF permite la recuperación de productos valiosos que pueden reciclarse en el proceso de producción. La influencia de esta aplicación en la economía del proceso, dependerá del valor y cantidad del producto recuperado.

La utilización de la tecnología de UF a mayor escala está condicionada por los altos costes de operación debido a los problemas de ensuciamiento de las membranas. El desarrollo de módulos de membranas tipo fibra hueca 2 – 3 mm de diámetro (capilares), que pudieran operar con caídas de presión de 520 – 700 kPa, con el objetivo de reducir los costes de energía y estabilizar los flujos de permeado, es una de las condiciones que ampliaría las posibilidades de aplicación de esta tecnología.

### IV.7.2.2 Operación y mantenimiento de Ultrafiltración

En la figura IV.7.4, presenta un diagrama de una planta típica de UF por membrana. La planta puede ser dividida en varias subcategorías:

- Toma de Agua Bruta y bomba de presión
- Pretratamiento, que incluye precibado, prefiltración y ajuste del pH o cualquier otro pretratamiento que se necesite
- Unidades de UF
- Estación de limpieza química, estación de retrolavado (que se usa agua producto clorada), estación de cloración, estación de acondicionamiento/preservación.
- Línea para descarga o tratamiento de retrolavado de agua.

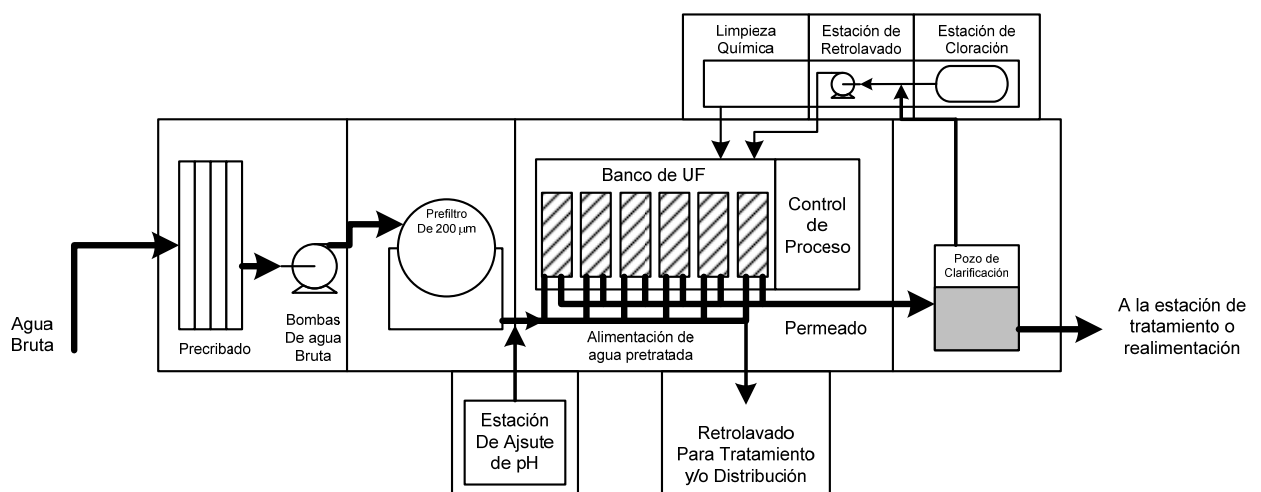
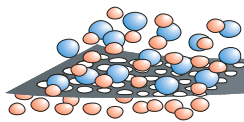


Figura IV.7.4. Diagrama de una planta de UF. [5]



El trabajo y el rendimiento de una planta de membranas de UF están fuertemente influidos por las variaciones de calidad del agua bruta. La turbidez y el COT del agua bruta son parámetros de calidad del agua de importancia fundamental, que dirigen el modo de operación y flujo de membrana para todas las plantas de UF presentes en todo el mundo.

La optimización de los parámetros de la operación es también de gran importancia cuando se está evaluando el costo por volumen del agua tratada, particularmente para ahorro energético.

Las plantas de UF se operan generalmente con un alto nivel de automatización para ser capaces de minimizar consumo energético, utilizando sensores externos para dirigir los diversos modos operacionales.

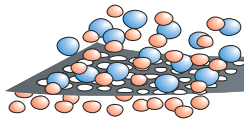
Se utilizan tres diferentes parámetros para controlar los procesos:

- Nivel de presión de entrada, que está correlacionado con el caudal y ensuciamiento específico de membrana. Se establecen dos niveles altos de presión.
- Nivel de turbidez del agua bruta con dos valores preseleccionados.
- Nivel de relación en la absorbancia UV y el COT con dos valores preseleccionados.

### IV.7.3. Ósmosis Inversa (OI)

La ósmosis inversa es una operación en donde al aplicar una presión se lleva a cabo la separación de solutos de bajo peso molecular a través de una membrana semipermeable no porosa. En éste proceso el flujo de materia está basado en las diferencias de solubilidad y difusividad, por tal razón la membrana retiene sustancias disueltas, tales como sales y azúcares y sólo permite el paso del solvente. La presión de operación para aguas marinas es de aproximadamente 5 a 8 MPa.

En general el proceso de ósmosis inversa tiene un gran número de aplicaciones industriales dado que puede ser utilizado para recuperar residuos valiosos, reducir la contaminación de efluentes, concentrar bebidas y drogas y principalmente producir agua potable a partir de fuentes salinas.



### IV.7.3.1. Características del proceso

La ósmosis es el proceso que tiene lugar cuando una membrana, con permeabilidad selectiva al agua, separa dos soluciones salinas acuosas de distinta concentración, que se encuentran a la misma presión y temperatura. De forma natural el agua pasa (Fig. IV.7.5.a) de la solución más diluida a la más concentrada a través de la membrana. El fenómeno cesa (Fig. IV.7.5.b) cuando el aumento de presión hidrostática, en el lado de la membrana de la solución más concentrada, supone una resistencia suficiente para impedir el paso del agua proveniente de la solución diluida. La diferencia de presión entre las dos soluciones cuando se alcanza este estado de equilibrio se denomina diferencia de presión osmótica ( $\Delta\pi$ ). Si lo que se pretende es invertir el flujo de agua generado por la ósmosis (Fig. IV.7.5.c), es necesario aplicar, en el lado de la solución concentrada, una presión que origine una diferencia de presión a través de la membrana ( $\Delta p$ ) superior a la presión osmótica. De esta forma se logra que el flujo de agua sea en el sentido de la solución concentrada a la solución diluida (*OI*), obteniéndose agua desalada, a partir de soluciones acuosas salinas, de calidad suficiente para ser utilizada en el consumo humano o en otras aplicaciones.[1]

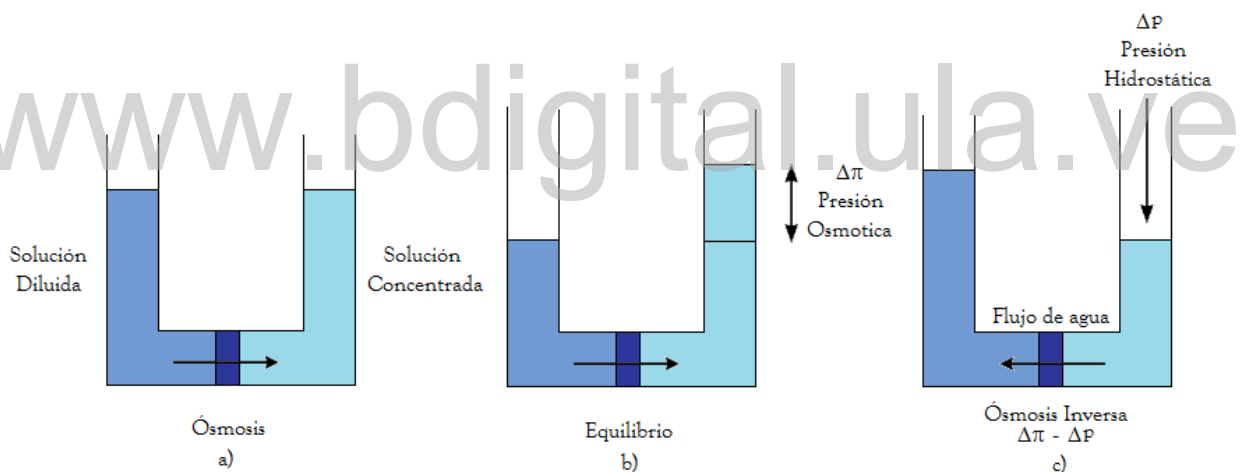
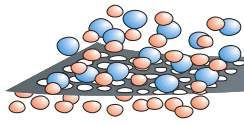


Figura IV.7.5. Proceso de Osmosis Inversa

En *OI* se utilizan membranas densas, anisótropas, en configuraciones del tipo módulos enrollados en espiral, aproximadamente de 6,25 cm de diámetro y 100 - 150 cm de largo; que se disponen en número de 5 – 7 en el interior de carcasas de plástico reforzadas con fibra de vidrio o de acero inoxidable. También se utilizan membranas del tipo fibra hueca, de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro, dispuesta en módulos que contienen 1000 unidades. La elección del tipo de membranas dependerá de las características del agua a tratar, ya que las configuraciones con membranas tipo fibra hueca presentan mayores problemas de ensuciamiento que las configuraciones tipo enrollamiento en espiral.

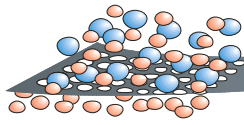
**IV.7.3.2. Aplicaciones**

Los objetivos de las plantas de *OI* instaladas se distribuyen de la siguiente forma: 50 % en desalinización de agua de mar y agua salobre; 40 % en la producción de agua ultrapura para las industrias electrónica, farmacéutica y de producción de energía; 10 % como sistemas de descontaminación de aguas urbanas e industriales.[5]

- **Desalinización de agua de mar:** Dependiendo de la zona geográfica, la salinidad de este tipo de aguas es de 30000 mg/L - 40000 mg/L. Para conseguir condiciones de potabilidad se utilizan membranas de poliamida de tipo fibra hueca que permiten conseguir coeficientes de rechazo superiores al 99.3 % con presiones de trabajo de 50 bar – 70 bar.

Los costes de operación de este tipo de plantas de tratamiento se estiman en 1 – 1.25\$US/ L de agua tratada/día, lo que hace que este sistema de tratamiento no sea competitivo, frente a otros sistemas como los procesos de evaporación multietapa, si las necesidades de agua superan los 40000 m<sup>3</sup> de agua tratada/día, dependiendo del costo de operación de la energía.

- **Producción de agua ultrapura:** La *OI* permite obtener a partir del agua de consumo (concentración de sólidos disueltos < 200 mg/L) agua de la calidad exigida en la industria electrónica. El principal problema en este tipo de instalaciones es el bioensuciamiento de las membranas, por lo que es necesario la instalación de sistemas de esterilización mediante radiación UV.
- **Tratamiento de aguas residuales:** Esta aplicación de la *OI* está limitada por los altos costes de operación debido a los problemas de ensuciamiento de las membranas. En el caso de las aguas residuales industriales, la *OI* se utiliza en aquellas industrias donde es posible mejorar la economía del proceso mediante la recuperación de componentes valiosos que puedan volver a reciclarse en el proceso de producción: industrias de galvanoplastia y de pintura de estructuras metálicas, o donde la reutilización del agua tratada signifique una reducción importante del consumo de agua: industria textil.

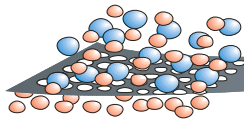
**IV.7.4. Nanofiltración (NF)**

Es una técnica de separación con membranas en la cual las partículas muy finas u otras materias suspendidas, con un tamaño de partícula en la gama de aproximadamente 0,001 a 0,005 micras, se separan de un líquido. Esta operación es capaz de quitar virus, pesticidas y herbicidas. En el tratamiento de aguas es utilizada principalmente en la remoción de iones polivalentes (calcio, magnesio) en operaciones de ablandamiento. Ha sido empleada también para separar la materia orgánica y en la desulfatación y endulzamiento de aguas provenientes de minas. La presión de trabajo se ubica entre 0,5 y 1,5 MPa.

Se utiliza en el tratamiento de aguas de consumo en pequeñas comunidades. Eliminación de la dureza del agua y como pretratamiento para la obtención de agua ultrapura.

A la vista de las principales aplicaciones de OI/NF, resulta evidente que las calidades del agua obtenida son suficientes para poder ser reutilizadas en las condiciones más exigentes. Para que estos procesos sean competitivos y tengan una mayor presencia en el tratamiento de aguas urbanas e industriales, será necesario un mayor desarrollo del sector con el fin de fabricar membranas más baratas, que permitan menores presiones de trabajo y reduzcan los problemas de ensuciamiento.

En los últimos 20 años, tomando como base de cálculo 1 m<sup>2</sup> de membrana tipo enrollamiento espiral, se ha reducido el coste de 1 US \$ a 0.14 US\$, se ha multiplicado por dos el flujo de agua tratada y se ha reducido a la séptima parte la permeabilidad de la membrana a las sales disueltas. El mantenimiento del nivel desarrollo de los últimos años, como lo demuestra la aplicación de las membranas en nuevos procesos de separación: pervaporación, reactores de membranas, piezodialisis, aplicaciones médicas, etc.; junto con la aparición de nuevos materiales que permitan, además de la depuración del agua, la recuperación de sustancias valiosas, hacen prever unas buenas perspectivas de futuro para estos procesos.

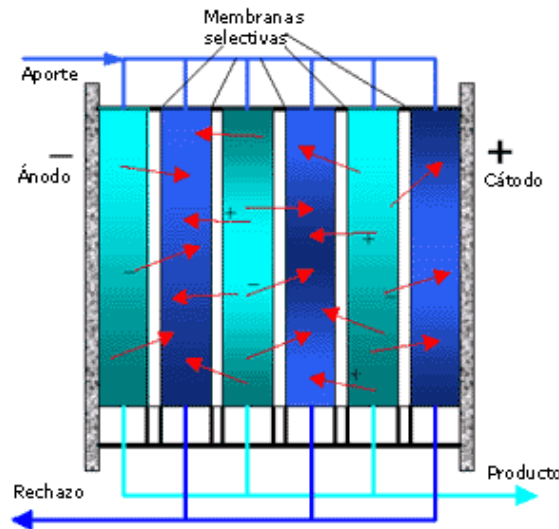
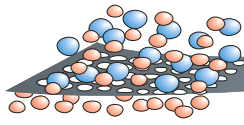
**IV.7.5. Diálisis**

La diálisis es un proceso en el cual una diferencia de concentración a través de la membrana es la fuerza directora. En éste proceso se colocan varias membranas paralelas una a la otra para formar compartimientos delgados de soluciones en un aparato similar a un filtro tipo prensa. Las membranas utilizadas son seleccionadas para permitir el paso de sales o pequeñas moléculas y retener macromoléculas y coloides. Una solución que contiene una mezcla de solutos grandes y pequeños se hace circular a través de los compartimientos enumerados como impares. Por otro lado el agua o la solución diluida de solutos más pequeños circulan a través de los compartimientos enumerados como pares. Debido a la diferencia de concentración a través de la membrana, tanto los solutos grandes como los pequeños tienden a transferirse a través de las membranas hasta la corriente diluida. Los solutos de menor tamaño se transfieren, sin embargo es bloqueado el paso de las moléculas más grandes de forma tal que puede ser recuperada una solución que contenga sólo pequeños solutos. La diálisis es la operación con membranas más antigua, pero sólo han encontrado unas pocas aplicaciones industriales, una de ellas es la separación de Hidroxido de sodio presente en una solución de Hemicelulosa-NaOH en la industria textil, y una de las aplicaciones más importantes en la medicina es la Hemodiálisis, un método que permite eliminar de la sangre residuos como potasio y urea, así como agua en exceso cuando los riñones son incapaces de hacerlo.

**IV.7.6. Electrodiálisis (ED)**

Los procesos de separación basados en la electrodiálisis utilizan membranas donde se han incorporado grupos con cargas eléctricas, con el fin restringir el paso de los iones presentes en una solución acuosa. En estos procesos la “fuerza impulsora” responsable del flujo de los iones, a través de la membrana, es una diferencia de potencial eléctrico.

Un equipo de electrodiálisis está formado por un conjunto de membranas aniónicas y cationicas, dispuestas en forma alterna y separada por espaciadores o placas, en una configuración semejante a los filtros prensa. Los espaciadores provocan turbulencias que evitan las deposiciones de materiales en la superficie de las membranas y homogeneizan la concentración. En la figura IV.7.6 se muestra un esquema de esta disposición.

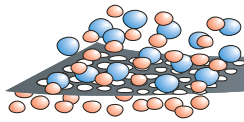


**Figura IV.7.6.** Esquema de un proceso de electrodiálisis

#### **IV.7.6.1. Proceso de Electrodiálisis Inversa (EDI)**

El proceso de EDI opera sobre los mismos principios básicos del proceso estándar de ED. Sin embargo, en el proceso de EDI, la polaridad de los electrodos se invierte periódicamente (aproximadamente de 3 a 4 veces por hora) y, por medio de válvulas motorizadas, se intercambian las salidas del acumulador de membrana, del agua potable producto y del agua residual. Los iones transferidos así en direcciones opuestas a través de las membranas. Esto ayuda a la rotura de las incrustaciones y al lavado y salida al exterior de lodos y otros depósitos de las celdas. El agua producto que emerge de la celda previa de salmuera se descarga normalmente al residuo por un tiempo de uno o dos minutos hasta que la calidad del agua se haya restaurado.[5]

La operación automática del proceso EDI normalmente elimina la necesidad de dosificar ácido y/o secuestrantes y la formación de incrustaciones en los compartimientos de los electrodos se minimiza debido al cambio continuo de condiciones ácidas a básicas. Esencialmente, en la EDI se usan tres métodos para eliminación de incrustaciones y otras materias ensuciantes de las superficies comprendiendo el sistema de limpieza in situ, desmontaje de la batería, como en la ED normal, e inversión del caudal y polaridad en la batería. El sistema de inversión de la polaridad aumenta en gran medida los intervalos entre las tareas de desmontaje y montaje, suministrando una reducción total del tiempo de mantenimiento.[5]



La capacidad de la EDI para controlar la precipitación de la incrustación más efectivamente que la ED normal es una gran ventaja de este proceso, especialmente para las aplicaciones que requieren altas recuperaciones de agua. Sin embargo, la operación más complicada y los requerimientos de mantenimiento del equipo de EDI necesitan más trabajo y un mayor nivel de preparación que para los equipos de OI. Esto puede ser una desventaja del proceso.

