

TEMA 3.2 SUMINISTRO DE AGUA

CI41B Ingeniería Ambiental

Profesores D. Rodríguez, R. Muñoz, J. Cornejo y C. Espinoza
Semestre Otoño 2004

1. INTRODUCCION

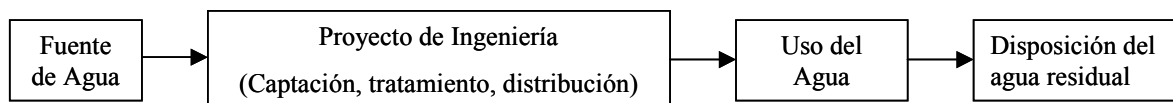
El problema de suministro de agua para un fin específico necesita resolver tres aspectos fundamentales:

- Determinar las demandas de agua y la calidad requerida para el uso.
- Identificar la fuente de abastecimiento, evaluando la disponibilidad y calidad del recurso.
- Definir el proyecto de ingeniería con sus diferentes componentes que permite utilizar el agua en la cantidad requerida y con la calidad exigida por la norma o por la naturaleza del uso previsto.

Además, para resolver globalmente el problema debe considerarse la disposición de las aguas usadas.

En la Figura 1 se muestra un esquema general de los componentes principales de un suministro de agua.

Figura 1
Esquema Conceptual de un Sistema de Suministro de Agua



1.1 Suministro de Agua Potable

Objetivo: entregar agua en cantidad suficiente y con la calidad requerida, a la población que se debe abastecer.

Requerimiento de calidad: cumplimiento de la norma chilena NCh 409 Of. 84.

Requerimiento de cantidad: suficiente para satisfacer las necesidades básicas de toda la población a abastecer (cobertura cercana al 100%), con una seguridad de abastecimiento cercana al 100%. Para ello se precisa conocer la población o abastecer y su crecimiento futuro y adoptar, de acuerdo a condiciones preestablecidas el consumo per cápita (dotación) que satisface las necesidades básicas.

Para cumplir el objetivo de cantidad es necesario seleccionar una o varias fuentes de agua que tengan una alta seguridad para entregar el caudal requerido. Para cursos de agua es necesaria una seguridad hidrológica, determinada en función de la probabilidad de que un cierto caudal sea igualado o excedido (probabilidad de excedencia) superior al 95% y deseable que sea mayor al 99%, además de contar con los derechos de aprovechamiento respectivos.

En general, los proyectos de suministro o abastecimiento de agua potable tienen una concepción y desarrollo similar orientados a dar respuesta a las siguientes variables:

- Cuánta agua se requiere (población y dotación que definen la demanda).
- Cuál es el período de servicio del proyecto (período de previsión que define el tamaño del proyecto).
- Cuál es la fuente de agua a utilizar (determinación de la cantidad y calidad del agua, esta última determina las necesidades de tratamiento).

2. DEMANDA DE AGUA POTABLE

La demanda media de agua potable puede ser definida como el producto entre la población y la dotación, según la expresión:

$$Q_{medio} = Población (háb) \cdot dotación (l / háb / día)$$

donde **dotación** corresponde a la cantidad media de agua necesaria por habitante y por día, considerando necesidades residencial, comercial, industrial pequeña y otros consumo, comúnmente se expresa en l/háb-día.

La dotación es un valor que puede asignarse o determinarse del análisis de registros estadísticos de consumo o de producción. Su valor depende de muchas variables, entre otras, del clima, condición socio-económica de la población, disponibilidad y costo del agua.

Por ejemplo, en abastecimientos rurales, los proyectos sociales asignan una dotación del orden de los 100 l/háb-día, mientras Aguas Andinas registra una dotación media del orden de los 200 l/háb-día. Finalmente, empresas que abastecen sectores pequeños de nivel socio-económico alto registran dotaciones medias del orden de 800 l/háb-día.

También es importante mencionar que debe diferenciarse dos tipos de dotación:

- De consumo: registrada a nivel de medidor domiciliario.
- De producción: determinada a nivel de fuentes de producción.

Esto se debe a que las empresas de suministro de agua potable tienen pérdidas de agua en las distintas etapas del abastecimiento (proceso de producción, roturas de redes de distribución, grifos, conexiones ilegales, subcontaje en los medidores). En general, valores de pérdida inferiores al 20%, define característica de alta eficiencia.

