



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

PROYECTO FINAL DE CARRERA

TRATAMIENTO DE ÓSMOSIS INVERSA PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA DE BOCA EN UNA URBANIZACIÓN DE MONTECANAL (ZARAGOZA)

Autora:
Yolanda Martínez Sánchez

Directora:
Eva Francés

Convocatoria:
Septiembre 2010

Especialidad:
Química

1. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN.....	4
2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	6
2.1. INTRODUCCIÓN.....	7
2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL	8
3. EMPLAZAMIENTO.....	12
4. MATERIA PRIMA.....	14
5. BALANCES DE MATERIA EN ETAPAS DE PROCESO.....	17
5.1. DATOS DE PARTIDA.....	18
5.2. FILTRO GRANULAR.....	18
5.2.1. TIPO DE RELLENO.....	18
5.2.2. VELOCIDAD DE FILTRACIÓN Y DIMENSIONES.....	19
5.2.3. SISTEMA DE DRENAJE.....	25
5.2.4. MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA.....	28
5.3. ADSORCIÓN MEDIANTE CARBÓN ACTIVO.....	30
5.3.1. INTRODUCCIÓN Y MATERIA PRIMA.....	30
5.3.2. SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVO.....	31
5.3.3. CÁLCULO DE LA ISOTERMA DE FREUNDLICH.....	34
5.3.4. DISEÑO DE LA COLUMNA.....	36
5.3.5. REGENERACIÓN.....	41
5.4. ÓSMOSIS INVERSA.....	42
5.4.1. INTRODUCCIÓN Y MATERIA PRIMA	42
5.4.2. SELECCIÓN DEL TIPO DE MEMBRANA.....	43
5.4.3. CÁLCULOS DE DISEÑO	44
5.4.3. MANTENIMIENTO DE LA MEMBRANA	50
6. ACCESORIOS.....	52
6.1.TANQUE DE ALMACENAMIENTO.....	53
6.2. TUBERÍAS.	54
6.3. BOMBAS	57
7. PRESUPUESTO	61
8. PLANO	75

9. ANEXOS	77
ANEXO 1: POTABILIZACIÓN DEL AGUA	78
A1.1. CONTAMINANTES DEL AGUA	79
A1.2. PROCESO DE POTABILIZACIÓN: INTRODUCCIÓN	83
A1.3. CAPTACIÓN DEL AGUA	83
A1.4. DESBASTE	84
A1.5. DESARENADO	85
A1.6. PREOXIDACIÓN	86
A1.7. COAGULACIÓN	87
A1.8. FLOCULACIÓN	87
A1.9. DECANTACIÓN	88
A1.10. FILTRACIÓN	91
A1.11. DESINFECCIÓN FINAL	92
A1.12. PLANTA POTABILIZADORA DE ZARAGOZA	92
ANEXO 2: FILTRACIÓN GRANULAR	95
A2.1. DEFINICIÓN	96
A2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FILTRACIÓN	96
A2.3. TIPOS DE FILTROS	98
A2.4. FÓRMULAS DE DISEÑO DE UN FILTRO LENTO	102
ANEXO 3: ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVO	105
A3.1. INTRODUCCIÓN	106
A3.2. CARBÓN ACTIVO	111
A3.2.1. Definición, características y usos	111
A3.3. TIPOS DE CARBÓN ACTIVO	116
A3.4. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO	119
A3.4.1. Materias primas	119
A3.4.2. Tipos de activación	121
A3.5. OPERACIONES DE ADSORCIÓN	125
A3.6. DECLORACIÓN CON CARBÓN ACTIVO	129
A3.7. REGENERACIÓN	132
A3.8. FÓRMULAS DE DISEÑO	133
ANEXO 4: ÓSMOSIS INVERSA	136
A4.1. DEFINICIÓN	137
A4.2. MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA	139
A4.2.1. Clasificación según la estructura	139
A4.2.2. Clasificación según la naturaleza	140
A4.2.3. Clasificación según su forma	141
A4.2.4. Clasificación según la composición química	143
A4.2.5. Clasificación según la carga superficial	145
A4.2.6. Clasificación según la morfología de su superficie	145
A4.2.7. Clasificación según la presión de trabajo	145
A4.3. FÓRMULAS DE DISEÑO	146
10. BIBLIOGRAFÍA	148

1. OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN.

La calidad del agua procedente de la red de distribución responde a las normas de calidad sanitaria establecidas en el ordenamiento legal, teniendo toda la garantía de potabilidad, lo que no excluye que se produzcan disfunciones en las instalaciones domésticas causadas, entre otros motivos por la dureza temporal (contenidos de bicarbonato y eventualmente carbonato cálcico y magnésico) conjuntamente con el pH, la conductividad, etc., así como que origine insatisfacción entre los usuarios debido a alteraciones de los aspectos organolépticos. Todo ello contribuye cada vez más a la utilización de tratamientos domésticos para mejorar estos y otros aspectos del agua.

El objetivo del proyecto consiste en el diseño de una instalación para el afino doméstico de agua potable mediante un tratamiento completo de ósmosis inversa, y su pretratamiento correspondiente para una urbanización de Zaragoza en el barrio de Montecanal, de 150 habitantes aproximadamente, consiguiendo así un agua de gran calidad aproximadamente con las características de la tabla 1.1.

Se dará tratamiento exclusivamente al agua de boca, es decir, consumo humano directo (beber y cocinar), de tal forma que no supusiera un gasto excesivo para la comunidad.

Tabla 1.1. Valores deseados para los diversos parámetros del agua.

Nombre	Valor deseado	Unidad de medida
Residuo seco	35	mg/l
Sulfatos	6	µg/l
Carbono orgánico _{total}	0,2	mg/l
Cloro combinado	0	mg/l
Cloro residual libre	0,01	mg/l
Cloruros	2	mg/l
Magnesio	3	mg/l
Potasio	1	mg/l
Calcio	3	mg/l
Sodio	1	mg/l
Dureza	<25	mg/l CO ₃ Ca
Turbidez	<0,2	UNF

2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

2.1. INTRODUCCIÓN.

El tratamiento de afino doméstico que se va a diseñar, va a estar basado fundamentalmente en un sistema de ósmosis inversa.

Se conoce como ósmosis inversa el proceso de filtrado bajo presión y a través de membranas semipermeables; se trata, por lo tanto, de un proceso físico de separación de determinados componentes del agua, sobre todo interesa separar las sales de determinados elementos químicos que suelen estar presentes en el agua (cloruros, sulfatos, carbonatos, etc.).

Debido a que las membranas se pueden ver dañadas por las partículas en suspensión, se incorpora un filtro de sedimentos, como primera etapa.

Se supone que el agua está desinfectada, de hecho es obligatorio que así sea, y como normalmente esta desinfección se caracteriza por la presencia de cloro libre (Cl^-) y éste también daña la membrana de ósmosis inversa, se debe eliminar el cloro antes de filtrar el agua a través de la membrana, por ello la planta de tratamiento también incorpora un filtro de carbón activo que adsorberá el cloro libre.

Después de esta primera fase el agua se osmotiza y de ahí va al tanque de almacenamiento.

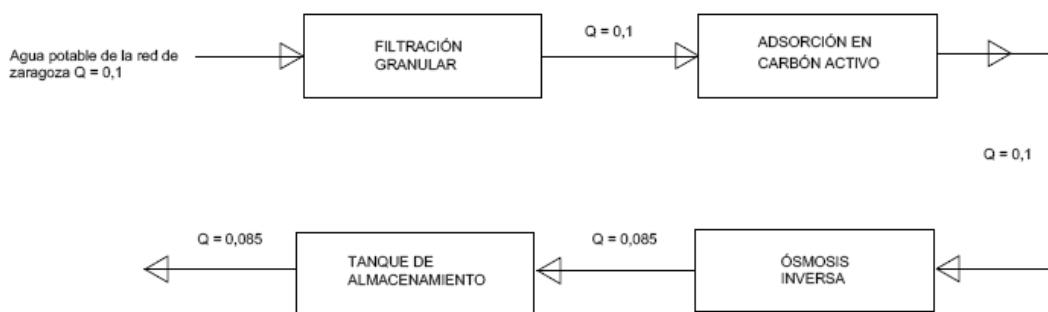


Figura 2.1. Diagrama de bloques de la planta tratamiento. Caudales (Q) en m^3/h .

2.2. DESCRIPCIÓN GENERAL.

La planta de tratamiento va a estar situada en el área de zonas comunes de la comunidad, se creará una pequeña nave de 8 metros de largo y 5,7 metros de ancho, es decir, de un área total de 45,6 m² (Véase plano).

Esta nave contendrá dos puertas, una doble por la que se podrán introducir todos los elementos menos el tanque de almacenamiento, que esté se situará en su lugar antes de cerrar la nave por arriba, y una puerta simple para que pueda entrar el personal de mantenimiento a realizar las tareas necesarias.

Por la parte superior izquierda de la nave entra como materia prima el agua potable de la red de Zaragoza, y se le realizan los tratamientos necesarios para obtener un agua de alta calidad.

FILTRACIÓN GRANULAR

El objetivo del filtro granular, es eliminar las partículas mayores de 5 µm, que son las que podrían dañar la membrana de ósmosis inversa. Este filtro consistirá en un lecho de limo de 1,8 m de altura, con un agua sobrenadante encima de éste de 1 m, para que la velocidad de filtración sea la adecuada, la zona de drenaje en la parte inferior del filtro, está formada por distintas capas de grava y arena, ocupando un total de 25 cm.

Las capas del sistema de drenaje (Figura 5.5) están formadas por una capa inferior de hormigón poroso (poros con un diámetro de 1 mm) de un espesor de 5 cm, encima de éste una capa de grava de 2 mm con un espesor de 8 cm, sobre la cual va una capa de arena de 0,5 mm de un espesor de 6 cm, encima otra capa de arena de 0,125 mm con un espesor de 4 cm, y por último en la capa superior arena de 0,031 mm con un espesor de 2 cm.

El contenedor de todo esto es un depósito de poliéster 100%, lo que asegura una resistencia a la intemperie y a la corrosión interna durante años, con el sistema de las tuberías de drenaje inferior integrado, todo ello con unas dimensiones de: altura total de 3 m y diámetro de 0,8 m, que se encuentra situado en un soporte metálico de una altura de 1 m.

Una vez al año se realizará el raspado de la parte superior del lecho de limo, unos 5 o 10 cm, y se repondrán, y cada 5 años se realizará el lavado completo del filtro.

ADSORCIÓN MEDIANTE CARBÓN ACTIVO PARA DECLORAR

Esta columna de adsorción de carbón activo Organosorb 10 CO va a tener como función reducir el cloro combinado y el cloro residual libre, ya que dañan la membrana de ósmosis inversa. A la vez que el proceso de decloración, la materia orgánica se ve reducida, por lo que no hará falta otra columna de adsorción en la planta de tratamiento.

La altura del lecho de carbón es de 1,5 m, y en la parte inferior se encuentra el sistema de drenaje de tuberías necesario, así la altura total de la columna que contiene el lecho, fabricada en poliéster, es de 2 m y un diámetro de 1 m, todo ello se encuentra encima de un soporte metálico a la altura de 1 m, que es a la que sale la tubería con el agua ya tratada, sin cloro ni materia orgánica, con un caudal de 0,1 m³/h, a una velocidad de 0,2 m/s.

ÓSMOSIS INVERSA

La tercera etapa es la ósmosis inversa, en la que se van a reducir todas las sales, dejando las cualidades del agua comparables con una agua mineral de mineralización muy débil. Para ello el agua pasará por una membrana de ósmosis inversa de poliamida TW30-4040 con configuración en espiral, que estará en un soporte metálico a la altura de 1 m, tiene unas dimensiones de 1 m de largo y un diámetro de 0,1 m, trabaja a unas condiciones de 25 °C y 30 bar.

La limpieza de la membrana se realizará cada 5 años pasando una disolución ácida para la disolución de las sales que se hayan podido incrustar, lo realizarán el personal de mantenimiento del proveedor de la membrana.

TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque es un cilindro de 2 m de altura y un diámetro de 2,6 m fabricado en poliéster, con esas dimensiones posee un volumen de 10,6 m³ para 10000 litros de agua, así en el caso de que hubiera alguna avería o problema en la planta de tratamiento, habría un remanente de agua en el tanque de almacenamiento para unos 5 días.

BOMBAS Y TUBERÍAS

La tubería de entrada a la nave es de un diámetro de 1,3 cm, de polietileno y de una longitud de 5 metros, 2 metros horizontales y 3 metros verticales, para elevar el agua a la parte alta del filtro mediante la bomba CM 1-2 A, la cual necesita una potencia de 0,823 W, el caudal del agua es de 0,1 m³/h, y la velocidad por la tubería 0,2 m/s.

La tubería de salida del filtro granular, con un diámetro de 1,3 cm y fabricada en polietileno, está a la altura de 1 m como todas las de la planta de tratamiento, lleva un caudal de 0,1 m³/h, a una velocidad de 0,2 m/s, tiene una longitud de 3,5 m, dos metros de manera horizontal, y 1,5 m de manera vertical para elevar el agua a la parte superior de la columna de adsorción mediante la bomba CM 1-2 A, la cual necesita una potencia de 0,55 W.

La membrana tiene dos tuberías de salida para las siguientes sustancias:

- Para el agua permeada, es decir, para el agua reducida de sales, que saldrá con un caudal de 0,085 m³/h, a una tubería en forma de L de polietileno, con un diámetro de 1,22 cm, para ir al tanque de almacenamiento.
- Para el rechazo, es decir, el agua más concentrada de sales, que saldrá con un caudal de 0,015 m³/h, este agua va directamente al alcantarillado mediante un desagüe que se instala a la salida de esta tubería de un diámetro de 0,5 cm, fabricada en polietileno.

La tubería de salida de la ósmosis inversa, de polietileno y con un diámetro de 1,22 cm, lleva un caudal $0,085 \text{ m}^3/\text{h}$, es una tubería de una longitud de 4 m, 2 m de manera horizontal y otros 2 m de manera vertical para elevar el agua a la parte superior del tanque mediante la bomba CM 1-2 A, la cual necesita una potencia de 0,46 W.

La tubería de salida del tanque tiene una longitud de 0,7 m, y un caudal de $0,085 \text{ m}^3/\text{h}$, y esta tubería de 1,22 cm de diámetro, sale de la nave al sistema de abastecimiento de la urbanización, los grifos de las casas tienen que tener una presión de 1,5 bar a 2 bar. Luego habrá que situar una bomba que proporcione un valor de presión determinado, será el mismo tipo de bomba CM 1-2 A que proporciona 2 bar de presión.

3. EMPLAZAMIENTO

La urbanización para la cual se realiza el diseño de la planta de afino de agua potable esta situada en la zona suroeste de la ciudad de Zaragoza, en el barrio de Montecanal (Figura 3.1). Se encuentra entre la calle de Martín Diez de Aux y la avenida de la Ilustración (Figura 3.2).



Figura 3.1. Situación de Montecanal en Zaragoza.



Figura 3.2. Situación de la urbanización en Montecanal, Zaragoza.

4. MATERIA PRIMA

La materia prima de este proceso, es el agua generada por la planta potabilizadora de Zaragoza, la cual tiene las características de las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, en las cuales se muestra el valor paramétrico, o valor que marca el Real Decreto 140/03 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, y el resultado obtenido en el muestreo y análisis que se ha realizado por el Instituto Municipal de Salud Pública del Ayuntamiento de Zaragoza.

El valor del resultado, se ha obtenido de hacer una media de los resultados de los muestreos de un año, ya que pueden variar según la época del año.

Tabla 4.1. Parámetros microbiológicos. Análisis al agua potable de la red de Zaragoza. (Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza, 2009-2010).

Nombre	Resultado (ufc/100ml)	Valor paramétrico (ufc/100ml)
Escherichia coli	0	0
Enterococo	0	0
Clostridium perfringens	0	0

Tabla 4.2. Parámetros indicadores. Análisis al agua potable de la red de Zaragoza. (Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza, 2009-2010).

Nombre	Resultado	Valor Paramétrico	Unidad de medida
Residuo seco	512		mg/l
Sulfatos	123	250	µg/l
C orgánico total	1,5		mg/l
Cl combinado	0,18	2,0	mg/l
Cl residual libre	0,95	1,0	mg/l
Cloruros	100	250	mg/l
Magnesio	14	15	mg/l
Potasio	15,6		mg/l
Calcio	82,9		mg/l
Sodio	70,3	200	mg/l
Dureza	262		mg/l CO ₃ Ca
Turbidez	0,35	5	UNF

Tabla 4.3. Parámetros químicos. Análisis al agua potable de la red de Zaragoza.
(Fuente: Ayuntamiento de Zaragoza, 2009-2010).

Nombre	Resultado	Valor Paramétrico	Unidad de medida
Antimonio	--	5	µg/l
Arsénico	--	10	µg/l
Benceno	<1	1	µg/l
Benzo (a) pireno	<0,01	0,01	µg/l
Boro	0,196	1,0	mg/l
Cadmio	<0,5	5	µg/l
Cianuro	<5	50	µg/l
Cobre	<0,05	2,0	µg/l
Cromo total	<5	50	µg/l
1,2- Dicloroetano	<1	3	µg/l
Fluoruro	0,081	1,5	mg/l
Hidrocarburos aromáticos	<0,1	0,10	µg/l
Mercurio	<0,2	1	µg/l
Níquel	<2	20	µg/l
Nitrato	11,3	50	mg/l
Nitrito	0,00	0,5	mg/l
Total Plaguicidas	<0,5	0,5	µg/l
Aldrin	<0,03	0,03	µg/l
Clorpirifos	<0,03	0,1	µg/l
Dieldrin	<0,03	0,03	µg/l
Fonofos	<0,03	0,1	µg/l
alfa-HCH	<0,03	0,1	µg/l
beta-HCH	<0,03	0,1	µg/l
delta-HCH	<0,03	0,1	µg/l
Lindano	<0,03	0,1	µg/l
Meltriparation	<0,03	0,1	µg/l
Paration	<0,03	0,1	µg/l
Heptacloro	<0,03	0,03	µg/l
Heptacloro epóxido	<0,03	0,03	µg/l
Plomo	<2	25	µg/l
Suma trihalometanos	39	100	µg/l
Tricloroeteno+Tetracloreto	<1	10	µg/l

5. BALANCES DE MATERIA EN ETAPAS DE PROCESO.

5.1. DATOS DE PARTIDA.

La planta de tratamiento que se va a diseñar está destinada para agua de consumo “de boca”, es decir la empleada en beber y cocinar. La urbanización cuenta en la actualidad con 150 habitantes, pero en previsión de un aumento de la población se va a realizar el diseño para 200 habitantes. Por otro lado como cada habitante consume unos 10 litros diarios de agua “de boca”, el caudal a tratar será de $62 \text{ m}^3/\text{mes}$ o $0,083 \text{ m}^3/\text{hora}$, lo cual se va a redondear para la realización de cálculos a $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, debido a que en el proceso de ósmosis inversa, la recuperación del caudal de alimentación no es del 100%, así que este caudal se verá reducido sin bajar de los $0,083 \text{ m}^3/\text{hora}$ que se necesitan.

5.2. FILTRO GRANULAR.

5.2.1. TIPO DE RELLENO.

El primer paso en el pretratamiento va a ser un filtro granular, que va eliminar los sólidos en suspensión mayores de 5 micras, ya que podrían deteriorar la membrana de ósmosis inversa. Se va a realizar el diseño de un filtro lento granular sencillo.

Como no se tienen datos de materia en suspensión en las tablas 3.1-3.3, se coge el valor de turbidez el cual es 0,35 UNF (unidad nefelométrica de turbidez); la turbidez es el grado de dificultad que posee el agua para transmitir la luz a través de ella esto puede ser consecuencia de materia insoluble en suspensión, materia coloidal o muy fina. También se tiene el dato inicial del residuo seco, que permite estimar la cantidad de materias disueltas y en suspensión que lleva un agua.

En la depuradora de Zaragoza el agua ha sido filtrada por un lecho granular de partículas de un tamaño de 0,7 mm (Planta potabilizadora de Casablanca), por lo que siguen quedando partículas que podrían dañar la membrana de ósmosis inversa, debido a que las partículas eliminadas han sido aproximadamente las mayores a 0,1 mm (100 μm).

El mecanismo más evidente para diseñar el filtro granular es el de la retención de las partículas con un diámetro superior a los espacios que deja el conjunto de

granos del lecho. Se considera que las partículas que serán atrapadas son las de diámetro superior a la séptima parte del diámetro medio de las partículas del lecho (27 - Gits, 2009). Por ejemplo, si se considera que el diámetro medio de las partículas del lecho es de 150 μm , las partículas más grandes de 21 μm se verán retenidas por ver impedido su paso.

Por lo que si se quiere eliminar toda la materia en suspensión mayor de 5 μm , se tendrá que utilizar un lecho de un diámetro medio de partícula de unas 35 μm . Teniendo en cuenta los diámetros de las partículas de la Tabla 5.1, se tendrá que utilizar un lecho de limo, cuyo diámetro medio es de 0,018 mm a 0,034 mm, es decir de 18 a 34 μm , por lo que quedarán retenidas las partículas superiores a 2,6 μm o a 4,9 μm , así se asegura el objetivo planteado.

Tabla 5.1. Diámetro de las partículas más abundantes (64 - Hodgson, Descripción de suelos).

Partículas	Diámetro (mm)
Arcilla	< 0,002
Limo	0,018 – 0,034
Arena	0,05 – 2,00
Piedras finas	2,00 – 5,00
Piedras gruesas	20,00 – 75,00

5.2.2. VELOCIDAD DE FILTRACIÓN Y DIMENSIONES.

Una de las primeras cosas que se deben estudiar es el comportamiento hidráulico dentro del filtro de arena. El objetivo es saber la altura de agua necesaria para garantizar que la velocidad de filtración se encuentre dentro de los valores establecidos, como ya se citó en el Anexo 2.4:

$$0,1 \frac{m^3}{m^2 \cdot h} \leq v_f \leq 0,4 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$$

que es la velocidad a la que debe circular el agua para ser considerado filtro lento de arena. Para que se cumplan estas velocidades se necesita saber la columna de agua necesaria para vencer la resistencia que ofrece la cama de arena y a la vez controlar la velocidad del flujo en el medio poroso. Si se considera que el agua va a seguir un régimen laminar en su filtración y mantener una presión constante de agua de entrada se puede utilizar la ley de Darcy.

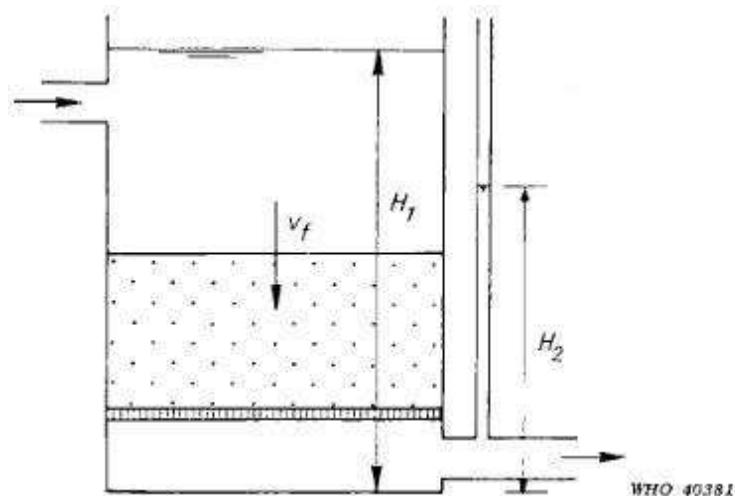


Figura 5.1. Filtro granular.

Por otro lado se sabe que el flujo de agua que va a pasar por el filtro viene controlado por: la diferencia de presiones y la velocidad de filtración, v_f . Si se adapta la ley de Darcy a un filtro genérico tal y como se muestra en la figura 5.1 se obtiene la siguiente ecuación:

$$H_1 - H_2 = h = \frac{v_f}{k} \bullet L \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad (m/h)

v_f = velocidad de filtración (m/h)

h = diferencia de altura de agua (m)

L = altura del lecho (m)

H_1 = altura de agua cruda constante encima del lecho (m)

H_2 = altura del agua tratada que varía con la velocidad de filtración (m)

A medida que pasa el tiempo, la velocidad de filtración va disminuir debido a la acumulación de partículas en el lecho, disminuyendo el valor de la permeabilidad. Por este motivo es más que recomendable asegurar una altura de agua cruda constante encima del lecho de limo (es decir $H_1 = \text{cte}$) y controlar la velocidad de filtración en la salida del agua tratada (H_2 variable).

En este caso inicialmente la velocidad de filtración se va a fijar, y así queda fijada H_2 , y con este dato se obtendrá la altura de agua cruda necesaria para que el filtro funcione de manera adecuada, si en algún momento la velocidad de filtración disminuyera se realizaría la limpieza del filtro antes del período habitual.

De ésta forma se podrá saber cuando la permeabilidad del filtro es tan baja (filtro colmatado) que se debe efectuar el mantenimiento del lecho.

Utilizando la ecuación 3 y aplicando los valores de velocidad de filtración que se necesitan para que un filtro lento funcione como tal, se obtienen diferentes alturas mínimas de agua sobrenadante ($H_1=h$) para que el flujo pueda atravesar el lecho (L) con una velocidad adecuada. Si por ejemplo, $v_f = 0,2 \text{ m/h}$ los resultados obtenidos se representan en la figura 5.2 para distintos valores de coeficiente de permeabilidad k .