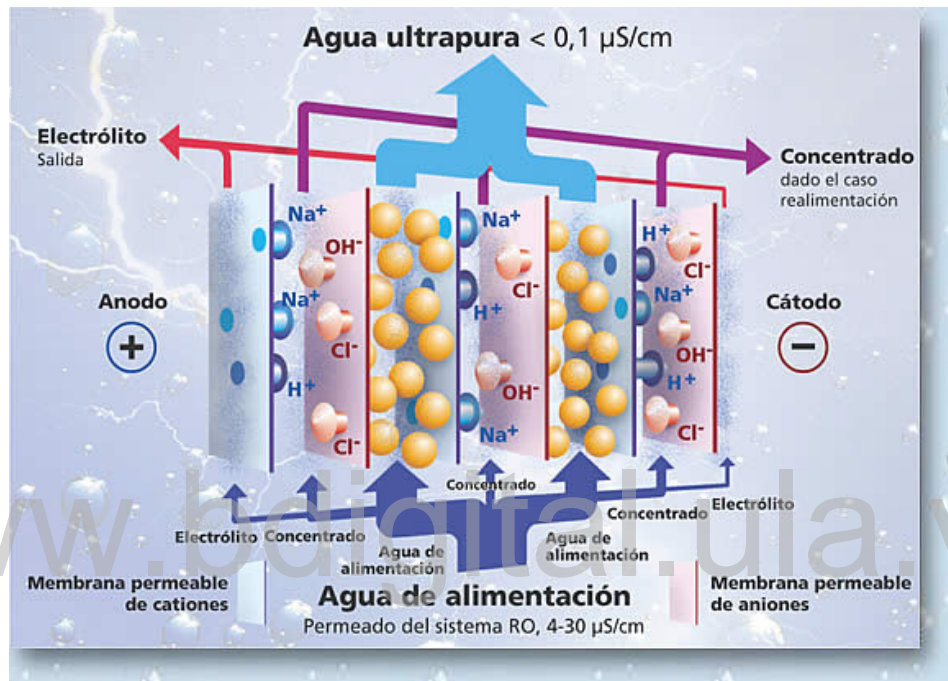
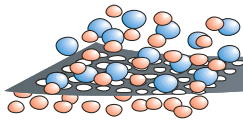


Figura IV.7.7. Diagrama de un proceso EDI

#### IV.8. Flujo de permeado a través de una membrana

El proceso de filtración con membranas permite llevar a cabo la separación de dos o más especies presentes en una corriente de proceso. Tal separación se basa en los dos principios básicos que rigen esta operación: la difusividad a través del medio filtrante (para membranas densas) y el tamaño de partículas (en el caso de las membranas porosas), característico este último del proceso de ultrafiltración. La densidad del flujo de permeado definida como la cantidad de material que atraviesa un área dada de la membrana en un período determinado de tiempo, es un parámetro que juega un papel importante en todo trabajo de investigación, puesto que de él depende en gran parte la efectividad de la operación y la economía del proceso a nivel industrial.



El flujo de permeado que circula a través de la membrana, sin materiales depositados en la superficie o en el interior de los poros se define mediante la Ley de Darcy.

$$J_o = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad (\text{IV.1})$$

Donde J es la densidad del flujo,  $\Delta P$  es la caída de presión transmembrana,  $\mu$  es la viscosidad absoluta del solvente, y  $R_m$  la resistencia hidráulica de la membrana limpia con dimensiones de longitud inversa. Del mismo modo se tiene entonces que la densidad del flujo permeado puede expresarse mediante la siguiente ecuación [6]:

$$J = K \frac{\Delta P}{t} \quad (\text{IV.2})$$

Donde; K es la permeabilidad de la membrana y t el espesor de la membrana. Sin embargo esta expresión se aplica cuando se trabaja a presiones bajas, puesto que la comparación provocada por altas presiones alejan de la linealidad la respuesta del sistema.

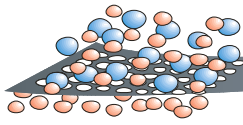
Cuando la mayor parte del permeado atraviesa por convección los poros de la membrana, caso típico de los procesos de UF y MF, se tiene entonces que el flujo volumétrico a través de la membrana que presenta un radio efectivo de poro, se describe mediante la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$J = \frac{\varepsilon \cdot r^2 \cdot \Delta P}{8 \cdot \eta \cdot L} \quad (\text{IV.3})$$

Donde  $\varepsilon$  es la porosidad, r el radio de poro,  $\eta$  la viscosidad del líquido y  $\Delta P$  la caída de presión a través de la membrana y L la longitud de la membrana, siendo esta puro para poros cilíndricos de igual longitud que la membrana.

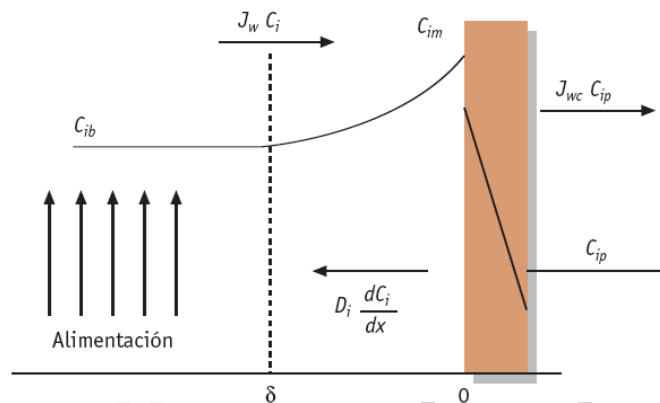
#### **IV.9. POLARIZACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN EN PROCESOS DE FILTRACIÓN CON MEMBRANAS POROSAS.**

La polarización de la concentración, tiene lugar en aquellos procesos que operan en la forma de filtración tangencial, como es el caso de ósmosis inversa y ultrafiltración. En las condiciones de trabajo de estos procesos es difícil evitar que los componentes de la alimentación



rechazados por la membrana no se acumulen en su superficie. El resultado es la creación de gradientes de concentración (polarización de la concentración) en el lado de la alimentación, que pueden disminuir la eficiencia de separación de la membrana y el flujo de permeado.[1]

La figura IV.9.1 representa la situación en la que un componente *i* de la alimentación, que es rechazado por la membrana, se acumula en su superficie, creándose un gradiente de concentración localizado en una película de espesor *d*, próximo a la membrana.



**Figura IV.9.1.** Creación de gradientes de concentración. [1]

El flujo difusivo de componentes *i* ( $D_i \frac{dC_i}{dx}$ ), generado por el gradiente de concentración, se opone al flujo conectivo creado por la diferencia de presión transmembrana, comportándose como una resistencia adicional que contribuye a disminuir el flujo de permeado.

Cuando se llega a un estado estacionario, donde cesa la acumulación de componente *i* en la superficie de la membrana, el balance de componente *i* en el volumen de espesor daría el siguiente resultado:

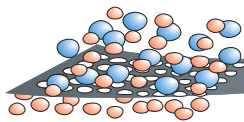
$$J_w C_i - J_w C_p + D_i \frac{dC_i}{dx} = 0 \quad (\text{IV.4})$$

Resolviendo para

$$C_i = C_{ib} \rightarrow x = \delta$$

$$C_i = C_{im} \rightarrow x = 0$$

$$J_w = \frac{D_i}{\delta} \ln \left( \frac{C_{im} - C_{ip}}{C_{im} - C_{ib}} \right) \rightarrow J_w = \frac{D_i}{\delta} \ln \left( \frac{C_{im}/C_{ib} - C_{ip}/C_{ib}}{1 - C_{ip}/C_{ib}} \right) \quad (\text{IV.5})$$



Como se desprende de la expresión final de  $J_w$ , para unas condiciones de operación dadas: coeficiente de rechazo ( $R$ ), condiciones fluidodinámicas ( $d$ ) y viscosidad, temperatura y naturaleza de la sustancias (factores estos últimos que condicionan  $D_i$ ); el máximo flujo de permeado ( $J_w$ ) se conseguirá cuando  $c_{im}$  alcance un valor máximo, que será el de la solubilidad de  $i$  en el gel de la película adyacente a la superficie de la membrana. En estas condiciones, un aumento de la diferencia de presión transmembrana no aumentaría el flujo de permeado ( $J_w$ ), únicamente aumentaría el espesor de la película, pudiendo llegar a compactarla, lo que disminuiría aún más el flujo de permeado e incluso producir un deterioro irreversible en la membrana.

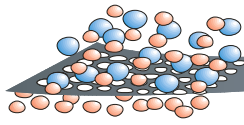
Una polarización de la concentración elevada aumentará la presión osmótica en el lado de la alimentación, lo que también contribuiría la disminución del flujo de permeado. Además, si la concentración  $c_{im}$  es elevada se favorecerá la difusión del componente  $i$  a través de la membrana, lo que significaría una disminución del coeficiente de rechazo.

Esta forma de mal funcionamiento de la membrana depende de las condiciones de operación y no del tiempo de utilización de la membrana. La manera más sencilla de evitar la polarización es aumentando la velocidad de paso de la alimentación, de tal forma que las turbulencias generadas arrastren a las sustancias depositadas en la superficie de la membrana.

**Tabla IV.9.1.** Valores de los parámetros en la polarización de la concentración de algunos procesos. [1]

Proceso	$\frac{C_{ip}}{C_{id}}$	$J_w$ ( $10^{-3} \text{ cm} / \text{s}$ )	$D_i$ ( $10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{s}$ )	$\frac{J_w D_i}{\delta}$	$\frac{C_{im}}{C_{ib}}$
<b>Desalación de agua de mar (OI)</b>	0,01	1,4	10	0,28	1,3
<b>Separación de proteínas (UF)</b>	0,01	1,4	0,5	5,6	70

$C_{ip} / C_{ib}$  y  $C_{im} / C_{ib}$  son parámetros de operación que se denominan módulo de polarización de la concentración y factor de enriquecimiento, respectivamente.  $C_{im}$ ,  $C_{ip}$  y  $C_{ib}$ , son las concentraciones del componente  $i$  en la superficie de la membrana, en el permeado y en lado de la alimentación.

**IV.10. FACTOR DE RECHAZO**

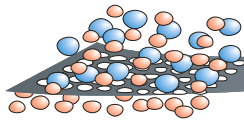
El factor de rechazo indica fundamentalmente la cantidad de soluto que es capaz de retener la membrana, es decir representa la efectividad de la membrana y se expresa de la siguiente manera:

$$R = 1 - \frac{C_f}{C_o} \quad (\text{IV.6})$$

Donde  $C_o$  es la concentración de soluto en la alimentación y  $C_f$  la concentración de soluto en el filtrado. Este factor resulta de gran utilidad a la hora de evaluar una membrana, puesto que si absolutamente nada de soluto atraviesa la membrana, el factor de rechazo es igual a la unidad y se dispone entonces de una membrana que es perfecta para la separación.

**IV.11. CONTROL Y ELIMINACIÓN DE LA POLARIZACIÓN.**

Para mantener entonces un alto caudal de permeado debe limitarse el crecimiento del espesor de la película formada en la superficie de la membrana. Un aumento en la velocidad del flujo (mayor turbulencia), que se traduce en el incremento de la tasa de corte, contribuye a la ruptura de la capa polarizada, estableciéndose un equilibrio en el grosor de la película. Sin embargo, el flujo extra que circula a través de la membrana a altas velocidades ocasiona la disminución del producto recuperado, es decir, la relación alimentación-producto se hace más pequeña. Por otro lado la utilización de una concentración reducida de soluto en la alimentación atenúa el ensuciamiento. El retrolavado suele también aplicarse para eliminar la capa de gel que se forma en la superficie de la membrana. El proceso consiste en hacer circular en sentido contrario la corriente de permeado [1].



## ADQUISICIÓN DE DATOS

### V.1. ADQUISICIÓN DE DATOS

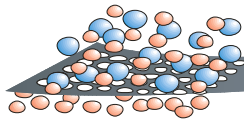
La adquisición de datos consiste en tomar un conjunto de variables físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora. Se requiere de una etapa de acondicionamiento que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación es la tarjeta de Adquisición de Datos. Una vez que las señales eléctricas se transformaron en digitales dentro de la memoria de la PC, se las puede procesar con un programa de aplicación adecuado al uso que el cliente desea, y/o archivarlas en disco duro, graficarlas en pantalla, enviarlas por modem-fax, imprimirlas por impresora, etc. [6]

De la misma manera que se toma una señal eléctrica y se transforma en una digital dentro del ordenador, se puede tomar una señal digital o binaria y convertirla en una eléctrica, en este caso el elemento que hace la transformación es una tarjeta de Adquisición de Datos de salida o tarjeta de control. La señal dentro de la memoria de la PC la genera un programa adecuado a las aplicaciones que quiere el usuario y luego de procesada es recibida por mecanismos que ejecutan movimientos mecánicos, a través de servomecanismos, que también son del tipo transductores. [6]

Un sistema típico de adquisición utiliza sensores, transductores, amplificadores, convertidores analógicos a digital (A/D) y digital analógico (D/A), para procesar información acerca de un sistema físico de forma digitalizada. [6]

#### V.1.1 Ventajas

- **Capacidad de procesamiento.** Las prestaciones del PC permiten un efectivo despliegue de la información obtenida y el tratamiento intensivo de los datos, tareas que pueden ser realizadas en tiempo real o en análisis posteriores.
- **Enormes cantidades de almacenamiento** disponibles, de rápido acceso.
- **Equipamiento virtual.** Según el software utilizado, es posible emular una gran cantidad de dispositivos de medición, inclusive varios instrumentos pueden ser activados al mismo tiempo.
- **Automatización.** Los procesos de medición, análisis y toma de decisiones pueden ser programados vía software.



### V.1.2 Usos

- Control de procesos y maquinarias
- Control de Calidad.
- Laboratorios de Medición y Pruebas.
- Detección de Fallas.

### V.1.3 ¿Como adquirir datos con un PC?

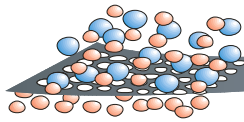
Existen muchos esquemas. Generalmente al computador se le adapta un periférico en una ranura (slot) del bus interno. Este dispositivo recibe el nombre de Tarjeta Recolectora de Datos.

### V.1.4 Tarjeta Recolectora de Datos (TRD)

Un PC es un procesador de señales digitales, las cuales consisten en niveles de voltaje discretos (Bajo = 0, alto = 1). Por otra parte, en el *mundo real*, la gran mayoría de las señales son analógicas, es decir, pueden tomar cualquier valor dentro de un rango dado. Este periférico contiene los dispositivos necesarios para comunicar un PC con el mundo real, implementando una interfaz adecuada. Generalmente, puede contener:

- **Convertidor Analógico-Digital (ADC):** Convierte las señales analógicas a señales digitales. Es la puerta de entrada al computador.
- **Convertidor Digital-Analógico (DAC):** El inverso de un ADC. Se utiliza como salida desde el PC cuando se desean generar señales analógicas.
- **Puertos de Entrada y Salida Digitales:** Para captar y/o manejar en forma apropiada y segura, señales del tipo discreto (on-off) provenientes o conducentes a switches, relés, leds, botones,
- **Contadores y Temporizadores:** Para medir frecuencias y contar eventos.

Una TRD específica puede contener uno o varios de los dispositivos nombrados, así que el usuario tiene una amplia gama de modelos para escoger el más adecuado para determinada aplicación.