Un ejemplo de lo anterior puede apreciarse para el año 1997, en que las pérdidas de agua fueron estimadas por la Superintendencia de Servicios Sanitarios en:

- EMOS: 22%
- ESVAL: 38%
- Aguas Cordillera: 21%
- Aguas Manquehue: 9%

Para relacionar las dotaciones de producción y consumo se utiliza la expresión:

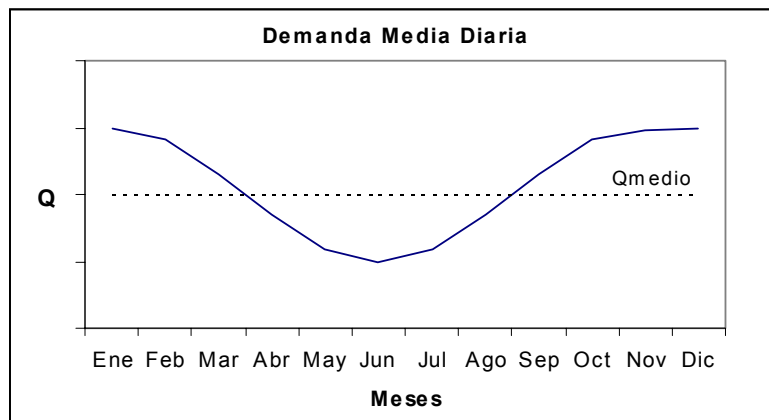
$$Q_{prod} = \frac{Q_{consumo}}{(1 - p)}$$

donde p: pérdida de agua en tanto por uno.

Por otra parte, el crecimiento de la población debe determinarse en base a un estudio que se apoya en los censos de población y condiciones particulares de la localidad aplicando métodos analíticos para extrapolar al futuro. En general, la tendencia actual indica que tanto la dotación como la población tienden a incrementarse.

La demanda media diaria representa un consumo diario constante a lo largo de un período. Sin embargo, por razones de clima y uso del agua, este consumo será diferente en los distintos meses (variación estacional), correspondiendo a un mes de verano el consumo máximo en el año (ver Figura 2).

Figura 2
Variaciones de la Demanda Durante el Año



El mes de máximo consumo en el año, tampoco tiene un consumo diario uniforme existiendo algunos días en los cuales ese consumo por día es máximo que corresponde a la **Demanda Máxima Diaria**, lo cual puede apreciarse en la Figura3.

Asimismo, en el día de máximo consumo (del mes de máxima demanda), se producirá una variación horaria, el máximo valor para 1 hora se denomina **Demanda Máxima Horaria**, relacionada con el gasto día-noche y los hábitos de la población (ver Figura 4).

Figura 3
Variaciones Diarias Durante el Mes de Máxima Demanda

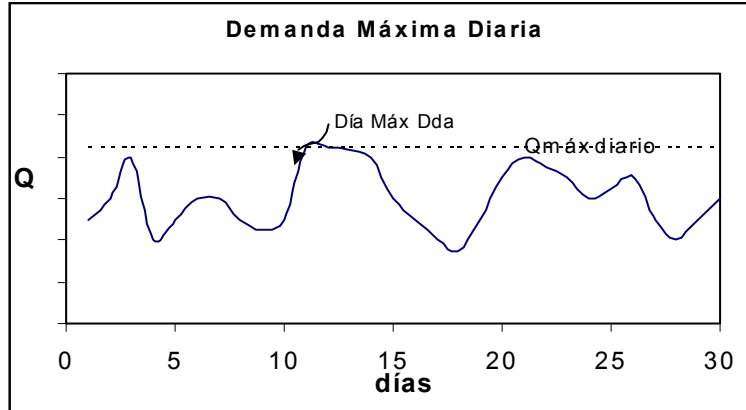
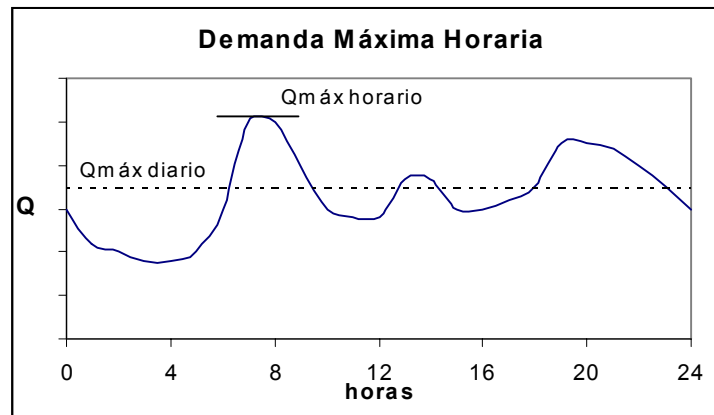