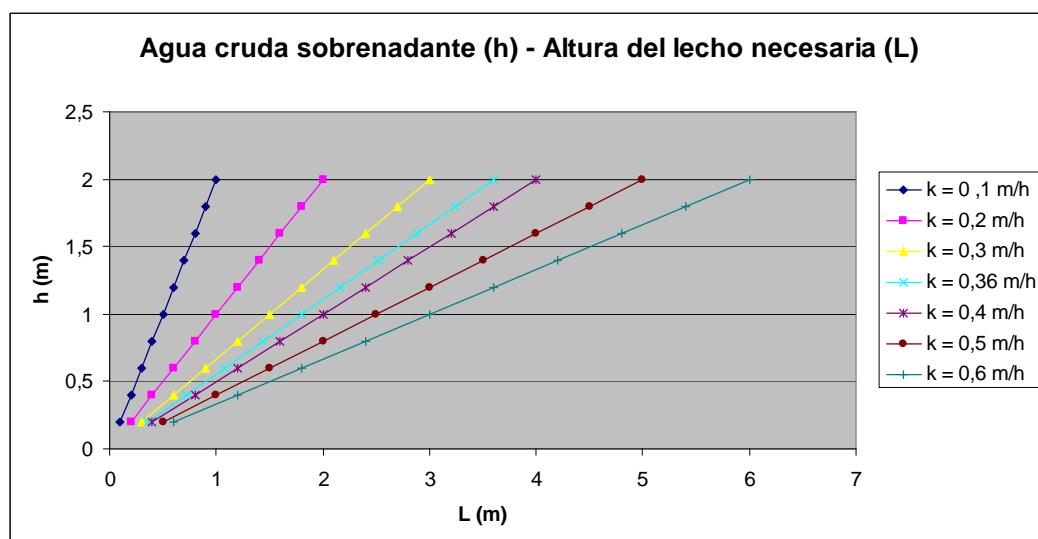


Figura 5.2: Altura del agua cruda sobrenadante mínima para distintas permeabilidades en función de la longitud del lecho filtrante.

El valor medio del coeficiente de permeabilidad para el limo es de $k = 10^{-3}$ cm/s (Tabla 5.2), que en unidades de m/h:

$$k = 10^{-3} \frac{\text{cm}}{\text{s}} \cdot \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,36 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Tabla 5.2. Coeficientes de permeabilidad. (Fuente: 32 - Estudio de suelos y rocas. Escuela de Arquitectura de Madrid, 2005).

Tipo de lecho	Valores del coeficiente de permeabilidad (cm/s)
Grava	$k = 1$
Arena	$1 > k > 10^{-2}$
Limo	$10^{-2} > k > 10^{-4}$
Arcilla	$10^{-4} > k > 10^{-8}$

Para que el filtro tenga un tamaño manejable, y el edificio donde se va a situar todo el tratamiento no ocupe un área demasiado grande en la urbanización, y por lo tanto tenga también costes reducidos, se fija una altura de agua de 1 metro, de forma que a través de la figura 5.2. con $h = 1 \text{ m}$ y $k = 0,36 \text{ m/h}$, se obtiene una altura de lecho de limo de 1,8 metros. Así con esta gráfica se obtendrían, distintas relaciones para otros factores de permeabilidad.

Así que una vez conocido el caudal de diseño que se quiere obtener ($0,1 \text{ m}^3/\text{h}$) y la velocidad de filtración ($0,2 \text{ m/h}$), falta por hallar las dimensiones del filtro. La ecuación 4, permite saber cual es el área mínima necesaria para filtrar el caudal de agua que pase por el filtro:

$$A_{\min} = \frac{Q}{v_f} \quad (\text{Ec.4})$$

$$A_{\min} = \frac{0,1m^3/h}{0,2m/h} = 0,5m^2$$

Por lo que una vez conocida el área del filtro, y sabiendo que va a ser circular porque es la mejor relación área-espacio, faltan por hallar sus dimensiones:

$$A = \Pi \cdot r^2 \quad (\text{Ec.5})$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\Pi}} = \sqrt{\frac{0,5}{\Pi}} \approx 0,4m$$

$$d = 2r = 0,8m$$

Así el diámetro del filtro será de 0,8 metros.

Una vez conocidas las características del filtro (Tabla 5.3), falta por saber el número de filtros necesarios, como después del tratamiento, se tendrá un tanque de almacenamiento de agua tratada, el cual puede abastecer a la urbanización durante 5 días, se puede parar el tratamiento para la limpieza del filtro, ya que esta se puede realizar en un día.

Los valores reducidos por el filtro granular son la turbiedad y el residuo seco, la turbiedad se estima que aproximadamente se ha reducido de 0,35 a 0,05 UNF (53 - Jorge Arboleda), al no quedar partículas en suspensión en el agua mayores de 5 μm , así mismo el residuo seco se reducirá sensiblemente al descender de manera notable la materia en suspensión de agua, pasando de 512 mg/l a unos 400 mg/l aproximadamente (48 - www.4ujaen.es/docencia_archivos), ya que no cabe la posibilidad de hacer ensayos en laboratorio no se puede hallar estos valores de manera exacta.

Tabla 5.3. Tabla resumen de valores obtenidos para el filtro granular.

Característica	Valor
Tipo de lecho	Limo
Diámetro medio partícula (d_p)	0,026
Partículas retenidas	> 5 μm
Caudal (Q)	0,1 m^3/h
Velocidad (v_f)	0,2 m/h
Área de filtración (A_{\min})	0,5 m^2
Diámetro del filtro (d)	0,8 m
Altura del lecho (L)	1,8 m
Altura de agua sobrenadante	1 m
Altura total del filtro (H_{filtro})	3 m
Número de filtros	1

5.2.3. SISTEMA DE DRENAJE.

El objetivo del sistema de drenaje es:

- proporcionar un soporte físico al lecho de arena
- proporcionar una salida con poca resistencia al agua tratada

La parte baja del sistema de drenaje esta compuesta por un drenaje principal y un conjunto de drenes secundarios, normalmente perpendiculares al principal. En filtros pequeños este conjunto de drenes se realizan mediante caños perforados mientras que para filtros más grandes se realizan de hormigón poroso o mediante bloques de hormigón prefabricado.

En este caso se va a poner de sistema de drenaje y soporte una capa de 5 cm de hormigón poroso, en el cual los poros serán de un diámetro de 1 mm.

Encima del hormigón poroso se colocan una serie de capas de material granular de grava y arena de distintos tamaños (Figura 5.3) para que se cumpla por un lado la función de soporte del lecho de limo y por otro lado evitar que parte del limo pase al sistema de drenaje y tapone la salida de agua tratada.

La capa situada en la parte baja tendría una distribución de diámetros de grano más gruesos mientras que a medida que se van colocando capas, el tamaño de grano sería cada vez más pequeño.

Se ha sacado información de la construcción del sistema de drenaje en la bibliografía (27 - Grupo GITS, artículo Filtros lentos de arena), para empezar a llenar el sistema de drenaje de material granular se coloca una capa en la parte baja con un diámetro superior a dos veces el tamaño de las aperturas del sistema de drenaje inferior, es decir, una capa de grava con diámetro medio de partículas de 2 mm.



Figura 5.3. Grava.

Las siguientes capas que se colocaran deben guardar una relación de diámetros entre sí con el fin de evitar la colmatación de finos. Concretamente, los diámetros pequeños deben ser a lo sumo cuatro veces inferiores a los de la capa inmediatamente inferior.

Se irán colocando capas de grava y arena cada vez mas fina hasta que se consiga una relación en el tamaño de grano cuatro veces superior al tamaño de grano del lecho de limo.

Por lo que las siguientes capas serán de diámetros de partículas de 0,5 mm, 0,125 mm y 0,031 mm.

Las propiedades físicas de la grava deben ser por lo general duras, más o menos redondas, con un peso específico inferior o igual a 2500 kg/m^3 , libres de arena, arcilla, lodos, y sin impurezas orgánicas de cualquier tipo. Si es necesario se tendrán que lavar. En cualquier caso, el espesor de cada capa debe ser de tres veces el diámetro de los granos más grandes. Finalmente, sólo comentar que la colocación de las diferentes capas de grava y arena debe realizarse con mucha atención, ya que una mala colocación implicaría la generación de huecos durante el funcionamiento del filtro.

Por lo que los espesores de las capa de grava y capas de arena, se podrían distribuir de la más gruesa a la más fina, en 8 cm, 6 cm, 4 cm y 2 cm.

La distribución del filtro quedaría como se observa en la Figura 5.4 y Figura 5.5.

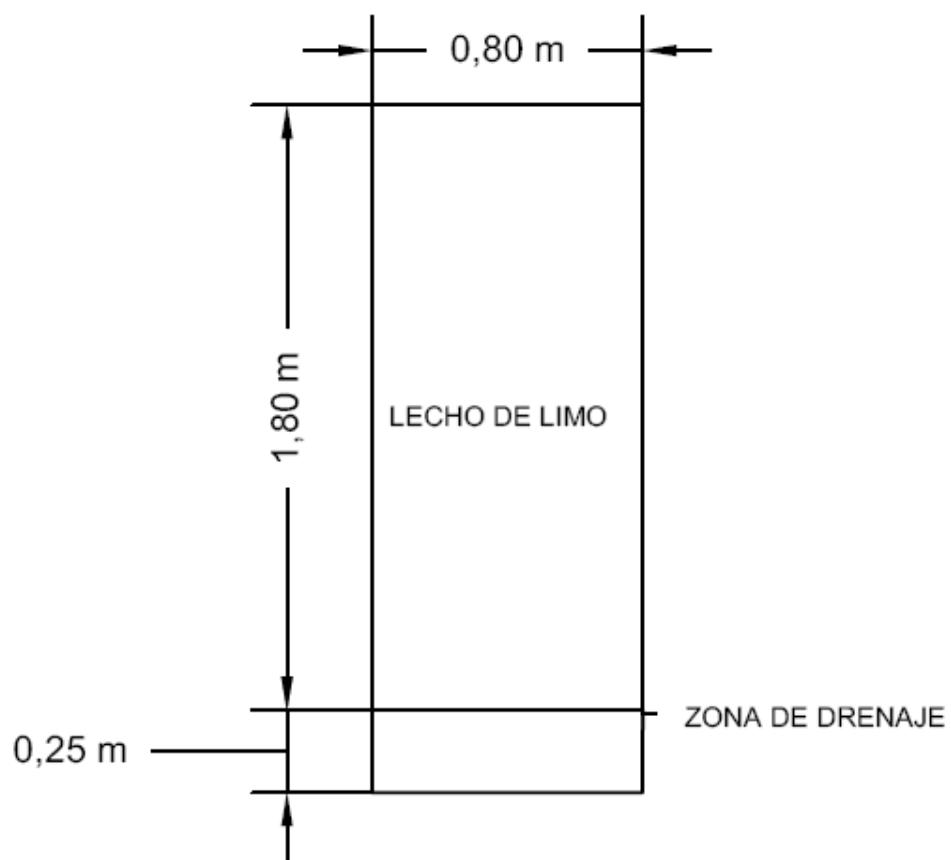


Figura 5.4. Disposición de las capas del filtro granular.

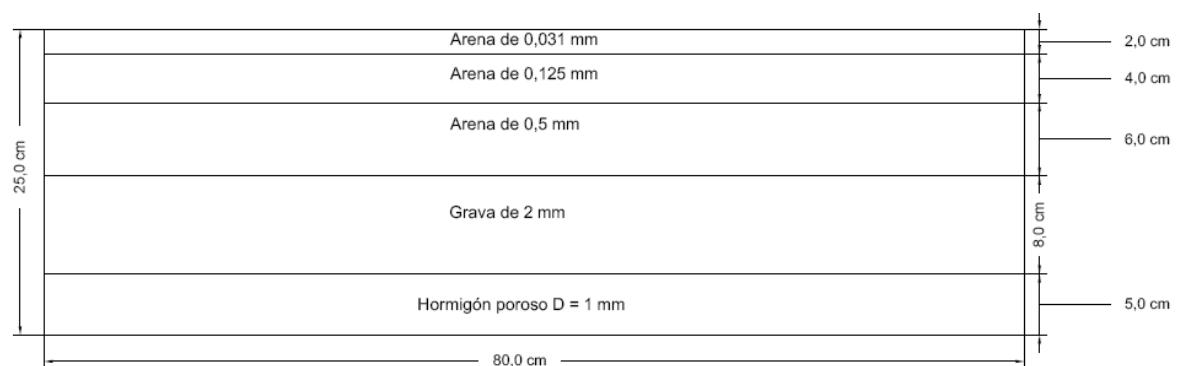


Figura 5.5. Disposición del sistema de drenaje.

5.2.4. MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA.

A medida que pasa el tiempo el agua va a tardar más en recorrer el lecho de limo (L), ya que las impurezas que lleve el agua cruda van a quedar retenidas en el mismo, concretamente en la parte superior del lecho filtrante disminuyendo la permeabilidad. Así que en esta pequeña zona de apenas 2 cm es donde se va a localizar una mayor resistencia al paso de agua mientras que en el resto del filtro granular la permeabilidad se va a mantener más o menos al mismo valor que al inicio. De ésta manera se puede llegar a tener presiones negativas justo debajo de la fina capa de contacto entre la arena y el agua sobrenadante, debido al gradiente de permeabilidades en muy poco espacio, que ocasionaría una entrada de aire variando el sentido del flujo en algunos puntos o en el peor de los casos en toda la superficie. Si esto sucede, las partículas, bacterias y/o organismos retenidos en la parte superior de la arena se mezclarían con el resto de la arena poniendo en peligro la calidad del agua tratada.

Para evitar éste fenómeno se coloca un vertedero a la altura del lecho de arena garantizando que el nivel de agua filtrada nunca sea inferior a la parte superior del lecho de arena.

En el lavado de la filtración lenta es suficiente realizar el raspado (o el arado) de 5 -10 cm. de la capa superior del lecho, lavado y ubicación en el lugar de origen o el reemplazo por otra capa similar. Esta operación se realiza cada vez que la parte superior del lecho filtrante adquiere un color gris, negro o amarillento, característico del enturbiamiento del agua, como ya se menciona en el Anexo 3, o el agua de salida no cumpla con los requisitos.

Los filtros de relleno tienen un rango de funcionamiento concreto, un filtro de arena puede aguantar funcionando durante:

- Algunos pocos días si el agua inicial contiene entre: 750 y 1500 UNF.
- Períodos largos si el agua inicial contiene como máximo 375 UNF.
- Períodos largos con una mejor purificación si el agua inicial contiene como máximo 75 UNF.

Como el agua potable de Zaragoza tiene 0,44 UNF, el filtro de arena funcionará a buen rendimiento seguro durante un año, ya que la cantidad de materia en suspensión es mínima.

Así que anualmente se efectuará su mantenimiento, este raspado se realizará de forma manual, por la persona de mantenimiento de la urbanización.

Cada cinco años, como mínimo, se realizará el lavado completo del filtro. Se retiran con mucho cuidado la arena y la grava para no mezclarlas y se lavan, se cepillan las paredes de la caja del filtro, se reacomoda el drenaje y se vuelve a colocar el lecho de arena y grava. Si ha habido pérdidas de arena y grava será necesario reponerla. Si hay grietas en las paredes o en el fondo, deberán reponerse antes de colocar el lecho filtrante.

5.3. ADSORCIÓN MEDIANTE CARBÓN ACTIVO.

5.3.1. INTRODUCCIÓN Y MATERIA PRIMA.

La segunda etapa en el tratamiento, consiste en eliminar el cloro que haya en el agua para que no dañe la membrana de ósmosis inversa, para ello se va a utilizar un lecho de carbón activo.

En la práctica, la adsorción sobre carbón activo se puede llevar a cabo tanto de forma continua o discontinua (véase anexo 3.3). En este caso se realizará operación continua con carbón activado granular (CAG), debido a que el carbón activado en polvo funciona rápida y eficazmente pero está limitado a depuraciones de menor escala que el CAG y se vuelve muy costoso si es necesario usarlo de manera continua. Al terminar el proceso es necesario eliminar el carbón en polvo, usualmente mediante filtración. Los sistemas CAG tienen un mayor costo de capital pero son capaces de lograr niveles más elevados de eliminación, y sus costos de operación (principalmente el costo de reemplazar el CAG agotado) son menores si el proceso de eliminación se realiza de manera continua.

El flujo de la materia a tratar puede ser ascendente o descendente, como ya se mencionó en el Anexo 3, en la planta de tratamiento a diseñar se realizará con flujo descendente, porque así no hace falta el uso de bombas para darle fuerza al agua dentro de la columna, a velocidades altas no hay peligro de fluidización del carbón activo, y el agua de partida no contiene sólidos en suspensión mayores de 5 μm que produzcan la obstrucción del filtro de carbón.

El agua inicial en esta etapa tiene los parámetros mostrados en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Datos de partida antes de la eliminación de cloro mediante carbón activo.

Nombre	Resultado	Unidad de medida
Caudal	0,1	m ³ /h
Residuo seco	400	mg/l
Sulfatos	123	µg/l
C orgánico total	1,5	mg/l
Cl combinado	0,18	mg/l
Cl residual libre	0,95	mg/l
Cloruros	100	mg/l
Magnesio	14	mg/l
Potasio	15,6	mg/l
Calcio	82,9	mg/l
Sodio	70,3	mg/l
Dureza	262	mg/l CO ₃ Ca
Turbidez	0,05	UNF

5.3.2. SELECCIÓN DEL CARBÓN ACTIVO.

La primera consideración en el diseño de un sistema de adsorción con carbón activado granular es la selección del carbón. La manera más precisa de realizarla es mediante pruebas dinámicas en columnas Piloto. Sin embargo, éstas requieren de mucho tiempo, y el pretender aplicarlas a toda la gama de carbonos que puede haber disponibles en el mercado, sería muy costoso y poco práctico.

Como alternativa, puede empezarse por una preselección rápida de sólo aquellos carbonos de los que a priori pueden esperarse los mejores resultados. Después de ésta, pueden hacerse los estudios detallados que permitan detectar el carbón idóneo de entre aquellos que se habían elegido.

La selección preliminar mencionada puede hacerse basándose en:

- La materia prima de la que parte el carbón. Ésta determina el tamaño de los poros predominantes de un carbón activo, es posible predecir el tipo de moléculas que se retendrán de manera preferencial. Por lo tanto, de acuerdo a la materia prima, y conociendo la composición de los contaminantes presentes en el agua, se puede hacer una selección preliminar del tipo de carbones más adecuados.

La segunda propiedad del CAG en orden de importancia es la dureza, que también depende de la materia prima. Cuando la mayoría de los contaminantes son de bajo peso molecular, el CAG más adecuado, por su diámetro de poros, suele ser de concha de coco (Figura 5.5). Al ser éste el de mayor dureza no existe conflicto al respecto. Por otro lado, si los contaminantes son de alto peso molecular, los carbones de madera o los ligníticos son los más apropiados. Aquí surge el problema de la falta de dureza de los mismos. En este caso puede requerirse que éstos se hayan sometido a un proceso de peletización que les brinde la dureza que no tienen de manera natural.

- Las especificaciones y normas de calidad. Son propiedades del carbón que reporta el fabricante, y que, entre otras cosas, sirven como apoyo en la preselección de carbones. Por otro lado, son un complemento que se toma en cuenta, además de los resultados de otras pruebas, para elegir el carbón más conveniente desde el punto de vista de costo-beneficio. Por ejemplo, una de las especificaciones es el contenido de humedad; mientras mayor es ésta, menor es el porcentaje de carbón neto que suministra el fabricante y, por lo tanto, el precio neto es mayor.
- Isotermas de adsorción. Son resultados de estudios con los que se determina la máxima capacidad que tiene un adsorbente en la retención de un soluto o de una mezcla de solutos. Los datos de isotermas de adsorción pueden encontrarse en la literatura, o bien pueden determinarse mediante pruebas de laboratorio.

Con esta información y la tabla A3.2 del anexo 3, se obtiene que el carbón más adecuado es el obtenido a partir de cáscaras de coco, debido a su dureza y capacidad de adsorción, así como la abundancia de su materia prima.



Figura 5.5. Cáscaras de coco.

El carbón activado granular elegido teniendo en cuenta los demás parámetros: calidad, precio, características, es Organosorb 10 CO, es un carbón de Desotec, el cual tiene las especificaciones mostradas en la tabla 5.5, se obtienen excelentes resultados en la decoloración de agua y en la retención de contaminantes orgánicos, como solventes y fenoles producto de la descomposición de desechos animales y vegetales, también elimina los trihalometanos.

Tabla 5.5. Especificaciones del carbón Organosorb 10 CO.

Propiedad	Valor
Superficie específica	1100 (m ² /g)
pH	6
Dureza	90 Adimensional
Cenizas Totales	6%
Peso específico	600 (Kg/m ³)
Humedad al empacar	4% máx.

5.3.3. CÁLCULO DE LA ISOTERMA DE FREUNDLICH.

Debido a la imposibilidad de realizar experimentos en el laboratorio, se van a realizar los cálculos a partir de la suposición de unos resultados que se muestran en la tabla 5.6, los cuales se obtuvieron por Gil W. Sánchez (65):

➤ 100 ml de una solución de agua a tratar es mezclada con diferentes cantidades de carbón activo en seis contenedores. Al cabo de cierto tiempo, las muestras son filtradas y la concentración de cloro libre medida. Siendo la concentración inicial de cloro libre de 100 mg/l.

Tabla 5.6. Resultados obtenidos.

Experimento	1	2	3	4	5	6
Carbón activo utilizado (mg)	50	100	200	300	400	500
Cloro libre residual (mg/l)	32	17	9	6	4	3

Con estos datos lo primero que se va a determinar es la isoterma de Freundlich, la cual viene expresada por la ecuación Ec.7.

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Ec.7})$$

La ecuación puede escribirse en forma lineal cogiendo logaritmos a ambos miembros:

$$\log q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e + \log K_F \quad (\text{Ec.8})$$

Si se representa $\log q_e$ en función de $\log C_e$ conduce a una línea recta que permite la determinación de los parámetros n y K_F .

Para ello se van a obtener los valores necesarios para representar la isoterma de Freundlich, estos se muestran en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Valores para la representación de la isoterma de Freundlich.

M	C_e	$X = (C_i - C_f) V$	$q_e = X/M$	$\log C_e$	\log
0,05	32	6,8	136	1,5	2,13
0,1	17	8,3	83	1,2	1,92
0,2	9	9,1	45,5	0,95	1,66
0,3	6	9,4	31,33	0,78	1,5
0,4	4	9,6	24	0,6	1,38
0,5	3	9,7	19,4	0,48	1,29

Se representa $\log q_e$ en función de $\log C_e$ y se obtiene la isoterma buscada en la figura 5.6.

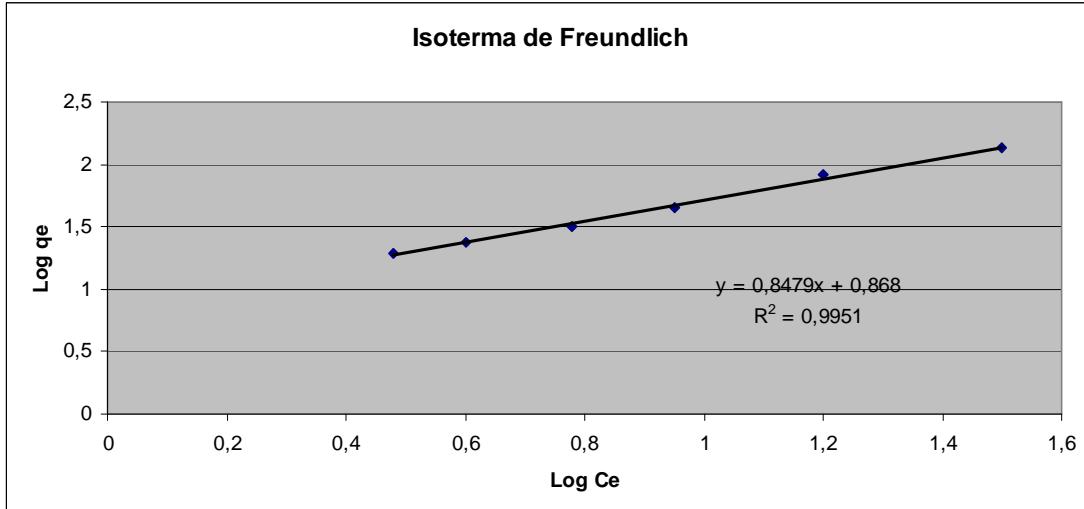


Figura 5.6. Isoterma de Freundlich carbón activo – cloro libre.

El paso siguiente es determinar los coeficientes de la isoterma de adsorción:

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan mediante la ecuación de la recta de la isoterma:

$$Y = 0,8479 x + 0,868$$

$$R^2 = 0,9951$$

Como la ecuación de Freundlich en forma lineal es la siguiente:

$$\log q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e + \log K_F \quad (\text{Ec.8})$$

Se obtienen los parámetros:

$$\text{Pendiente} = 1/n = 0,8479$$

$$\text{Log } K_F = 0,868 \rightarrow K_F = 10^{0,868} = 7,38 \text{ mg/g}$$

Por lo tanto la isoterma vendrá determinada por la siguiente ecuación:

$$q_e = 7,38 C_e^{0,8479}$$

5.3.4. DISEÑO DE LA COLUMNA.

Se necesita reducir el nivel de cloro libre de manera cualitativa, no hace falta calcular exactamente todos los parámetros, ya que no es necesario, debido a como se explico en el anexo A3.6, el carbón activo actúa como quimiadsorbente para la decoloración y aún cuando se halla saturado de materia orgánica puede seguir teniendo capacidad para decolorar.