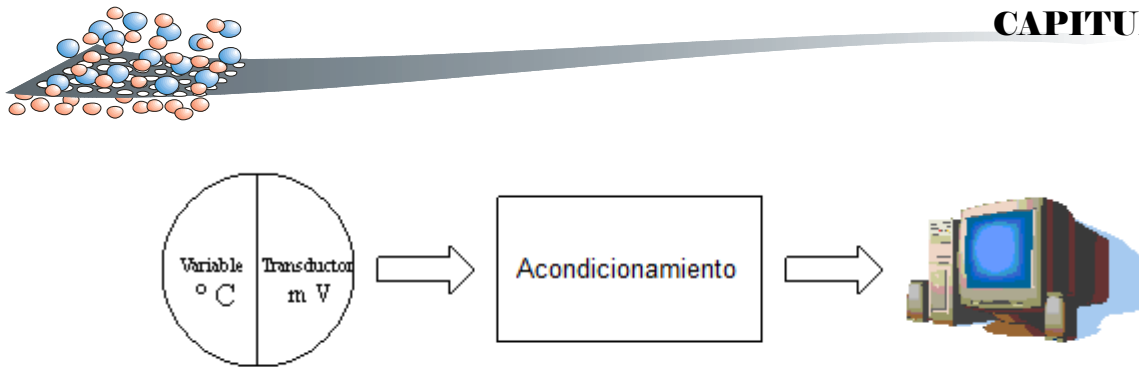
Se selecciona según las características del proceso y las tareas a realizar. Se debe hacer un recuento del tipo de sensores existentes o que se propone instalar. De esta forma se hace un estimado del número de canales analógicos y digitales de entrada y salida que se necesitan. Generalmente cada sensor requiere de un canal de entrada y cada actuador, un canal de salida. Las TRD esta equipadas:

- **Entradas:** Analógicas y digitales según modelos estándar y requerimientos especiales.
- **Salidas:** Analógicas y digitales según modelos estándar y requerimientos especiales
- **Frecuencia de Muestreo:** La TRD va a introducir en el PC una muestra digital de las señales de entrada. Cada cierto tiempo barre todos los canales e introduce los valores en memoria. La frecuencia máxima de muestreo es un parámetro importante puesto que debe tener un valor acorde con el tipo de señal. A mayor variabilidad de la señal, mayor frecuencia. Si la TRD va a ser utilizada para captar las más diversas señales, se debe elegir una tarjeta de frecuencia de muestreo mayor o igual a la máxima necesaria.
- **Resolución:** Con una resolución conveniente para las aplicaciones industriales y de análisis requeridas.
- **Acondicionamiento de señal:** Es un circuito para cada canal que adecua las señales de entrada y salida a rangos y potencia compatibles que permitan el funcionamiento normal y seguro del PC. Este circuito es muy variable y debe estar diseñado para maximizar la exactitud en las lecturas de las variables.

### V.1.5 ¿Cómo leer variables físicas con una Tarjeta Recolectora de Datos?

Primeramente, se requiere un *Transductor*, que convierta la medición de una señal eléctrica. La salida del transductor se conecta a una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal (reducción de ruido, aislamiento galvánico, cambio de rango) a los niveles compatibles con el ADC de la Tarjeta. La salida de la etapa de acondicionamiento, va al conector de la TRD.

En el PC debe recibir un software de recolección de datos especializados en utilizar el hardware asociado (TRD) y en implementar la instrumentación virtual.



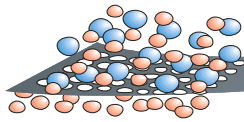
**Figura V.1.** Esquema de acondicionamiento

En la Fig. V.1 se observa un esquema de acondicionamiento. La variable a medir es temperatura (grados centígrados). El transductor, generalmente un termopar, genera una señal del orden de los milivoltios. La TRD usualmente tiene un rango de 0-5VDC (0 a 5 voltios en corriente continua), por lo cual el acondicionamiento debe consistir principalmente en amplificar la señal de manera que se utilice eficazmente. También debería proveer aislamiento galvánico entre el sistema eléctrico del computador y el proceso que se mide.

## V.2. ¿QUÉ ES LA COMUNICACIÓN SERIAL?

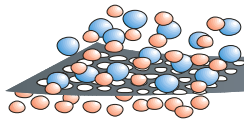
La comunicación serial es un protocolo muy común (no hay que confundirlo con el Bus Serial de Comunicación, o USB) para comunicación entre dispositivos que se incluye de manera estándar en prácticamente cualquier computadora. La mayoría de las computadoras incluyen dos puertos seriales RS-232. La comunicación serial es también un protocolo común utilizado por varios dispositivos para instrumentación. Además, la comunicación serial puede ser utilizada para adquisición de datos si se usa en conjunto con un dispositivo remoto de muestreo. [6]

El concepto de comunicación serial es sencillo. El puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez. Aun y cuando esto es más lento que la comunicación en paralelo, que permite la transmisión de un byte completo por vez, este método de comunicación es más sencillo y puede alcanzar mayores distancias. Por ejemplo, la especificación *IEEE 488* para la comunicación en paralelo determina que el largo del cable para el equipo no puede ser mayor a 20 metros, con no más de 2 metros entre cualesquier dos dispositivos; por el otro lado, utilizando comunicación serial el largo del cable puede llegar a los 1200 metros.



Típicamente, la comunicación serial se utiliza para transmitir datos en formato ASCII. Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: (1) Tierra (o referencia), (2) Transmitir, (3) Recibir. Debido a que la transmisión es asincrónica, es posible enviar datos por una línea mientras se reciben datos por otra. Existen otras líneas disponibles para realizar *handshaking*, o intercambio de pulsos de sincronización, pero no son requeridas. Las características más importantes de la comunicación serial son la velocidad de transmisión, los bits de datos, los bits de parada, y la paridad. Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características sean iguales.

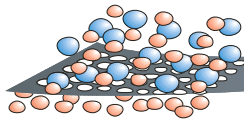
- a. **Velocidad de transmisión (*baud rate*):** Indica el número de bits por segundo que se transfieren, y se mide en baudios (*bauds*). Por ejemplo, 300 baudios representa 300 bits por segundo. Cuando se hace referencia a los ciclos de reloj se está hablando de la velocidad de transmisión. Por ejemplo, si el protocolo hace una llamada a 4800 ciclos de reloj, entonces el reloj está corriendo a 4800 Hz, lo que significa que el puerto serial está muestreando las líneas de transmisión a 4800 Hz. Las velocidades de transmisión más comunes para las líneas telefónicas son de 14400, 28800, y 33600. Es posible tener velocidades más altas, pero se reduciría la distancia máxima posible entre los dispositivos. Las altas velocidades se utilizan cuando los dispositivos se encuentran uno junto al otro, como es el caso de dispositivos GPIB. [6]
  
- b. **Bits de datos:** Se refiere a la cantidad de bits en la transmisión. Cuando la computadora envía un paquete de información, el tamaño de ese paquete no necesariamente será de 8 bits. Las cantidades más comunes de bits por paquete son 5, 7 y 8 bits. El número de bits que se envía depende en el tipo de información que se transfiere. Por ejemplo, el ASCII estándar tiene un rango de 0 a 127, es decir, utiliza 7 bits; para ASCII extendido es de 0 a 255, lo que utiliza 8 bits. Si el tipo de datos que se está transfiriendo es texto simple (ASCII estándar), entonces es suficiente con utilizar 7 bits por paquete para la comunicación. Un paquete se refiere a una transferencia de byte, incluyendo los bits de inicio/parada, bits de datos, y paridad. Debido a que el número actual de bits depende en el protocolo que se seleccione, el término paquete se usa para referirse a todos los casos.



- c. **Bits de parada:** Usado para indicar el fin de la comunicación de un solo paquete. Los valores típicos son 1, 1.5 o 2 bits. Debido a la manera como se transfiere la información a través de las líneas de comunicación y que cada dispositivo tiene su propio reloj, es posible que los dos dispositivos no estén sincronizados. Por lo tanto, los bits de parada no sólo indican el fin de la transmisión sino además dan un margen de tolerancia para esa diferencia de los relojes. Mientras más bits de parada se usen, mayor será la tolerancia a la sincronía de los relojes, sin embargo la transmisión será más lenta.
- d. **Paridad:** Es una forma sencilla de verificar si hay errores en la transmisión serial. Existen cuatro tipos de paridad: par, impar, marcada y espaciada. La opción de no usar paridad alguna también está disponible. Para paridad par e impar, el puerto serial fijará el bit de paridad (el último bit después de los bits de datos) a un valor para asegurarse que la transmisión tenga un número par o impar de bits en estado alto lógico. Por ejemplo, si la información a transmitir es 011 y la paridad es par, el bit de paridad sería 0 para mantener el número de bits en estado alto lógico como par. Si la paridad seleccionada fuera impar, entonces el bit de paridad sería 1, para tener 3 bits en estado alto lógico. La paridad marcada y espaciada en realidad no verifican el estado de los bits de datos; simplemente fija el bit de paridad en estado lógico alto para la marcada, y en estado lógico bajo para la espaciada. Esto permite al dispositivo receptor conocer de antemano el estado de un bit, lo que serviría para determinar si hay ruido que esté afectando de manera negativa la transmisión de los datos, o si los relojes de los dispositivos no están sincronizados.

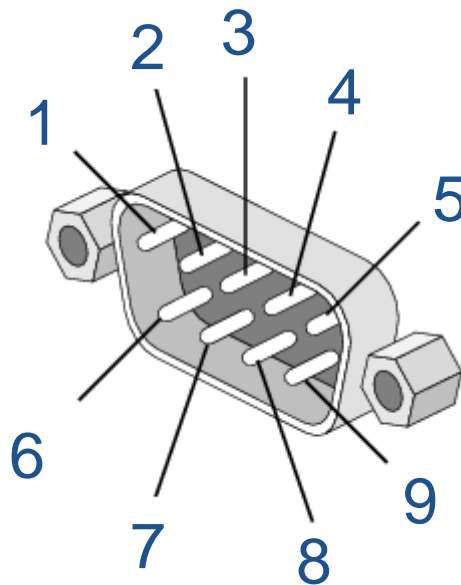
### V.2.1 ¿Qué es RS-232?

RS-232 (Estándar ANSI/EIA-232) es el conector que tienen los computadores. Es utilizado para una gran variedad de propósitos, como conectar un ratón, impresora o modem, así como instrumentación industrial. Gracias a las mejoras que se han ido desarrollando en las líneas de transmisión y en los cables, existen aplicaciones en las que se aumenta el desempeño de RS-232 en lo que respecta a la distancia y velocidad del estándar. El RS-232 está limitado a comunicaciones de punto a punto entre los dispositivos y el puerto serial de la computadora. El hardware de RS-232 se puede utilizar para comunicaciones seriales en distancias de hasta 50 pies.[6]



**V.2.2. Pines del conector DB-9**

En la figura V.2 se muestra el diagrama de un puerto serial RS-232 de 9 pines, cuyo funcionamiento se especifican en la tabla V.1.

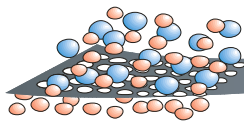


**Figura V.2.** Diagrama del puerto RS-232

**Tabla V.1.** Funciones de los pines en RS-232

Conector o PIN	Nombre	Descripción
1	DCD	Indica que existe presencia de datos
2	RxD	Recibe datos del DCE
3	TxD	Transmite datos del DTE (Ordenador) hacia el DCE (Modem).
4	DTR	Indica que el ordenador esta Encendido
5	SG	Circuito Común
6	DSR	Indica que el dispositivo esta conectado al puerto
7	RTS	Indica que el ordenador al no estar ocupado puede recibir datos
8	CTS	Indica que el dispositivo puede recibir datos
9	RI	Indicador de llamada

Evidentemente para que exista flujo de datos entre dispositivos RS-232 únicamente serán imprescindibles los pines 2 (RxD) , 3 (TxD) y 5 (SG). Las demás podrán ser eliminadas, según el caso, ya que nos proporcionan los diferentes estados de los dispositivos conectados.

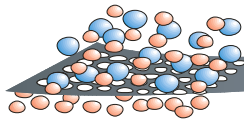


## **ANTECEDENTES**

**En 1995 R. Villarroel y Colaboradores [7]**, llevaron a cabo el tratamiento de emulsiones de hidrocarburos del tipo O/W mediante el proceso de ultrafiltración. Básicamente evaluaron el efecto de la distribución del tamaño de gota sobre la deposición de impurezas en la superficie de la membrana. Para ello utilizaron membranas inorgánicas de zirconio depositadas en un soporte de carbono con un tamaño de poro de 30000 Daltons, puesto que se adaptan mejor al proceso que las orgánicas. Las emulsiones objeto del análisis presentaban una concentración de hidrocarburos igual a 20 mg/L y 30 mg/L de sólidos suspendidos, valores característicos de los efluentes en la mayoría de las refinerías. La membrana empleada permitió retener prácticamente el 100 % de los hidrocarburos.

**En 1995 Tansel B. [8]**, en su investigación tuvo como objetivo el estudio de la efectividad del proceso de ultrafiltración en el tratamiento de aguas contaminadas con crudo, tomando en cuenta como parámetros principales, la densidad del flujo de permeado y las características de ensuciamiento de la membrana en presencia de especies coagulantes. La membrana empleada tenía tamaños de poro de 10000 Daltons. Los coagulantes utilizados fueron Cat flor T-2 y Cat flor K-10. De la experiencia llevada a cabo se obtuvo que la presencia de Cat-floc K-10 aumentaba el tiempo requerido para que se produjera una reducción drástica de la densidad de flujo. Por el contrario las muestras sin coagulantes y con cat floc T-2 alcanzaban ese punto mucho más rápido. Este comportamiento se atribuyó a que con cat floc K-10 se formaban coágulos de gran tamaño que podían ser removidos fácilmente reduciendo así la tasa de ensuciamiento. Tales estudios permitieron concluir que el empleo de coagulantes debe ser considerado como un pretratamiento efectivo para disminuir significativamente el ensuciamiento irreversible de la membrana [9].

**En el 2002 Curcio S. y Colaboradores [9]**, realizaron el monitoreo continuo de un proceso de ultrafiltración. El sistema propuesto se basó en la utilización de un sistema de adquisición de datos, con los equipos de la casa National Instruments, donde el modulo de UF fue conectado a una computadora y fue posible hacer las mediciones continuas del decaimiento del flujo de permeado y el control del ensuciamiento de la membrana, por medio de un dispositivo que controla la caída de

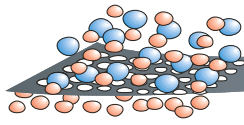


presión de la membrana y el flujo de alimentación, con el uso del computador, el cual se generan pulsos eléctricos que fueron traducidos por la tarjeta de adquisición de datos de la National Instruments, usando como programa LabView<sup>®</sup> también de la misma firma.

**En el 2004 El Aissami A. [10]**, en su investigación estuvo enfocado en la reducción de la concentración de crudo emulsionado en un efluente petrolero hasta niveles permisibles para su reutilización o desecho, mediante el uso de una técnica de separación con membranas, donde obtuvo como resultado principal, que las membranas constituidas por Polisulfona, Polivinildifluoruro, Celulosa Regenerada y la membrana Durapore<sup>®</sup>, permiten reducir la cantidad de crudo en el permeado, hasta niveles compatibles con las normas medioambientales.

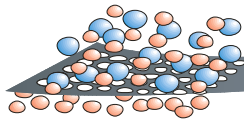
**En el 2004 González L [11]**, estudio la factibilidad del tratamiento de aguas que contienen crudo liviano utilizando membranas, por medio de la medición del flujo de permeado de una dispersión de crudo Apure y Lagocinco. En este trabajo se hicieron variaciones en la concentración de crudo inicial, se estudio el efecto que produce la presión en el flujo y el efecto del tipo de membrana en la separación de crudo. Encontró que en el proceso de filtración de las emulsiones sintéticas, el crudo tiende a formar una capa sobre la superficie de las membranas de polisulfona y PVDF, dicha película ocasionó un taponamiento irreversible que impidió la recuperación de las membranas mediante limpieza física. Otro resultado importante de este trabajo, es que el aumento en la concentración inicial de crudo en la alimentación, no provoco incrementos en el efecto de taponamiento sobre el flujo de permeado cuando se filtro con membranas de acetato de celulosa. Al incrementar la caída de presión durante el proceso de filtración de emulsiones preparadas con crudo Apure, se obtuvo un aumento en el flujo de permeado que concuerda con el comportamiento descrito por la ley de Darcy.

**En el 2007 Hoeger I. [12]**, estudió la mojabilidad de diferentes crudos sobre membranas poliméricas de celulosa regenerada y polisulfona en un medio acuoso. En este trabajo se midió el ángulo de contacto en el punto triple entre la membrana, el crudo y el solvente a diferentes pH, variando la salinidad del solvente. También se determinó la tensión interfacial en cada sistema que se estudió, obteniendo como resultados que las propiedades interfaciales y electrocinéticas del crudo dependen básicamente de su naturaleza y del ambiente fisicoquímico de la fase acuosa, según la presencia de fracciones hidrofílicas que estén adsorbidas en la interfase. Los resultados indican



que para la membrana de Polisulfona se generaron cambios en el ángulo de contacto entre el crudo y dicha membrana al variar el pH y la concentración de sodio, debido a la dependencia existente con la carga superficial de los substratos. Un cambio en la carga superficial produce un cambio en la afinidad entre la superficie oleica y la membrana.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



**PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

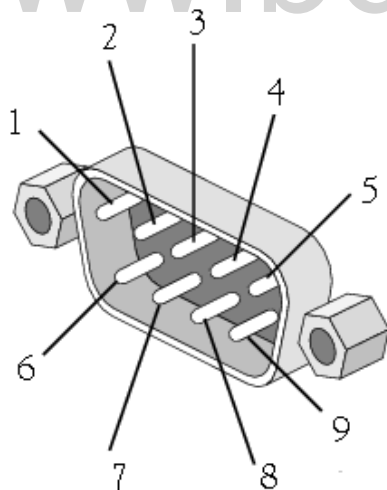
**VII.1 CREACIÓN DE LA INTERFAZ PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS**

**Instrumentos Utilizados:**

- Computadora Pentium IV
- Balanza Analítica Explorer PRO
- Manómetro Digital (Cole Parmer P-68023)
- Tarjeta de adquisición de datos (NI PCI-MIO-16XE-50)
- Bloque conector CB-68LP de la tarjeta de adquisición
- Software de Programación Gráfica y adquisición de datos LABVIEW 8.0

**VII.1.1 Conexión de la Balanza con la Computadora**

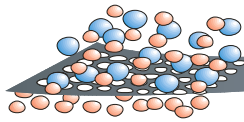
Para que se diera la comunicación entre la Balanza analítica (Fig. VII.3) y la computadora (Fig. VII.2), fue necesario construir un cable de puerto Serial RS232 de nueve pines, con características específicas que permitiera la transferencia de datos. En la figura VII.1 se muestra dicha especificación.