Figura 4
Variaciones Horarias Durante el Día de Máxima Demanda



Las demandas máximas se relacionan entre si y con la demanda media diaria por medio de coeficientes de gasto cuyos valores se estiman en base a resultados empíricos. Así, es posible definir:

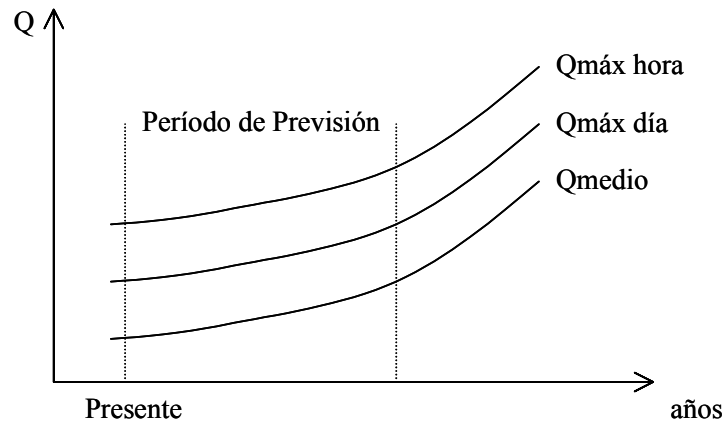
$$Q_{máz\ día} = C_{md} \cdot Q_{medio} \quad \text{donde } C_{md}: \text{coeficiente de demanda máxima diario (1.2-2.0)}$$

$$Q_{máz\ hora} = C_{mh} \cdot Q_{máz\ día} \quad \text{donde } C_{mh}: \text{coeficiente de demanda máxima horaria (1.4-3.0)}$$

Para los coeficientes de gasto máximo, C_{md} y C_{mh} , normalmente se adoptan valores entre 1,4 y 1,6. Los valores máximos de C_{md} se pueden dar en lugares con gran población flotante en los cuales generalmente se produce restricción en el abastecimiento. Los valores máximos de C_{mh} se pueden dar en localidades pequeñas con población de hábitos similares.

La proyección en el tiempo, incluyendo crecimiento de la población y dotación, da origen a las curvas de demanda anual como las que se muestran en la Figura 5.

Figura 5
Curvas de Demanda de Agua Potable



Las demandas máxima diaria y máxima horaria son utilizadas para definir la capacidad necesaria de las fuentes de suministro de agua y el tamaño de los distintos elementos que componen un sistema de abastecimiento de agua potable, o también verificar la capacidad de algunos de ellos. Previo al diseño o verificación del sistema es necesario definir el período de servicio del proyecto denominado comúnmente **período de previsión**, que es el período para el cual se evalúa el proyecto de abastecimiento.

Cabe señalar que el período de previsión no necesariamente coincide con la vida útil de las obras (vida útil física \neq período de previsión), pudiendo ésta última ser mayor, dando lugar a valores residuales de la inversión.

Determinada la demanda a lo largo de un período de tiempo cualquiera, es necesario definir el período para el cual se proyectaran las obras requeridas, por medio de cual se define el tamaño de éstas.

El período de previsión está asociado principalmente a las condiciones generales de la economía y del ente ejecutante y a factores técnico económicos propios del proyecto.

Factores importantes en la adopción del período de previsión:

2.1 Económicos

Tasas de interés e inflación. Reflejan la disponibilidad de recursos económicos y la estabilidad general de la economía.

El incremento de esas variables produce una reducción del período adoptado.

2.2 Técnicos

Nivel tecnológico (obsolescencia y desarrollo de equipos)

Tamaño de las obras necesarias. Demandas.

El período de previsión es una característica que debe definirse para cualquier proyecto