Por ello se va a elegir uno de los mejores carbones en el mercado para decolorar:

Organosorb 10 CO, es un carbón de Desotec.

Entonces ahora se va a determinar el tiempo que se tarda hasta agotar la capacidad de decoloración de una columna de CAG cuando funciona con un caudal de 0,1 m³/h. fijando un radio de la columna de 0,5 m, y una profundidad de la columna de 1,5 m, y que son aplicables los datos de adsorción de la isoterma calculada anteriormente. La concentración entrante de cloro libre es de 0,95 mg/l, y de cloro combinado 0,18 mg/l que también se produce su eliminación, así es un total de 1,13 mg/l y la concentración de agotamiento se estima en 0,1 mg/l. La

densidad del CAG Organosorb 10 CO utilizado en la columna es de 600 Kg/m³ (véase Tabla 5.5).

A partir de la isoterma de adsorción de Freundlich obtenida, se calcula la capacidad de adsorción teórica (q_e)₀ para una concentración de cloro libre de 0,95 mg/l, más el cloro combinado de 0,18 mg/l.

$$q_e = 7,38 C_e^{0,8479}$$

$$(q_e)_0 = 0,0073 C_e^{0,8479} = 0,0073 \cdot 1,13^{0,8479} = 0,008 \text{ mg/mg}$$

Como la columna va a ser de sección circular, y se ha fijado un radio de 0,5 m, la superficie de la columna va a ser:

$$\pi \cdot r^2 = \pi \cdot (0,5)^2 = 0,785 \text{ m}^2$$

Se determina el tiempo de agotamiento empleando la ecuación

$$t_b = \frac{(q_e)_b M_c}{Q[C_i - (C_b/2)]}$$

Se suponen las siguientes condiciones:

$$(q_e)_b = 0,5 \quad (q_e)_0 = 0,5 \cdot 0,008 \text{ mg/mg} = 0,004 \text{ mg/mg}$$

M_c = masa de carbón contenido en la columna = Volumen · Densidad =>

$$\Rightarrow 0,785 \text{ m}^2 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 600 \text{ Kg/m}^3 = 706,5 \text{ Kg}$$

$$Q = \text{caudal} = 0,1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/día} = 2,4 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$C_i = \text{concentración a la entrada de la columna} = 1,13 \text{ mg/l}$$

$$C_b = \text{concentración al producirse el agotamiento} = 0,1 \text{ mg/l}$$

El tiempo de agotamiento será:

$$t_b = \frac{(0,004 \text{ mg/mg})(706,5 \text{ Kg})(1000 \text{ g/Kg})}{(2,4 \text{ m}^3/\text{día})(1,13 \text{ mg/l} - 0,05 \text{ mg/l})} = 1090$$

$$t_b = 1090 \text{ días} = 3 \text{ años}$$

El agua es bombeada dentro de la columna que contiene el carbón activo, el agua deja la columna a través de un sistema de drenaje.

El cual consiste en unas pequeñas tuberías en la parte baja de la columna que van evacuando el agua ya tratada al sistema de drenaje principal, como se puede observar en la figura 5.7.

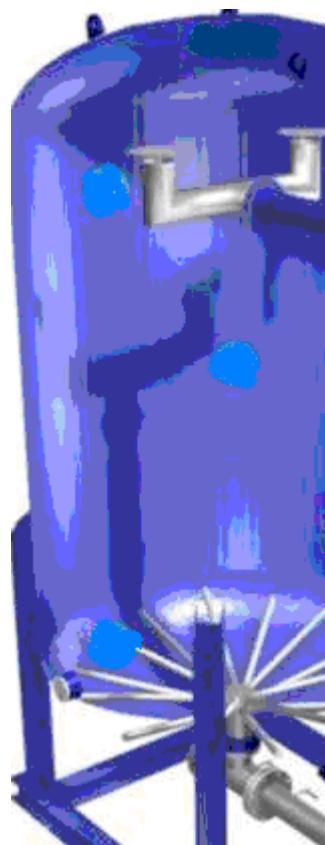


Figura 5.7. Sistema de drenaje de la columna de adsorción.

En resumen queda una columna con las características que se muestran en la tabla 5.8.

En esta columna de carbón activo no sólo se va a realizar la eliminación de cloro, sino también se va a producir reducción de materia orgánica, se va a calcular el tiempo de agotamiento para reducir la materia orgánica, así se elegirá el menor tiempo de agotamiento para cambiar el carbón activo de la columna, y que sólo sea necesaria una columna de adsorción en la planta de tratamiento. Se coge una isoterma de este tipo de carbón para materia orgánica que da como dato el fabricante de carbón, esta es:

$$Y = 3,558 x + 0,1908$$

$$R^2 = 0,9984$$

Como la ecuación de Freundlich en forma lineal es la siguiente:

$$\log q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e + \log K_F \quad (\text{Ec.8})$$

Se obtienen los parámetros:

$$\text{Pendiente} = 1/n = 3,558$$

$$\text{Log } K_F = 0,1908 \rightarrow K_F = 10^{0,1908} = 1,55 \text{ mg/g}$$

Por lo tanto la isoterma vendrá determinada por la siguiente ecuación:

$$q_e = 1,55 C_e^{3,558}$$

A partir de la isoterma de adsorción de Freundlich obtenida, se calcula la capacidad de adsorción teórica ($q_e)_0$ para una concentración de carbono orgánico total de 1,5 mg/l.

$$q_e = 1,55 C_e^{3,558}$$

$$(q_e)_0 = 0,0015 C_e^{3,558} = 0,0015 \cdot 1,5^{3,558} = 0,00635 \text{ mg/mg}$$

Teniendo el valor de la capacidad de adsorción teórica ($q_e)_0$, ya se tienen todos los datos para poder hallar el tiempo de agotamiento para la materia orgánica.

$$t_b = \frac{(q_e)_b M_c}{Q[C_i - (C_b/2)]}$$

Se suponen las siguientes condiciones:

$$(q_e)_b = 0,5 \quad (q_e)_0 = 0,5 \cdot 0,00635 \text{ mg/mg} = 0,0032 \text{ mg/mg}$$

M_c = masa de carbón contenido en la columna = Volumen · Densidad =>

$$\Rightarrow 0,785 \text{ m}^2 \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 600 \text{ Kg/m}^3 = 706,5 \text{ Kg}$$

$$Q = \text{caudal} = 0,1 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/día} = 2,4 \text{ m}^3/\text{día}$$

C_i = concentración a la entrada de la columna = 1,5 mg/l

C_b = concentración al producirse el agotamiento = 0,1 mg/l

Se halla C_b :

$$t_b = \frac{(0,0032 \text{ mg/mg})(706,5 \text{ Kg})(1000 \text{ g/Kg})}{(2,4 \text{ m}^3/\text{día})(1,5 \text{ mg/l} - 0,1/2 \text{ mg/l})} = 649,65 \text{ días}$$

El tiempo de agotamiento es menor para la materia orgánica así que habría que cambiar el carbón cada 649 días o lo que es lo mismo cada 1 año y 9 meses.

Tabla 5.8. Especificaciones de la columna de adsorción para la eliminación de cloro libre.

Especificación	Valor
Relleno	Organosorb 10 CO
Sección	Circular
Radio	0,5 m
Altura del lecho	1,5 m
Área de la sección	0,785 m ²
Volumen de carbón	1,178 m ³
Cantidad carbón	706,5 Kg
Total altura columna	2 m
Tiempo de agotamiento	1 año y 9 meses

5.3.5. REGENERACIÓN.

Como la columna de carbón debería ser regenerada cada 1 año y 9 meses, y el proceso de regeneración con vapor de agua a unos 250-300°C, no puede ser realizado por la comunidad, porque no merece la pena tener una caldera únicamente para eso, se podría mandar a un gestor de residuos para su regeneración, pero para evitar complicaciones de enviarlo cada año y 9 meses a un gestor de residuos, pagar transporte y gestor, se cambiará el carbón granular por nuevo cada período.

5.4. ÓSMOSIS INVERSA.

5.4.1. INTRODUCCIÓN Y MATERIA PRIMA.

La tercera etapa en el tratamiento, consiste en reducir las sales que haya en el agua para que esta posea una buena calidad, para ello se va a utilizar una membrana de ósmosis inversa, la cual no se verá dañada por materia en suspensión, ni por cloro debido al pretratamiento realizado.

Los parámetros del agua antes de entrar en la membrana de ósmosis inversa son los descritos en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9. Datos de partida antes de la etapa de ósmosis inversa.

Nombre	Resultado	Unidad de medida
Caudal	0,1	m ³ /h
Residuo seco	400	mg/l
Sulfatos	123	µg/l
C orgánico total	0,1	mg/l
Cl combinado	0,0	mg/l
Cl residual libre	0,1	mg/l
Cloruros	100	mg/l
Magnesio	14	mg/l
Potasio	15,6	mg/l
Calcio	82,9	mg/l
Sodio	70,3	mg/l
Dureza	262	mg/l CO ₃ Ca
Turbidez	0,1	UNF

5.4.2. SELECCIÓN DEL TIPO DE MEMBRANA.

El primer paso va a ser elegir la membrana adecuada para este proceso, cuyo fin consiste en reducir principalmente la dureza del agua, es decir reducir los valores de sales de calcio y magnesio en el agua del suministro de la ciudad de Zaragoza, sobre todo eliminar el carbonato de calcio (CaCO_3).

Como se menciona en el Anexo 4, hay diversos materiales para las membranas de ósmosis inversa, pero uno de los más utilizados es la poliamida, ya que tiene buen rechazo de sales, que es el fin de esta etapa, no es resistente al cloro pero como ha sido eliminado en la fase anterior no hay problema, como consecuencia la membrana seleccionada va a estar formada por poliamida.

La configuración seleccionada va a ser la de espiral, ya que ofrece una mayor superficie de contacto y es menos susceptible a partículas coloidales y turbiedades.

Membranas similares a la seleccionada se encuentran en el mercado, como por ejemplo el modelo de Dow Chemical FILMTEC TW30-4040 (Figura 5.8).

Todos los elementos FILMTEC de arrollamiento en espiral están basados en la membrana compuesta de capa delgada FT30, que desde hace tiempo ha establecido el estándar en la industria en cuanto a rendimiento de ósmosis inversa. La membrana FILMTEC FT30 está compuesta por tres capas: una capa de barrera de poliamida ultradelgada, una entrecapa de polisulfona microporosa y una malla de soporte de poliéster de alta resistencia. La malla no tejida proporciona el soporte estructural. La capa de barrera de poliamida proporciona un elevado caudal de agua, un nivel insuperable de rechazo de sílice y sal y una excelente resistencia a los productos químicos. La capa microporosa gruesa de soporte de polisulfona ofrece las características de porosidad y resistencia necesarias, y resiste la compactación bajo las condiciones de presión de la ósmosis inversa.

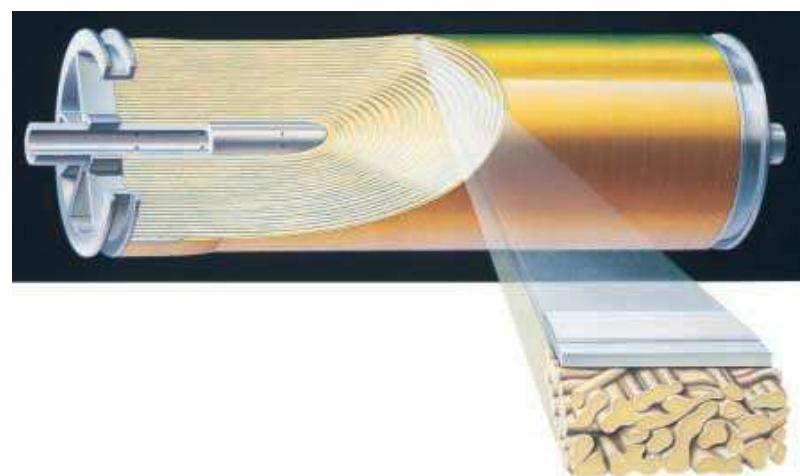


Figura 5.8. Membrana compuesta de capa delgada FT30, arrollamiento en espiral.

5.4.3. CÁLCULOS DE DISEÑO.

Para los cálculos se necesita saber el caudal volumétrico a la entrada, el cual va a ser el caudal que sale de la columna de adsorción, es decir $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, el contenido de CaCO_3 que es la sustancia principal que se quiere reducir, aunque se reduzcan todas las sales que contiene el agua, las cantidades iniciales de los parámetros son los citados en la Tabla 5.9.

Los parámetros de la membrana seleccionada son los mostrados en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10. Parámetros de la membrana seleccionada.

Parámetro	Valor
Factor de recuperación (C)	85 %
Factor de rechazo de sales (R)	95 - 99 %
Superficie (S)	$7,6 \text{ m}^2$
Presión	30 bar
Temperatura	25°C
Constante K_a	$0,32 \text{ Kg/ m}^2 \cdot \text{min}$

Los factores de rechazo varían levemente según la sal a eliminar, en la membrana seleccionada, son los mostrados en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11. Factores de rechazo según la sal a eliminar.

Nombre	Factor de rechazo
Sulfatos	99 %
Cloruros	99 %
Magnesio	98 %
Potasio	96 %
Calcio	97 %
Sodio	99 %
Dureza	99 %

En primer lugar se va a hallar el valor de la presión osmótica necesaria para eliminar el CaCO_3 , del cual se tienen 262 mg/l.

$$\frac{0,262 \text{ g CaCO}_3}{1} \cdot \frac{1 \text{ mol}}{100 \text{ g CaCO}_3} = 0,00262 \frac{\text{mol}}{1}$$

$$\pi = c \cdot R \cdot T \quad (\text{Ec.13})$$

Donde:

π = presión ósmotica (atm)

c = concentración de la solución (moles/litro)

R = constante de los gases ideales = 0,082 $\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

T = temperatura (K)

Sabiendo que las condiciones de la membrana son 25°C, se puede hallar la presión osmótica:

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$\pi = 0,00262 \frac{\text{mol}}{1} \times 0,082 \frac{\text{atm} \cdot 1}{\text{mol} \cdot \text{k}} \times 298 \text{ K} = 0,064 \text{ atm} = 6487,06 \text{ Pa}$$

Ahora se van a hacer los mismos cálculos para hallar las presiones osmóticas para la eliminación el resto de sales (Tabla 5.12), y se sumarán todas para obtener la presión osmótica total.

Tabla 5.12. Presiones osmóticas necesarias para la eliminación de diversas sustancias.

Sustancia	mol/l	Presión osmótica (atm)
Cloruros	0,0033	0,08
Magnesio	0,000056	0,013
Potasio	0,000399	0,0097
Calcio	0,00207	0,05
Sodio	0,0036	0,088
Sulfatos	0,0013	0,031

Entonces la presión osmótica total necesaria resulta:

$$\pi = 0,3357 \text{ atm} = 34014,8 \text{ Pa}$$

Superficie de la membrana requerida:

Para hallar la superficie de la membrana se aplicará la siguiente ecuación:

$$Q_{ap} = K_a (p - \pi) \cdot S \quad (\text{Ec.16})$$

Se conocen todos los datos de la ecuación, pero se debe efectuar alguna transformación de unidades:

Recuperación:

$$C = 100 \frac{Q_{ap}}{Q_{aa}} \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

Q_{ap} = caudal de agua permeada

Q_{aa} = caudal de la corriente de alimentación = $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$

$$85 = 100 \frac{Q_{ap}}{0,1 \text{ m}^3/\text{h}} \rightarrow Q_{ap} = 0,085 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 85 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q_{ap} = 85 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \frac{1 \text{ kmol}}{18,02 \text{ kg}} \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} = 1,31 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Ahora se tiene que transformar K_a en las unidades adecuadas ($\text{mol} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$):

$$K_a = 0,32 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} \frac{1 \text{ kmol}}{18,02 \text{ kg}} \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} \frac{1 \text{ m}^2}{10^4 \text{ cm}^2} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 2,95 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

La presión en la membrana son 30 bar = 29,61 atm

$$2,95 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \div 29,61 \text{ atm} = 9,96 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}}$$

Una vez con todos estos valores se sustituye la superficie en la ecuación:

$$S = \frac{Q_{ap}}{K_a (p - \pi)} = \frac{1,31 \frac{\text{mol}}{\text{s}}}{9,96 \cdot 10^{-7} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}} \cdot (29,61 - 0,3357) \text{ atm}} = 44928 \text{ cm}^2 = 4,49 \text{ m}^2$$

Como son $4,49 \text{ m}^2$ con la membrana elegida que tiene $7,2 \text{ m}^2$, se tiene suficiente para que se produzca la reducción de carbonato cálcico requerida.

El diagrama de bloques del proceso de ósmosis inversa es el de la figura 5.9:

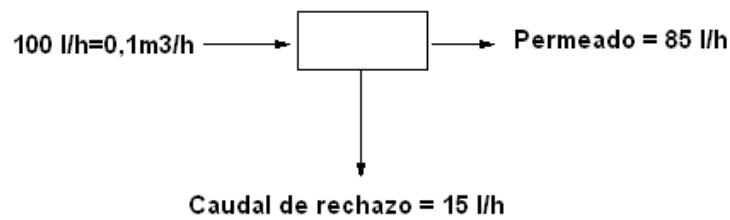


Figura 5.9. Diagrama de bloques.

Ahora se va a realizar el balance al carbonato cárlico, el contenido inicial en CaCO_3 es 262 mg/l, es decir en $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$ se tienen 26,2 g de CaCO_3 o lo que es lo mismo, pasan 26,2 g/h de CaCO_3 por la membrana de ósmosis inversa, como tiene un factor de rechazo entre 95 - 99 %, quedará en el agua permeada 0,262 g/h de CaCO_3 o 2,62 mg/l.

Tabla 5.13. Especificaciones de la membrana de ósmosis inversa.

Especificación	Valor
Forma	Espiral
Área	$7,2 \text{ m}^2$
Caudal de entrada	$0,1 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de permeado	$0,085 \text{ m}^3/\text{h}$
Caudal de rechazo	$0,015 \text{ m}^3/\text{h}$
Constante K_a	$0,32 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}$
Rechazo sales	95 - 99 %
Presión	30 bar
Temperatura	25°C
Diámetro	10 cm
Largo	1 m

Mediante la ósmosis inversa se ven reducidas todas las sales del agua, las concentraciones finales de sales en el permeado y en el rechazo quedan como se muestran en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14. Concentración de sales en el permeado y en el rechazo.

Sustancia	Permeado (mg/l)	Rechazo (mg/l)
Dureza	3,08	1729,2
Cloruros	1,18	660
Magnesio	0,33	91,47
Potasio	0,73	99,84
Calcio	2,92	536,08
Sodio	0,83	463,98
Sulfatos	1,45 (µg/l)	811,8 (µg/l)

El caudal del rechazo, como no es un efluente que posea contaminantes, sino un agua de mineralización fuerte, con altas concentraciones de sales, se puede echar por el desagüe, así la tubería de rechazo irá directamente al alcantarillado.

El agua totalmente tratada queda con las características mostradas en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15. Características finales del agua tratada.

Nombre	Resultado	Unidad de medida
Caudal	0,085	m ³ /h
Residuo seco	30	mg/l
Sulfatos	1,45	µg/l
C orgánico total	0,1	mg/l
Cl combinado	0,0	mg/l
Cl residual libre	0,1	mg/l
Cloruros	1,18	mg/l
Magnesio	0,33	mg/l
Potasio	0,73	mg/l
Calcio	2,92	mg/l
Sodio	0,83	mg/l
Dureza	3,08	mg/l CO ₃ Ca
Turbidez	0,1	UNF

5.4.3. MANTENIMIENTO DE LA MEMBRANA.

Cualquier instalación de OI presentará a medio o largo plazo problemas de ensuciamiento de las membranas que hacen necesaria la realización de limpiezas. El protocolo de limpieza dependerá del tipo de depósito (biopelícula, materia orgánica, depósitos inorgánicos o de naturaleza coloidal) presente en las membranas por lo que es imprescindible su caracterización.

En este caso al haber tratado anteriormente el agua para quitarle las partículas en suspensión y el cloro, el mayor problema de ensuciamiento lo dará el carbonato cálcico.

Los cristales de carbonato cálcico se originan muy rápidamente debido a la elevada cinética de precipitación de este compuesto. Estas incrustaciones, las

más comunes en instalaciones de OI, presentan como efectos inmediatos una brusca disminución del caudal, aumento de la salinidad y de la presión diferencial. Este efecto es más acusado en las membranas situadas en las últimas posiciones de la instalación, siendo este hecho común para cualquier tipo de incrustación.

El carbonato cálcico es una incrustación cuya limpieza es muy sencilla, ya que cualquier ácido fuerte disolverá estos cristales.

Existen dos tipos de limpiadores de membrana: ácidos y alcalinos. El alcalino es más efectivo con la contaminación biológica y, en general, se utiliza primero. El ácido es más efectivo con la contaminación mineral (por ejemplo, calcio) pero sólo se utiliza si el alcalino no puede recuperar los caudales de agua producida. En este caso se usará el ácido para eliminar las incrustaciones de carbonato cálcico que se produzcan. Para limpiar una membrana, primero debe enjuagarse con agua limpia y luego se mezcla la solución ácida con agua limpia en un balde. Se despresuriza la unidad. Se hace funcionar la unidad durante una hora para que la solución circule a través de la membrana, se la deja descansar durante otra hora y se la hace funcionar nuevamente durante 15 minutos aproximadamente. Luego de esto, se vuelve a hacer funcionar al sistema, sin presión, durante 15 minutos para terminar de sacar la solución de limpieza, antes de volver a hacer que funcione en forma regular. Una vez más, el agua producida inicial necesitará descargarse fuera del sistema, en forma manual o automática. Y después de esto ya podrá funcionar de manera normal.

La limpieza de la membrana se realizará cuando se aprecie una reducción del caudal de permeado, por lo que a la salida se dispondrá de un caudalímetro para tener esta información, se recomienda que hay que limpiar la membrana de ósmosis inversa cada vez que sea necesario o una vez cada cinco años (promedio). Las membranas de ósmosis inversa (O.I.) tienen una duración aproximada de cinco años, pudiendo durar hasta diez años, con un cuidado y funcionamiento correctos.

Así que sino se aprecia una reducción del caudal permeado, se realizará su limpieza cada 5 años.

6. ACCESORIOS.

6.1.TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

El tanque final de almacenamiento (Figura 6.1) tiene como función, acumular agua para cinco días por los problemas que se pudieran dar en la planta de tratamiento, debido a limpieza del filtro, cambios de carbón de las columnas de adsorción o limpieza de la membrana de ósmosis inversa.

Así va a tener una capacidad de 10000 litros. Va a ser un depósito en forma de cilindro con un radio de 1,3 m y una altura de 2 m, para que su volumen sea:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h = \pi \cdot (1,3)^2 \cdot 2 = 10,6m^3$$

Así el volumen de agua alojado en su interior serán 10 m³ o lo que es lo mismo 10000 litros.

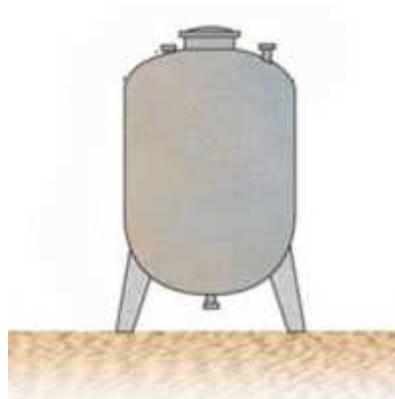


Figura 6.1.Tanque de almacenamiento.

El depósito será de poliéster ($C_{10}H_8O_4$) reforzado con fibra de vidrio. El poliéster es una categoría de polímeros que contiene el grupo funcional éster en su cadena principal. El poliéster es una resina termoestable obtenida por polimerización del estireno y otros productos químicos. Se endurece a la temperatura ordinaria y es muy resistente a la humedad, a los productos químicos y a las fuerzas mecánicas. Tienen innumerables ventajas, aúnan la dureza del acero con las cualidades del plástico:

- ✓ Indicados para usos alimenticios
- ✓ Espesores homogéneos

- ✓ Resisten temperaturas de 0º a 60º
- ✓ Estabilidad ante los cambios de temperatura
- ✓ No transmiten olor, ni sabor, ni color
- ✓ No crean ni desarrollan microorganismos
- ✓ Aspecto interior espejo
- ✓ Fácil limpieza
- ✓ No sufren envejecimiento y no necesitan mantenimiento
- ✓ Gran resistencia química y mecánica
- ✓ Facilidad de reparación ante rotura mecánica
- ✓ Son sólidos, ligeros y fáciles de transportar

6.2. TUBERÍAS.

Una gran variedad de tubos y otros conductos se encuentra disponible para el abastecimiento de líquidos a los componentes mecánicos, o desde una fuente de abastecimiento a una máquina.

Existen en el mercado diferentes tipos de tubos según su función y según su material de fabricación.

- Tubería Metálica.

- Tubos flexibles y otros especiales.

- Tubo de plástico.

Como el tubo de plástico no se corroe y tiene resistencia para un amplio grupo de substancias químicas industriales, se emplea mucho en lugar del tubo metálico.

La planta de tratamiento de agua potable diseñada cuenta con seis tuberías. Estas tuberías transportan agua a temperatura ambiente. Por esto, se ha elegido polietileno como material de fabricación de las tuberías, que serán electrosoldables (Figura 6.2). El polietileno no comunica olor ni sabor alguno a su contenido, es ligero, tiene baja resistencia al movimiento de fluidos, resiste a la intemperie. Se va a necesitar en el diseño de la planta como se puede observar en el plano, 19,7 m de tuberías, las cuales como lo que van a transportar es agua potable, serán de polietileno negro con banda azul, y serán suministradas por la empresa Pipelife S.A..



