

## RECICLADO DE AGUAS

Las aguas residuales se generan por diferentes usuarios como son:

1: Aguas domésticas: son las aguas que se generan en los hogares de los habitantes de una ciudad.

2: Servicios: oficinas públicas, hospitales, restaurantes, hoteles, etc.

3: Pequeña y mediana industria: talleres de costura, talleres eléctricos y mecánicos, microindustria, etc.

4: Industria desarrollada: son empresas de mediano y gran tamaño que emplean más de 20 personas por turno y desarrollan alguna actividad de manufactura que tiene un uso intensivo del agua. Ejemplo de estas son: industrias maquiladoras, industria de manufactura, rastros privados y municipales, entre otros.

Las aguas domésticas en general son muy accesibles para el tratamiento biológico tradicional. No contienen agentes tóxicos o no biodegradables en cantidades apreciables, y su composición aunque variable está dentro de un rango muy definido.

La composición del agua producida en los servicios y la pequeña y mediana industria puede o no ser directamente accesible al proceso biológico que se emplea en una planta de tratamiento de aguas residuales del municipio u organismo que opera la planta de aguas residuales de la comunidad.

Su composición es muy variable y depende de la fuente emisora de aguas residuales. El organismo regulador de la calidad de agua de alcantarillado o receptor de aguas de desecho debe ejercer control de las descargas de los emisores de este tipo.

En estas aguas de desecho se tienen cantidades apreciables de materia orgánica (hospitales, restaurantes), y de materiales no biodegradables como grasas y aceites minerales (talleres electromecánicos, de pintura), y son la principal fuente de problemas para los organismos operadores de plantas de tratamiento de agua de la ciudad, ya que estas descargas se integran a la red municipal de colectores de aguas residuales para ser procesadas en las plantas de tratamiento.

La industria desarrollada o gran industria, generalmente tienen su planta de proceso internamente dentro de la unidad de producción, y una vez que el agua recibe tratamiento secundario o terciario, ésta se recicla y se emplea en usos no potables o se vierte a la red de drenaje, si después del tratamiento interno los parámetros de calidad están dentro de las normas de calidad de agua de este tipo.

Si la gran industria no produce aguas residuales contaminantes y estas no rebasan los límites establecidos por la norma para aguas residuales, se le permite al emisor que sus desechos se integren a la red de aguas residuales para ser procesados en la planta de tratamiento.

### **8.0 RECICLADO DE AGUAS:**

Las aguas residuales procesadas con tratamiento secundario o terciario se integran al medio ambiente y se vierten en: ríos, lagos y lagunas para que sigan su curso y no dañen los nichos ecológicos y el medio ambiente. Esta es la forma más común de disponer de las aguas residuales depuradas.

En sitios desérticos donde el agua es escasa y los mantos acuíferos están sobreexplotados, las aguas residuales se integran parcialmente al medio ambiente y parte de ellas se emplean en sustitución del agua potable para riego y reforestación principalmente. Esta práctica cada vez es más extendida y ha sido un gran alivio para solventar al menos parcialmente el agotamiento de las reservas de agua potable y para reforestación y apertura de nuevas áreas de riego.

### **8.1 AGUAS CON TRATAMIENTO SECUNDARIO:**

Las aguas con tratamiento secundario contienen en mayor o menor cantidad los siguientes componentes:

⇒ Sólidos suspendidos

⇒ Nitrógeno y fósforo

⇒ Orgánicos biodegradables

⇒ Orgánicos refractarios o no biodegradables

⇒ Metales

La importancia de cada uno de ellos y sus efectos en la calidad del agua, aunque ya han sido discutidos previamente se describen nuevamente a continuación:

Sólidos Suspendedos: los sólidos suspendidos son partículas coloidales que salen con el agua tratada. Generalmente son algas y conglomerados de microorganismos que se producen durante el proceso aerobio y que no pudieron ser removidos por sedimentación.

Para separar estos del agua tratada se puede emplear la filtración en medios granulares y la microfiltración, pero si el agua se integra al medio ambiente con las aguas naturales, estas partículas se separan naturalmente del agua que fluye. Por esta razón y por el costo que implica un proceso de tratamiento adicional, raras veces se filtra el agua que sale de la planta de tratamiento.