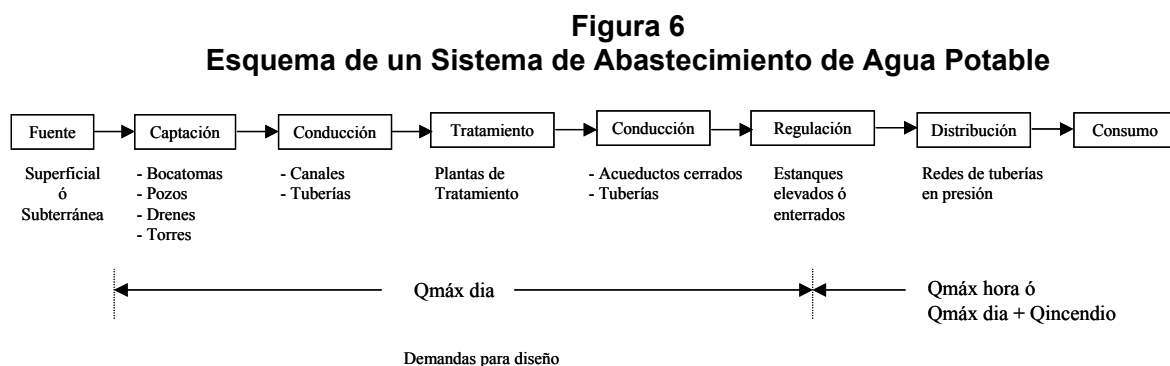
evaluado económicamente y es adoptado o determinado por el mandante. En agua potable los períodos adoptados no son mayores a 15 años.

Existen varios métodos para determinar el período de previsión, basados en los beneficios obtenidos al evaluar proyectos de diferente tamaño.

También pueden aplicarse modelos analíticos que evalúan una situación simplificada, empleando las variables más relevantes.

3. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

La Figura 6 muestra el esquema de un sistema de abastecimiento de agua potable con sus componentes principales y las demandas que se utilizan en el diseño.



El largo período de tiempo en el cual se ha proyectado, construido y operando sistemas de abastecimiento de AP con componentes similares permite contar con numerosa experiencia que hace posible establecer muchas de las condiciones que es necesario cumplir en el dimensionamiento y diseño de esos componentes, correspondiendo prácticamente a un sistema normado. Esto es especialmente válido para la regulación y distribución.

3.1 Regulación

Corresponde al volumen que es necesario almacenar para satisfacer la diferencia entre la demanda máxima diaria y horaria, incluyendo además un volumen adicional de seguridad para hechos eventuales previstos (incendio, reparaciones, etc).

En general, el volumen de regulación corresponde a un 15 a 20% de la demanda máxima diaria, expresada como volumen diario.

3.2 Distribución

Corresponde a un sistema interconectado de tuberías que forman una red de distribución que opera en presión. El nivel de presión debe mantenerse entre los límites señalados a continuación:

- Presión máxima: 70 m.c.a. (limitar roturas, proteger artefactos domiciliarios, disminuir pérdidas).
- Presión mínima: 15 m.c.a. (abastecer hasta edificios de 4 pisos, permitir funcionamiento de calefont, entregar gasto de grifos de incendio).

Las redes, además de los grifos de incendio y las conexiones domiciliarias, tienen válvulas que permiten aislar pequeños sectores para efectuar reparaciones y otros elementos que pueden ser necesarios.

3.3 Tratamiento

Corresponde a uno o varios procesos físicos y físico-químicos secuenciales, destinados a remover o reducir el contenido de sustancias objetables en el agua para consumo humano. En este punto se analiza aspectos básicos del tratamiento de agua potable y su generalización al tratamiento físico-químico utilizable para obtener aguas de diferente calidad a partir de distintas fuentes.

En algunos casos, los requerimientos de calidad del agua para uso industrial pueden ser mayores a los del agua potable y es necesario incorporar procesos adicionales y en otros la situación es la inversa.

A través de algunos ejemplos puede clasificarse lo señalado previamente. El agua potable debe estar libre de microorganismos (patógenos y no patógenos) para lo cual siempre requiere un proceso para garantizar su eliminación, en algunos usos industriales esto puede no ser necesario. Algunos procesos o productos industriales requieren agua con bajo contenido de dureza (sales de calcio y magnesio) cuyo límite en agua potable puede ser superior y es necesario incorporar procesos para removerla, denominados de ablandamiento. El agua de bacterias está libre de la totalidad de sólidos y por lo tanto es necesario desmineralizar el agua potable para ese uso.