Figura 6.2. Uniones de tuberías electrosoldables.

Para dimensionar las tuberías se va a seleccionar una velocidad adecuada para el agua, y se calcula el diámetro necesario.

La velocidad adecuada para líquidos poco viscosos como el agua es de 0,15 a 0,3 m/s (McCabe/Smith/Harriot).

Ahora se van a realizar los cálculos necesarios para saber el diámetro adecuado de las tuberías.

En la instalación el máximo caudal a transportar es $0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, como este es el caudal volumétrico, ya se pueden realizar los cálculos.

Caudal = Sección x Velocidad

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 v$$

$$0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = \frac{\pi}{4} (D)^2 \cdot 720 \frac{\text{m}}{\text{h}} \Rightarrow D = 0,0133 \text{ m} = 1,33 \text{ cm}$$

El espesor de las tuberías va a ser 2 mm, ya que como no hay ningún punto en el que la presión sea grande, ni una velocidad superior, así que se escoge la tubería HERSGUA de 1,35 cm de diámetro y 2 mm de espesor.

El resto de resultados para todas las tuberías de la instalación se encuentran en la tabla 6.1. La numeración de las tuberías queda indicada en el plano.

Tabla 6.1. Resumen de las características de las tuberías del sistema.

Nº de	D (m)	Q (l)	v	L	e	Material
1	0,0133	0,1	0,2	5	2	PE 100
2	0,0133	0,1	0,2	4	2	PE 100
3	0,0133	0,1	0,2	2	2	PE 100
4	0,005	0,015	0,2	0,3	2	PE 100
5	0,0122	0,085	0,2	6	2	PE 100
6	0,0122	0,085	0,2	1,2	2	PE 100

6.3. BOMBAS.

Existen muchos tipos de bombas para diferentes aplicaciones. Los factores más importantes que permiten escoger un sistema de bombeo adecuado son: presión última, presión de proceso, velocidad de bombeo, tipo de gases o líquidos a bombear.

En la planta de tratamiento como lo que se trata es agua, no es necesario bombas resistentes a líquidos ácidos, calientes ni características extremas, así como el caudal es pequeño, la potencia de las bombas es mínima por lo que se van a escoger las bombas más simples del mercado (Figura 6.3), que son centrífugas del menor rango de potencia.

Las bombas Grundfos CM han sido diseñadas para cubrir una amplia variedad de aplicaciones, desde pequeñas instalaciones domésticas a grandes sistemas industriales, por lo que se adaptan a cualquier aplicación en la que se requiera aumento de presión.

La bomba y el motor están integrados en un diseño compacto y de fácil uso. La bomba está unida a una placa base de perfil bajo, idónea para su instalación en sistemas en los que el espacio resulta importante. También cabe destacar su bajo nivel de ruido gracias a su motor e hidráulica de elevado rendimiento.

La gama de bombas CM también está disponibles en versión electrónica, denominándose Grundfos CME. Todas las CME incorporan variador de frecuencia integrado que permite un control continuo sobre la velocidad del motor, por lo que la bomba puede ajustarse para operar en cualquier punto de trabajo de su curva característica.

Las ventajas primordiales de una bomba CM son la simplicidad, el bajo costo inicial, el flujo uniforme, los costos bajos de mantenimiento y el funcionamiento silencioso.



Figura 6.3. Tipo de bomba seleccionada.

Se van a realizar los cálculos para la primera bomba necesaria en el proceso, la cual eleva el agua de la tubería de entrada que está a 1 m de altura hasta el filtro granular que tiene una altura de 3 metros.

Se comienza con la ecuación de Bernouilli:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_B = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

v = velocidad del fluido en la sección considerada.

g = aceleración gravitatoria

z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

p = presión a lo largo de la línea de corriente.

ρ = densidad del fluido.

Como la presión, velocidad y la densidad son constantes, se eliminan de la ecuación, obteniendo como resultado la siguiente expresión:

$$z_1 + H_B = z_2$$

$$z_1 = 1 \text{ m} \quad z_2 = 4 \text{ m} \quad H_B = 3 \text{ m}$$

La potencia se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = \rho \cdot g \cdot H_B \cdot Q$$

$$P = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 3 \text{ m} \cdot 0,000028 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0,823 \text{ W}$$

Así que se cogerán las bombas más simples y económicas del mercado, porque es mínima la fuerza que tienen que hacer al ser el caudal tan pequeño.

Las bombas seleccionadas son CM 1-2 A, las cuales tienen las siguientes características:

Datos técnicos:

- Caudal, Q: máx. 2,5 m³/h
- Altura, H: máx. 18 m
- Temperatura líquido: 0 °C a +40 °C
- Peso: 12 kg

Aplicaciones:

- Casas de una o dos viviendas
- Casas de campo
- Granjas

Características y beneficios:

- Unidad completa de aumento de presión
- Fácil de instalar
- Fácil de manejar
- Protección contra marcha en seco con rearne automático
- Silenciosa
- Sin mantenimiento.

Ahora se cita la función de cada bomba, las cuales están enumeradas en el plano, y se dan sus características en la tabla 6.2.

Bomba 1: Subir el agua de la tubería de entrada al filtro granular.

Bomba 2: Subir el agua de la tubería de salida del filtro granular a la columna de adsorción de carbón activo.

Bomba 3: Subir el agua de la tubería de salida de la ósmosis inversa hasta la entrada al tanque de almacenamiento.

Tabla 6.2. Potencias de las bombas de la planta de tratamiento.

Nº de bomba	Potencia necesaria (W)	Tipo
1	0,823	CM
2	0,55	CM
3	0,46	CM

7. PRESUPUESTO

7.1. MEDICIONES.

CAPITULO 1: Filtración granular.

Código	Descripción	Totales	Precio (€)	Importe (€)
1	Filtro granular de limo, con unas medidas de 3 m de alto y 0.8 m de diámetro provisto con sistema de drenaje.	1		
2	Bomba CM1-2 A que aporta presión al agua de la tubería de entrada hasta la entrada superior del filtro Granular (3m).	1		

CAPITULO 2: Adsorción mediante carbón activo.

Código	Descripción	Totales	Precio (€)	Importe (€)
3	Torre de adsorción con carbón activo Organosorb 10 CO para la decoloración con unas dimensiones de 2 m de alto y 1 m de diámetro.	1		
4	Bomba CM1-2A que aporta presión al agua de la tubería de salida del filtro granular hasta la entrada de la torre de adsorción (2 m).	1		
5	Bomba CM1-2 A que aporta presión al agua para que entre en el tanque de almacenamiento (2 m).	1		

CAPITULO 3: Ósmosis inversa.

Código	Descripción	Totales	Precio (€)	Importe (€)
6	Membrana FILMTEC TW30-4040.	1		

CAPITULO 4: Almacenamiento.

Código	Descripción	Totales	Precio (€)	Importe (€)
7	Tanque de almacenamiento de 10000 litros, con unas dimensiones de 2,6 m de diámetro y 2 m de altura, fabricado en poliéster.	1		

CAPITULO 5: Tuberías.

Código	Descripción	Totales (m)	Precio (€)	Importe (€)
8	Tubería de 1,33 cm de diámetro y de polietileno, modelo HERSAQUA.	11		
9	Tubería de 1,22 cm de diámetro y de polietileno, modelo HERSAQUA.	7,2		

7.2. PRECIOS UNITARIOS.

CAPITULO 1: Filtración granular.

Código	Descripción	Totales	Subtotal (€)	Importe (€)
1	Filtro granular de limo, con unas medidas de 3 m de alto y 0.8 m de diámetro provisto con sistema de drenaje.		4880	
2	Bomba CM1-2 A que aporta presión al agua de la tubería de entrada hasta la entrada superior del filtro Granular (3m).		238	

CAPITULO 2: Adsorción mediante carbón activo.

Código	Descripción	Totales	Subtotal	Importe
		(€)	(€)	(€)
3	Torre de adsorción con carbón activo Organosorb 10 CO para la declaración con unas dimensiones de 2 m de alto y 1 m de diámetro.		4375	
4	Bomba CM1-2A que aporta presión al agua de la tubería de salida del filtro granular hasta la entrada de la torre de adsorción (2 m).		238	
5	Bomba CM1-2 A que aporta presión al agua para que entre en el tanque de almacenamiento (2 m).		238	

CAPITULO 3: Ósmosis inversa.

Código	Descripción	Totales	Subtotal	Importe
			(€)	(€)
6	Membrana FILMTEC TW30-4040.	3250		

CAPITULO 4: Almacenamiento.

Código	Descripción	Totales	Subtotal	Importe
			(€)	(€)
7	Tanque de almacenamiento de 10000 litros, con unas dimensiones de 2,6 m de diámetro y 2 m de altura, fabricado en poliéster.	2875		

CAPITULO 5: Tuberías.

Código	Descripción	Totales (m)	Subtotal (€)	Importe (€)
8	Tubería de 1,33 cm de diámetro y de polietileno, modelo HERSAQUA.		2,5	
9	Tubería de 1,22 cm de diámetro y de polietileno, modelo HERSAQUA.		2,3	

7.3 PRECIOS PARCIALES

CAPITULO 1: Filtración granular.

Código	Descripción	Totales	Precio unidad (€)	Importe (€)
1	Filtro granular de limo, con unas medidas de 3 m de alto y 0.8 m de diámetro provisto con sistema de drenaje.	1	4880	4880
2	Bomba CM1-2 A que aporta presión al agua de la tubería de entrada hasta la entrada superior del filtro Granular (3m).	1	238	238
Suma total del capítulo 1:				5118

CAPITULO 2: Adsorción mediante carbón activo.

Código	Descripción	Totales	Precio unidad (€)	Importe (€)
3	Torre de adsorción con carbón activo Organosorb 10 CO para la declaración con unas dimensiones de 2 m de alto y 1 m de diámetro.	1	4375	4375
4	Bomba CM1-2A que aporta presión agua de la tubería de salida del filtro granular hasta la entrada de la torre de adsorción (2 m).	1	238	238
5	Bomba CM1-2A que aporta presión al agua para que entre en el tanque de almacenamiento (2 m).	1	238	238
Suma total del capítulo 2:				4851

CAPITULO 3: Ósmosis inversa.

Código	Descripción	Totales	Precio unidad (€)	Importe (€)
6	Membrana FILMTEC TW30-4040.	1	3250	3250
Suma total del capítulo 3:				3250

CAPITULO 4: Almacenamiento.

Código	Descripción	Totales	Precio unidad (€)	Importe (€)
7	Tanque de almacenamiento de 10000 litros, con unas dimensiones de 2,6 m de diámetro y 2 m de altura, fabricado en poliéster.	1	2875	2875
Suma total del capítulo 4:				2875

CAPITULO 5: Tuberías.

Código	Descripción	Totales (m)	Precio unidad (€)	Importe (€)
8	Tubería de 1,33 cm de diámetro y de polietileno, modelo HERSGUA.	11	2,5	27,5
9	Tubería de 1,22 cm de diámetro y de polietileno, modelo HERSGUA.	7,2	2,3	16,50
Suma total del capítulo 5:				44

6.4 RESUMEN DE CAPITULOS.

CAPITULO 1	Filtración granular.	5118
CAPITULO 2	Adsorción mediante carbón activo	4851
CAPITULO 3	Ósmosis inversa	3250
CAPITULO 4	Almacenamiento	2875
CAPITULO 5	Tuberías	44

Total de la ejecución material

El presupuesto total de la ejecución material del proyecto asciende a: DIECISEIS MIL CIENTO TREINTA Y OCHO euros.

13% GASTOS GENERALES 2097,94

MATERIAL Y MANO DE OBRA 18235,94

18% IVA 3282,47

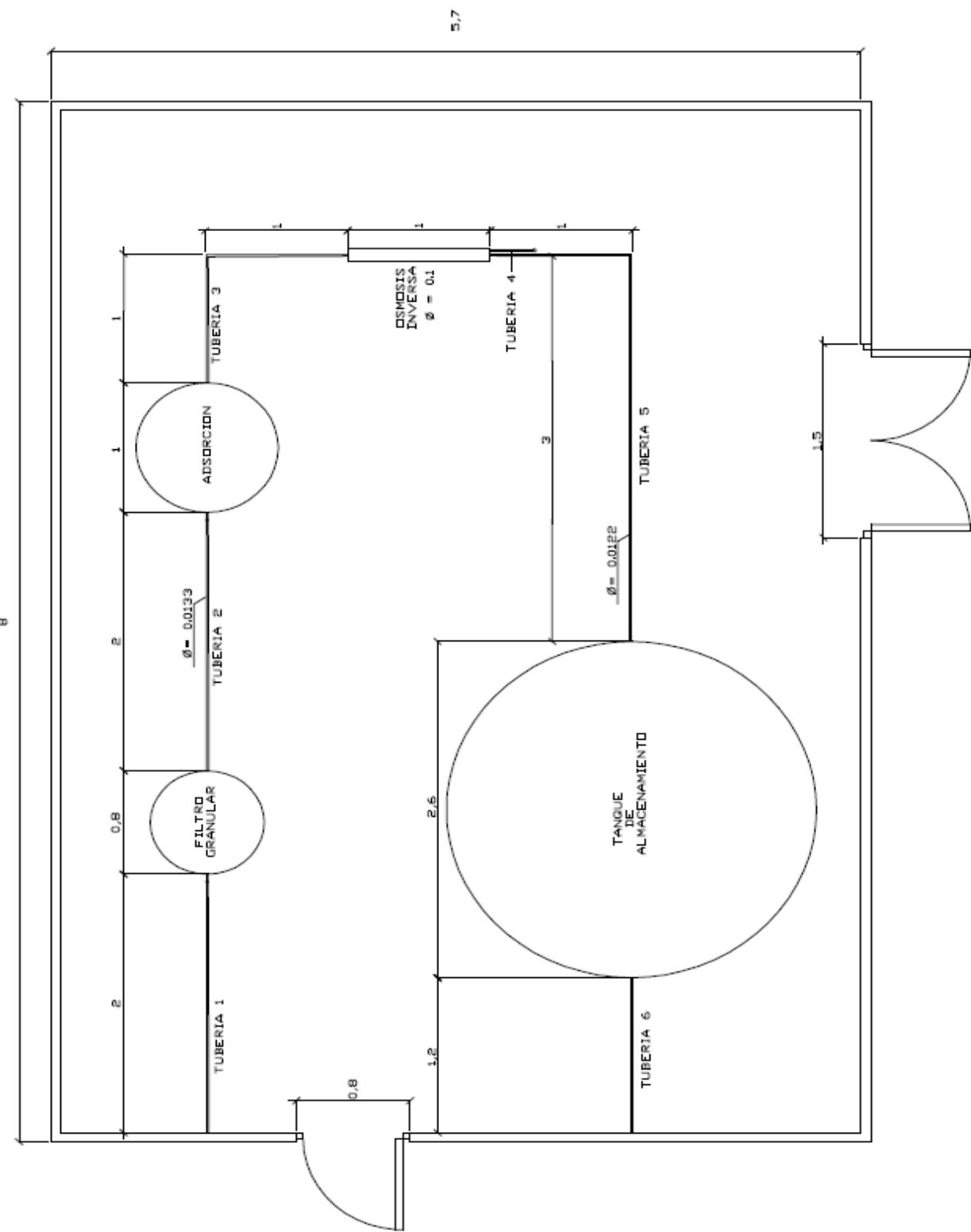
TOTAL 21518,41

El presupuesto total de la ejecución por contrata impuestos incluidos del proyecto asciende a: VEINTIUN MIL QUINIENTOS DIECIOCHO COMA CUARENTA Y UNO céntimos de euro de euro.

Zaragoza, a 31 de Agosto de 2010.

Fdo.:

8. PLANO.



9. ANEXOS

ANEXO 1:

POTABILIZACIÓN DEL

AGUA

A1.1. CONTAMINANTES DEL AGUA.

- Color: El color natural del agua se debe a la presencia de algunos iones metálicos como el hierro y manganeso, plancton y extractos vegetales. Las aguas que tienen coloración debido a sustancias naturales en descomposición, normalmente no son consideradas como tóxicas o perjudiciales; sin embargo, cuando la intensidad del color es demasiada alta se presenta el problema de que no es aceptada estéticamente hasta no haber sido tratada.
- Conductividad eléctrica: es la medida de la cantidad de iones presentes en el agua. Su utilidad analítica da una idea de las concentraciones de los minerales disueltos en una muestra de agua.
- Olor: el olor de las aguas proviene de las impurezas producidas durante los procesos de putrefacción o descomposición biológica de sustancias orgánicas de origen animal o vegetal; tales como el amoniaco, aminas y las de origen inorgánico como el ácido sulfídrico, entre otras.
- Potencial de hidrógeno: El pH es un término que se utiliza para definir en qué condiciones de acidez o de alcalinidad se encuentra una solución
- Sabor: cuando se presentan olores y sabores desagradables provenientes de las impurezas durante los procesos de putrefacción o descomposición biológica de sustancias orgánicas de origen animal o vegetal son indeseables para consumo humano.
- Sólidos totales: los sólidos totales son la adición de los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos. En el caso de las aguas para beber, el índice de sólidos que más interesan desde el punto de vista analítico son los sólidos totales
- Temperatura: esta propiedad termodinámica influye notablemente en muchas de las características físicas, químicas y biológicas del agua. Por ejemplo, el aumento de temperatura disminuye el oxígeno disuelto del agua, lo cual puede alterar la flora y fauna en ella existente, la densidad, conductividad y pH se ven afectados por variaciones de temperatura.

- Turbiedad: es debida a la presencia de partículas de material suspendido, que varía desde arcilla a materia orgánica e inorgánica diluida. La turbiedad tiene una importante aplicación ya que al aumentar la turbidez aumenta el costo de tratamiento del agua.

- Acidez: la acidez del agua se puede deber a la presencia de dióxido de carbono no combinado, de ácidos minerales o de sales de ácidos fuertes y de bases débiles. Las aguas ácidas poseen propiedades corrosivas atacando cualquier tipo de tubería utilizada, alteran el pH provocando reacciones secundarias y rompen el ciclo ecológico del agua.

- Alcalinidad: es una medida de su capacidad para neutralizar ácidos, los materiales que pueden contribuir a la alcalinidad en aguas naturales o tratadas, se debe principalmente a la presencia de: hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos presentes.

- Aniones:

- Cloruros: son aniones que están presentes en el agua en diversas concentraciones y normalmente se incrementan con el contenido mineral. Provienen de la disolución de rocas y suelos. Los cloruros en proporciones razonables no son dañinos a la salud, pero en concentraciones superiores a 250 miligramos por litro dan sabor salino al agua siendo desagradable para el consumo humano. Su combinación en exceso con el sodio da un sabor salado también, actuando como laxante.

- Nitratos: Los diferentes tipos de nitrógeno son de gran interés, debido a la importancia que tienen en los procesos de la vida de plantas y animales. No deben encontrarse en el agua de abastecimiento en valores superiores a 45 partes por millón.

- Sulfatos: los iones sulfato están frecuentemente en las aguas naturales debido al poder de disolución que tiene el agua sobre los minerales de la corteza terrestre. Un exceso de sales de sulfatos en aguas de consumo humano, puede laxar a las personas que lo ingieren y su combinación con otros iones imparte al agua sabor desagradable.

- Dureza: representa la concentración total de iones de calcio y magnesio.
- Cloro residual: La cloración del agua de suministro y del agua contaminada sirve principalmente para destruir microorganismos. Pero puede producir efectos diversos como la formación de compuestos orgánicos principalmente carcinogénicos.
- Cationes:
- Calcio: el calcio en el agua proviene de casi todo tipo de suelos y rocas, pero en especial de las calizas, las dolomitas y el yeso.
- Cobre: Las sales de cobre eran utilizadas en el suministro de agua potable en los sistemas para el control del crecimiento biológico; además muchas de las tuberías antes utilizadas eran de cobre; de ahí que había presencia de cobre en el agua. La ingestión de cantidades excesivas de sales de cobre por vía oral, como el sulfato de cobre, puede producir la muerte.
- Hierro: El hierro proviene de la disolución de suelos, rocas. Concentraciones mayores de 1 o 2 mg / litro, indican generalmente desechos de zonas mineras y otras fuentes; se encuentra como ion ferroso en pozos profundos y como ion férrico en aguas superficiales. Desde el punto de vista sanitario el hierro tiene gran importancia dado que, a determinadas concentraciones contribuye al desarrollo de ciertas bacterias, que al contacto con materiales orgánicos produce sabores desagradables y coloración café rojiza, haciéndose indeseable para consumo humano.
- Magnesio: El magnesio proviene de la disolución de la mayoría de los suelos y rocas, pero especialmente de las dolomitas. Provoca problemas al formar incrustaciones en las líneas de conducción de agua.
- Manganoso: El manganoso se origina a partir de la disolución de algunos suelos y rocas. Causa sabor y coloración desagradable en el agua; además es incrustante en tuberías y válvulas.
- Sodio: El sodio proviene de la disolución de la mayoría de las rocas y suelos. :

- Patógenos: Pueden ser virus, bacterias, protozoos u otro tipo de organismos patógenos que pueden afectar negativamente a la salud del consumidor. Pueden provenir de las aguas residuales tanto de humanos como de animales que contaminan los recursos de agua.

- Contaminantes orgánicos: Los compuestos orgánicos son compuestos formados por enlaces largos, generalmente de carbono. Muchos compuestos orgánicos son tejidos básicos de los organismos vivos.

El comportamiento de los compuestos orgánicos depende de su estructura molecular, tamaño y forma y de la presencia de grupos funcionales que son determinantes importantes de la toxicidad.

Existen muchos tipos diferentes de contaminantes orgánicos, algunos ejemplos son:

- o Hidrocarburos.
- o Los PCB's (policlorobifenilos o bifenilos policlorados).
- o Los insecticidas tales como el DDT (1,1,1-Tricloro-2,2-bis(4-clorofenil)-etano).
- o Detergentes

A1.2. PROCESO DE POTABILIZACIÓN: INTRODUCCIÓN.

El agua absorbe rápidamente tanto las sustancias naturales como las producidas por el hombre, generalmente convirtiendo el agua en inadecuada para su consumo sin algún tipo de tratamiento.

Algunas aguas pueden ser naturalmente potables y otras pueden necesitar un tratamiento corrector previo a su entrega al consumo.

Las aguas provenientes de fuentes subterráneas profundas, galerías filtrantes o manantiales, pueden ser entregadas directamente al consumo, siempre que sean químicamente apropiadas y si se tiene en cuenta todas las previsiones necesarias en su captación para evitar su contaminación. Es decir, esta agua es en general naturalmente potable. Sólo se recomienda un tratamiento con cloro para resguardarla de cualquier contaminación accidental en la red de distribución.

Cuando el agua no es naturalmente potable habrá que hacer un tratamiento corrector, como sucede con las aguas superficiales. A continuación se explican de forma resumida los tratamientos correctores más frecuentes para un agua superficial.

A1.3. CAPTACIÓN DEL AGUA.

El agua que entra en la planta potabilizadora se recoge del medio natural y proviene generalmente de los ríos y acuíferos.

A1.4. DESBASTE.

El desbaste se realiza normalmente mediante rejas y tiene por objeto:

- Proteger a la estación de la posible llegada de grandes objetos capaces de provocar obstrucciones en las distintas unidades de la instalación
- Separar y evacuar fácilmente las materias voluminosas arrastradas por el agua bruta, que podrían disminuir la eficacia de los tratamientos siguientes, o complicar la realización de los mismos.

La operación puede ser más o menos eficaz, según la separación entre los barrotes de la reja. Pueden distinguirse:

- Desbaste fino, con una separación de 3 a 10 mm,
- Desbaste medio, con una separación de 10 a 25 mm,
- Predesbaste, con una separación de 50 a 100 mm,

Las rejas utilizadas en el desbaste pueden ser de limpieza manual como se puede observar en la Figura A1.1, o de limpieza automática, llamadas rejas mecánicas. Una reja mecánica va normalmente protegida por una pre-reja de barrotes más espaciados.

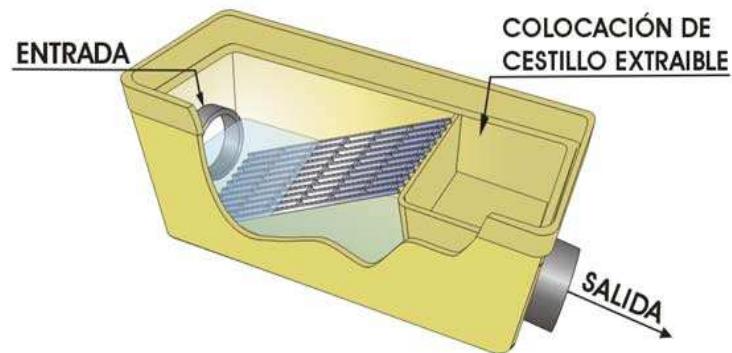


Figura A1.1. Reja de desbaste manual.

A1.5. DESARENADO.

El desarenado tiene por objeto, extraer del agua bruta la grava, arena y partículas minerales más o menos finas, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión, y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguientes.

El desarenado se refiere normalmente a las partículas superiores a 200 micras. Una granulometría inferior corresponde a los procesos de pre-decantación o decantación. Existen tres tipos de desarenadores fundamentales: desarenadores de flujo horizontal, desarenadores de flujo vertical (Figura A1.2) y desarenadores de flujo inducido (Figura A1.3).

Los desarenadores de flujo horizontal son utilizados en instalaciones de pequeñas poblaciones y consisten en un ensanchamiento del canal del pretratamiento de forma que se reduzca la velocidad de flujo y decanten las partículas. Debe diseñarse con un canal paralelo para proceder a su limpieza que se realiza manualmente.