Pin	Descripción
1	N/C
2	Datos de Salida (TXD)
3	Datos de Entrada (RXD)
4	N/C
5	Indica que el computador puede recibir datos (CTS)
6	Indica que la balanza esta encendida (DTR)
7	Tierra
8	Indica que la balanza esta lista para recibir datos (RTS)
9	N/C

**Figura VII.1.** Puerto RS232 de la Balanza Analítica

La función de esta conexión es obtener los datos del flujo de permeado, durante el proceso de filtración.



**Figura VII.2.** Computador Utilizado



**Figura VII.3.** Balanza Analítica

### VII.1.2 Protocolo de Comunicación Usado Entre la Balanza y la Computadora.

El protocolo utilizado para la transferencia de datos entre la Balanza y la Computadora es el siguiente:

- Velocidad de Transmisión (Baud Rate) = 9600 Hz
- Bits de Datos = 8 bits
- Bits de Parada = 2 bit
- Paridad = Ninguna

Es importante destacar que este protocolo no es el único que puede llevar la comunicación. Se debe verificar que la configuración entre ambos equipos siga el mismo protocolo de comunicación, tomando en cuenta que el protocolo mencionado es el más adecuado.

### VII.1.3 Conexión del Manómetro con la Computadora

Para la adquisición de datos de presión del proceso de filtrado, se necesitan los siguientes instrumentos:

- Tarjeta de adquisición de datos (NI PCI-MIO-16XE-50)
- Bloque conector de la tarjeta de adquisición
- Manómetro Digital (Cole Parmer P-68023)

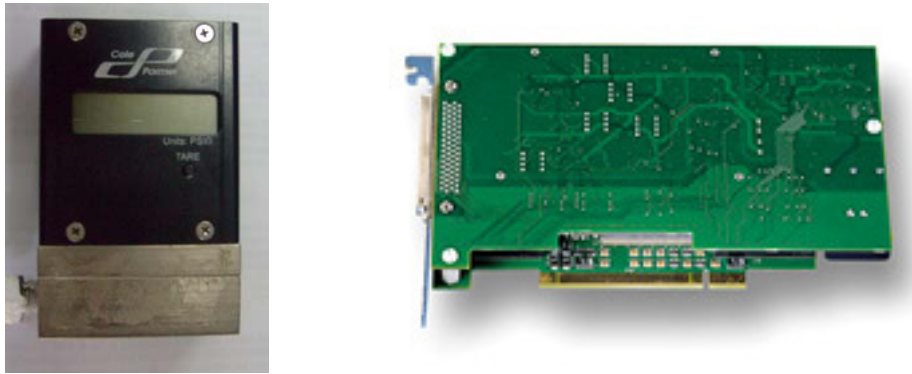
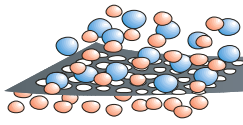
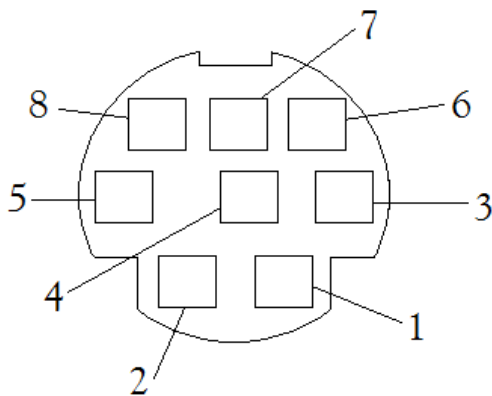


Figura VII.4. Manómetro y Tarjeta de Adquisición de datos

El manómetro se conectó a la tarjeta de adquisición de datos por medio de un bloque conector, una tarjeta que sirve de puente para conectar cualquier dispositivo a la tarjeta de adquisición de datos. Para lograr la comunicación, se debe seguir con el protocolo mostrado en la figura VII.5, donde solo es necesario conectar los cables 6 y 8. El cable 6 de color verde es el que envía la señal de salida analógica y el cable 8 de color morado es el cable de tierra.

El cable 6 se conecta con el contacto 33 del bloque conector, que es la entrada de señal analógica para el canal 1 de la tarjeta de adquisición de datos (ver especificaciones en el ANEXO C) y el cable 8 se conecta con el contacto 32 que es la entrada de tierra en la tarjeta de adquisición como se muestra en la figura VII.6.



No.de Pin	Descripción
1	4-20 mA out
2	5.12 v Dc out
3	RS232 in
4	Set Point in
5	RS232 out
6	Signal Out
7	Power in
8	Ground

Figura VII.5. 8 Pin Mini-DIN Connector

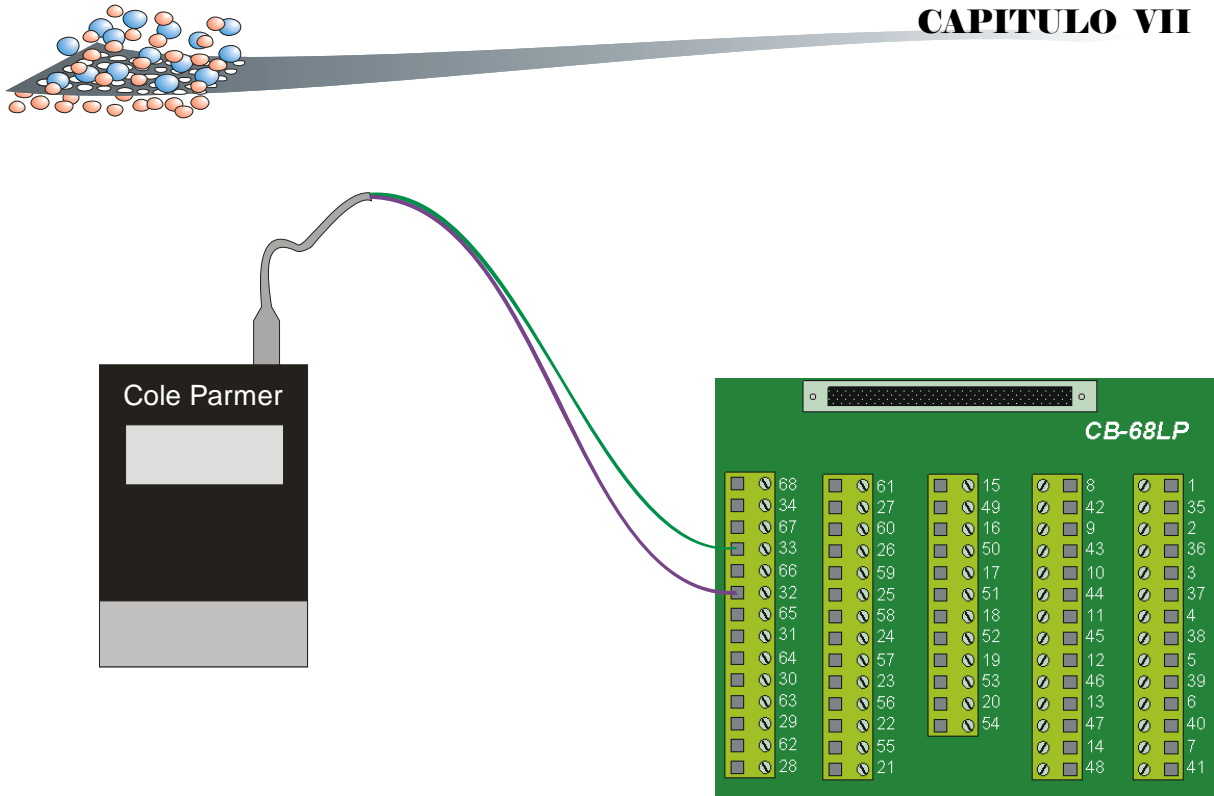
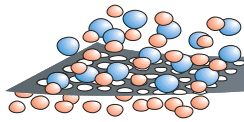


Figura VII.6. Diagrama de Conexión del Manómetro al Bloque Conector

El manómetro posee una escala de 0 a 100 psi, con un rango o intervalo de salida de 0 a 5,12 Voltios de corriente directa; la señal es convertida en una señal digital por medio de la tarjeta de adquisición de datos, con una frecuencia de 1000 Hz lo que equivale a 1000 valores por segundo; con estos valores se calculó una media aritmética para determinar un valor puntual de la señal digital. El valor puntual se expresó en unidad de presión por medio de la ecuación,

$$Pr esion = \left( \frac{100 - 0}{5,12 - 0} \right) * Voltaje \quad (VII.1)$$



### VII.1.4 Modelo y codificación de la Interfaz

Se utilizó el software LabView 8.0<sup>®</sup> de la firma National Instrument para la creación de la interfaz visual que se observa en la figura VII.7, esta interfaz esta constituida por cuatro secciones: Datos, Monitoreo, Registro y la configuración del protocolo usado para la balanza analítica.

En la sección de datos se introduce el valor de la densidad del fluido a medir, para que el programa haga su respectivo cálculo del flujo de permeado, como se observa en la codificación (Ver figura VII.8), éste flujo de permeado va ser representado por medio de un gráfico en tiempo real en la sección de monitoreo, en esta sección también se encuentra representada la caída de presión del sistema. La sección de balance de masa, cuantifica el volumen de líquido que se encuentre en el tanque de alimentación y en el tanque de permeado, esto se logra mediante la ecuación de balance de materia del sistema introducida en el código correspondiente. En la parte inferior izquierda de la interfaz se tiene la sección en la que se configura el protocolo que se va usar con la balanza analítica, y en ella se tiene el switch de encendido para que el sistema o interfaz comience con la adquisición de datos. Por último se tiene la sección de registro, donde al final del proceso la matriz de almacenamiento de los datos reporta todos los valores en la tabla de registro.

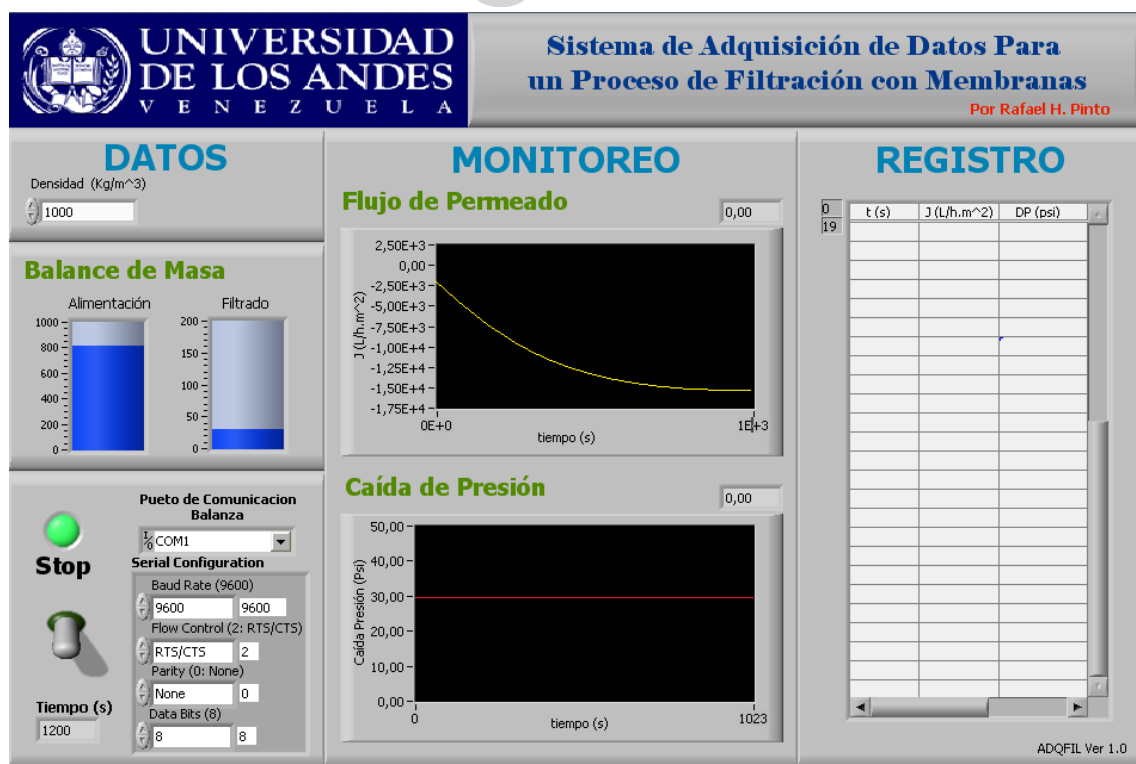


Figura VII.7. Panel Frontal de la interfaz hecha para la filtración de agua con crudo

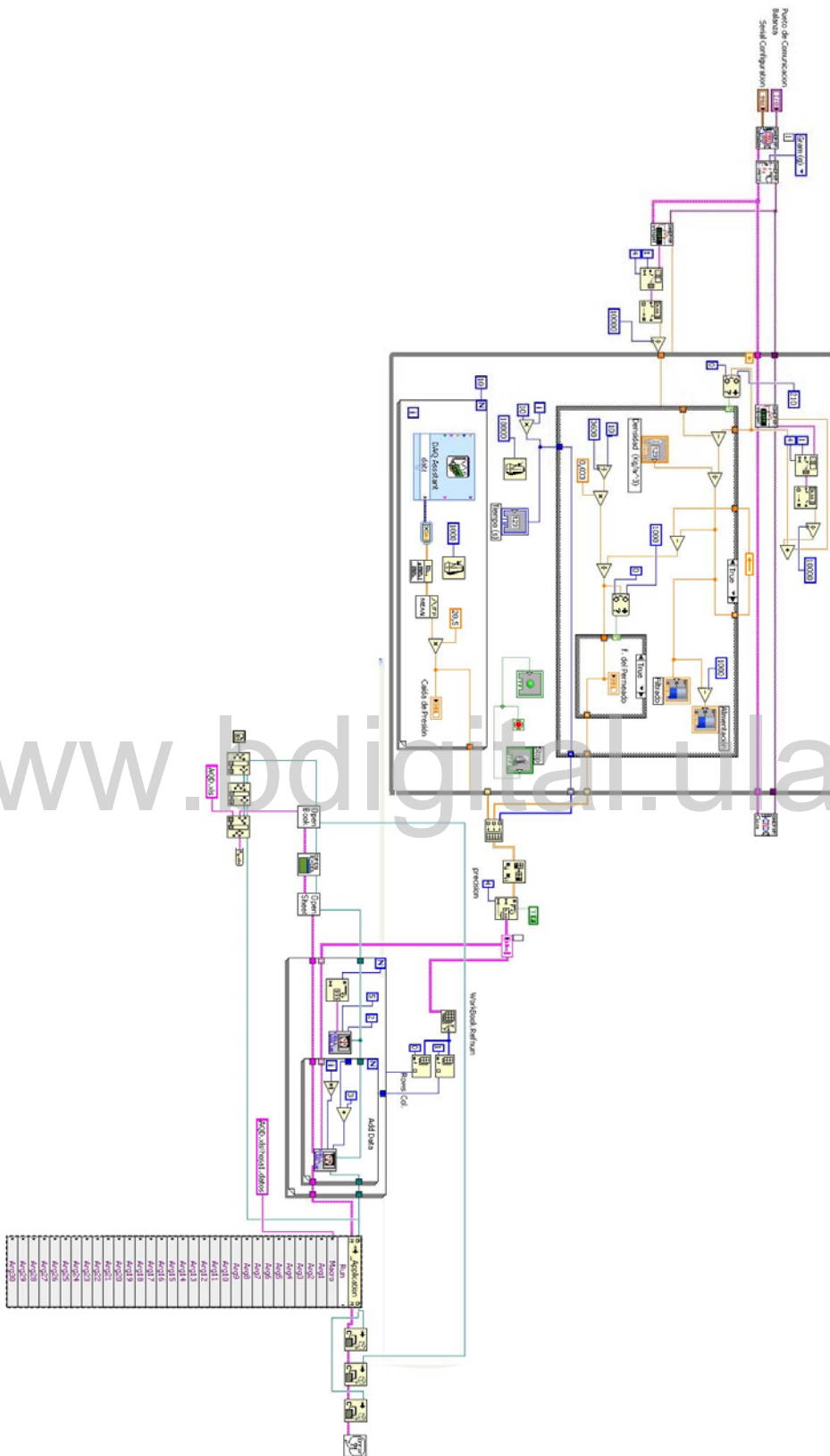
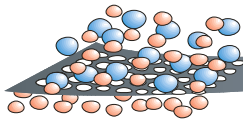
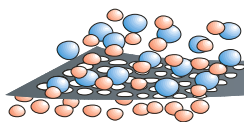


Figura VII.8. Diagrama de Bloque del Proceso



## VII.2 Método para Determinar el contenido de Crudo disperso en el Agua

### Instrumentos Utilizados:

- Espectrofotómetro de LV-UV Mini 1240 Shimadzu
- Agitador Eléctrico Braun de 200 Watts
- 9 tubos de 50 ml
- 1 bureta
- 9 Balones aforados de 50 ml
- 1 Balón aforado de 100 ml



### Materiales:

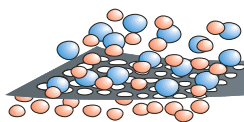
- Agua destilada
- Heptano de grado analítico J.T. Baker
- Tolueno de grado analítico Riedel-de Haën
- Crudo Apure ( $^{\circ}\text{API}=33,4$  ; Factor Kuop = 12 ; Liviano)
- Colorímetro HACH DR/890

Figura VII.9. Espectrofotómetro LV-UV      Figura VII.10. Agitador

El análisis para determinar la cantidad de crudo existente en el permeado, se realizó por medio de una extracción líquido – líquido, utilizando como solvente una mezcla de Heptano – Tolueno. En primer lugar, se determinó la relación volumétricas entre los solventes, estudiando las relaciones 50/50 y 70/30 % tolueno – heptano, y seleccionando la relación en la que se observara mayor absorbancia en el espectrofotómetro. Una vez determinada la relación entre los solventes, se procedió a conseguir la relación óptima entre el solvente y la muestra problema, ya que se quiere extraer la mayor cantidad de crudo disperso en el agua con la menor cantidad de solvente.