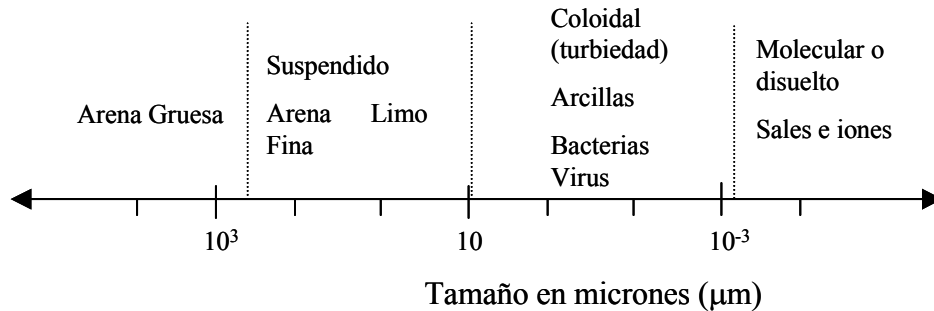
En general, la selección del sistema de tratamiento debe cumplir con el objetivo de eficiencia técnica y económica, es decir, seleccionar entre las posibles alternativas que cumplen con el objetivo de calidad de agua requerido, aquella de menor costo total (inversión más operación).

4. TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

En los puntos siguientes se analizan algunos de los sistemas o procesos de tratamiento más comunes aplicados a las fuentes naturales de agua (superficiales, subterráneas y agua de mar). Estos sistemas, por las características de las aguas (sustancias principalmente inorgánicas) utilizan procesos físico-químico para la remoción de las sustancias objetables y de aquí que se denomina tratamiento físico-químico.

Para explicar el objetivo de los distintos procesos que se utilizan en el tratamiento físico-químico se asociarán estos al tamaño de los sólidos presentes en el agua que deben ser removidos, según la distribución estudiado en capítulos anteriores del curso y que se presenta, en forma resumida, en la Figura 7.

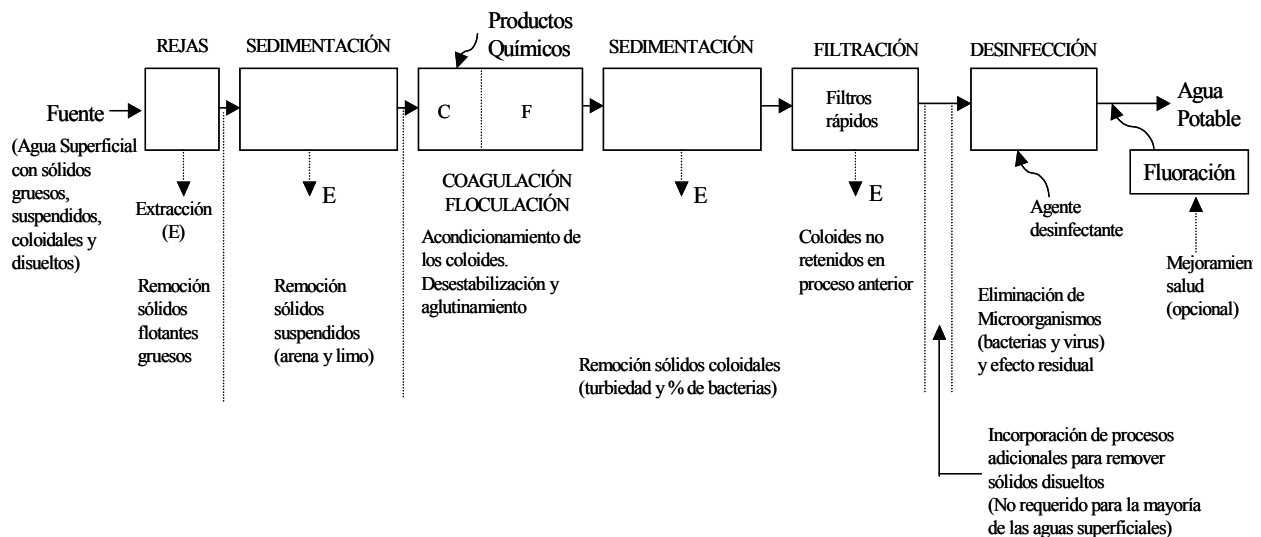
Figura 7
Tamaño de Partículas



Los procesos de tratamiento remueven los sólidos presentes en el agua en forma secuencial de acuerdo a su tamaño partiendo por los mayores, y el grado de dificultad se va incrementando a medida que el tamaño disminuye.

En la Figura 8 se muestra el esquema general de una planta de tratamiento de agua potable para aguas superficiales que contienen sólidos suspendidos y coloidales y una concentración de sólidos disueltos inferior a los valores máximos indicados en la norma chilena para agua de consumo humano (ejemplo: aguas del río Maipo, Mapocho, etc).