Los desarenadores de flujo vertical se diseñan mediante tanques que tienen una velocidad ascensional del agua tal que permite la decantación de las arenas pero no caen las partículas orgánicas. Suelen ser depósitos tronco-cilíndricos con alimentación tangencial.

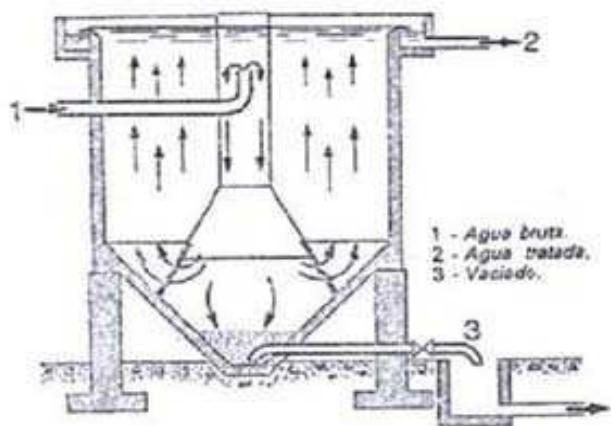


Figura A1.2. Desarenador de flujo vertical.

Los desarenadores de flujo inducido son de tipo rectangulares aireados. En estos equipos se inyecta aire por medio de grupos motosoplantes creando una corriente en espiral de manera que permite la decantación de las arenas y genera una corriente de fondo. Además el aire provoca la separación de las materias orgánicas. De esta forma, dado que el depósito está aireado y se favorece la separación de la materia orgánica, se reduce la producción de malos olores.

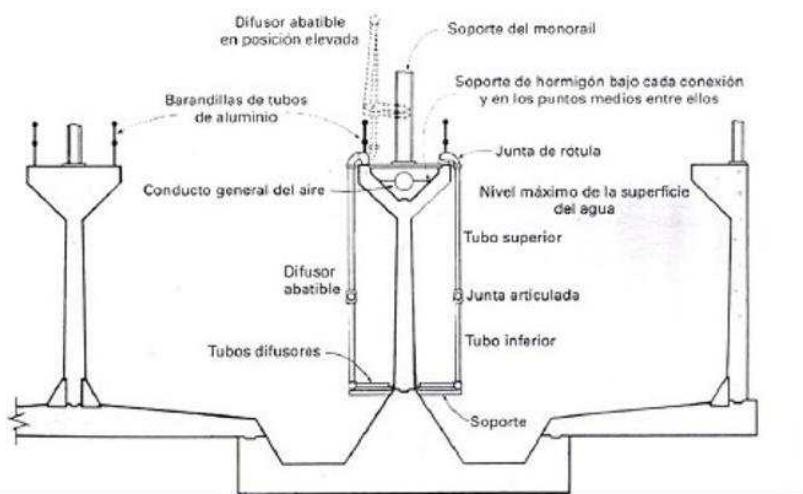


Figura A1.3. Desarenador de flujo inducido.

A1.6. PREOXIDACIÓN.

Una vez ha entrado el agua a la potabilizadora y ha pasado el desbaste, recibe su primer tratamiento químico que consiste en añadir al agua una primera dosis de un producto oxidante para eliminar sustancias contaminantes, este producto utilizado generalmente es el cloro, por lo que a esta fase se le puede denominar también precloración. Así una pequeña dosis de cloro o dióxido de cloro permite eliminar del agua compuestos orgánicos e inorgánicos, y microorganismos patógenos, así se permite que el agua llegue a las siguientes etapas mucho más desinfectada.

A1.7. COAGULACIÓN.

La coagulación consiste en introducir en el agua un producto capaz de neutralizar la carga de los coloides, y de formar un precipitado. Este producto se conoce como coagulante. Los coagulantes principalmente utilizados son sales de aluminio o de hierro.

La coagulación forma parte de un proceso físico-químico de tratamiento para la separación de materia suspendida y coloidal que viene presente en el agua, que consta de mezclado, coagulación, floculación y sedimentación.

A1.8. FLOCULACIÓN.

El coagulante introducido da lugar a la formación del flóculos, pero es necesario aumentar su volumen, su peso y sobre todo su cohesión. Se favorecerá el engrosamiento del flóculos por medio de:

- una coagulación previa, tan perfecta como sea posible,
- un aumento de la cantidad del flóculo en el agua; conviene poner el agua en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de fangos), tratando de conseguir la mayor concentración posible,
- una agitación homogénea y lenta del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con una partícula de flóculos,
- el empleo de ciertos productos llamados floculantes.

Los floculantes, llamados también ayudantes de coagulación, ayudantes de floculación e incluso ayudantes de filtración, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones.

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico).

A1.9. DECANTACIÓN.

El objeto de la decantación es el conseguir que se depositen las partículas que se encuentran en suspensión en el agua, tanto si se trata de partículas presentes en el agua bruta, como si se deben a la acción de un reactivo químico añadido en el tratamiento e incluso de las que resultan de una floculación física ligada a una acción biológica. En resumen, es la eliminación de sólidos presentes en el agua, por la acción de la gravedad.

En tratamiento de aguas potables, el proceso de decantación se realiza principalmente en dos grupos de decantadores: decantadores de contacto de fango (Figura A1.4), y decantadores de lecho de fango (Figura A1.5).

A1.9.1. Decantadores de contacto de fangos.

Para aumentar el tamaño de los flóculos, en este tipo de decantadores, se pone en contacto el agua de entrada con parte de los fangos existentes, en lo que se denomina zona de reacción, consigiéndose un engrosamiento de los sólidos que lleva el agua.

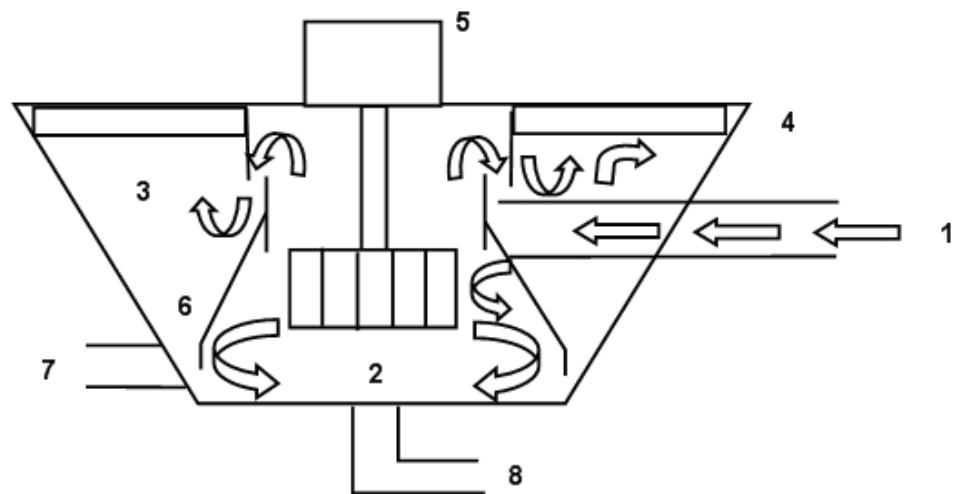


Figura A1.4. Decantador de contacto de fango.

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| 1. Entrada agua bruta | 5. Turbina de agitación |
| 2. Zona de reacción | 6. Concentrador de fangos |
| 3. Zona de decantación | 7. Purga de fangos en exceso |
| 4. Salida de agua clarificada | 8. Purga de fondo |

A1.9.2. Decantadores de lecho de fangos.

En este grupo de decantadores, el agua en un sentido ascendente, va a ir atravesando una masa uniforme de fango, que va a permanecer en suspensión en el decantador. Esto permite que el lecho de fango actúe como zona de floculación, favoreciendo la retención de los sólidos que trae el agua bruta, por los flóculos integrantes del fango.

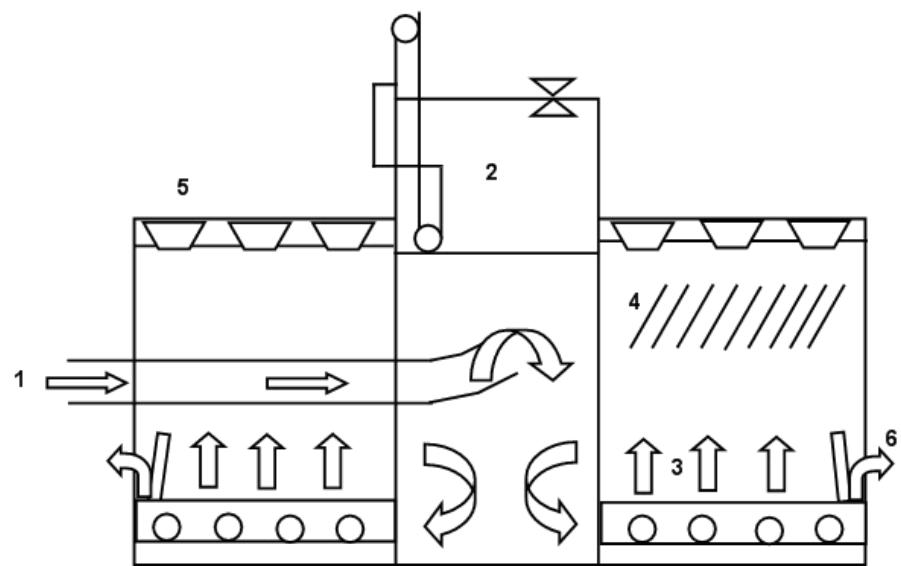


Figura A1.5. Decantador de lecho de fango.

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1. Entrada de agua bruta | 4. Placas laminares |
| 2. Campana de vacío | 5. Canaletas salida de agua |
| 3. Tuberías perforadas de reparto | 6. Concentrador de fangos |

A1.10. FILTRACIÓN.

Una vez que el agua ha sido decantada, para terminar el proceso de clarificación se hace pasar por una etapa de filtración (véase Figura A1.6).

El proceso físico va a consistir, en hacer pasar el agua a través de un lecho filtrante, normalmente este lecho será de arena y grava de distinta granulometría, aunque también se puede optar, si se quiere un tratamiento más fino, por pasar el agua a través de un lecho de carbón activado, con esto no sólo se retiene la materia que aún queda en suspensión en el agua, sino que quedarán en el lecho partículas adsorbidas que podrían producir olores y sabores en el agua. Para evitar atascamientos, es importante que la retención de partículas se haga en el interior del lecho filtrante, y no en la superficie del lecho.

Dependiendo de las fuerzas que intervengan en el proceso de filtración, se puede distinguir entre filtros de gravedad, y filtros de presión, siendo los primeros más económicos de explotar y mantener.

Cuando un filtro se satura, porque ha llegado a un nivel de lámina de agua máximo, habrá que limpiarlo, para que vuelva a tener capacidad de filtrado. El proceso de lavado, va a consistir en una inyección temporal de aire y/o agua en contracorriente, haciendo que se desprendan los sólidos que han quedado retenidos en el lecho filtrante. El agua de estos lavados se puede llevar a cabecera de planta, o alguna instalación de aprovechamiento de las aguas.

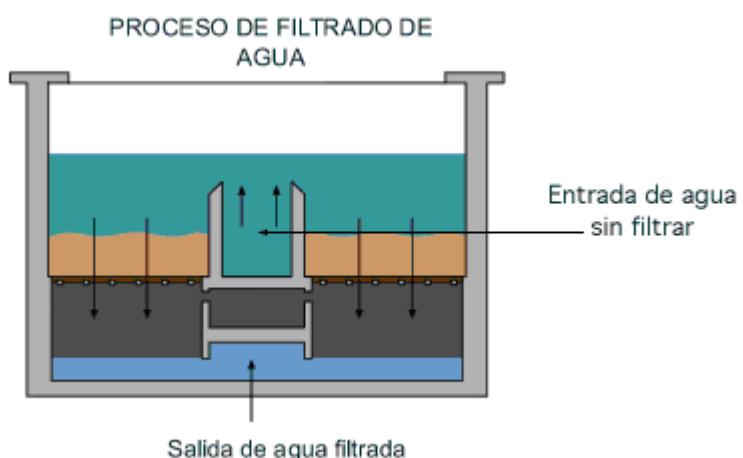


Figura A1.6. Filtración de agua.

A1.11. DESINFECCIÓN FINAL.

El objetivo que se persigue con la desinfección, es eliminar los organismos patógenos que pueda llevar el agua, garantizando así sanitariamente su consumo. Así se establece en la reglamentación técnica sanitaria, en el apartado de suministro y distribución de las aguas potables, donde se articula que las aguas potables de consumo público, deberán contener a lo largo de toda la red de distribución, y en todo momento, cloro residual libre o combinado, u otros agentes desinfectantes, en las concentraciones que determine la Administración.

Se pueden utilizar diversos agentes desinfectantes, su elección dependerá de diversos factores: tiempo de contacto, calidad del agua, e instalaciones y recursos disponibles. El desinfectante más generalizado para potabilizar el agua, es el cloro y sus derivados.

A1.12. PLANTA POTABILIZADORA DE ZARAGOZA.

La Planta Potabilizadora para el abastecimiento de agua a la ciudad de Zaragoza está situada en el barrio de Casablanca, en la margen izquierda del Canal Imperial de Aragón. Su construcción se realizó en tres fases, en los años 1965, 1969 y 1987, que llevaron la capacidad inicial de tratamiento de 2 metros cúbicos por segundo en 1965 a 6 metros cúbicos por segundo en la actualidad.

FUENTES DE ABASTECIMIENTO.

Las fuentes de abastecimiento son, a partir de julio 2010, 100% del Pantano de Yesa. En cualquier caso, hay que recordar que este nuevo abastecimiento seguirá siendo provisional hasta que entre en servicio el crecimiento de Yesa, es decir, al menos hasta el año 2016. Mientras tanto, Zaragoza solo podrá recibir agua de calidad del Pirineo cuando el sistema de riegos de Bardenas disponga de excedentes o cuando haya reservas en el embalse de La Loteta.

En caso de ser necesario, será mezclada este agua de Yesa con la del Canal Imperial de Aragón, que deriva sus aguas del río Ebro a la altura del término municipal de Fontellas de Navarra, a unos 80 kilómetros de Zaragoza. Además se dispone de un sistema alternativo de abastecimiento del río Ebro, mediante una

estación elevadora que capta en un punto situado aguas arriba del barrio de la Almozara.

LÍNEA DE TRATAMIENTO.

El proceso de potabilización comprende las siguientes fases:

- Desbaste: Mediante reja de eliminación de sólidos de 3,5 x 5 m (distancia entre barrotes: 100 mm) y losa deflectora de hormigón que impide la entrada de material flotante. A continuación, dos rejas autolimpiantes, con un paso entre barrotes de 20 mm, permiten la eliminación de hojas de árboles.
- Precloración y coagulación: En cabecera de tratamiento se añade cloro, como oxidante de materia orgánica, y sulfato de alúmina, como agente coagulante de las materias en suspensión y turbiedad de origen coloidal.
- Floculación y decantación: Estos dos procesos se ejecutan en 11 decantadores Accelerator de recirculación de fangos, de 28 m de diámetro y 6,5 m de altura. Como coadyuvante de floculación se utiliza normalmente polielectrolito débilmente aniónico, dosificado a la entrada de los decantadores. Con este sistema se obtiene una elevada concentración de fangos, lo que permite altos rendimientos en la separación de las impurezas. El exceso de fangos se purga en forma intermitente y automática. Al final de estos procesos, se han eliminado virus, bacterias, el 99% de la materia en suspensión, el 90% de turbiedad coloidal y el 60% de la materia orgánica.
- Filtración sobre arena: El agua decantada pasa al proceso de filtración, a través de un lecho de arena silícea de 60 cm de altura y granulometría de 0,7 mm. Existen 34 filtros de una superficie unitaria de 96 m². La recogida del agua filtrada se efectúa mediante toberas colectoras (43 por m² de superficie filtrante), de 0,2 mm de paso de ranuras, rascadas sobre un falso fondo. El lavado de los filtros se realiza mediante agua y aire a contracorriente, en fases separadas. La filtración es del tipo de nivel constante, mediante reguladores de nivel en lazo de control con el actuador de las válvulas de regulación de caudal a la salida de cada filtro.
- Bombeo a depósitos: Para regular la demanda se dispone en la propia Planta de tratamiento de unos depósitos de agua tratada, de una capacidad de

180000m², cuya cota de altura máxima es 8,5 metros superior a la del agua filtrada. La elevación se realiza mediante 6 grupos motobomba de 180 CV y 1 m²/s y 2 grupos de 100 CV y 0,5 m²/s.

➤ Desinfección final: Para asegurar la potabilidad tanto del agua almacenada en depósitos como la de la red municipal, se dosifica cloro gas de forma que exista siempre un contenido en cloro residual en el agua dentro del rango ,5-1,6 ppm. En varios depósitos y estaciones elevadoras secundarias se refuerzan las concentraciones de cloro residual cuando es necesario, mediante hipoclorito sódico y bombas dosificadoras automáticas.

ANEXO 2: FILTRACIÓN GRANULAR.

A2.1. DEFINICIÓN.

La filtración granular consiste en el paso de agua a tratar a través de un medio granular (arena) de manera que las impurezas que lleva el agua queden retenidas en dicho medio hasta su posterior limpieza. Las razones por las que las partículas son retenidas se muestran en la tabla A2.1.

A2.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FILTRACIÓN.

- Tipo de medio filtrante: En plantas de tratamiento de aguas, está constituido por tipos de arena, antracita, granate o una combinación de dichos materiales. La forma tiene importancia no sólo por el aspecto hidráulico, sino por la relación superficie a volumen, ya que el proceso de filtración tiene relación directa con el área total de los granos.
- Velocidad de filtración: Es inversamente proporcional a la eficiencia.
- Tipo de suspensión: las características físicas y químicas de la suspensión afectan en forma notable el comportamiento de los filtros. En muchos casos resultan más importantes para obtener una determinada calidad de efluente, que el tamaño y clase del medio filtrante usado, ya que el mismo flujo trabajando a la misma velocidad puede producir agua con mayor o menor turbiedad, según sea el tipo de suspensión que reciba.
- Temperatura: Ésta afecta tanto a los mecanismos físicos como los químicos que intervienen en la filtración. A mayor temperatura, los fluidos suelen ser menos viscosos por lo que tienen una mayor movilidad en el filtro, hay menos pérdida de carga, pero también se deposita menos partículas en la superficie del lecho filtrante.

Tabla A2.1. Mecanismos de remoción de un filtro.

MECANISMO	DESCRIPCIÓN
CRIBADO <ul style="list-style-type: none"> - Mecánico - Oportunidad de contacto 	<p>Partículas más gruesas que los poros del medio son retenidas mecánicamente.</p> <p>Partículas más pequeñas que los poros del medio son retenidas por oportunidad de contacto.</p>
SEDIMENTACIÓN	Las partículas se sedimentan sobre el medio filtrante, dentro del filtro.
IMPACTO INERCIAL	Las partículas pesadas no siguen las líneas de corriente.
INTERCEPCIÓN	Muchas partículas que se mueven a lo largo de una línea de corriente son removidas cuando entran en contacto con la superficie del medio filtrante.
ADHESIÓN	Las partículas se adhieren a la superficie del medio filtrante.
ADSORCIÓN QUÍMICA	Una vez que una partícula ha entrado en contacto con la superficie del medio filtrante o con otras partículas, la adsorción, física y, o química, permite su retención sobre dichas superficies.
ADSORCIÓN FÍSICA	<ul style="list-style-type: none"> - Fuerzas electrotáticas y electrocinéticas - Fuerzas de Van der Waals
FLOCULACIÓN	Partículas más grandes capturan partículas más pequeñas y forman partículas aún más grandes

A2.3. TIPOS DE FILTROS.

- Filtros rápidos convencionales: Los filtros convencionales constan de un tanque rectangular de unos 3,5 a 5 m de profundidad total, en el cual se coloca un lecho de arena y grava sobre un sistema adecuado de drenaje. El flujo pasa de la parte superior del tanque, a los drenes del fondo atravesando el medio filtrante. Como al cabo de cierto número de horas de servicio el filtro se obstruye, se hace necesario lavarlo invirtiendo el sentido del flujo, por medio de agua que se inyecta a presión en los drenes y se recoge en las canaletas de lavado colocadas sobre la superficie de la arena, como muestra la figura A2.1. Esta operación dura de 5 a 15 minutos, después de la cual el filtro vuelve a su operación normal.

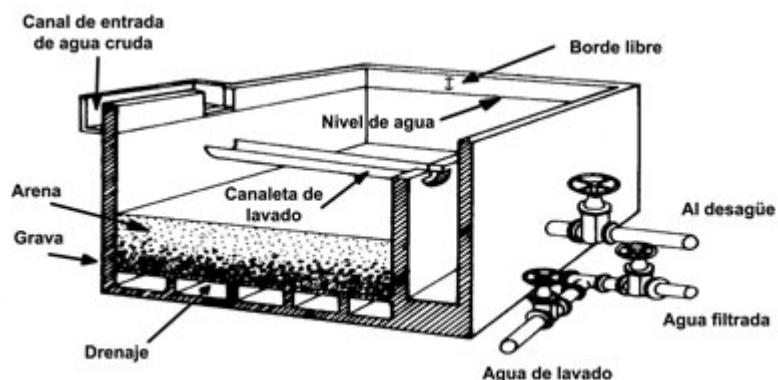


Figura A2.1. Filtro rápido convencional.

- Filtros lentos convencionales: Son aquellos que consisten en que el agua cruda (sin tratar) atraviese un lecho o capa de arena, eliminando ésta contaminantes o impurezas, si la velocidad de flujo o de filtración, a través del lecho, es igual o inferior de 0,3 m/h. El lecho de arena puede depositarse en recipientes comunes: tanques de cemento, tanques plásticos, tubos, etc. En el lecho filtrante suceden un sinnúmero de fenómenos físicos, físico-químicos y biológicos que hacen que el agua se libere de contaminantes nocivos, convirtiéndola en un líquido que no atente contra la salud de los consumidores. Lo expuesto, permite concebir la filtración lenta en arena como un método de tratamiento de elevada capacidad purificadora, pues permite que el agua adquiera la categoría apta para consumo humano en un solo proceso, siempre y cuando la

calidad del agua de la fuente no se salga de los parámetros proyectados. Es esta la ventaja más importante de la filtración lenta en arena.

Otra ventaja de este método de tratamiento es la sencillez de construcción, operación y mantenimiento de los filtros, además de la fácil consecución de los materiales utilizados, pues las arenas, a pesar que deben ser seleccionadas, abundan, al igual que los tubos, tanques y demás recipientes que no son objetos de difícil adquisición, elaboración o adecuación.

La desventaja más grande de la filtración lenta en arena, consiste, en que dada la baja velocidad de filtración, los volúmenes de agua tratada son, relativamente, bajos y las instalaciones de gran tamaño, por tanto la inversión inicial suele ser alta.

En el lavado de la filtración lenta es suficiente realizar el raspado (o el arado) de 5 -10 cm. de la capa superior (de arena), lavado y ubicación en el lugar de origen o el reemplazo por otra capa similar. Esta operación se realiza cada vez que la parte superior del lecho de arena adquiere un color gris, negro o amarillento, característico del enturbiamiento del agua.

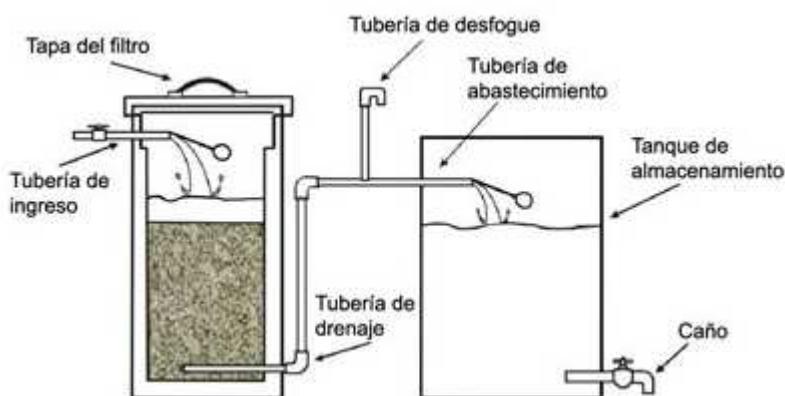


Figura A2.2. Sistema filtro lento de arena.

- Filtros biológicos: Son otra forma de hacer remoción de orgánicos, y pueden hacerse con filtración rápida o con filtración lenta. En ambos casos, el medio poroso granular al recibir agua con suficiente carga orgánica disuelta, tiende a formar una película biológica alrededor de los granos del mismo, capaz de alimentar microorganismos de distinto tipo, consumidores de la materia orgánica

biodegradable, esto es, del grupo de compuestos y/o moléculas asimilables por las bacterias.

La filtración biológica puede hacerse con:

- Filtros rápidos de arena, o de arena y antracita o de carbón activado granular con o sin la inyección de ozono y/o la supresión del cloro en el agua de lavado.
- Con filtros lentos de arena con o sin la inyección de ozono.

Debe tenerse en cuenta que el lavado de los biofiltros no puede ser tan vigoroso que elimine por completo la biomasa que se ha formado entre los granos del lecho, porque ésta se necesita para iniciar la siguiente carrera de filtración. Por eso, el uso de agua de lavado clorada, por lo general, no resulta satisfactoria porque tiende a inactivar los microorganismos presentes en ella, los cuales sólo posteriormente, a lo largo de la carrera, vuelven a recrecer, con lo que la eficiencia del proceso disminuye, en comparación con la de los filtros que se lavan con agua no clorada.