### VII.2.1 Preparación de las Curvas de Calibración

Se pesaron 50 mg de crudo Apure en un balón de 100 ml y se aforó con el solvente, para obtener una concentración de 500 mg/L, a partir de esta solución se hicieron diluciones a 100, 50, 40, 30, 20, 10, 5 y 3 mg/L. Luego se hizo un barrido espectral a la solución de 100 mg/L para obtener la longitud de onda donde se absorbe la mayor cantidad de luz ultravioleta, siendo este valor de 281 nm. Posteriormente se realizaron las respectivas mediciones de absorbancia, para las soluciones restantes a la longitud de onda encontrada de 281 nm, construyéndose las curvas de calibración para las relaciones volumétricas entre los solvente 50/50 y 70/30 % de Tolueno / Heptano.

**VII.2.2 Determinación de la relación óptima entre solvente y la muestra problema.**

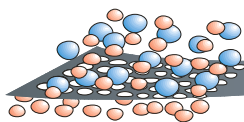
Se preparo un dispersión de crudo en agua, pesando 0,2 g en un vaso de 600 ml y se aforó hasta 350 ml con agua destilada; con el uso de un agitador eléctrico se promovió la dispersión agitando la solución durante 10 minutos, se observaron las perdidas de crudo, ya que gran parte quedó adherido al vaso y en el agitador. Se determinó la concentración de crudo que quedó disperso, por medio de 3 etapas de extracción, usando una relación de 5:1 (Solvente : Muestra Problema), arrojando un valor de 172,4 mg/L.

Se tomaron 9 tubos de 50 ml, a cada tubo se le agregó solvente y la muestra con una concentración de crudo de 172,4 mg/L, variando la relación entre 5:1 y 1:5, lo que equivale a un porcentaje global entre 83,3 y 16,7 % de solvente como se observa en la tabla VII.1. Se agitaron los tubos durante 1 hora, utilizando un agitador mecánico; se dejaron reposar hasta separarse de nuevo las fases. Luego se tomó una alícuota de la fase orgánica y se midió la absorbancia en el espectrofotómetro, obteniéndose la cantidad extraída de crudo por el solvente con ayuda de la curva de calibración. Con el volumen de agua que se tiene en cada tubo se determino la concentración de crudo que había disperso en el agua o muestra problema.

Para garantizar la extracción total de crudo disperso en el agua, se utilizaron tres etapas de extracción a todos los tubos.

**Tabla VII.1.** Fracción solvente para las relaciones volumétricas solvente - Muestra

<b>Relación (Svte/Agua)</b>	(5:1)	(4:1)	(3:1)	(2:1)	(1:1)	(1:2)	(1:3)	(1:4)	(1:5)
<b>Fracción Solvente</b>	0,833	0,800	0,750	0,667	0,500	0,333	0,250	0,200	0,167

**VII.3 PREPARACIÓN DE LA DISPERSIÓN Y MEDIOS ACUOSOS****Instrumentos Utilizados:**

- Vaso Precipitado de 600 ml
- Agitador Eléctrico Braun de 200 Watts
- 1 Balón aforados de 100 ml
- 1 Balón aforado de 2000 ml
- Decantador
- Colorímetro HACH DR/890

**Figura VII.11.** Colorímetro HACH DR/890**Materiales:**

- Crudo Apure ( $^{\circ}\text{API}=33,4$  ; Factor Kuop = 12 ; Liviano)
- Solución de Ácido Clorhídrico a 0,0531 M
- Solución de Hidróxido de Sodio a 0,05263 M
- Cloruro de Sodio Riedel-de Haën
- Agua destilada

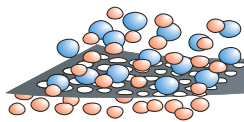
En la prueba de filtración con membranas, se va estudiar el comportamiento del flujo de permeado para diferentes medios acuosos, variando el pH y la concentración del ión Sodio. Las soluciones se prepararon de la siguiente forma:

**VII.3.1 Preparación de la Solución de Cloruro de Sodio a 2M**

- ✓ Pesar 11,69 gramos de cloruro de sodio
- ✓ Mezclarlo y agitar en un balón aforado de 100 ml, enrasar hasta el aforo con agua destilada

**VII.3.2 Preparación de la Solución a pH 4 y concentración de Sodio de 0,001 M**

- ✓ Agregar 3,766 ml de HCl 0,0531 M en un balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 1 ml de solución de NaCl 2 M
- ✓ Enrasar con agua destilada

**VII.3.3 Preparación de la Solución a pH 7 y concentración de Sodio de 0,001 M**

- ✓ Agregar 3,766 ml de HCl 0,0531 M en un balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 3,8 ml de NaOH 0,05263 M al balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 0,9 ml de solución de NaCl 2 M
- ✓ Enrasar con agua destilada

**VII.3.4 Preparación de la Solución a pH 10 y concentración de Sodio de 0,001 M**

- ✓ Agregar 3,8 ml de NaOH 0,05263 M en un balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 0,9 ml de solución de NaCl 2 M
- ✓ Enrasar con agua destilada

**VII.3.5 Preparación de la Solución a pH 4 y concentración de Sodio de 0,1 M**

- ✓ Agregar 3,766 ml de HCl 0,0531 M en un balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 100 ml de solución de NaCl 2 M
- ✓ Enrasar con agua destilada

**VII.3.6 Preparación de la Solución a pH 7 y concentración de Sodio de 0,1 M**

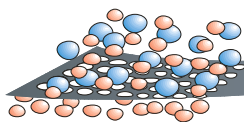
- ✓ Agregar 3,766 ml de HCl 0,0531 M en un balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 3,8 ml de NaOH 0,05263 M al balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 90 ml de solución de NaCl 2 M
- ✓ Enrasar con agua destilada

**VII.3.7 Preparación de la Solución a pH 10 y concentración de Sodio de 0,1 M**

- ✓ Agregar 3,8 ml de NaOH 0,05263 M en un balón de 2000 ml
- ✓ Agregar 90 ml de solución de NaCl 2 M
- ✓ Enrasar con agua destilada

**VII.3.7 Preparación de la dispersión de crudo en el medio acuoso**

- ✓ Pesar 0,2 gramos de crudo apure en un vaso precipitado de 600 ml
- ✓ Agregar 350 ml de la solución o medio acuoso en que se quiere preparar la dispersión
- ✓ Agitar durante 10 minutos por medio del agitador eléctrico
- ✓ Dejar reposar la dispersión por 30 minutos



- ✓ Separar por medio de un decantador
- ✓ Medir la turbidez de la dispersión con el Colorímetro HACH DR/890 y por medio de la curva de calibración numero de turbidez (NTU) vs Concentración de Crudo (ANEXO B) se determina la concentración de la dispersión
- ✓ Se ajusta la dispersión a 80 mg/L tal como lo establece en su trabajo Gonzále L. (2004), por medio de una dilución.

### VII.4 FILTRACIÓN CON MEMBRANAS

**Instrumentos Utilizados:**

- Membrana de Polisulfona para Ultrafiltración serie EW de 60 K Dalton de la compañía STERLITECH
- Minitan de Millipore
- Sistema de Adquisición de datos

Tabla VII.2. Características de la membrana.

Membrana	Afinidad	Presión máxima (bar)	Área (cm <sup>2</sup> )	Dimensiones			Estructura Molecular
				Longitud (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)	
Polisulfona	Hidrófoba	3	30	15,25	7,625	0,254	

El equipo de filtración utilizado consta de una bomba de desplazamiento positivo (Bomba peristáltica), modulo de placas, válvula de reflujo, manómetro digital, balanza analítica y el computador, tal como se muestra en la figura VII.12. La bomba peristáltica succiona la dispersión desde el tanque de almacenamiento hacía el modulo de placas, con una caída de presión de 2 bar, obteniendo una corriente de retenido que se recircula hacia el tanque, y una corriente de permeado a la que se le mide el flujo por medio de la balanza y el computador. El caudal de la bomba se ajustó variando la velocidad de giro (Revoluciones) hasta obtener una velocidad tangencial sobre la membrana de 0,13 m/s. La caída de presión del sistema se ajustó por medio de la válvula de reflujo, obteniendo así las condiciones que desea necesarias para el proceso de filtración.

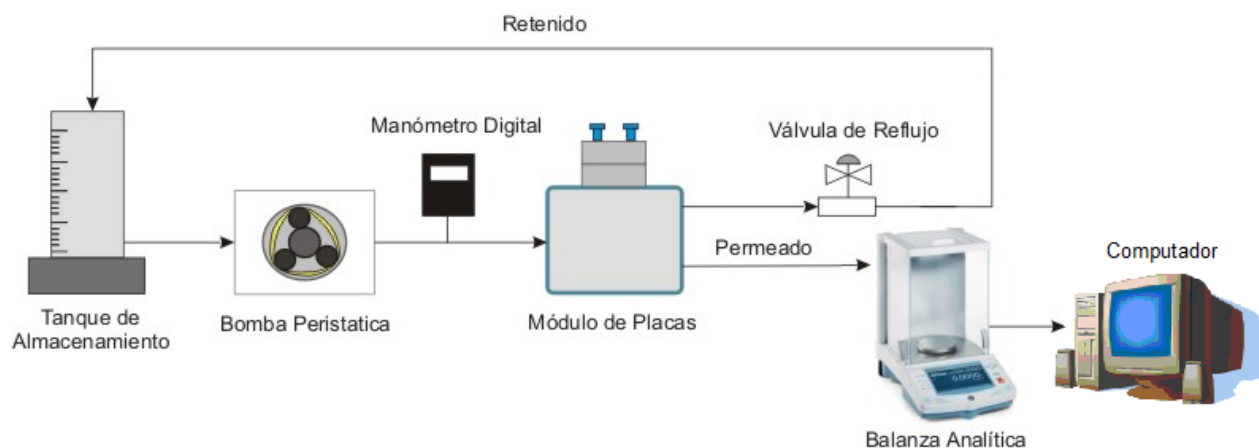
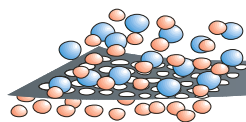


Figura VII.12. Equipo piloto de Filtración

El procedimiento experimental para la filtración consta de tres etapas, la primera de ellas se le llamó **Pre-Filtración**, donde se le hizo pasar a través de la membrana sólo la solución acuosa (medio acuoso) a las condiciones de operación del sistema, durante un tiempo aproximado de 60 minutos, monitoreándose y registrándose el flujo de permeado y la caída de presión.

Para la etapa de **Filtración**, se prepara la dispersión tal como se muestra en el paso VII.3.7. Al tener la concentración de crudo en el medio acuoso a las condiciones establecidas, se inició el proceso de filtrado ajustándose la válvula de reflujo y las revoluciones de la bomba para obtener las condiciones de operación del sistema, monitoreándose el flujo de permeado y la caída de presión que nos muestra el computador a través del programa o sistema de adquisición de datos explicado anteriormente, durante un tiempo aproximado de 77 minutos, almacenándose para su posterior análisis el volumen de permeado obtenido.

La tercera y última etapa del proceso se le llamo **Post-Filtración**, al igual que en la **Pre-Filtración** se le hizo pasar a través de la membrana solo el medio acuoso a las mismas condiciones de operación del sistema monitoreándose y registrándose el flujo de permeado y la caída de presión durante en tiempo aproximado de 60 minutos.

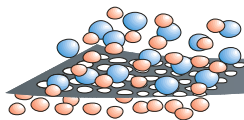


Figura VII.13. Sistema de bombeo y filtración MINITAN.

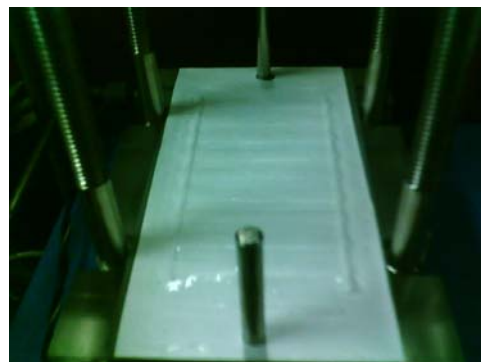


Figura VII.14. Modulo de Placas.

En la Tabla VII.3 se muestra un resumen de las condiciones de operación que se establecieron para cada una de las pruebas o procesos de filtración realizadas en este proyecto.

Tabla VII.3 Resumen de las condiciones de filtración establecidas para cada una de las pruebas.

Prueba	pH	Concentración de Sodio [Na <sup>+</sup> ] M	Concentración de Crudo (ppm)
1	4	0,001	80
2	7	0,001	80
3	10	0,001	80
4	4	0,1	80
5	7	0,1	80
6	10	0,1	80
7	10	0,1	40
8	10	0,5	80

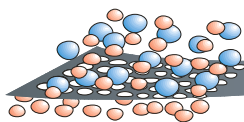
### VII.5 PROCEDIMIENTO DE LAVADO DEL EQUIPO PILOTO DE FILTRACIÓN

**Materiales:**

- Pirofosfato de sodio Riedel-de Haën
- Kerosene
- Jabón
- Agua destilada



Figura VII.15 “Pirofosfato de Sodio”



Una vez realizada una filtración, es necesario tener el equipo extremadamente limpio para el siguiente proceso de filtración, es por esto que se realizó un protocolo para el lavado, Este protocolo consiste en hacer fluir por el equipo 200 ml de kerosene para retirar los restos de crudo que se adhieren al módulo de placas y a las tuberías, luego se hizo pasar unos 2000 ml de una solución jabonosa para retirar los restos de kerosene que pudieron quedar adheridos, y para asegurar que el equipo quede lo mas limpio posible se le hizo pasar 1000 ml de una solución de pirofosfato de sodio al 1 % , retirando los residuos de pirofosfato con aproximadamente 4000 ml de agua destilada.

### VII.6 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACION DE CRUDO EN EL PERMEADO

#### Instrumentos Utilizados:

- Espectrofotómetro de LV-UV Mini 1240 Shimadzu
- Celda de Cuarzo
- Tubo de 20 ml
- 1 bureta

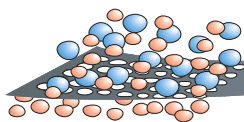
#### Materiales:

- Tolueno de grado analítico Riedel-de Haën
- Heptano de grado analítico J.T. Baker
- Permeado



Figura VII.16. Tolueno y Heptano utilizados.

La determinación de la concentración de crudo en el permeado, se hizo por medio de una extracción líquido – líquido, escogiéndose como solvente una mezcla del 70 % de tolueno y un 30% de heptano, y una relación de solvente – muestra de permeado de 3:1, A dos muestras de 3 ml de volumen de permeado se le agregaron 9 ml de solvente a cada una, agitándose durante un tiempo de 60 minutos y dejándose reposar hasta separarse de nuevo las fases. Luego se tomó una alícuota de la fase orgánica y se midió su absorbancia en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 281 nm y por medio de una curva de calibración (ver Anexo A) obtener la cantidad de crudo absorbida por el solvente y así calcular la concentración de crudo en el permeado.



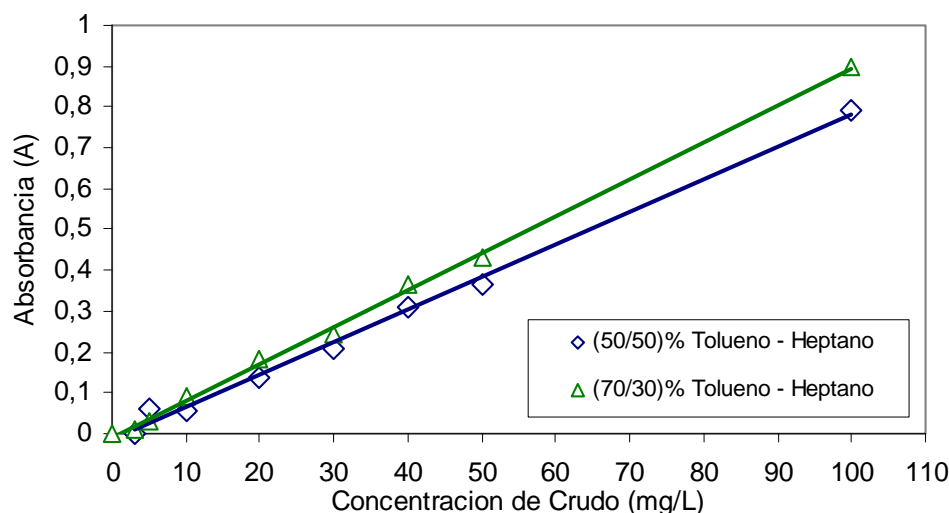
## DISCUSIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS

### VIII.1 MÉTODO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE CRUDO DISPERSO EN EL AGUA

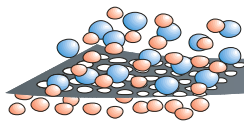
#### VIII.1.1 Determinación de la relación del solvente

Para conocer la concentración de crudo que esta presente en el permeado, se utilizó el método de extracción líquido – líquido. Se seleccionaron el tolueno y el heptano como los solventes más idóneos ya que el crudo presenta un porcentaje de compuestos aromáticos y compuestos parafínicos, que se pueden extraer fácilmente con solventes.