Figura 8
Esquema General Planta de Tratamiento de Agua Potable del Tipo Filtración Rápida



El esquema de la figura puede modificarse según las características de la fuente respecto al contenido de sólidos. Por ejemplo, un río o lago sin sólidos en suspensión y con un nivel bajo de sólidos coloidales (turbiedad inferior a 20 UNT) no requeriría del proceso de sedimentación inicial y posterior a la coagulación. Dicho proceso se denomina filtración directa.

Los sólidos extraídos en los procesos de sedimentación y filtración corresponden al material natural presente en las aguas y en la mayoría de los casos es descargado al mismo curso de agua utilizado como fuente. En el caso que las plantas de tratamiento remueven sales disueltas

o algunos elementos tóxicos (metales pesados) los lodos deben ser secados y dispuestos en lugares preparados especialmente para ello.

A continuación se explican los principales procesos de tratamiento de agua potable.

4.1 Sedimentación

Objetivo: remoción, por acción de la fuerza de gravedad, de sólidos gruesos y suspendidos (de densidad mayor que el agua). La Flotación es un caso especial de sedimentación.

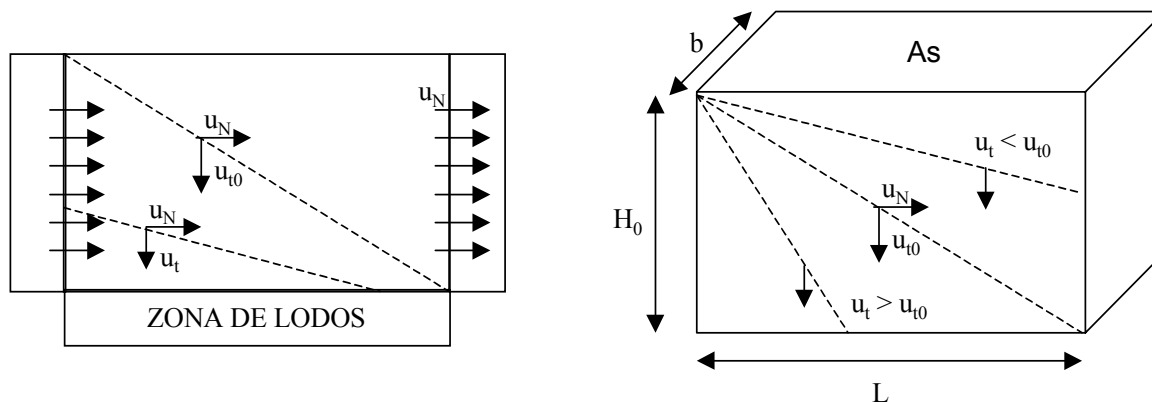
La teoría se explica con el comportamiento de una partícula aislada en el agua: velocidad terminal de sedimentación u_t

Según el tipo de flujo, los sedimentadores se clasifican en Horizontal, Vertical y Oblicuo (alta tasa).

4.1.1 Flujo Horizontal

El modelo asume que el flujo horizontal posee una velocidad constante y uniforme (desprecia efectos turbulentos).

Figura 9
Sedimentador de Flujo Horizontal



u_{t0} : velocidad terminal de sedimentación de la partícula que sigue una trayectoria crítica (límite entre partículas que sedimentan y las que no)

A_s : área superficial ($L \times b$)

A partir de las relaciones geométricas de la figura es posible obtener la tasa superficial:

$$u_{t0} = \frac{Q}{A_s} \text{ (m}^3 \text{ / m}^2 \text{ - día)}$$

u_{t0} define el valor de operación (producción) de los sedimentadores, obtenidos de experiencia en unidades reales (este valor es muy inferior al obtenido teóricamente por las aproximaciones del modelo).

Valores usuales:

Desarenación: $u_{to}=100 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-día}$

Sedimentación: $u_{to}=40\text{-}60 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-día}$ (sólidos suspendidos).

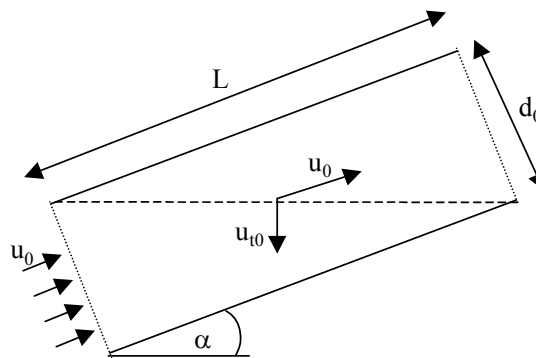
4.1.2 Flujo Oblicuo

Denominado de alta tasa por su mayor producción por unidad de área superficial.