El lavado de los filtros biológicos debe, por tanto, cumplir los requisitos contradictorios: por una parte, no destruir toda la población bacteriana indispensable para el catabolismo bacterial, y por el otro, debe eliminar el exceso de material que obstruye los poros del medio y que puede producir carreras cortas, bolas de lodo e, incluso, condiciones sépticas.

Sin embargo como el material biológico se adhiere con mayor fuerza que el no biológico y, por tanto, es posible que para mantener en buenas condiciones el lecho se requiera recurrir a lavado auxiliar con aire y, en ocasiones, utilizar lavado con agua clorada cuando las condiciones de temperatura y concentración de materia orgánica biodegradable inducen un excesivo crecimiento orgánico.

- Filtros de flujo ascendente: Consiste en una caja provista de un falso fondo, el agua afluente entra por la parte de abajo y es recolectada en la canaleta superior.

Los filtros de flujo ascendente, tienen algunas ventajas:

- Dan mejor resultado en filtración de contacto con los filtros descendentes. Esto se debe a una serie de factores, tales como su gran profundidad, que permite un

volumen de poros considerablemente más grande, el hecho de que el flujo pase por granos cada vez más finos, lo que estimula la mejor distribución de los depósitos, de que una buena proporción de los sólidos sedimentables más pesados sean retenidos en la grava del fondo descargando así las capas superiores de este material. Además el mayor tiempo de residencia medio del flujo, da un mejor tiempo de respuesta a los cambios.

- Su eficiencia no depende del peso de las partículas a filtrar, por lo que no es necesario un proceso de floculación antes de la filtración, como en algunos otros filtros, según las características del líquido a filtrar.

Las desventajas de los filtros de flujo ascendente son:

- Fluidificación parcial periódica de la capa superior del lecho filtrante.
- Lecho filtrante muy profundo.
- El lavado se hace en el mismo sentido que el filtrado: presenta el problema de que el agua limpia sale por los mismos conductos que el agua de lavado cuya contaminación es considerable. El agua filtrada además queda en la parte superior del filtro expuesta a posible polución accidental.
- El primer filtrado resulta bastante turbio y hay que arrojarlo al desagüe.
- Requiere un sistema de drenaje a prueba de atascamiento.

A2.4. FÓRMULAS DE DISEÑO DE UN FILTRO LENTO.

La filtración se identifica por la velocidad de paso del agua a través del manto filtrante, medida como carga superficial, q_F ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$), o sea el cociente entre el caudal, Q (m^3/h) y el área filtrante A_F (m^2):

$$q_F = v_f = \frac{Q}{A_F} \quad (\text{Ec.1})$$

Para que el filtro a diseñar sea un filtro lento, la carga superficial tiene que encontrarse en el siguiente rango de valores (Rojas, R; Guevara, S.):

$$0,1 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \leq v_f \leq 0,4 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

Para que se cumplan estas velocidades se necesita saber la columna de agua necesaria para vencer la resistencia que ofrece el lecho y a la vez controlar la velocidad del flujo en el medio poroso. Si se considera que el agua va a seguir un régimen laminar en su filtración y mantener una presión constante de agua de entrada se puede utilizar la ley de Darcy.



Figura A2.3. Filtro granular.

Por otro lado se sabe que el flujo de agua que va a pasar por el filtro viene controlado por:

- la diferencia de presiones
- la velocidad de filtración, v_f .

Darcy midió el volumen de agua por unidad de tiempo a través de una columna de arena saturada de longitud (L) y área (A) cuando existía una diferencia de presión hidrostática (h) entre dos puntos espaciados en una longitud (L).

$$Q = \frac{kAh}{L} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

Q = caudal (m^3/h)

k = coeficiente de permeabilidad (m/h)

A = área (m^2)

h = diferencia de altura de agua (m)

L = longitud (m)

Si se adapta la ley de Darcy a un filtro genérico tal y como se muestra en la figura A2.3 se obtiene la siguiente ecuación:

$$h = \frac{v_f}{k} \bullet L \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

k = coeficiente de permeabilidad (m/h)

v_f = velocidad de filtración (m/h)

h = diferencia de altura de agua (m)

L = espesor del lecho (m)

Para hallar el área mínima de filtración que tendrá que tener el lecho, resulta de la división del caudal Q entre la velocidad de filtración:

$$A_{\min} = \frac{Q}{v_f} \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/h)

v_f = Velocidad de filtración (m/h)

A_{\min} = Área filtrante del lecho (m^2)

Sabiendo el área se halla el radio:

$$A = \Pi \cdot r^2 \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

A = Área (m^2)

r = Radio (m)

ANEXO 3: ADSORCIÓN EN CARBÓN ACTIVO.

A3.1. INTRODUCCIÓN.

La adsorción es un proceso de separación en la que ciertos componentes de una fase fluida se transfieren hacia la superficie de un sólido adsorbente. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama "adsorbato" y la fase adsorbente se llama "adsorbente".

El proceso opuesto a la adsorción, se denomina desorción, por lo que consta en separar una molécula o átomo adherido en una superficie.

El adsorbente más común es el carbón activo (véase Figura A3.1) debido a sus propiedades, la más importante su gran área superficial que puede ser mayor de 500 m²/g, siendo fácilmente alcanzables valores de 1000 m²/g.

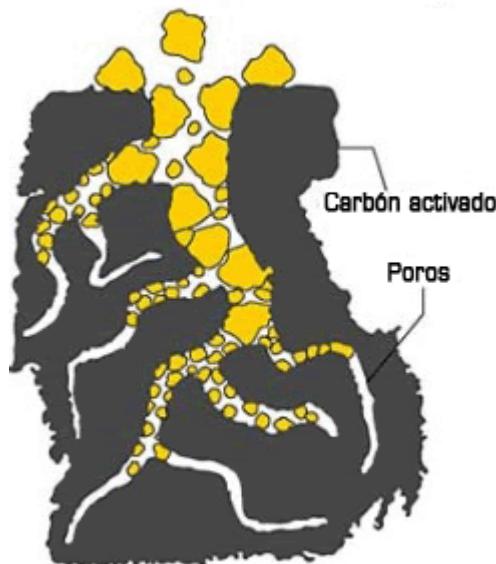


Figura A3.1. Adsorción en carbón activo.

La velocidad global de adsorción representa los efectos combinados de difusión a través de una capa laminar de un fluido circundante, difusión hacia la superficie y adsorción en la superficie interna de los poros del carbón. La mayoría de las soluciones que describen los perfiles matemáticos de las concentraciones contra el tiempo se limitan al caso especial en el cual sólo uno de estos fenómenos controla la velocidad global de adsorción.

ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Los datos de equilibrio a una temperatura dada se representan usualmente por una isoterma de adsorción (Figura A3.2), que es la relación entre la cantidad adsorbida por unidad de masa del sólido y la concentración del soluto en la solución a una temperatura determinada.

Para medir una isoterma de adsorción, se ponen en contacto cantidades conocidas de adsorbente y de solución a temperatura constante, hasta que la solución no cambia en composición con el tiempo. La isoterma de adsorción se puede calcular a partir de las concentraciones medidas de soluto en la solución al inicio y al alcanzar el equilibrio.

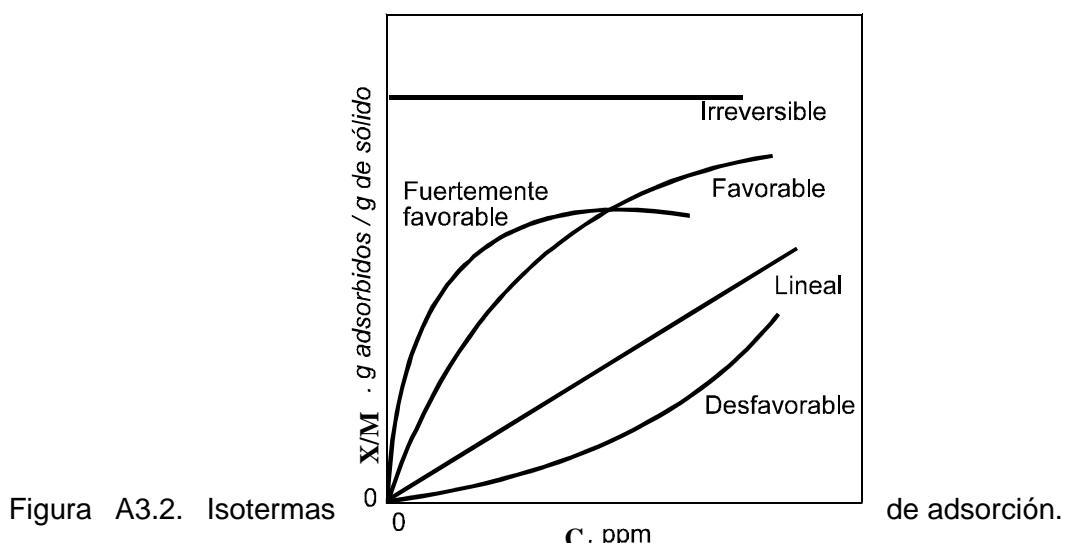


Figura A3.2. Isotermas de adsorción.

La isoterma lineal pasa por el origen de coordenadas y la cantidad adsorbida es proporcional a la concentración en el fluido.

Las isothermas que son convexas hacia arriba se denominan favorables, debido a que puede obtenerse una carga relativamente elevada del sólido para una baja concentración de fluido. El caso límite de una isoterma muy favorable es la adsorción irreversible, donde la cantidad adsorbida es independiente de la disminución de concentración hasta valores muy bajos. Todos los sistemas presentan una disminución de la cantidad adsorbida al aumentar la temperatura, debido a que la adsorción suele ser un proceso exotérmico, y, por supuesto el adsorbato puede desorberse aumentando la temperatura, aun para los casos titulados irreversibles. Sin embargo, la desorción requiere una temperatura mucho

más elevada cuando la adsorción es muy favorable o irreversible que cuando las isotermas responden a un modelo lineal.

Una isoterma que es cóncava hacia arriba recibe el nombre de desfavorable debido a que se obtienen cargas de sólido relativamente bajas y a que conducen a largas zonas de transferencia de materia en el lecho. Las isotermas de esta forma son raras, pero resultan interesantes para ayudar a comprender el proceso de regeneración.

Las isotermas se pueden ajustar a varios modelos matemáticos como son:

- Isoterma de Langmuir :

$$q = \frac{X}{M} = \frac{K b C_e}{1 + K C_e} \quad (\text{Ec.6})$$

X = masa del soluto adsorbido (mg)

M = masa del adsorbente (g)

q = masa del soluto adsorbido / masa del adsorbente

K = constante de equilibrio (cm³ de adsorbente/mg de adsorbato)

C_e = concentración de equilibrio del soluto en la disolución (mg/l)

b = una constante que representa el cubrimiento en monocapa por unidad de peso de adsorbente (mg de adsorbato/g de adsorbente).

X/M viene a ser la capacidad de adsorción, de tal forma que representando C_e/q frente a C_e, se obtiene que la pendiente es 1/b y la ordenada en el origen es 1/Kb.

- Isoterma de adsorción de Freundlich:

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (\text{Ec.7})$$

La ecuación puede escribirse en forma lineal cogiendo logaritmos a ambos miembros:

$$\log q_e = \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e + \log K_F \quad (\text{Ec.8})$$

Si se representa $\log q_e$ en función de $\log C_e$ conduce a una línea recta que permite la determinación de los parámetros n y K_F .

n = parámetro característico del adsorbato

q_e = masa del soluto adsorbido / masa del adsorbente

K_F = parámetro característico del adsorbente

C_e = concentración de equilibrio del soluto en la disolución (mg/l)

- Isoterma de adsorción BET:

El modelo BET supone que las capas de moléculas se adsorben en la parte superior de moléculas previamente adsorbidas. Cada capa se adsorbe de acuerdo con el modelo de Langmuir. La isoterma BET se expresa mediante la ecuación:

$$P/v(P_0-P) = 1/v_m \cdot c + (c-1/v_m \cdot c) \cdot P/P_0 \quad (\text{Ec.9})$$

v = volumen, reducido a las condiciones estándar, del gas adsorbido a la presión P y temperatura T .

P_0 = presión del vapor saturado del adsorbato a la misma temperatura.

v_m = el volumen del gas adsorbido cuando la superficie se cubre con una capa unimolecular.

c = constante

$$c = (E_1 - E_L) / RT$$

E_1 = calor de adsorción de la primera capa.

E_L = calor de la licuefacción del gas.

A3.2. CARBÓN ACTIVO

A3.2.1. Definición, características y usos.

El carbón activado (CA) es un sólido que tiene dos propiedades que lo han hecho muy útil en el tratamiento de aguas. La primera consiste en que atrapa todo tipo de contaminantes orgánicos en sus paredes, con una avidez tal que puede dejar un agua prácticamente libre de estos compuestos, debido a su gran porosidad y características. La segunda, en que destruye el cloro libre residual que no ha reaccionado después de que dicho compuesto realizó una acción desinfectante.

Se llama carbón activado a todo carbón que, como resultado de un proceso de preparación particular, muestra de manera exaltada y en alto grado la propiedad de fijar y retener sustancias llevadas a su contacto.

Un carbón activado de buena calidad se constituye químicamente casi con exclusividad de carbón amorfó. Poseen una fina y alta porosidad que les confieren un elevado coeficiente en la relación superficie de paredes de poros versus su masa.

Se admite que los poros internos tienen un diámetro del orden de $5 \cdot 10^{-7}$ cm. Así en los buenos carbonos activados, la relación superficie/masa es del orden del 1150 m²/gramo.

Las propiedades adsorbentes son muy elevadas, a la temperatura del aire líquido, los carbonos activados adsorben fácilmente 100 veces su propio volumen de aire a presión atmosférica.



Figura A3.3. Tipos de carbón activado.

Las características más importantes de un carbón activado son las siguientes:

- En cuanto a la forma de las partículas de carbón activo estas pueden ser: Gránulos, gránulos cilíndricos, pseudoesferas, tabletas y polvos (Figura A3.3).
- Granulometría: Referida básicamente a cuando la forma es granular seleccionada. Se usa acompañada del grado de uniformidad. La granulometría abarca un amplio rango en función del uso, puede tenerse una idea de que suele estar dentro del intervalo 0,5-3 mm.
- Porosidad interna: Los intervalos situados entre 50 y 80%. Como se puede observar en la figura A3.4.

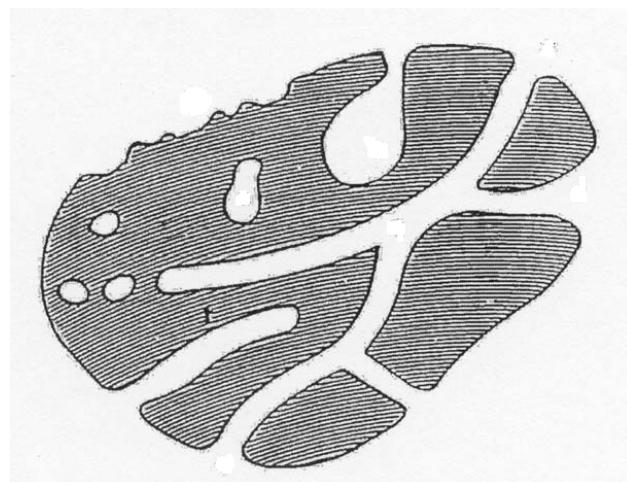


Figura A3.4. Corte de un sólido poroso.

- Área superficial total: esta es el área superficial del carbón expresada en metros cuadrados por gramos, normalmente medido por la adsorción del gas nitrógeno por el método BET.
- Densidad: Medida sobre muestra secada al aire. Se tienen valores más ajustados, entre 300 y 500 g/l. También definida como el peso en gramos de un mililitro de carbón en aire.
- Diámetro de poros: Valor medio, que en unidades angstrom estará entre 5 y 40.

La IUPAC reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño, como se muestran en la figura A3.5:

Macroporos > 50 nm

Mesoporos: 2 - 50 nm

Microporos: < 2 nm

- Cenizas y pH: Estos dos parámetros son complementarios de la información solicitada. Proporcionan información de impurezas y estabilidad.
- Capacidad adsortiva: Se suele utilizar como referencia la adsorción frente al fenol, en porcentaje. Parecen valores aceptables entre 2,5 y 3,5%.

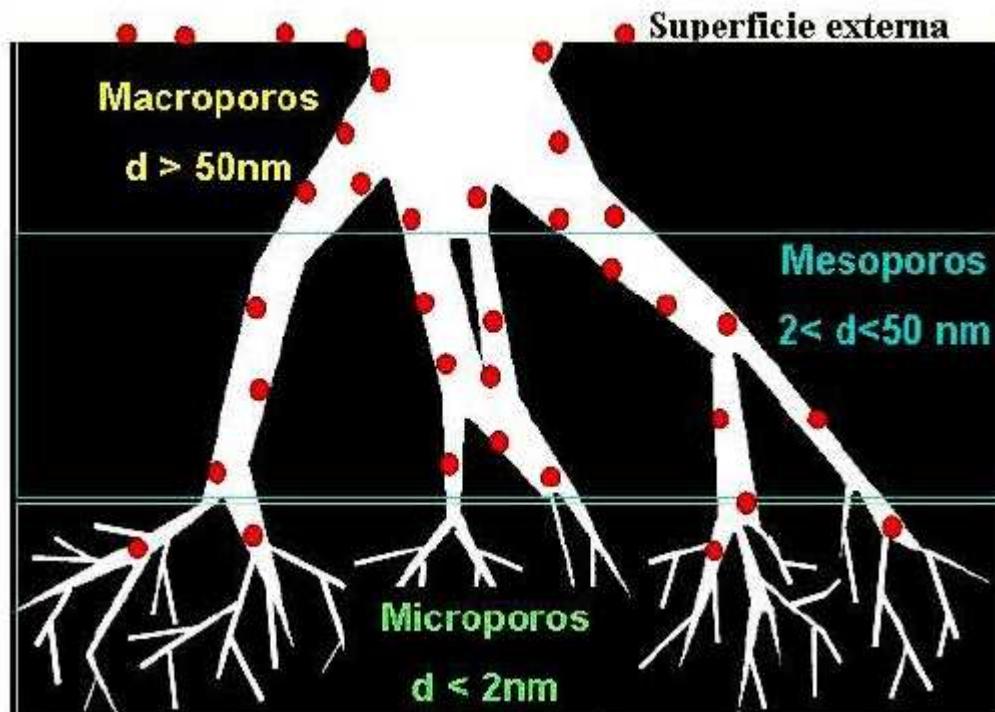


Figura A3.5. Representación esquemática del sistema poroso de un carbón y clasificación de los poros según su tamaño.

USOS

Los carbones activos son adsorbentes de amplio espectro: la mayoría de las moléculas orgánicas se fijan en su superficies, siendo las que peor se fijan las moléculas más cortas (especialmente las que contienen menos de tres átomos de carbono: alcoholes simples, primeros ácidos orgánicos), y las menos polares. Por el contrario, se fijan bien las moléculas más pesadas como por ejemplo los compuestos aromáticos.

Se puede observar, que los cuerpos que peor se fijan son los más fácilmente biodegradables, lo que confiere al tratamiento de adsorción un carácter de complementariedad apreciable, con relación al tratamiento biológico.

Por ello, se utilizan en las siguientes aplicaciones:

- En tratamiento de aguas potables o de aguas industriales de gran pureza, especialmente cuando se obtienen partiendo de aguas superficiales: el carbón activo fijará entonces los compuestos orgánicos disueltos que hayan

podido escapar a la degradación biológica natural: microcontaminantes, sustancias que determinan el sabor del agua; igualmente adsorbe ciertos metales pesados en estado de trazas.

- En tratamiento terciario de aguas residuales o industriales. El carbón fija los compuestos orgánicos disueltos, refractarios al tratamiento biológico situado a la entrada, con lo que se elimina una gran proporción de la DQO (demanda química de oxígeno) residual.
- En tratamiento de aguas residuales industriales, cuando el efluente no es biodegradable o contiene elementos tóxicos orgánicos que impiden la puesta en práctica de técnicas biológicas. Se observa, que mediante el empleo de carbón activo puede efectuarse, generalmente, una retención selectiva de los elementos tóxicos y, por tanto, obtener un efluente normalmente biodegradable.
- Tratamiento de acabado posterior a la cloración de aguas potables; instalación en los puntos de consumo de filtros de desactivación catalítica del cloro libre residual.
- Filtración de los lodos producidos como consecuencia de los procedimientos de separación de hierro y manganeso por medio de la adición de agentes oxidantes. Otros tipos de lecho no consiguen separar los pequeños tamaños de partícula generados.
- Recuperación de los condensados de circuitos de calefacción.
- Depuración fina de destilados.
- Recuperación de bencina y benceno de los condensados.

A3.3.TIPOS DE CARBÓN ACTIVO

Los carbones activos pueden clasificarse atendiendo al tamaño de las partículas en carbón activado en polvo (CAP) y carbón activado granular (CAG).

❖ **Carbón en polvo (CAP).**

El carbón en polvo se presenta en forma de partículas comprendidas entre 10 y 50 μm .

Cuando se utiliza carbón en polvo éste es agregado al producto a purificar en un tanque con suficiente agitación para mantener una suspensión homogénea después de dar un tiempo de contacto adecuado, el carbón es removido por sedimentación o filtración. En este último caso es recomendable el uso de un filtro ayuda, para obtener una filtración más eficiente. De ser posible es recomendable tener un tanque pequeño en el cual se prepare una suspensión del carbón activado-con agua o con un líquido limpio-y se permita que el polvo se humecte perfectamente.

Ventajas:

- Los carbones activos en polvo son, aproximadamente, de dos a tres veces más económicos que los carbones en grano.
- Pueden dosificarse en exceso, en caso de puntas de contaminación.
- Para utilizarlo, sólo se necesita realizar una inversión reducida.
- Su cinética de adsorción es rápida, puesto que su superficie es directamente accesible.
- Favorece la decantación, al espesar el flóculos.

Inconvenientes:

- No puede regenerarse cuando se recupera en mezcla con fangos de hidróxidos, por lo que debe preverse la pérdida de este material, después de su utilización.

- Resulta difícil eliminar las últimas trazas de impurezas, sin añadir un exceso de carbón activo.

❖ **Carbón en grano (CAG).**

El carbón granular activado consiste en partículas de aproximadamente un milímetro de diámetro (diez a cien veces el tamaño de las partículas de carbón en polvo). Éste se distribuye típicamente en un lecho o columna a través de los cuales se hace pasar lentamente el fluido a tratar. Algunas veces se unen entre sí varias columnas de adsorción en un solo sistema.

Cuando se tiene altas concentraciones de soluto, se trabaja en operación continua, que se lleva a cabo en columnas conteniendo carbón granulado de 0,2 a 1,7 mm.

Las propiedades físicas más importantes son la dureza y el tamaño de partícula. Buena parte del coste de operación con los carbones en grano se debe a pérdidas por atrición durante el manejo y la regeneración.

Es más económica que la operación discontinua y ha encontrado mayores aplicaciones. En este caso el carbón se regenera en el mismo lugar que se usa y el agua tiene que estar libre de materia en suspensión, para evitar atascos en el lecho granular. Un límite de carga comúnmente usado para sólidos suspendidos totales es de 50 mg/l. El aceite y la grasa también pueden perjudicar el rendimiento de CAG al revestir las partículas de carbón, lo que inhibe el proceso de adsorción. Se admite como límite normalmente 10 mg/l.

La adsorción en CAG es una tecnología ampliamente usada para tratar aguas residuales. Usualmente, la DQO puede reducirse a menos de 10 mg/l y la DBO a menos de 2 mg/l.

Se muestran, algunas características físicas de carbonos en grano, utilizables en el tratamiento del agua. Se observan amplias variaciones que es fundamental tener en cuenta en la elección del carbón y del material destinado a su utilización (granulometría, densidad, friabilidad,...).

Tabla A3.1. Características de diversos CAG.

Materia prima	Turba	Turba	Carbón	Carbón	Madera	Coque de petróleo
Granulometría:						
TE mm	0,95	0,66	0,45	0,6	1,7	0,4
Coeficiente de uniformidad	1,5	1,4	2,2	1,6	1,4	1,4
Presentación	triturado	granos cilíndricos	triturado	triturado	triturado	bolas
Friabilidad:						
15 min	31	22	20	11	2,2	25
30 min	54	38	30	23	6,7	45
Densidad aparente	0,29	0,42	0,67	0,45	0,69	0,58
Superficie específica (m ² /g)	650/ 750	1100/ 1200	800/ 900	1050/ 1200	1000/ 1100	1100/ 1300
Cenizas %	04-jun	5,5	8	8	12	0,2

Friabilidad = cantidad del mismo que no se mantiene utilizable después de la trituración. Determina la velocidad con que las partículas se rompen y se hacen más pequeñas, perdiéndose durante la operación de lavado del lecho o escapando del mismo durante el funcionamiento normal, como sucede con otros medios porosos. A mayor friabilidad es más blando el carbón, se rompe más fácilmente.

TE = talla efectiva. Se calcula representando el cernido acumulado frente a la luz de malla, de tal forma que TE es la luz de malla que le corresponde a un cernido acumulado del 10 % (es indicativo por lo tanto del tamaño de los finos)

Coeficiente de uniformidad es el cociente entre las luces de malla del 60% y 10 % de cernido acumulado.

Las cenizas se calculan calcinando a una temperatura de 625 ± 25 °C

A3.4. PRODUCCIÓN DE CARBÓN ACTIVO.

A3.4.1. Materias primas.

Prácticamente cualquier material orgánico con proporciones relativamente altas de carbono es susceptible de ser transformado en carbón activado.