En el gráfico VIII.1, se observa que la relación volumétrica 70/30 presenta una mayor absorbancia con respecto a la relación 50/50 tolueno – heptano, debido a que el crudo Apure presenta una naturaleza mixta, pero con mayor presencia de compuestos aromáticos que parafínicos, eligiéndose la relación 70/30 como la relación base entre los solventes para las posteriores pruebas, debido a su mayor absorbancia.



**Gráfico VIII.1** Curvas de Calibración para las relaciones volumétricas 50/50 y 70/30 % Tolueno – Heptano

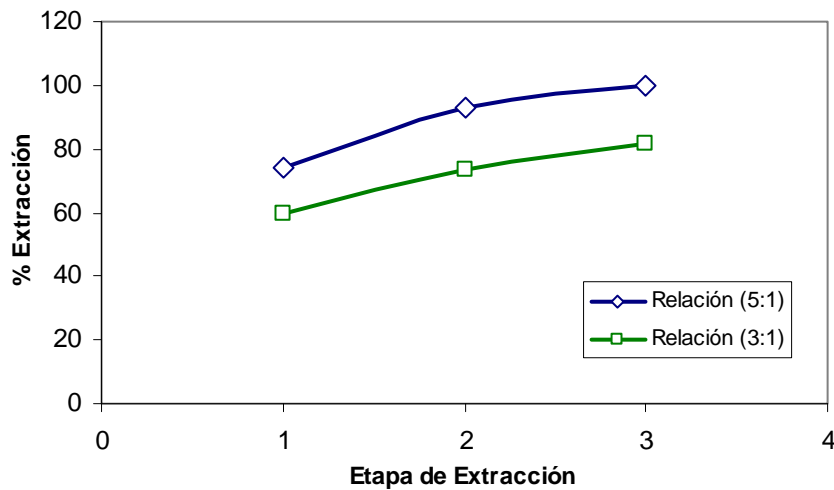
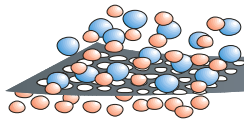
**VIII.1.2 Determinación de la relación óptima de solvente y muestra problema.**

Es importante para el método de extracción líquido – líquido encontrar una relación entre el solvente y la muestra problema que permita extraer la mayor cantidad de crudo disperso en el agua con la menor cantidad de solvente, y que su vez permita obtener una señal en el espectrofotómetro en un intervalo de 0,1 a 1 de Absorbancia, sin llegar al punto de saturación de crudo en solvente. Esto se logró variando la relación volumétrica entre el solvente y la muestra problema para relaciones entre 5:1 a 1:5 (Solvente: Muestra Problema) como se muestra en la figura VIII.1. Cabe destacar que el método empleado se ajusta solo a la condiciones del proceso realizado para este proyecto.



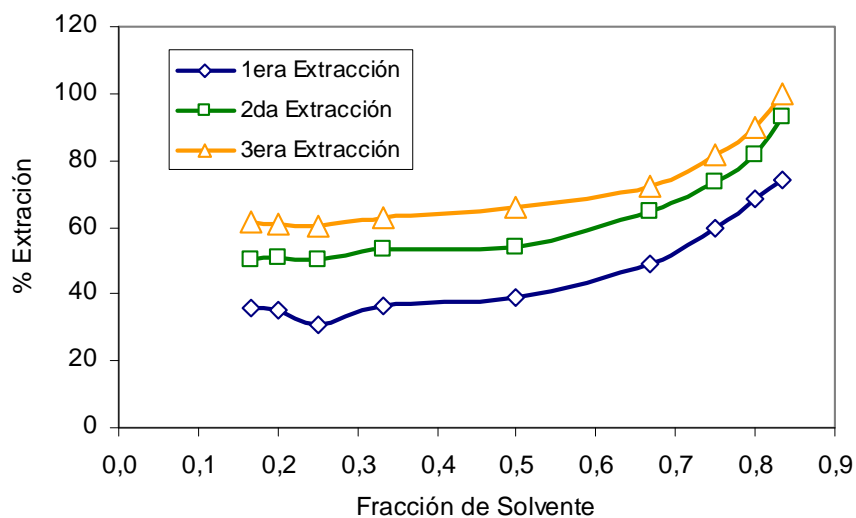
**Figura VIII.1** Variación de la relación volumétrica antes y después de la primera extracción

En el gráfico VIII.2, se muestra la variación que tiene el porcentaje de extracción con respecto al número de etapas realizadas para las relaciones 5:1 y 3:1, a una concentración de crudo de 174 mg/L, siendo este valor semejante al encontrado frecuentemente en aguas de producción en la industria petrolera, asegurando que el método empleado sea eficiente al trabajar a altas concentraciones. Se observó que en cada una de las etapas, la relación 5:1 extrae una mayor cantidad de crudo, obteniendo el 100% por medio de tres etapas, a diferencia de la relación 3:1, donde solo se alcanzó extraer el 81% para el mismo número de etapas. Se seleccionó la relación 3:1 como la relación óptima para hacer el análisis del permeado, debido a que las membranas de polisulfona van a retener la mayor parte del crudo disperso en la alimentación, obteniendo en el permeado concentraciones muy por debajo de los 80 mg/L, garantizando de extraer el 100 % del crudo con un menor gasto de solvente.

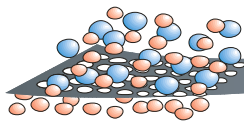


**Grafico VIII.2** Porcentaje de extracción para cada etapa hecha a los tubos con Las relaciones volumétricas Solvente – Muestra Problema (5:1) y (3:1)

En el grafico VIII.3 queda representada las tres etapas de extracción para diferentes relaciones de solvente, observándose la ventaja al realizar varias etapas de extracción. Puede observarse también que para fracciones menores o igual de 0,5, las curvas presentan un comportamiento constante del porcentaje de extracción, lo que indica la posible saturación de solvente por la dilución del crudo. En el caso del presente estudio, no es conveniente trabajar en este intervalo, sino a fracciones mayores de 0,6 o 60 % de solvente en muestra problema.



**Grafico VIII.3** Primera y segunda etapa de extracción para las relaciones entre (5:1) y (1:5)



## VIII.2 FILTRACIÓN DE LA DISPERSIÓN

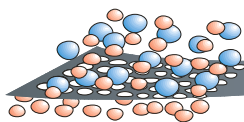
En esta sección del análisis se presentan las variaciones de flujo de permeado en la filtración de dispersiones (emulsiones) de crudo en agua. Se evaluó el comportamiento de las membranas de Polisulfona de 60 K Dalton con emulsiones de crudo apure de 40 y 80 ppm, variando el pH y la concentración de Sodio del medio acuoso en que se encuentra la dispersión.

### VIII.2.1 Ensuciamiento de la membrana en el proceso de filtrado

En el proceso de filtrado se nota el ensuciamiento que se produce en la membrana a medida que transcurre el tiempo, demostrado por la disminución en el flujo permeado para las pruebas hechas, tal como se muestra en los gráficos VIII.4 a VIII.9. El ensuciamiento produce una disminución de la concentración de crudo en el retenido, ya que parte del crudo queda adherido a la membrana, provocando resistencia al flujo de permeado y reduciendo el diámetro de poro de la membrana. En la tabla VIII.1 se muestra la caracterización de la membrana, observando el porcentaje aproximado en que se reduce el diámetro de poro al final del proceso, esto se logró siguiendo los pasos mencionados para el proceso (Pre-Filtración, Filtración y Post-Filtración) y utilizando la ecuación VIII.1.

$$\frac{J_{Pre-Filtración}}{J_{Post-Filtración}} = \frac{d_{Pre-Filtración}^2}{d_{Post-Filtración}^2} \quad (\text{VIII.1})$$

Se puede apreciar en la tabla VIII.1, que la condición a pH 7 mostró un porcentaje de reducción de poro mucho mayor que para las condiciones a pH 4 y a pH 10, esto se debe al hecho de que la adherencia del crudo a la membrana va a depender del medio en que se encuentre la dispersión. Si el medio es muy afín a la membrana el esparcimiento del crudo va a ser mayor que cuando no lo es, debido al ángulo de contacto que forma la gota de crudo con la membrana de polisulfona, este comportamiento fue observado por Hoeger (2007), quien confirmó que esta afinidad viene dada por el pH y la concentración de Sodio.



**Tabla VIII.1** Porcentajes de reducción del diámetro de poros en la Membrana para cada Prueba.

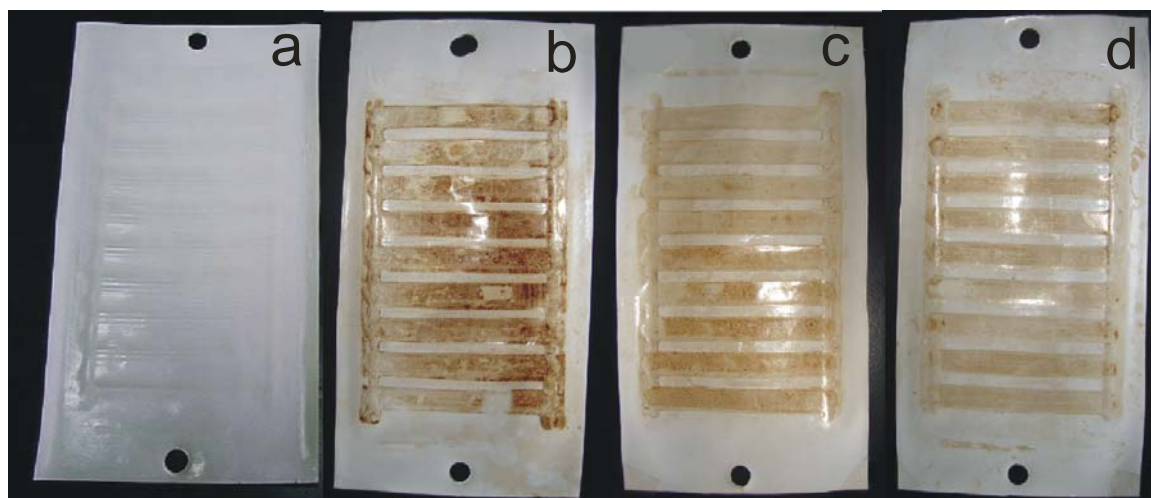
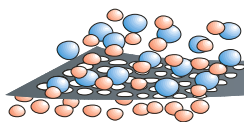
Condición	pH 4 y 0,001 M [Na <sup>+</sup> ]	pH 7 y 0,001 M [Na <sup>+</sup> ]	pH 10 y 0,001 M [Na <sup>+</sup> ]	pH 4 y 0,1 M [Na <sup>+</sup> ]	pH 7 y 0,1 M [Na <sup>+</sup> ]	pH 10 y 0,1 M [Na <sup>+</sup> ]
<b>J<sub>Pre-filtración</sub> (L/h.m<sup>2</sup>)</b>	190,25	220	110	170	155	170
<b>J<sub>Post-filtración</sub> (L/h.m<sup>2</sup>)</b>	21	2,8	15	18	3	18
<b>% Reducción de Ensuciamiento</b>	66,78	88,72	63,07	67,46	86,09	67,46

Al hacer el análisis del contenido de crudo en el permeado, se encontró que la concentración del crudo es menor a 3 mg/L según el método establecido, donde se obtuvieron muestras limpias de cero NTU y absorbancia menores a 0,01, al extraer con el solvente de relación 70/30 Tolueno – Heptano, como se aprecia en la tabla VIII.2. Los resultados de la tabla indican que las membranas de polisulfona son eficientes al realizar esta separación por su comportamiento hidrófobo.

**Tabla VIII.2.** Resultados obtenidos para determinar la concentración de crudo.

Prueba	Absorbancia	NTU	Concentración de Crudo en el Solvente (mg/L)
pH 4 y 0,001 M	0,0065	0	1,85
pH 7 y 0,001 M	0,0165	0	2,95
pH 10 y 0,001 M	0,002	0	1,35
pH 4 y 0,1 M	0,0045	0	1,63
pH 7 y 0,1 M	0,015	0	2,78
pH 10 y 0,1 M	0,001	0	1,24
pH 10 y 0,1 M a 40 ppm	0	0	1,13
pH 10 y 0,5 M	0,003	0	1,46

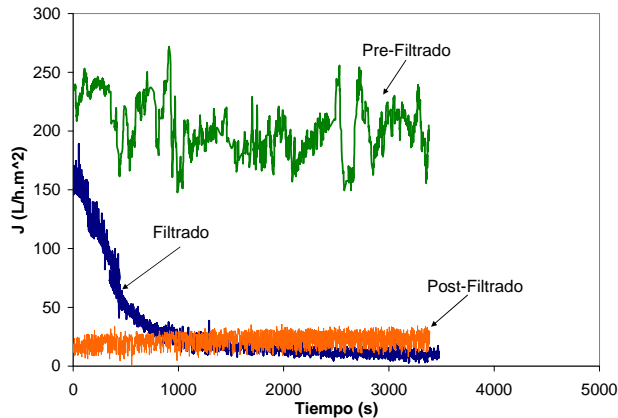
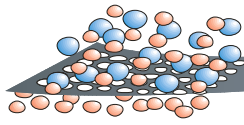
En la figura VIII.2 se muestra el estado de la membrana al final del proceso, donde se aprecia la película de crudo que queda adherida a ella, la cual provoca obstrucción del flujo. En la figura VIII.2 también se aprecia como se adhiere mayor cantidad de crudo a la condición a pH 7 que a pH 4 y a pH 10. Es de hacer notar que las membranas quedan inutilizables; los intentos de recuperación de membranas similares fueron infructuosos, según se muestra en los trabajos de El Aisami A. (2004) y González L. (2004).



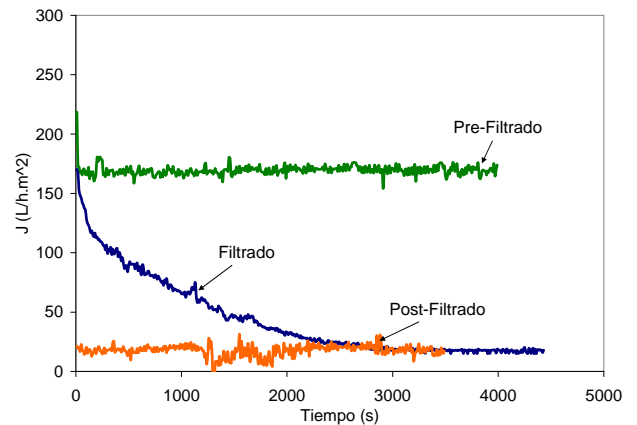
**Figura VIII.2** Membrana de polisulfona antes y después de filtrar una dispersión de 80 mg/L de crudo Apure con una caída de presión de 2 bar y 0,13 m/s de velocidad tangencial a las condiciones: (a) Membrana antes de Usar; (b) pH 7 y 0,001 M; (c) pH 4 y 0,001 M; (d) pH 10 y 0,001 M

En los gráficos VIII.4 a VIII.9, se pueden observar las tres etapas de filtración para cada prueba hecha a las mismas condiciones de operación (2 bar de caída de presión y 0,13 m/s de velocidad tangencial); Este procedimiento nos da a conocer la permeabilidad de la membrana antes y después de cada proceso de filtrado. De acuerdo a los gráficos, en la mayoría de las pruebas el flujo de permeado inicial se encuentra entre un intervalo de 120 a 220 L/h.m<sup>2</sup>.

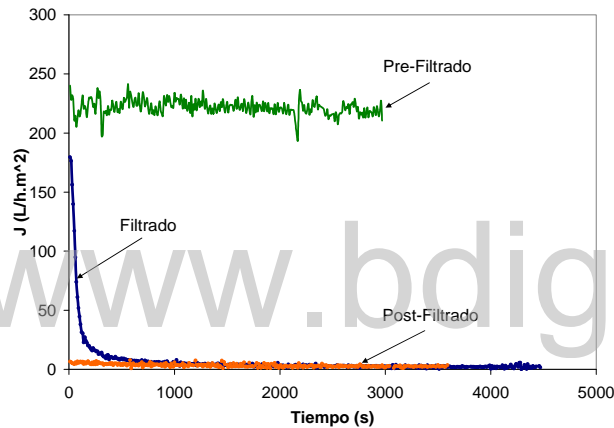
Para la elaboración del grafico VIII.4, se midió un valor de flujo de permeado por cada segundo, recabando el sistema de adquisición alrededor de 3600 puntos para su construcción, a diferencia del grafico VIII.9 donde se tomó un valor cada 5 segundos, mientras que en las graficas restantes se tomó un valor cada 10 segundos. Se puede destacar que al tomar muestras cada segundo se provoca un margen de error mucho mayor que al tomarlas cada 10 segundos, debido a la precisión que se obtiene al tomar un caudal promedio en un intervalo de 10 segundos que cuando se hace para cada segundo.