Zona de sedimentación corresponde a un módulo de dimensión reducida (aprox. $5 \times 120 \text{ cm}$) que se repite n veces. El flujo en el interior del módulo se asume como laminar ($R_e \sim 500$).

En la Figura 10 se muestra un esquema de un sedimentador de flujo oblicuo.

Figura 10
Sedimentador de Flujo Oblicuo



L : longitud del módulo

d_o : espacio libre entre módulos

u_o : velocidad del flujo

α : ángulo de inclinación c/r a la horizontal

u_{to} : velocidad terminal de sedimentación de la partícula que sigue la trayectoria crítica

De relación entre velocidades y geometría, se tiene:

$$u_{to} = \frac{u_o \cdot S_c}{\sin \alpha + L/d_o \cos \alpha} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 - \text{día})$$

S_c : cte que depende del tipo de módulo utilizando (igual a 1 para placas paralelas)

u_{to} es una velocidad de sedimentación equivalente a la determinada para sedimentador de flujo horizontal.

En este caso, es posible definir la tasa aparente como:

$$\text{Tasa aparente} = \frac{Q}{As'}$$

Donde As' corresponde al área superficial del espejo de agua bajo el cual se ubican los módulos.

La tasa aparente (m^3/m^2 -día) es del orden de 6 a 8 veces mayor que la tasa superficial de un sedimentador de flujo horizontal, de aquí la denominación de alta tasa. Lo que permite diseño de unidades con mayor productividad por metro de área superficial y un efluente de mejor calidad al ser el flujo más similar al flujo pistón.

4.2 Coagulación – Floculación

Objetivo: desestabilización de partículas coloidales (coagulación) para posibilitar su aglutinamiento (formación de flóculos: floculación) y posterior sedimentación.

4.2.1 Coagulación

La coagulación puede ser explicada a partir de un esquema físico y uno químico. El modelo físico considera al coloide una partícula cargada electronegativamente que se desestabiliza agregando iones de carga eléctrica contraria (positiva). El modelo químico, por su parte, explica las reacciones químicas que ocurren entre el coloide, los iones que contiene el agua y el coagulante. Este modelo es importante por la cinética (velocidad) de la reacción que dura alrededor de 1 seg y por la eficiencia de las fases que se desarrollan durante la reacción.

Los dos modelos superpuestos explican los resultados empíricos que se obtienen. Se debe emplear una mezcla muy rápida del coagulante con el agua para aprovechar las fases más eficientes de la reacción (de menor duración). Para lo anterior se recurre a dispositivos mezcladores que pueden consistir en resaltos hidráulicos o agitadores mecánicos rápidos.

Como sustancias coagulantes se utilizan sales metálicas de Al^{+3} ó Fe^{+3} .

4.2.2 Floculación

Transporte de los coloides desestabilizados y generación de un gradiente de velocidad adecuado mediante una mezcla lenta.

4.3 Filtración

Objetivo: Remover partículas que no se retuvieron en los procesos previos. Es el proceso que garantiza un agua de baja turbiedad.

Se utiliza un medio granular que tiene capacidad volumétrica para retener sólidos suspendidos y coloidales. En la medida que el medio granular va reteniendo sólidos se ensucia (colmata) aumentando las pérdidas de carga por disminución de la porosidad inicial. Según lo anterior, la pérdida de carga total en un instante t está dada por:

$$h(t) = h_0 + h_{\phi}(t)$$

h_0 : pérdida de carga inicial, medio granular limpio

$h_{\phi}(t)$: pérdida de carga por colmatación. Depende de las características del agua a filtrar.

Hay numerosas expresiones semi-empíricas para determinar la pérdida de carga inicial, h_0 ,

importante en el diseño.

Para un medio granular uniforme (constituido por partículas de igual forma y tamaño), la expresión de Rose es:

$$h_0 = \frac{1,067}{\psi} \frac{C_D}{g} L \frac{v^2}{\varepsilon_0^4} \frac{1}{d} \quad (m)$$

donde:

ψ : coeficiente de esfericidad

C_D : coeficiente de arrastre

g : aceleración de gravedad (m/s²)

L : espesor del medio granular (m)

v : velocidad ó tasa de filtración (m) ó m³/m²-día

ε_0 : porosidad inicial

d : diámetro de las partículas del medio granular

Los filtros pueden clasificarse en rápidos y lentos. Filtración rápida y de alta tasa se realiza con velocidades entre 120 y 360 m³/m²-día. Filtración lenta se realiza con velocidad o tasa entre 4 y 10 m³/m²-día. Los filtros rápidos requieren un proceso previo de coagulación, mientras los filtros lentos funcionan sin proceso previo (aplicable sólo a aguas de bajo turbiedad, inferior a 20 UNT).