Los carbones activados obtenidos industrialmente pueden provenir de madera y residuos forestales u otros tipos de biomasa, turba, lignito y otros carbones minerales, así como de diferentes polímeros y fibras naturales o sintéticas. Según el origen del carbón activo, éste presentará unas características u otras (Tabla A3.2). Existen, no obstante, algunas limitaciones. Así, desde un punto de vista estructural los carbones activados son carbones muy desordenados e isótropos. Por tanto, no serán adecuados para preparar carbones activados aquellos materiales carbonosos que pasen por un estado fluido o pseudo-fluido durante su carbonización; dado que durante la resolidificación de esta fase suelen formarse estructuras ordenadas en los carbones resultantes. No resultan adecuados, por tanto, los carbones coquizables, salvo que se eliminen sus propiedades coquizantes, mediante una oxidación previa, por ejemplo.

Del mismo modo, tampoco resultan adecuados los residuos termoplásticos. Los factores que hay que tener en cuenta para elegir un precursor adecuado son: buena disponibilidad y bajo coste, bajo contenido en materia mineral y que el carbón resultante posea unas buenas propiedades mecánicas y capacidad de adsorción. Los residuos de madera, las cáscaras de coco y frutos secos, así como las semillas de algunas frutas junto con los carbones minerales y el coque de petróleo, son los precursores más usados.

El carbón activo se prepara haciendo, en primer lugar, un carbón a partir de uno de los materiales de partida antes mencionados. El material se lleva al rojo vivo para expulsar los hidrocarburos, pero con una aportación insuficiente de aire para mantener la combustión. La partícula de carbón se activa seguidamente.

Tabla A3.2. Características según el origen del carbón.

ORIGEN	APLICACIONES	OBSERVACIONES
Madera de pino	Agua residual con colores intensos y/o con cantidades sustanciales de grasas, aceites y otros compuestos de alto peso molecular. Potabilización de agua superficial con alto contenido de materia orgánica natural.	Se requiere un carbón activado macroporoso, ya que los contaminantes mencionados tienen un tamaño molecular grande. Usado en la industria textil, alimentaria, y de petróleo. Como este carbón activado es poco duro se aplica en polvo.
Carbón mineral lignítico	Agua residual cuyos contaminantes sean muy diversos, como es el caso de las de procedencia municipal.	Este carbón tiene poros de muy diversos tamaños, por lo que es el adecuado en el caso de que los contaminantes sean de una gran gama de tamaños moleculares. La dureza es relativamente baja.
Carbón mineral bituminoso	Agua residual en la que predominen contaminantes de peso molecular intermedio. Potabilización de agua superficial o con un ligero color producido por algas.	La mayoría de los poros de este CA están en el rango bajo de la mesoporosidad. Es menos duro que el de coco, pero más adecuado cuando hay una alta proporción de contaminantes no volátiles
Cáscara de coco	Potabilización de agua de pozo. Eliminación de olor, sabor y compuestos volátiles. Agua residual contaminada con solventes volátiles o con otras moléculas de bajo peso molecular. Declaración	Es el carbón con más proporción de microporos, por lo tanto es el más adecuado para retener moléculas pequeñas. Es el carbón utilizado cuando solamente se requiere declarar, ya que es el más duro y resistente a la abrasión.

A3.4.2. Tipos de activación.

El proceso de activación consiste básicamente en reordenar los átomos de carbono en anillos tipo benceno para lograr una estructura cristalina reticular similar a la del grafito, en otras palabras, la activación consiste en "multiplicar" la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable.

Las características específicas de los distintos tipos de carbonos activados dependen principalmente de la materia prima y del proceso de activación utilizado.

Es importante mencionar que una misma materia prima que sea activada por procesos diferentes dará como resultado carbonos con propiedades diferentes.

Existen básicamente dos procesos a través de los cuales se puede lograr la activación:

- Activación física o térmica: La activación física consiste en oxidar la materia prima a altas temperaturas en presencia de un agente oxidante. Debido a que la reacción es endotérmica es necesario generar una temperatura constante, normalmente y dependiendo de la materia prima, ésta es de 800°C.

La activación se produce por la reacción química del agente oxidante (como el aire, vapor de agua, CO₂, etc.) con el carbono del material que está siendo activado.

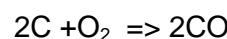
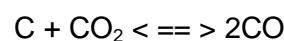
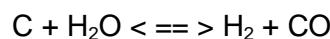
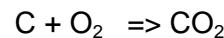
Este tipo de activación consta de varias etapas (Figura A3.6). Así, a veces son necesarios ciertos pretratamientos como la molienda y el tamizado para obtener un tamaño adecuado del precursor. Si el precursor es un carbón coquizable será necesario entonces una etapa de oxidación para eliminar las propiedades coquizables.

En otras ocasiones el material de partida es molido hasta formar un fino polvo, después compactado con algún aglomerante en forma de briquetas y luego vuelto a moler hasta obtener el tamaño deseado. De esta forma se consigue una mejor

difusión del agente activante y por tanto una mejor porosidad en el carbón activado resultante.

Otra etapa previa a la activación propiamente dicha es la carbonización, en la cual el precursor es sometido a elevadas temperaturas (del orden de los 800°C) en ausencia de aire, para eliminar las sustancias volátiles y dejar un residuo carbonoso que será el que se someta a la activación. Durante la desvolatilización, la salida de los gases y vapores del precursor produce una porosidad “incipiente” en el carbonizado, la cual se desarrolla aun más durante la etapa de activación.

La activación propiamente dicha puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo a continuación de ésta. Consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado; de forma que se produzca un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: Oxígeno (raramente a escala industrial) aire, vapor de agua (el más usado) y CO₂. Estos agentes dan lugar a las siguientes reacciones químicas que eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad.



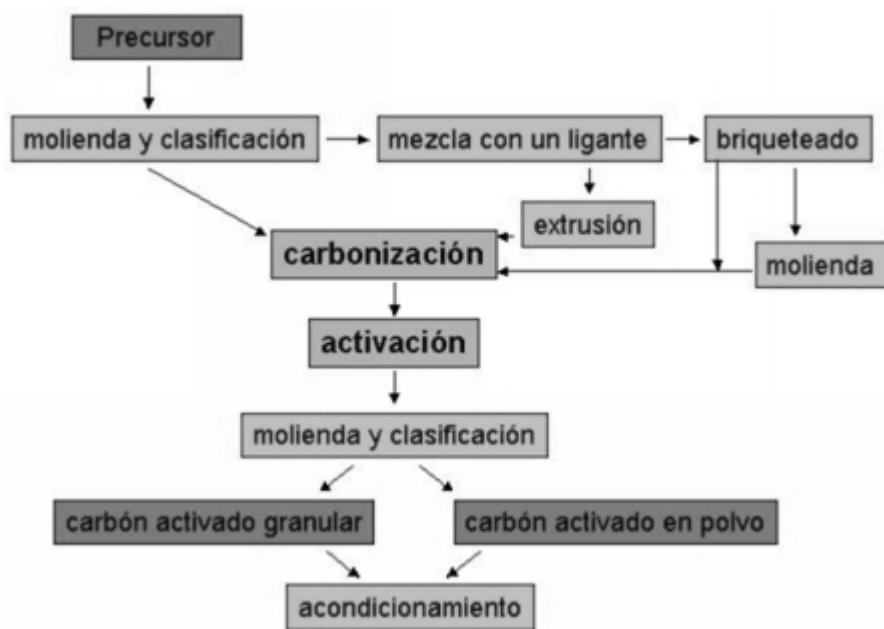


Figura A3.6. Diagrama de la activación física.

- Activación química: La activación química se basa en la deshidratación de la materia prima, mediante substancias químicas y a una temperatura media (400 a 600°C), ésta depende de la substancia química a utilizar para activar el carbón.

En este tipo de activación, es necesaria una etapa posterior de lavado del carbón activado para eliminar los restos del agente activante. Existen numerosos compuestos que podrían ser usados como agentes activantes, sin embargo los más usados industrialmente son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el hidróxido de potasio (KOH).

La activación química con H_3PO_4 prácticamente ha desplazado al $ZnCl_2$ y los precursores usados en este tipo de activación son en su mayoría, como en el caso del $ZnCl_2$, residuos forestales (madera, cáscara de coco, hueso de aceituna, etc.).

La activación con H_3PO_4 implica las siguientes etapas (Figura A3.7):

- molienda y clasificación del material de partida
- mezcla del precursor con H_3PO_4 (reciclado y fresco)

- tratamiento térmico en atmósfera inerte entre 100 y 200 °C, manteniendo la temperatura aproximadamente 1h
- tratamiento térmico hasta 400 – 500 °C, manteniendo esta temperatura en torno a 1h
- lavado, secado y clasificación del carbón activado
- reciclado del H_3PO_4

La proporción H_3PO_4 suele ser 1:5 (aunque proporciones diferentes dan lugar a carbones con distintas propiedades), el rendimiento en carbón activado suele ser del 50%.

La activación química con KOH se desarrolló durante los años 70, para producir los denominados “carbonos superactivados”, con superficies específicas del orden de los $3000 \text{ m}^2/\text{g}$.

A diferencia de los otros dos agentes activantes, los precursores preferibles para la activación con KOH son aquellos de bajo contenido en volátiles y alto contenido en carbono, como los carbonos minerales de alto rango, carbonizados, coque de petróleo, etc.

En esta activación el KOH se mezcla con el precursor, en una suspensión acuosa o mediante una simple mezcla física, en proporciones KOH: precursor entre 2:1 y 4:1. Cuando la impregnación tiene lugar en medio acuoso, la activación se lleva a cabo en dos tratamientos térmicos consecutivos en atmósfera inerte. El primero a temperaturas bajas, pero superiores a los 200 °C (que se utiliza solo para evaporar el agua y dispersar el KOH) y el segundo entre 700 y 900 °C. En el caso de una mezcla física no es necesario llevar a cabo el primer tratamiento.



Figura A3.7. Diagrama de la activación química.

A3.5. OPERACIONES DE ADSORCIÓN.

La adsorción puede llevarse a cabo en forma continua o discontinua. En operación discontinua, el carbón activo en polvo se mezcla con el agua residual y se deja decantar. La operación continua se lleva a cabo en columnas conteniendo carbón granular, es más económico que la operación discontinua y tiene más aplicaciones, por ello sólo se va a tratar los tipos de adsorbedores en operación continua.

Para grandes cantidades de líquido se emplean columnas empacadas con material granular. La alimentación puede ser flujo descendente o ascendente, el diámetro de las partículas entre 0,4 – 2,5 mm, para evitar excesiva caída de presión y disminuir pérdidas. En las columnas de lecho fijo muy raras veces se alcanza el equilibrio entre las fases.

- Adsorbedores de lecho fijo. Curva de ruptura.

Este es el más empleado en la práctica para tratar grandes caudales (Figura A3.8). La alimentación puede tener flujo descendente o ascendente, la concentración varía en espacio y tiempo, cuando se va a alcanzar la capacidad de adsorción del sólido, este se regenera y se vuelve a usar.

Las partículas de adsorbente se colocan en un lecho de 0,3 a 1,2 m de espesor soportado sobre un tamiz o placa perforada.

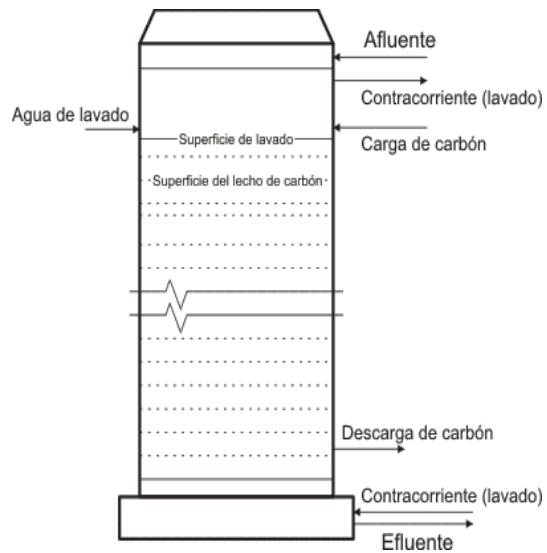


Figura A3.8. Columna de adsorción. Lecho fijo. Flujo descendente.

El flujo descendente de la alimentación es preferible debido a que el flujo ascendente a velocidades elevadas puede dar lugar a la fluidización de las partículas, lo que provoca colisiones y formación de finos.

El tamaño del lecho adsorbente está determinado por la velocidad de flujo de materia a tratar y por el tiempo de ciclo deseado.

Curva de ruptura. Se posee un fluido, el cual es una solución binaria, que contiene un soluto adsorbido. El fluido se va a pasar continuamente a través de un lecho relativamente profundo de adsorbente que al principio está libre de adsorbato. La capa superior de sólido, en contacto con la fuerte solución entrante, adsorbe al principio el soluto rápido y efectivamente; el poco remanente de soluto en la solución queda prácticamente eliminado por las capas de sólido en la parte inferior del lecho. El efluente del fondo del lecho está prácticamente libre de soluto. La distribución del adsorbato en el lecho sólido se indica en la parte superior de la figura A3.9, donde la zona oscura de la torre indica la concentración relativa de adsorbato. La capa superior del lecho está prácticamente saturada; la mayor parte de la adsorción tiene lugar en una zona de adsorción relativamente estrecha, en la

cual la concentración cambia rápidamente. Mientras continua fluyendo la solución, la zona de adsorción se mueve hacia a abajo como una onda, con una rapidez generalmente mucho más lenta que la velocidad lineal del fluido a través del lecho. Después de cierto tiempo, aproximadamente la mitad del lecho está saturado con soluto, y la parte inferior de la zona de adsorción ha alcanzado el fondo del lecho y la concentración de soluto en el efluente a la salida de la torre ha aumentado bruscamente por primera vez.

Se dice que el sistema ha alcanzado el punto de ruptura. Ahora la concentración de soluto en el efluente aumenta con rapidez, si la solución sigue fluyendo, ocurre poca adsorción adicional puesto que el lecho, esta completamente en equilibrio con la solución de alimentación.

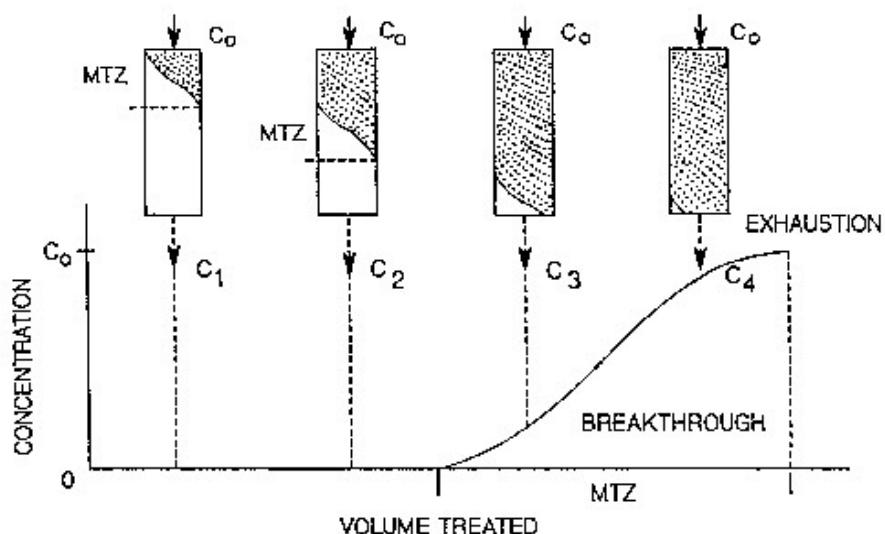


Figura A3.9. La onda de adsorción.

La forma y el tiempo de la aparición de la curva de ruptura influyen mucho sobre el método de operación de un adsorbedor de lecho fijo. Las curvas generalmente tienen una forma de S, pero pueden tener una gran pendiente o ser relativamente planas y, en algunos casos, considerablemente distorsionadas. Si el proceso de adsorción fuese infinitamente rápido, la curva de ruptura sería una línea vertical recta. La rapidez real y el mecanismo del proceso de adsorción, la naturaleza del equilibrio de adsorción, la velocidad del fluido, la concentración de soluto en la alimentación y la longitud del lecho adsorbedor, en particular si la concentración

de soluto en la alimentación es elevada, determinará la forma de la curva producida por cualquier sistema.

Por lo general, el tiempo de ruptura decrece al decrecer la altura del lecho, al aumentar el tamaño de partícula del adsorbente, al incrementarse el flujo del fluido a través del lecho y al crecer el contenido inicial de soluto de la alimentación.

- Adsorbedores continuos. Lecho móvil.

La adsorción a partir de gases o líquidos puede realizarse de forma realmente continua haciendo circular el sólido a través del lecho en contracorriente con el flujo del fluido. Las partículas sólidas descienden por gravedad, haciéndolas retornar después a la parte superior de la columna mediante un sistema de elevación con aire o de forma mecánica (Figura A3.10).

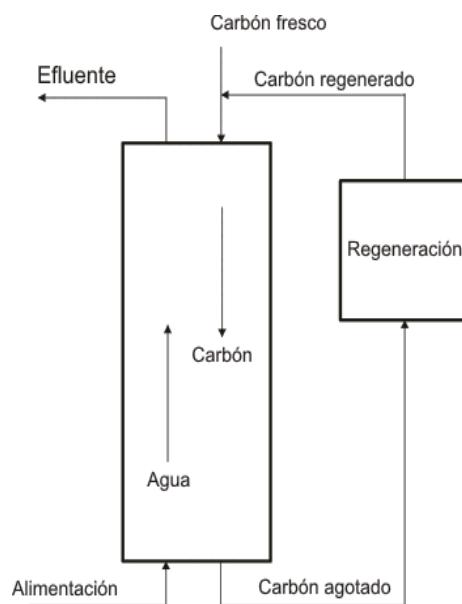


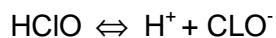
Figura A3.10. Lecho móvil. Flujo a contracorriente.

A3.6. DECLORACIÓN CON CARBÓN ACTIVO.

Una de las principales aplicaciones del CA es la decloración o la eliminación de cloro libre del agua. Dicho compuesto no proviene de las fuentes naturales de abastecimiento, tales como pozos, ríos o lagos. Tampoco es contaminante, sino que es un reactivo químico que se le agrega al agua, principalmente como desinfectante, y en ocasiones para controlar olor y sabor, y controlar el crecimiento biológico o eliminar amoniaco.

La decloración consiste en un mecanismo complicado que puede seguir distintos caminos de reacción en los que el CA puede intervenir como reactivo o como catalizador.

El cloro libre puede adicionarse al agua en forma de cloro líquido, solución de hipoclorito de sodio, o tabletas - gránulos - de hipoclorito de calcio. En cualquiera de estos casos, el resultado es el mismo, quedando el cloro disuelto en forma de ácido hipocloroso (HClO), un ácido débil que tiende a disociarse parcialmente.



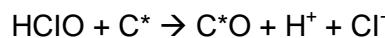
La distribución entre ácido hipocloroso e ión hipoclorito depende del pH y de la concentración de estas especies. A ambas formas moleculares se las define como cloro libre. Las dos son fuentes oxidantes que al ser adicionados al agua empiezan por reaccionar de manera casi inmediata con impurezas orgánicas e inorgánicas y susceptibles de oxidarse. El cloro que reacciona en esta etapa deja de ser libre y pasa a ser combinado. El restante requiere de algún tiempo que puede ir de unos cuantos segundos a varias decenas de minutos, según su concentración, para ejercer un efecto biocida en los microorganismos. Se cree que la toxicidad del cloro libre radica en la reacción de éste con el sistema enzimático de las células.

El cloro que interviene en esta etapa de desinfección, también se combina y deja de ser libre. Una vez terminada esta etapa, es necesario eliminar el cloro libre residual, no sólo porque es tóxico para el ser humano, sino porque imparte un mal olor y sabor al agua, interfiere con procesos industriales, daña a la mayoría de las

resinas de intercambio iónico utilizadas en los suavizadores y en los desmineralizadores, y afecta a las membranas de ósmosis inversa.

Aunque se han desarrollados varios procesos para disminuir los niveles de cloro libre en agua, la decloración en un lecho fijo de carbón activo granular (CAG) ha sido el más rentable, y por lo tanto el más común.

Se trata de un tanque cilíndrico vertical con una cama de CAG por la que se hace circular el agua. Cuando el carbón se expone al cloro libre, se llevan a cabo reacciones en las que el ácido HClO o el OCl^- se reducen a ión cloruro. Dicha reducción es el resultado de distintos caminos de reacción posibles. En dos de los más comunes, el CAG actúa como agente reductor, de acuerdo con las siguientes reacciones:



donde C^* representa al carbón activo. C^*O y C^*O_2 son óxidos superficiales, que poco a poco van ocupando espacios, que al quedar bloqueados, ya no participan en la reacción algunos de estos óxidos se liberan hacia la solución como CO y CO_2 . Esto vuelve a dejar espacios disponibles que por lo tanto aumentan la capacidad del CAG para esta reacción de reducción. En cuanto al cloruro, también se acumula en la superficie del carbón durante los primeros momentos de operación. Al seguir llegando HClO o ClO^- a la superficie del carbón, la reacción se hace un poco más lenta, y entonces se empieza a liberar el cloruro.

Esta disminución de velocidad se debe al envenenamiento del carbón con los óxidos superficiales. Dicho envenenamiento continúa de manera gradual, mientras disminuye la capacidad, tanto de adsorción como de decloración del CA.

En las reacciones anteriormente expuestas, puede intervenir el ClO^- , en lugar del HOCl, con la diferencia de que no se produce H^+ . Puede observarse que el carbón activo reacciona y por lo tanto desaparece. Si no hubiera acumulación de óxidos superficiales, la reacción continuaría hasta la desaparición completa del carbón.

Otro camino de reacción, en el que el carbón actúa solamente como catalizador, es el siguiente:



Esto se favorece cuando un importante porcentaje de la superficie del CAG ya está saturada. Por otro lado, existen muchas otras posibles reacciones, algunas de las cuales se llevan a cabo entre el cloro libre y los óxidos superficiales que estaban presentes en el carbón desde antes de su aplicación. Cada una de ellas puede formar otros grupos más complejos, con la subsecuente liberación de H^+ y Cl^- .

Un ejemplo de éstas es:



Con todo lo anterior se observa que la decloración es una operación compleja, en la que el CAG actúa como quimiadsorbente. Se han desarrollado varias expresiones matemáticas que intentan describir la decloración en lechos de carbón, pero ninguna de ellas ha sido suficientemente precisa.

Hay que aclarar que al mismo tiempo que el CAG actúa como declorador, adsorbe la materia orgánica presente en el agua. Por lo tanto, a mayor contaminación orgánica, disminuye su tiempo de vida como declorador, y viceversa. También hay que mencionar que aún cuando el carbón siga eliminando todo el cloro libre, puede ya no estar reteniendo materia orgánica. Es decir, termina antes su capacidad de adsorción física -de moléculas orgánicas - que su capacidad de declorar.

CONDICIONES QUE AFECTAN A LA DECLORACIÓN

1. Al disminuir el tamaño de partícula del CAG, aumenta considerablemente la velocidad de difusión, y por lo tanto la velocidad de decloración. Como consecuencia aumenta el tiempo de vida útil. El uso del menor tamaño de partícula posible, es la manera más sencilla y eficaz de lograr el mayor aprovechamiento del CAG.

2. El pH del efluente controla la forma del cloro libre en el agua. Cuando su valor es de 7,6 la mitad del cloro libre está presente como HClO y la otra mitad como ClO^- . La reacción del HClO con el carbón activo es mucho más rápida que la del ClO^- . A un pH de 4,0 casi todo es HClO y a un pH de 10,0 casi todo es ClO^- . Por lo tanto, mientras menor es el pH, la reacción es más rápida, y el resultado es un mayor tiempo de operación antes de detectar cloro libre en el efluente.

3. La velocidad de decloración aumenta al aumentar la temperatura, debido a que la viscosidad del agua disminuye, haciendo más rápida la difusión del cloro libre hacia la superficie del CAG. Como resultado, también se alarga la vida útil del carbón.

4. Al aumentar la concentración de cloro libre en el efluente, se satura el CAG en menor tiempo. Independientemente del valor que puedan tener las distintas condiciones anteriores, el CAG tiene una alta capacidad de decloración en relación con la de adsorción de contaminantes orgánicos.

A3.7. REGENERACIÓN.

En el proceso de adsorción, una vez que se llega al punto de ruptura, es decir, cuando la concentración de soluto en el fluido de salida alcanza un cierto valor, el lecho esta saturado en adsorbato, y es necesaria su regeneración o desorción.

Debido a la economía, generalmente es más factible regenerar el carbón gastado para su posterior reutilización que desecharlo; en el proceso de regeneración, el objetivo es remover de la estructura porosa del carbón los materiales adsorbidos previamente, y de esta manera reconstruir su habilidad para adsorber impurezas. Existen varias formas de regeneración que pueden ser aplicadas:

- Regeneración con vapor: este método se limita a la regeneración de carbón que sólo haya adsorbido algunos productos muy volátiles; sin embargo, la aplicación de vapor puede ser interesante para desobstruir la superficie de los granos y esterilizar el carbón.
- Regeneración térmica: por pirólisis y combustión de sustancias orgánicas adsorbidas. El calentamiento hasta unos 800°C, en atmósfera controlada, evita que se inflame el carbón. Es el método que más se emplea; con él se consigue

una buena regeneración del carbón activo, si bien se presenta un doble inconveniente:

- Requiere fuertes inversiones: según los casos, se utiliza un horno de bandejas escalonadas, de lechos fluidificados o un horno giratorio. El horno debe ir provisto de dispositivos de control de atmósfera y de temperatura, de un sistema de deshidratación a la entrada y de un temple de carbón a la salida del horno.
- Conduce a pérdidas de carbón elevadas (7 al 10% por regeneración), es decir que, al cabo de 10 a 14 regeneraciones se habrá cambiado estadísticamente toda la masa de carbón activo.
- Regeneración química: acción de un disolvente utilizado a una temperatura próxima a 100°C y a pH elevado. La ventaja de este procedimiento, a igualdad de inversión, es que produce unas pérdidas mínimas de carbón activo (del orden del 1% de la masa tratada).