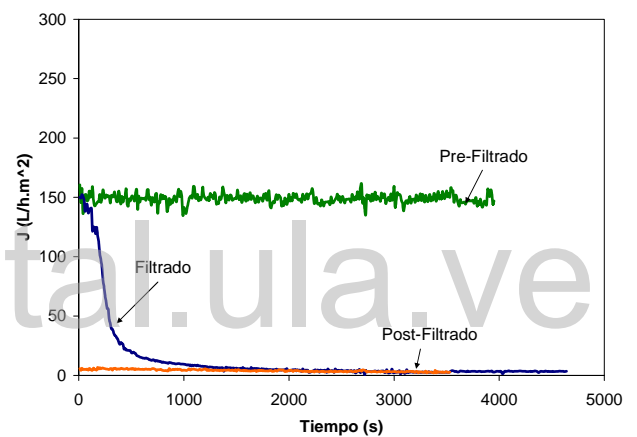
**Gráfico VIII.4** Variación del flujo de permeado para las 3 etapas de filtración, a la condición de pH 4 y 0,001 M de  $\text{Na}^+$



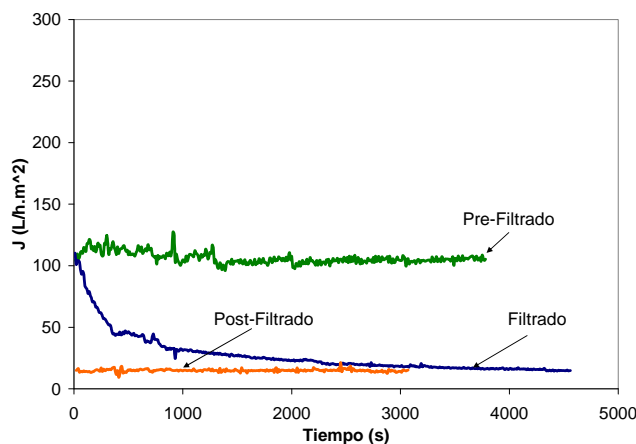
**Gráfico VIII.5** Variación del flujo de permeado para las 3 etapas de filtración, a la condición de pH 4 y 0,1 M de  $\text{Na}^+$



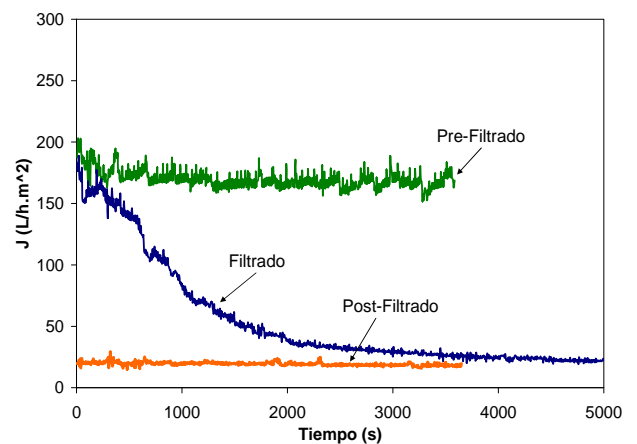
**Gráfico VIII.6** Variación del flujo de permeado para las 3 etapas de filtración, a la condición de pH 7 y 0,001 M de  $\text{Na}^+$



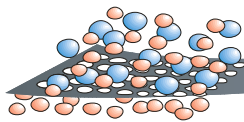
**Gráfico VIII.7** Variación del flujo de permeado para las 3 etapas de filtración, a la condición de pH 7 y 0,1 M de  $\text{Na}^+$



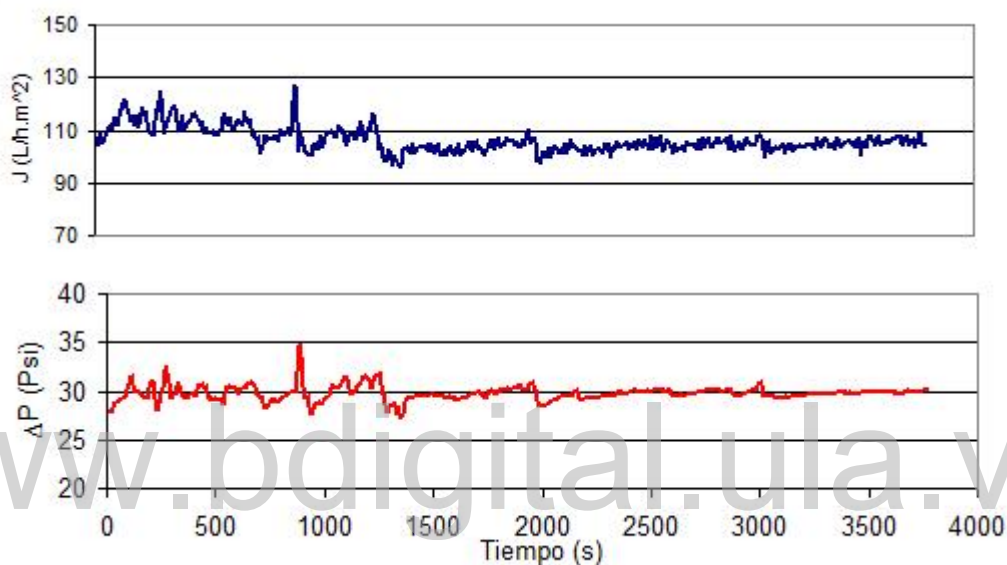
**Gráfico VIII.8** Variación del flujo de permeado para las 3 etapas de filtración, a la condición de pH 10 y 0,001 M de  $\text{Na}^+$



**Gráfico VIII.9** Variación del flujo de permeado para las 3 etapas de filtración, a la condición de pH 10 y 0,1 M de  $\text{Na}^+$



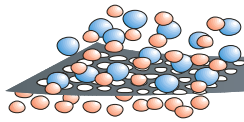
Otro factor importante para el control del proceso de filtrado es la caída de presión, ya que al variar ésta se provoca una perturbación en el flujo de permeado, como se puede ver en el gráfico VIII.10, en el cual se observa que al aumentar o decaer la caída de presión se produce un aumento o descenso en el flujo de permeado respectivamente. Al principio del proceso fue difícil mantener constante la caída de presión y ocurrieron alteraciones en el flujo de permeado, pero luego al estabilizar la caída de presión, el flujo adoptó una tendencia constante como se aprecia en el gráfico a partir de los mil cuatrocientos segundos.



**Gráfico VIII.10** Efecto que provoca en el flujo de permeado al variar la caída de presión en una filtración.

### VIII.2.2 Efecto del pH sobre el flujo de permeado

En los gráficos VIII.11 y VIII.12 se representó el comportamiento del flujo de permeado al variar el pH, manteniendo fija la concentración de Sodio y la concentración inicial de la dispersión de crudo en el medio acuoso a 80 mg/L. Las condiciones de operación fueron de 2 bar y una velocidad tangencial de 0,13 m/s. Ambos gráficos se observa que a pH 7 ocurre el mínimo de flujo de permeado, ya que siendo pH 7 un medio neutro, la carga superficial que se genera sobre la membrana es muy baja con respecto a las condiciones a pH 4 y pH 10, predominando las fuerzas de atracción de Van der Waals y manifestando que a esta condición existe una mayor afinidad del crudo hacia la membrana.



Esta afinidad se puede presentar debido a que las fracciones con tendencias hidrofílicas, (resinas, ácidos nafténicos y asfaltenos), no se han establecido en su totalidad en la interfase. La membrana de polisulfona no ha desarrollado una carga superficial considerable haciendo que predominen las fuerzas atractivas de Van der Waals, permitiendo el esparcimiento del crudo sobre la membrana. [12]

Para las condiciones a pH 4 y pH 10, se observó un mayor flujo de permeado debido a que predominan las fuerzas de repulsión electrostáticas sobre las fuerzas de Van der Waals, ya que es probable, que a estas condiciones las fracciones hidrofílicas migran hacia la interfase, generando una carga superficial que produce el efecto repulsivo y manifestando menor afinidad hacia la membrana.

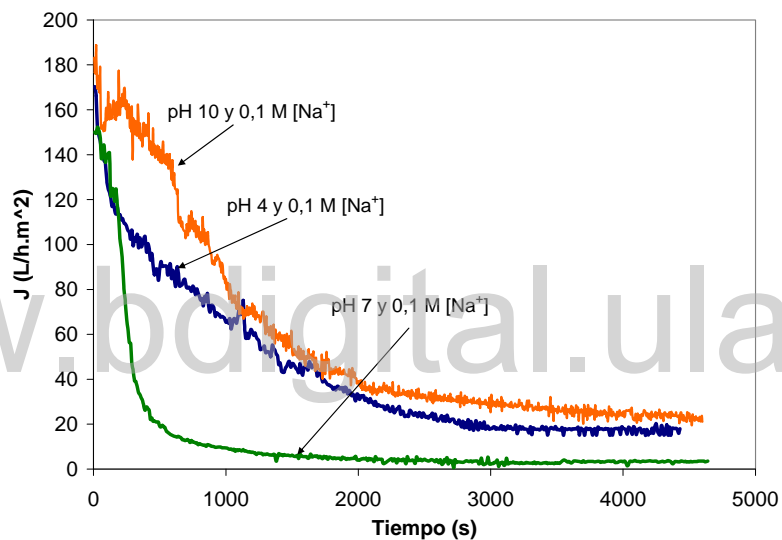


Grafico VIII.11 Efectos de la variación del pH a una concentración de Sodio de 0,1 M

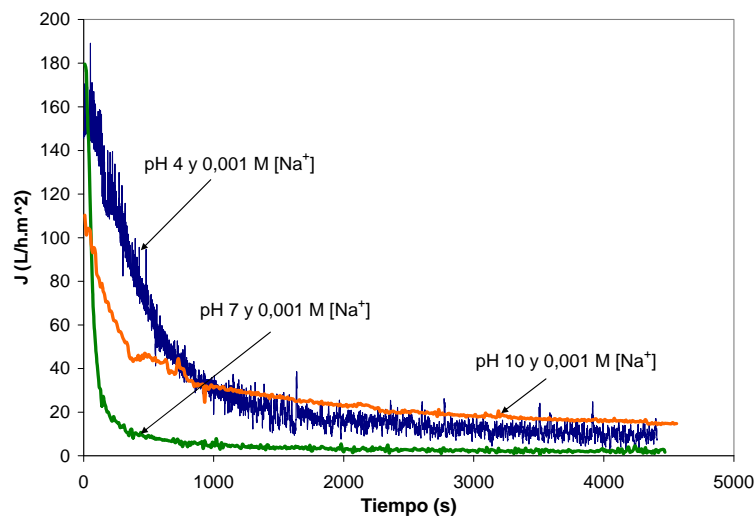
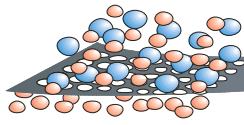


Grafico VIII.12 Efectos de la variación del pH a una concentración de Sodio de 0,001 M



VIII.2.3 Efecto de la Concentración de Sodio sobre el flujo de permeado.

En los gráficos VIII.13, VIII.14 y VIII.15 se puede observar que a mayor concentración del ión Sodio ( $\text{Na}^+$ ) se promueve el aumento del flujo de permeado, que junto a las condiciones de acidez y basicidad del medio producen un mayor desplazamiento de las fracciones hidrofílicas hacia la interfase, tal como lo estableció en su trabajo Hoeger (2007), debido a la alta polaridad que adquiere el medio acuoso, aumentando de esta manera, las fuerzas repulsivas entre la membrana de polisulfona y la dispersión de crudo en el proceso de filtrado, lo que se traduce a una disminución de la afinidad entre la membrana y la dispersión del crudo a alta concentración del ión sodio ( $\text{Na}^+$ ).

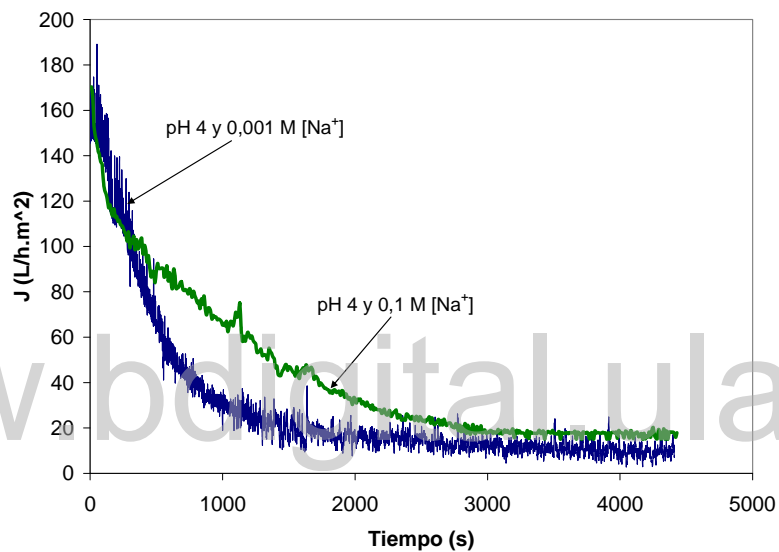


Grafico VIII.13 Efectos de la variación de la concentración de Sodio a pH 4

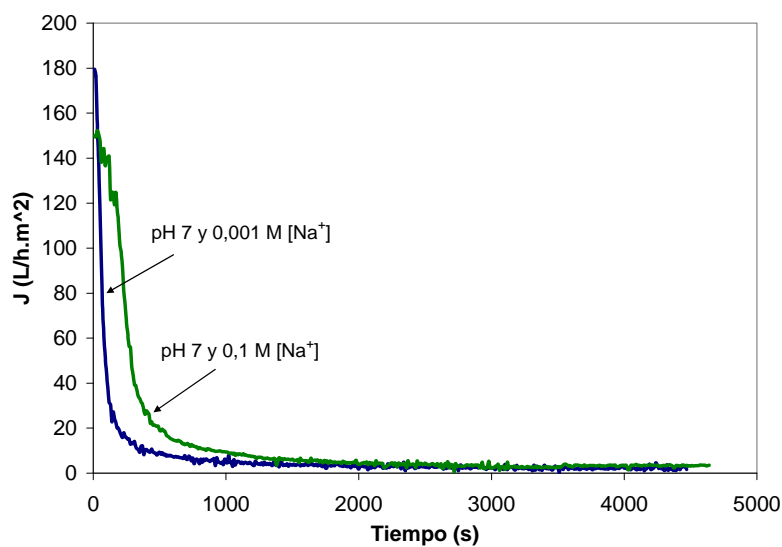


Grafico VIII.14 Efectos de la variación de la concentración de Sodio a pH 7

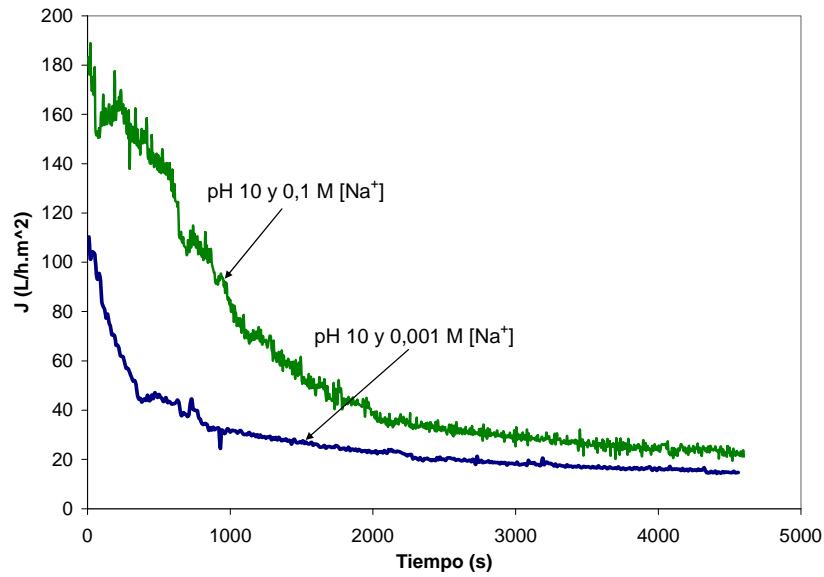
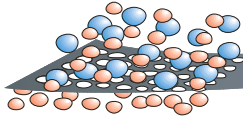


Grafico VIII.15. Efectos de la variación de concentración de Sodio a pH 10

En el gráfico VIII.16 se represento el efecto que se produce al variar el pH y la concentración de Sodio en el flujo de permeado, a partir de las pruebas de filtraciones hechas a las distintas condiciones de pH y concentración de Na<sup>+</sup> a una presión de 2 bar y una velocidad tangencial de 0,13 m/s. En el gráfico se observa que la condición en la que se alcanzó el mayor flujo de permeado fue a pH 10 y una concentración de Sodio de 0,1 M de Na<sup>+</sup>.