4.4 Proceso de Desinfección

Objetivo: Destrucción o inactivación e microorganismos presentes en el agua (bacterias y virus). Como efecto secundario aminora problemas estéticos del agua (color, sabor) al producir oxidación.

El proceso de desinfección puede modelarse como una reacción de primer orden, similar a un modelo de decaimiento bacterial de un cuerpo de agua natural, considerando una cinética (k) que depende del tipo de microorganismos y desinfectante, y características del sistema (pH, temperatura).

$$\frac{dN}{dt} = -k \cdot N \quad \text{donde } N \text{ representa la concentración de microorganismos}$$

La desinfección es un proceso necesario y obligatorio para los sistemas de agua potable, independiente de la calidad bacteriológica de la fuente utilizada (superficial o subterránea).

El desinfectante, además de destruir los microorganismos, debe tener efecto residual (permanecer en el agua) para evitar contaminación bacteriana en el sistema de distribución de agua potable (estanques y redes).

Existen muchos métodos y compuestos químicos que producen desinfección y su selección depende de consideraciones económicas (costo), técnicas (aplicación simple) y de seguridad (no tóxico aún a concentración mayor a la necesaria, efecto residual). Los métodos físicos consideran la utilización de rayos ultravioletas o cambios de temperatura. Los métodos químicos se basan en la utilización de compuestos, tales como ozono, compuestos de yodo y compuestos de cloro. El compuesto mas común es el cloro. La norma chilena NCh 409 define

una concentración mínima de cloro residual de 0,2 mg/l.

4.5 Procesos Para Remoción de Sólidos Disueltos

Existen una gran cantidad de procesos que permiten remover sólidos disueltos específicos con o sin presencia de sólidos suspendidos mediante procesos de coagulación, decantación, filtración y otros procesos específicos que remueven iones y sales disueltas de aguas sin contenido de sólidos en suspensión (agua con baja turbiedad) conocidos como procesos de desalinización o desmineralización.

4.5.1 Procesos Convencionales (Coagulación-Decantación-Filtración)

- Ablandamiento método de cal-soda (remoción de calcio, magnesio y turbiedad).
- Remoción de fierro y manganeso (aeración-oxidación química-filtración).
- Precipitación química (remoción de algunos cationes metálicos)

4.5.2 Métodos de Desalinización

- Requieren de aguas con bajo contenido de sólidos en suspensión
- Sistemas de tecnologías compleja en relación a métodos convencionales. En general se emplean resinas o membranas de alta tecnología, patentadas, o sistemas completos patentados.
- Entre los métodos más comunes se encuentran el intercambio iónico, la osmosis inversa, la destilación rápida y la electrodiálisis.

El intercambio iónico se aplica principalmente para ablandamiento del agua, desmineralización y recuperación o concentración de elementos valiosos o peligrosos que se encuentren en baja concentración. Este proceso presenta ciertos requerimientos:

- Resina intercambiadora (catiónica o aniónica).
- Sustancias químicas regeneradoras (sal común, ácidos, bases).
- Concentraciones de sólidos disueltos no muy altas para no saturar la resina en tiempos cortos.

La osmosis inversa se basa en la utilización de una membrana semipermeable que permite el paso del solvente pero no del soluto. El flujo se produce en forma natural para igualar concentración de sales. El material de las membranas puede ser acetato de celulosa o foliamidas (nylon), que rechazan prácticamente todos los solutos (>90%). La vida útil de las membranas es de 2 a 3 años.

Para llevar acabo este proceso se requiere una presión externa de 0,8 atmósferas por cada 1000 mg/l de concentración de sales, con una presión de trabajo del sistema entre 20-40 kg/cm² de presión diferencial. Cabe mencionar que para que este proceso presente buenos resultados es necesario acondicionar el agua (correcciones del pH).

La destilación rápida consiste en la producción de vapor y condensación de éste en condiciones controladas y en varias etapas. Obviamente, este proceso requiere energía para calentar el agua. La energía para vaporizar 1 m³ de agua es 625 KWH. Luego, considerando un óptimo de alrededor de 12 etapas se requieren 40-50 KWH/m³ por etapa.