A3.8. FÓRMULAS DE DISEÑO.

La ecuación para hallar el tiempo de agotamiento de una columna de adsorción es:

$$t_b = \frac{(q_e)_b M_c}{Q[C_i - (C_b/2)]} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde:

t_b = tiempo de agotamiento (h)

$(q_e)_b$ = capacidad de adsorción de agotamiento, es un porcentaje de la capacidad teórica de adsorción obtenida a partir de la isoterma. Se suele tomar un 25-50 % de $(q_e)_0$.

M_c = masa de carbón contenido en la columna (Kg)

Q = caudal (m^3/h)

C_i = concentración inicial del adsorbato (mg/l)

C_b = concentración al producirse el agotamiento (mg/l)

t = tiempo de servicio (h)

La ecuación de Bohart y Adams:

$$\ln\left[\left(\frac{C_0}{C_e}\right) - 1\right] = \ln\left(e^{\frac{KN_0D}{V}} - 1\right) - KC_0t \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

C_0 = concentración soluto inicial (mg/l)

C_e = concentración soluto permitida (mg/l)

K = constante de velocidad (l/g de carbón ·h)

N_0 = capacidad de adsorción (Kg soluto/m³ de carbón)

V = velocidad lineal (m/h)

D = profundidad del lecho (m)

t = tiempo de servicio (h)

A partir de la ecuación se desarrolla una ecuación para D_0 (profundidad crítica del lecho de carbón, m) es la profundidad teórica de carbón suficiente para evitar que la concentración de soluto en el efluente exceda del valor requerido.

Se obtiene de la Ec.10, haciendo $t=0$ y despejando D (que es igual a D_0 en este caso). Ya que el término exponencial de la ecuación es mucho mayor que la unidad, se desprecia el término unidad entre paréntesis en el primer miembro de la ecuación. El resultado final es:

$$D_0 = \left(\frac{V}{K \cdot N_0} \right) \ln\left[\left(\frac{C_0}{C_e}\right) - 1\right] \quad (\text{Ec.12.1})$$

Donde:

C_0 = concentración soluto inicial (mg/l)

C_e = concentración soluto permitida (mg/l)

K = constante de velocidad (l/g de carbón ·h)

N_0 = capacidad de adsorción (Kg soluto/m³ de carbón)

V = velocidad lineal (m/h)

D_0 = profundidad del lecho (m)

Y también se puede hallar la fórmula para el tiempo de servicio t:

$$t = \frac{N_0}{C_0 \cdot V} \cdot D - \ln \left[\left(\frac{C_0}{C_e} \right) - 1 \right] / KC_0 \quad (\text{Ec.12.2})$$

Donde:

C_0 = concentración soluto inicial (mg/l)

C_e = concentración soluto permitida (mg/l)

K = constante de velocidad (l/g de carbón ·h)

N_0 = capacidad de adsorción (Kg soluto/m³ de carbón)

V = velocidad lineal (m/h)

D = profundidad del lecho (m)

t = tiempo de servicio (h)

ANEXO 4: ÓSMOSIS INVERSA.

A4.1. DEFINICIÓN.

El fenómeno de la ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio. Cuando se ponen en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme (Figura A4.1). Si estos fluidos están separados por una membrana permeable (la cual permite el paso a su través de uno de los fluidos), el fluido que se moverá a través de la membrana será el de menor concentración de tal forma que pasa al fluido de mayor concentración.

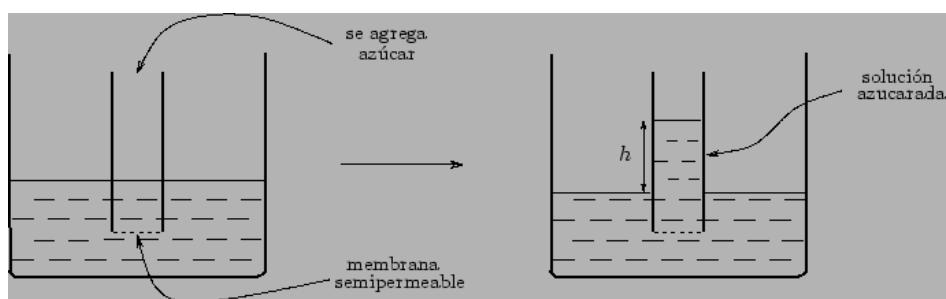


Figura A4.1. Presión osmótica.

Al cabo de un tiempo el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como presión osmótica.

Cuando se aplica una presión superior a la presión osmótica el agua fluirá de la disolución más concentrada a la más diluida como se muestra en la figura A4.2. Así se realiza el proceso inverso a la ósmosis, o lo que es llamado ósmosis inversa.

Se trata de un proceso con membranas. Para poder forzar el paso del agua que se encuentra en la corriente de salmuera a la corriente de agua con baja concentración de sal, es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica. Como consecuencia a este proceso, la salmuera se concentrará más.

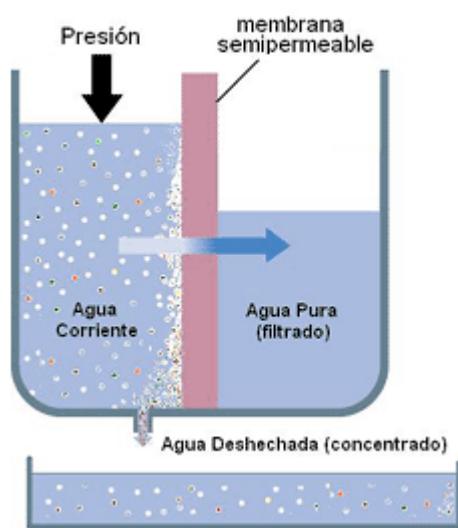


Figura A4.2. Ósmosis inversa.

A4.2. MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA.

La parte más importante del proceso de ósmosis inversa son las membranas. Éstas pueden clasificarse en función de distintos parámetros, como muestra la Tabla A4.1.

Tabla A4.1. Clasificación de las membranas de ósmosis inversa.

PARÁMETROS	TIPOS
ESTRUCTURA	Simétrica
	Asimétrica
NATURALEZA	Integrales
	Compuestas de capa fina
FORMA	Planas
	Tubulares
	Fibra hueca
	Espirales
COMPOSICIÓN QUÍMICA	Orgánicas
	Inorgánicas
CARGA SUPERFICIAL	Neutras
	Catiónicas
	Aniónicas
MORFOLOGÍA DE LA SUPERFICIE	Lisas
	Rugosas
PRESIÓN DE TRABAJO	Muy baja
	Baja
	Media
	Alta
TÉCNICA DE FABRICACIÓN	De máquina
	Dinámica

A4.2.1. Clasificación según la estructura.

Atendiendo a la estructura que presentan en un corte transversal a la superficie en contacto con la solución a tratar, las membranas pueden ser:

- Simétricas

Se llaman membranas “simétricas” u “homogéneas” a aquellas cuya sección transversal ofrece una estructura porosa uniforme a lo largo de todo su espesor, no existiendo zonas de mayor densidad en una o ambas caras de la membrana.

Actualmente se utilizan en otras técnicas pero no son aptas para la ósmosis inversa.

- Asimétricas

Un corte transversal de una membrana de este tipo presenta en la cara en contacto con la solución de aporte, una capa extremadamente densa y delgada bajo la cual aparece un lecho poroso. Esta capa densa y delgada se denomina “capa activa” y es la barrera que permite el paso del solvente e impide el paso del soluto. El resto de la membrana constituye el soporte de la capa activa ofreciendo una resistencia mínima al paso del solvente. Las membranas asimétricas son las utilizadas industrialmente en proceso de la ósmosis inversa.

A4.2.2. Clasificación según la naturaleza.

Atendiendo a su naturaleza, las membranas “asimétricas” de ósmosis inversa pueden ser:

- Integrales

En las membranas “integrales” existe continuidad entre la capa activa y el lecho poroso soporte siendo ambos del mismo polímero. Los dos tienen la misma composición química y entre ellos no hay una clara separación, sino un aumento progresivo de la porosidad.

- Compuestas de capa fina

En las membranas compuestas de capa fina, la “capa activa” y el sustrato microporoso que le sirve de soporte son de materiales diferentes. La membrana consta de tres capas de distintos materiales que, en orden descendente, son:

- Capa superior: Capa activa.
- Capa intermedia: Lecho poroso de la capa activa.
- Capa inferior: Tejido reforzado responsable de la resistencia mecánica de la membrana.

A4.2.3. Clasificación según su forma.

Atendiendo a la forma que presenta la membrana, una vez fabricada, se pueden distinguir los siguientes tipos:

- Planas

Este tipo de membranas, como indica su nombre, presenta una capa activa plana.

- Tubulares

Las membranas tubulares (Figura A4.3) se construyen en forma de tubo hueco, de distintas longitudes. La capa activa en este tipo de membranas suele encontrarse en la superficie interior del tubo.

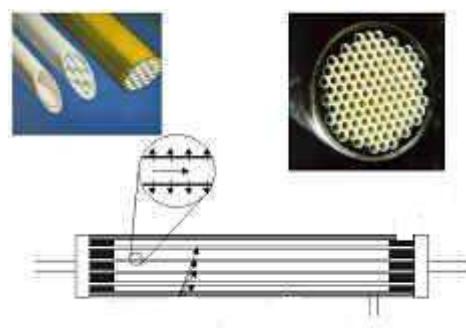


Figura A4.3. Membranas tubulares.

- Fibra hueca

A estas membranas también se las llama “capilares” ya que su aspecto es el de una fibra de tejer hueca o el de un tubo capilar hueco del tamaño de un cabello humano (figura A4.4).

Se fabrican con varios centenares de miles de membranas de fibra hueca dobladas en forma de “U” y colocadas paralelamente a un tubo central. Las membranas se fijan en ambos extremos mediante resina epoxi para dar estabilidad al haz así formado.

La solución de aporte se introduce a presión en el tubo central quien la reparte radial y uniformemente a través de todo el haz de fibras. Cuando la solución a tratar entra en contacto con la superficie exterior de la fibra donde se encuentra la capa activa, una parte de la misma (el permeado) atraviesa la fibra moviéndose por su interior hueco hasta el extremo abierto.



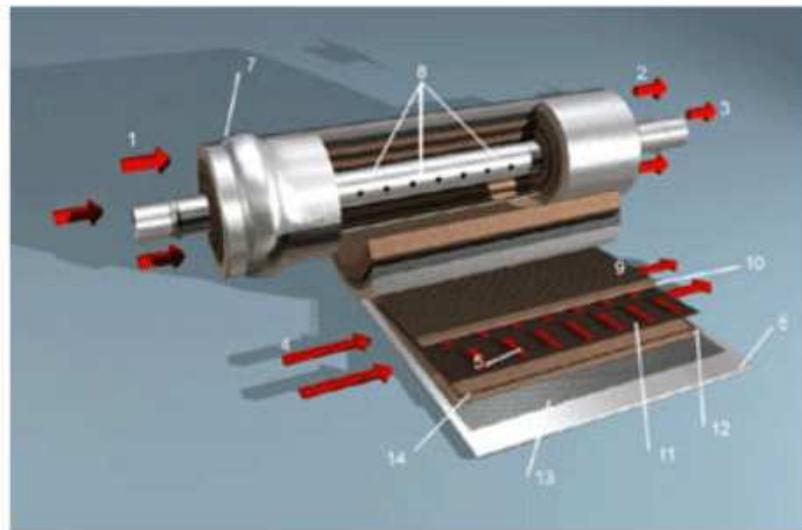
Figura A4.4. Membrana de fibra hueca.

- Espirales

Esta configuración se llama así porque está formada por membranas planas enrolladas en espiral alrededor de un tubo central, como se puede observar en la figura A4.5.

Cada “paquete”, consta de una lámina rectangular de membrana semipermeable doblada por la mitad de forma que la capa activa quede en su exterior. Entre las dos mitades se coloca un tejido provisto de diminutos canales para recoger el permeado que atravesie la membrana y conducirlo hacia el tubo central de recogida.

Encima de la capa activa de la membrana se coloca una malla provista de canales de distribución para repartir homogéneamente la solución de aporte sobre toda la superficie de la membrana.



(1) Agua bruta alimentación (2) Rechazo (3) Salida de agua permeada
 (4) Flujo de agua bruta (5) Flujo de permeada (6) Material de protección
 (7) Junta de estanqueidad entre módulo y envolvente
 (8) Perforaciones de recogida de agua permeada (9) Espaciador
 (10) Membrana (11) Colector de agua permeada (12) Membrana
 (13) Espaciador (14) Línea de soldadura de las dos membranas

Figura A4.5. Membrana en espiral.

A4.2.4. Clasificación según la composición química.

Atendiendo a la composición química de la capa activa, las membranas pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Orgánicas.
- Inorgánicas.
- **MEMBRANAS ORGÁNICAS.**

Reciben este nombre todas aquellas membranas cuya capa activa está fabricada a partir de un polímero o copolímero orgánico. Aunque existe un gran número de polímeros, copolímeros y mezclas, tanto naturales como sintéticos con los que se pueden fabricar membranas, muy pocas de éstas son aptas para la ósmosis inversa. De todos los compuestos orgánicos, los que han tenido éxito en la fabricación de membranas de ósmosis inversa son:

1. Acetato de celulosa (CA).
2. Triacetato de Celulosa (CTA).
3. Poliamida Aromática (AP).
4. Poliéter-Urea.
5. Poliacrilonitrilo.
6. Polibencimidazola.
7. Polipiperacidamidas.
8. Polifurano sulfonado.
9. Polisulfona sulfonada.

- **MEMBRANAS INÓRGANICAS.**

Las membranas orgánicas presentan dos limitaciones importantes que reducen su campo de aplicación: su estabilidad química y la resistencia a la temperatura. La búsqueda de soluciones a estos dos problemas ha desembocado en la utilización de materiales inorgánicos para su fabricación.

Los cuatro grandes grupos en que se pueden clasificar las membranas inorgánicas son:

1. Cerámicas.
2. Vidrios.
3. Fosfacenos.
4. Carbonos.

A4.2.5. Clasificación según la carga superficial.

A veces los polímeros orgánicos con que se fabrican las membranas de ósmosis inversa tienen, en su estructura molecular, un exceso de grupos químicos (aminas, sulfónicos, carboxílicos, etc.), lo que confiere a la superficie activa de éstas una cierta naturaleza eléctrica que suele medirse determinando su "potencial Z". Este parámetro da una idea de la carga eléctrica existente por unidad de superficie. Atendiendo a esta naturaleza, las membranas pueden ser:

- Neutras. Aquellas que no presentan ninguna carga eléctrica. En estas membranas su "potencial Z" sería nulo.
- Catiónicas. Son aquellas en las que la carga eléctrica sobre su superficie es positiva.
- Aniónicas. Son aquellas en las que la carga eléctrica sobre su superficie es negativa

A4.2.6. Clasificación según la morfología de su superficie.

Atendiendo al aspecto que presenta la cara exterior de la capa activa, las membranas pueden ser:

- Lisas.
- Rugosas.

A4.2.7. Clasificación según la presión de trabajo.

El parámetro fundamental que define las condiciones de operación de una planta de ósmosis inversa es la presión de trabajo. Como dicha presión debe ser varias veces superior a la presión osmótica de la solución de aporte, debido, por un lado, a los fenómenos de polarización de la membrana, y por otro, al aumento de concentración que se produce a medida que se va generando permeado, su valor vendrá condicionado por la salinidad de la solución a tratar.

En la actualidad, las membranas de ósmosis inversa disponibles en el mercado pueden encuadrarse en una de las cuatro categorías siguientes:

- Membranas de muy baja presión. Son las que trabajan con presiones comprendidas entre 5 y 10 bares.
- Membranas de baja presión. Este tipo de membranas trabajan a una presión comprendida entre 10 y 20 bares,
- Membranas de media presión. La presión de trabajo de estas membranas está comprendida entre 20 y 40 bares.
- Membranas de alta presión. Estas membranas se han desarrollado para poder obtener agua potable a partir del agua del mar. Su presión de trabajo, debido a la elevada presión osmótica del agua de mar (20-27 bares, llegando en el Mar Rojo a 35 bares), está comprendida entre 50 y 80 bares.

A4.3. FÓRMULAS DE DISEÑO.

La presión osmótica es la presión que se debe aplicar a una solución para que se produzca un flujo de disolvente a través de una membrana semipermeable:

$$\pi = c \cdot R \cdot T \quad (\text{Ec.13})$$

Donde:

π = presión osmótica (atm)

c = concentración de la solución (moles/litro)

R = constante de los gases ideales = 0,082 $\frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$

T = temperatura (K)

Factor de rechazo (R), porcentaje de eliminación de cierta sustancia mediante ósmosis inversa:

$$R = 100 \frac{C_a - C_p}{C_a} \quad (\text{Ec.14})$$

Donde:

C_a = concentración de alimentación

C_p = concentración del producto

Recuperación (C) es la relación (%) entre el volumen de agua permeada y la alimentación:

$$C = 100 \frac{Q_{ap}}{Q_{aa}} \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

Q_{ap} = caudal de agua permeada

Q_{aa} = caudal de la corriente de alimentación

Ecuación para hallar la superficie de membrana requerida:

$$Q_{ap} = K_a (p - \pi) \cdot S \quad (\text{Ec.16})$$

Donde:

π = presión osmótica (atm)

Q_{ap} = caudal del agua producto (mol/s)

K_a = constante de la membrana de ósmosis (mol / $\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{atm}$)

p = presión de la membrana (atm)

S = superficie de la membrana (m^2)

10. BIBLIOGRAFÍA

- PÁGINAS WEB (Orden por fecha de lectura):

- 1 - www.scribd.com: Documentos y libros de Internet (Consulta permanente durante la elaboración del proyecto)
- 2 - www.lenntech.es: Soluciones para el tratamiento del agua (Consulta permanente durante la elaboración del proyecto)
- 3 - www.zaragoza.es: Ayuntamiento de Zaragoza (Consulta permanente durante la elaboración del proyecto)
- 4 - www.sciencedirect.com.roble.unizar.es:9090. Revistas y libros electrónicos (Consulta permanente durante la elaboración del proyecto)
- 5 - www.textoscientificos.com. Artículos científicos (Consulta permanente durante la elaboración del proyecto)
- 6 - www.monografias.com: Documentos en Internet (Consulta permanente durante la elaboración del proyecto)
- 7 - payala.mayo.uson.mx: Universidad de Sonora, química en línea (6/11/09)
- 8 - www.clubdelamar.org: El paraíso de la pesca (6/11/2009)
- 9 - www.planetaqua.huertayjardineria.com: Información sobre el agua (6/11/09)
- 10 - www.nutricionlandia.com: Información fiable, cercana y práctica sobre cultura de la salud (6/11/2009)
- 11 - www.cricyt.edu.ar: Web especializada en agua y contaminantes (7/11/2009)
- 12 - platea.pntic.mec.es: Gobierno de España, Ministerio de educación (7/11/2009)
- 13 - prueba2.aguapedia.org: enciclopedia sobre el agua (20/11/2009)
- 14 - www.ambientechn.org: Portal educativo de ciencias, tecnología y medio ambiente (20/11/2009)
- 15 - www.kifiba.com: Laboratorios Kifiba (23/11/2009)

- 16 - www.educalia.org: Recursos educativos (23/11/2009)
- 17 - cmeal.fr: Centro de dirección Europa y América Latina (23/11/2009)
- 18 - www.elperiodicodearagon.com: El periódico de Aragón (23/11/2009)
- 19 - www.miliarium.com: Ingeniería civil y medio ambiente (23/11/2009)
- 20 - portal.aragon.es: Gobierno de Aragón (30/11/2009)
- 21 - www.iagua.es: información y opinión sobre el agua (30/11/09)
- 22 - teleobjetivo.org: Blog sobre ciencia, tecnología y fotografía (30/11/2009)
- 23 - www.worldwater.org: Instituto del Pacífico (30/11/2009)
- 24 - www.oviedo.es: Ayuntamiento de Oviedo (15/12/2009)
- 25 - www.aquapurificacion.com: Tratamiento de aguas (12/2010)
- 26 - www.drinking-water.org: El agua potable es esencial (16/12/2009)
- 27 - www.gits.ws: Grupo de investigación en transporte de sedimentos (16/12/2009-20/01/2010)
- 28 - www.invenia.es: gestión del conocimiento (15/01/2010)
- 29 - www.carbotecnia.info: Empresa dedicada al carbón activado (15/01/2010-26/04/2010)
- 30 - www.ict-filtracion.com: Líderes de fabricación de telas filtrantes (16/12/2009-12/01/2010)
- 31 - www.ict-filtracion.com: Web sobre el agua y acuarios (12/01/2010)
- 32 - www.uem.es: Escuela de arquitectura de Madrid (22/01/2010)
- 33 - www.fresnovalves.com: Filtros de arena y grava verticales (13/02/2010)
- 34 - arena.elregante.com: Filtros de arena (11/02/2010)

- 35 - www.fsi-filtracion.com: Ingeniería dedicada al diseño, fabricación e instalación de equipos y procesos de separación de fases sólido-líquido, con especial focalización a los procesos de decantación y filtración (15/01/2010-16/04/2010)
- 36 - www.sefiltra.com: Filtros de arena y carbón activo (02/2010)
- 37 - www.uclm.es: Universidad de Castilla La Mancha (02/2010)
- 38 - www.ciberteca.net: Soluciones globales para el tratamiento de agua (02/2010)
- 39 - www.carbonactivo.com: Empresa de carbón activado (03/2010)
- 40 - www.filtros-carbon-activo.com: Empresa de filtros de carbón activo (03/2010)
- 41 - www.desotec.com: Carbón activo (03/2010-05/2010)
- 42 - www.condorchem.com: Empresa de tratamientos de agua y aire (05/2010)
- 43 - www.unitek.com.ar: Ingeniería en tratamiento de agua (05/2010)
- 44 - www.slideshare.net: Presentaciones de diversos temas en Internet (06/2010)
- 45 - www.acquamatter.com: Ósmosis inversa doméstica y destiladores (06/2010)
- 46 - www.osmosisdomestica.com: Ósmosis doméstica (06/2010)
- 47 - www.carbonapelsa.com: Carbones activos (06/2010)
- 48 - www.4ujaen.es/docencia_archivos: Universidad de Jaén (15/06/10)
- 49 - www.searecovery.com/Spanish/membranes.html: Desalinizadores mediante ósmosis inversa (14/07/10)
- 50 - www.pipelife.es: Empresa de tuberías (07/2010)
- 51 - www.grundfos.es: Empresa de todo tipo de accesorios para agua (07/2010)
- 52 - tiendaagricola.com: Tienda de accesorios, tanques (08/2010)

• LIBROS:

53 - Teoría y práctica de la purificación del agua / Jorge Arboleda Valencia / Editorias McGrawHill / 2000 / Colombia

54 - Desalación de aguas / Juan Carlos Ibahim Perera / Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos / 1999 / Madrid

55 - Potabilización del agua / Jairo Alberto Romero Rojas / Alfaomega / 1999 / México

56 - Operaciones de separación en Ingeniería Química / Pedro J. Martínez de la Cuesta y Eloísa Rus Martínez / Editorial Pearson / 2004 / Madrid

57 - Ingeniería química / J. M. Coulson y J. F. Richardson / Editorial Reverté /1984 / Barcelona

58 - Operaciones unitarias en ingeniería química / Warren L. McCabe, Julian C. Smith y Peter Harriot / Editorial McGrawHill / 2007 / México

59 - Tratamiento de aguas / R. S. Ramalho / Editorial Reverté / 2003 / Barcelona

60 - Manual del Ingeniero Químico / Robert Perry / Editorial McGrawHill / 2001 / Madrid

61 - Operaciones básicas de Ingeniería Química / McCabe, Smith y Harriot / Editorial McGrawHill / 1991 / Madrid

62 - Ingeniería de aguas residuales / Metcalf y Eddy / Editorial McGrawHill / 1996 / Madrid

63 - Fisicoquímica / Gilbert W. Castellan / Editorial Pearson / 1987 / Argentina

64 - Muestreo y descripción de suelos / J. M. Hodgson /Editorial Reverté / 1987 / Barcelona

- Artículos u otros:

65 - Granular Activated Carbon Purification of Brewing Water Supplies: Selection, Usage, Monitoring, and Replacement / Gil W. Sanchez / 2001

66 - Filtración lenta en arena para abastecimiento público de agua en países en desarrollo / Van Dijk, J.C.; Oomen, J. / IRC/OMS/CEPIS. Serie Documentos Técnicos /1978

67 - Divulgación Técnica, 76. Lima, OPS/CEPIS, UNATSABAR / 2000

68 - Proceso de producción de café descafeinado / Rubén Perdices / Marzo 2010 / E.U.I.T.I.Z.

- Consultas a profesionales:

69 - Departamento de Marketing de Bombas Grundfos España, S.A.

70 - Ing. Javier Lozano Allende de Apelsa Guadalajara S.A.

71 - Santi Llauradó del departamento de ingeniería de Depuradoras Totagua, S.L.