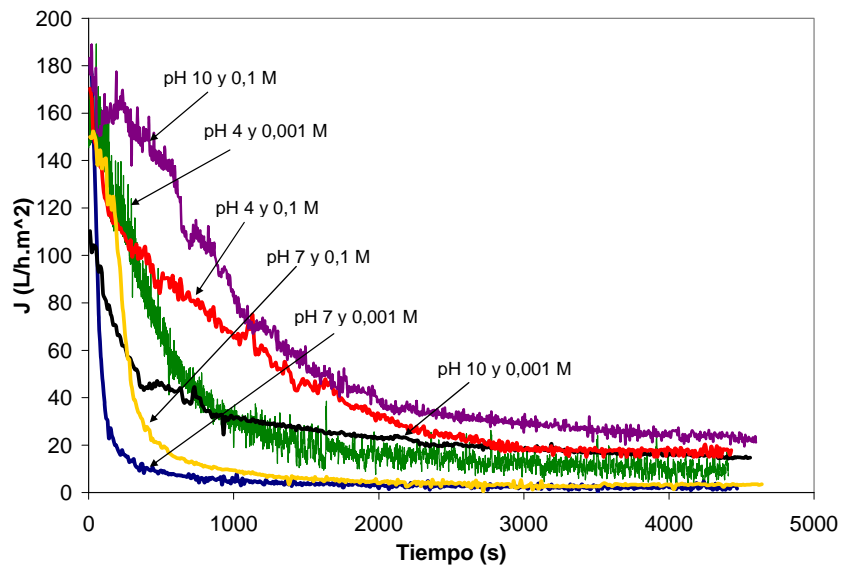
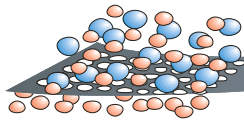
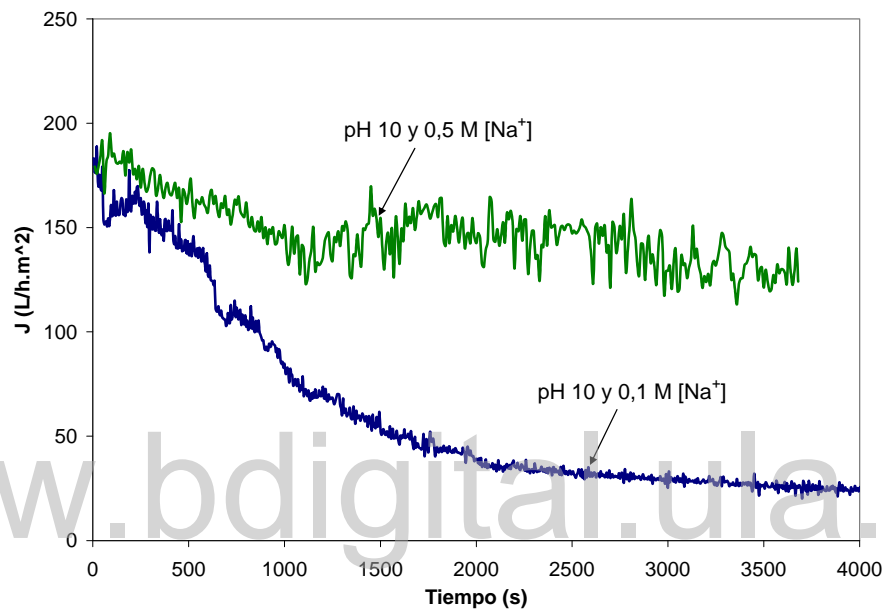


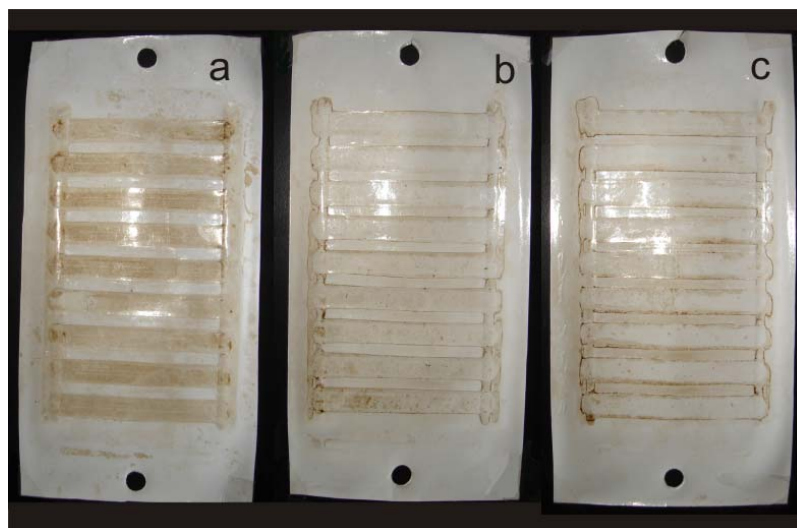
Grafico VIII.16. Flujos de permeados para las primeras 6 pruebas hechas, variando el pH y la concentración de Sodio



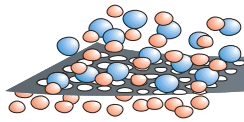
Al realizar una prueba incrementando la concentración de Sodio a 0,5 M a pH 10, manteniendo las condiciones de presión y concentración, se obtuvo como resultado el aumento considerable del flujo de permeado, observándose una tendencia constante para este flujo a la condición de 0,5 M de concentración de Sodio, tal como se aprecia en el grafico VIII.17. En la figura VIII.3, se puede observar como disminuye el ensuciamiento al aumentar la concentración de Sodio, debido a las fuerzas repulsivas que se generan entre la membrana y la dispersión de crudo, explicada anteriormente.



**Grafico VIII.17.** Efectos de la variación de la concentración Sodio a pH 10



**Figura VIII.3** Membrana de polisulfona después de filtrar una dispersión de 80 mg/L de crudo APURE con una caída de presión de 2 bar y 0,13 m/s de velocidad tangencial a las condiciones: (a) pH 10 y 0,001 M (b) pH 10 y 0,1 M; (c) pH 10 y 0,5 M;



### VIII.2.4 Efecto al variar la concentración inicial de crudo sobre el flujo de permeado

Para determinar el efecto que se produce en el flujo de permeado al disminuir la concentración de crudo en la alimentación, se realizó una prueba tomando como referencia la condición a pH 10 y 0,1 M de concentración de Sodio, 2 bar de caída de presión, 0,13 m/s de velocidad tangencial y 40 mg/L de concentración inicial de crudo. En el gráfico VIII.18, se observó un mayor flujo de permeado en los primeros minutos del proceso, ya que se produce una reducción de la resistencia que aporta la adherencia de crudo en la membrana debido a la disminución de crudo disperso, descendiendo poco a poco hasta casi anularse la diferencia que existía en el flujo de permeado para ambas concentraciones, es decir, que a partir de los 1500 segundos se superponen las curvas demostrando que para tiempos prolongados la membrana se satura con la adherencia de crudo de igual forma.

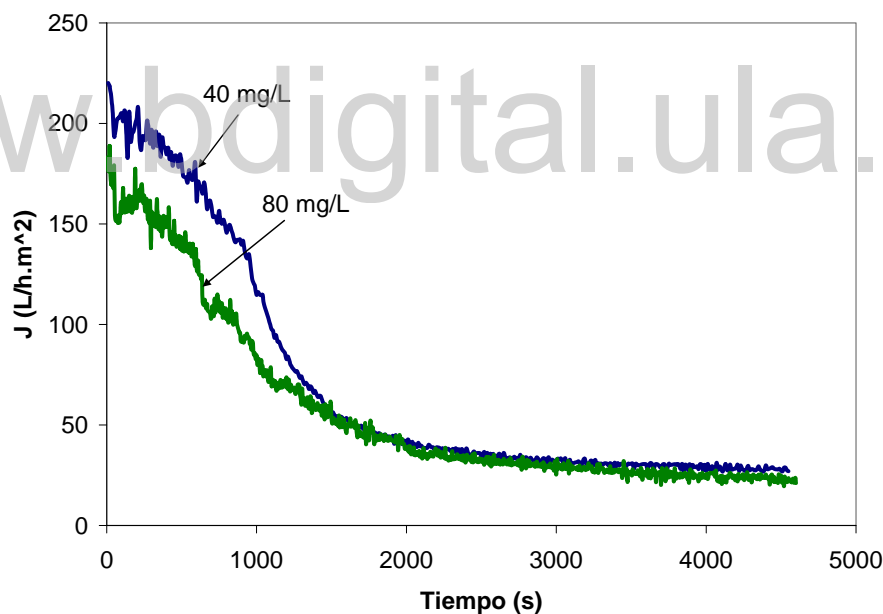


Grafico VIII.18. Efectos en el flujo de permeado al variar la concentración de crudo Inicial



## CONCLUSIONES

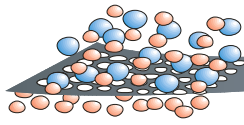
- ✓ El sistema de adquisición trabajó de manera eficiente al tomar valores para el flujo de permeado a cada diez segundos.
- ✓ El decrecimiento del flujo de permeado en el proceso de filtración, se debe al ensuciamiento que se produce a medida que transcurre el tiempo, observándose una película o capa de crudo adherida en la superficie de la membrana, lo que provoca el taponamiento de la misma.
- ✓ El flujo de permeado fue mayor para las condiciones de pH 10 y pH 4, con respecto a la condición de pH 7, debido a que predominaron las fuerzas de repulsión electrostáticas sobre las fuerzas de Van der Waals, ya que a estas condiciones las fracciones hidrofílicas migran hacia la interfase, generando una carga superficial que produce el efecto repulsivo y manifestando menor afinidad hacia la membrana.
- ✓ La presencia del ión Sodio promueve el aumento del flujo de permeado, ya que es posible el desplazamiento de las fracciones hidrofílicas hacia la interfase, debido a la alta polaridad que adquiere el medio acuoso, aumentando las fuerzas repulsivas entre la membrana de polisulfona y la dispersión de crudo.



## RECOMENDACIONES

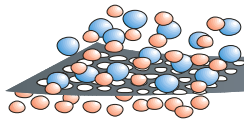
- ✓ Estudiar con mayor profundidad el método de análisis de crudo en agua, utilizando otros tipos de solventes y tipos de crudos, variando la concentración de la dispersión.
- ✓ Estudiar el efecto que pudiera tener la temperatura en el proceso de filtrado.
- ✓ Para mejorar el proceso de adquisición de datos, recomendaría usar una válvula de aguja con mayor precisión, o quizás un válvula de control con sus respectivos lazos para automatizar el proceso.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barberii E. (1998). *El Pozo Ilustrado*. Fondo Editorial del Centro Internacional de Educación y Desarrollo. Caracas
- [2] Salager, J. (1999). *Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para Obtener las Propiedades Deseadas, Estado del Arte, partes A, B y C*. Laboratorio del FIRP. Universidad de los Andes, Mérida
- [3] Salager, J. (1998). *Bases Fundamentales de la Deshidratación*. Laboratorio FIRP. Universidad de los Andes, Mérida
- [4] Mallevalle J. (1998). *Tratamiento del Agua por Proceso de Membranas*. Mc Graw-Hill, Madrid
- [5] Rodríguez A., Letón P., Rosal R., Dorado M., Villar S. y Sanz J. (2006). *Tratamientos Avanzados de Aguas Residuales Industriales*. Circulo de Innovación en Tecnología Medioambiental y Energía CITME. Volumen 2. Madrid.
- [6] National Instruments. (2007), *DAQ E-Series E-Series Usermanual*. Texas
- [7] Villaroel, R., Elmaleh, S. y Ghaffor, N. (1995) *Crossflow Ultrafiltration of Hydrocarbon Emulsions*. Journal of membrane Science, Vol 102, pp 55-64
- [8] Tansel, B., Regula, J. y Shalewitz, R. (1995). *Treatmente of fuel oil and crude oil contaminated waters by ultrafiltration membrane*. Desalination Vol 102, pp 301-311.
- [9] Curcio S., Calabro V. y Iorio G. (2002) *Monitoring and control of TMP and feed flow rate pulsatile operations during ultrafiltration in a membrane module*. Desalination Vol 146, pp 217-222.



[10] El Aissami A. (2004). *Separación de Crudo de Efluentes Petroleros mediante el uso de Membranas*. Tesis de Pregrado. Universidad de los Andes. Mérida

[11] González L.(2004). *Tratamiento de Aguas con crudos Livianos utilizando Membranas*. Tesis de Pregrado. Universidad de los Andes. Mérida

[12] Hoeger I. (2007). *Estudio de la Adsorción de crudo sobre Membranas Poliméricas*. Tesis de Pregrado. Universidad de los Andes. Mérida

Paginas Web consultadas:

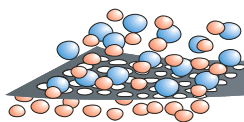
National Instruments, Recuperado el día 10 de julio del 2007 en <http://www.ni.com>

Millipore, Recuperado el día 18 de noviembre del 2007 en <http://www.millipore.com/>

Sterlitech, Recuperado el 1 de Julio del 2008 Corporation: <http://www.sterlitech.com/>

Estructura de la Polisulfona, Recuperado el 10 de septiembre de 2008 [http://it.wikipedia.org/](http://it.wikipedia.org/wiki/Polisulfone)

[www.bdigital.ula.ve/wiki/Polisulfone](http://www.bdigital.ula.ve/wiki/Polisulfone)



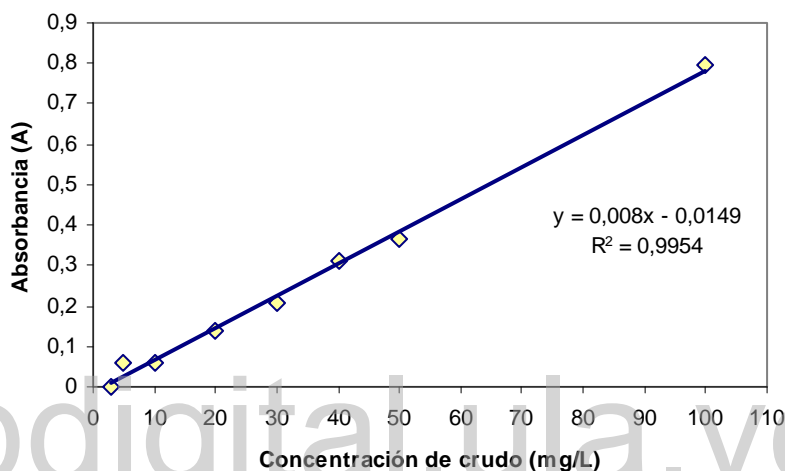
## CONSTRUCCIÓN DE LAS CURVAS DE CALIBRACIÓN PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE CRUDO EN EL SOLVENTE

### A.1. Curva de Calibración para la relación de Solvente (50:50) y (70:30) Tolueno- heptano

Se prepararon curvas de calibración para conocer la concentración de crudo en el solvente, donde a partir de una solución de 500 ppm se hicieron diluciones a varias concentraciones y midiendo su absorbancia en el espectofotómetro a una longitud de onda de 281 nm.

**Tabla A.1.** Absorbancia de soluciones a diferentes concentraciones usando una relación de solvente (50:50)

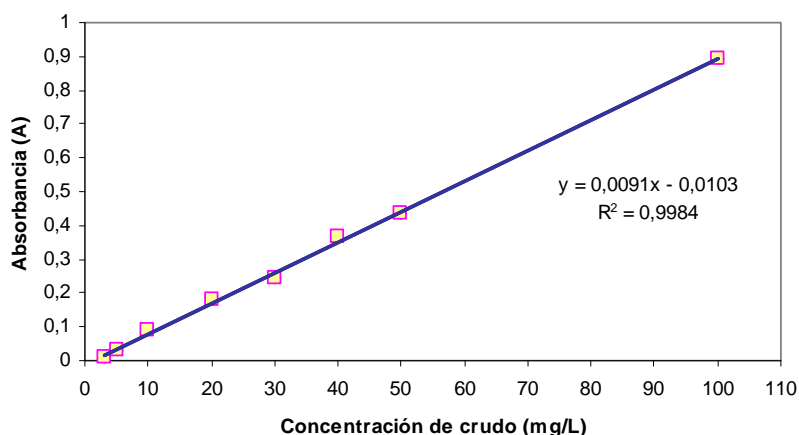
[ ] ppm	Abs
3	0,002
5	0,061
10	0,058
20	0,136
30	0,21
40	0,312
50	0,368
100	0,794

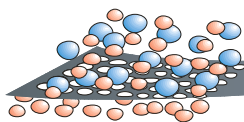


**Gráfico A.1.** Curva de calibración para determinar la concentración de crudo usando una relación de solvente (50:50)

**Tabla A.2.** Absorbancia de soluciones a diferentes concentraciones usando una relación de solvente (70:30)

[ ] ppm	Abs
3	0,01
5	0,03
10	0,092
20	0,182
30	0,243
40	0,367
50	0,434
100	0,896



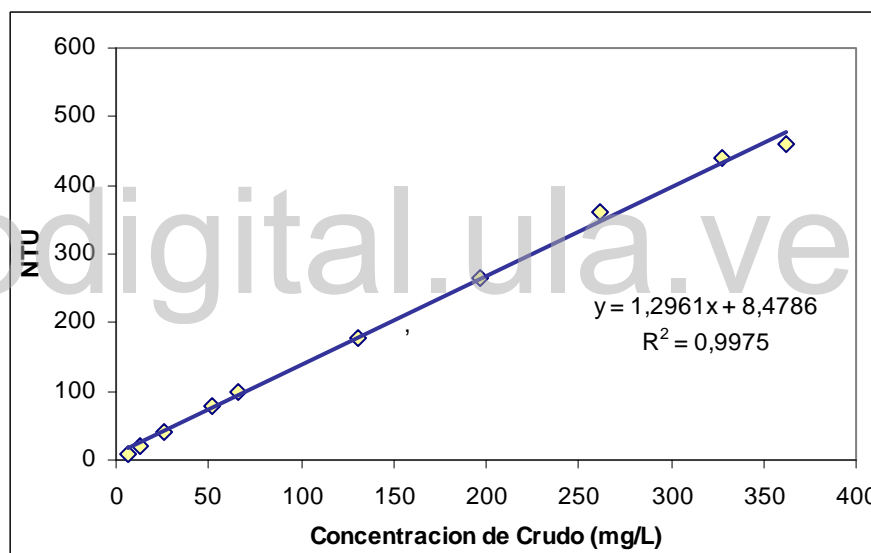


## CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE CALIBRACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE CRUDO EN LA DISPERSIÓN

Para determinar la concentración inicial de crudo en la dispersión, se hizo por medio de una curva de calibración, donde se le hizo un análisis a la dispersión madre por medio de extracción líquido – líquido, usando una relación de solvente (70:30) Tolueno – Heptano, obteniendo así la concentración inicial de crudo, y a partir de esta solución madre se hicieron diluciones entre un rango aproximado de 370 a 6 ppm, y midiendo el numero de turbidez en el Colorímetro HACH DR/890.

**Tabla B.1.** Número de turbidez a diferentes concentraciones de crudo APURE

[ppm]	NTU
362	460
327,3	439
261,87	361
196,4	266
130,93	177
65,47	100
52,37	80
26,19	41
13,09	20
6,55	10



**Gráfico B.1.** Curva de calibración para la determinación de la concentración de crudo APURE en la dispersión