Si el uso que se da al agua es para riego, los sólidos suspendidos se remueven por retención de las partículas en medios filtrantes, para evitar el taponamiento de los aspersores de riego.

También si el uso de esta agua es en otras actividades, por ejemplo en la industria de la construcción, se deberá filtrar el agua para incrementar los niveles de calidad del producto que se elabora con estas aguas recicladas.

Nitrógeno y Fósforo: Los organismos autotróficos solo requieren de agua, nitrógeno, fósforo y algunos micronutrientes como sodio, potasio, fierro, manganeso, etc. para su crecimiento y desarrollo.

Las algas que son organismos autotróficos van a proliferar en aguas que contienen nitrógeno y fósforo, y su desarrollo solo va a estar limitado por la presencia de estos nutrientes ya que los elementos micro que también requieren los autotróficos siempre van a estar disponibles en el agua residual tratada.

Si el agua que se produce en una unidad con tratamiento secundario se va a emplear en riego directamente o se integra a ríos y aguas no estancadas la presencia de nitrógeno y fósforo no es objetable y por el contrario estos elementos se integran como nutrientes de las plantas.

Cuando las aguas procesadas se vierten y luego se integran a reservas de agua potable como estanques, lagos y lagunas o si se va a reciclar para uso en la industria y en los servicios, ocurre la eutroficación, y es necesario remover estos nutrientes.

En un tratamiento terciario las aguas se someten a un proceso adicional al de una planta con tratamiento secundario y nitrógeno y fósforo son removidos por conversión microbiana a nitrógeno elemental y el fósforo es absorbido por la masa microbiana.

Una vez que el agua no contiene nutrientes en cantidades apreciables, la eutroficación no ocurre. El agua tiene una calidad superior a la obtenida con un tratamiento secundario, y es susceptible de un posterior pulido para emplearla en sustitución del agua potable.

Orgánicos refractarios: Durante el proceso de degradación microbiana de la materia orgánica, algunos componentes orgánicos no son digeridos por las bacterias ordinarias presentes en el proceso de digestión microbiana de las aguas residuales típicas.

Estos compuestos son aproximadamente y para fines prácticos la diferencia aritmética entre DQO y DBO en un análisis de estos parámetros en el agua residual.

Los orgánicos refractarios son aquellos que se encuentran presentes en las aguas residuales, domésticas, industriales o de servicios y que por su constitución química no son susceptibles de que los microorganismos en el digestor aerobio la aprovechen para obtener energía.

Algunos compuestos de este tipo son: aceites minerales, gasolinas, solventes orgánicos sintéticos, etc. Siempre se encuentran en mayores o menores cantidades en las aguas residuales de todo tipo. Estos orgánicos no son digeridos por la flora microbiana que se desarrolla en los sistemas convencionales de tratamiento biológico pero son parcialmente removidos durante la sedimentación y filtración y son separados o integrados a otros subproductos pero parte de ellos aún se pueden detectar en el agua residual tratada.

Estos orgánicos refractarios residuales pueden ser removidos por medio de filtración a través de carbón activado, por oxidación con ozono y con una muy alta eficiencia por osmosis inversa.

Metales: Los metales en las aguas de desecho tienen una mayor concentración que en las aguas naturales de donde provienen estas mismas aguas residuales y la razón es simple: la actividad antropogénica en sus diferentes formas genera residuos metálicos.

Sodio, potasio, cobre, aluminio, zinc, mercurio, arsénico, fierro, manganeso, son algunos de los elementos químicos que presentan en concentraciones fácilmente detectables, que en algunos casos superan los límites máximos establecidos por la norma de agua potable.

La fuente de estos metales es por el uso de equipos suavizadores que integran gran cantidad de sal en las aguas residuales, por industrias o microindustrias que emplean metales en sus procesos de manufactura (zinc, cobre, fierro), y algunos metales tóxicos como: cromo, arsénico, mercurio por el uso de fungicidas, plaguicidas, venenos caseros, etc. que se vierten en los sistemas de drenaje.

## **8.2 SISTEMAS DE TRATAMIENTO PARA RECUPERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES**

**TRATADAS** El empleo de aguas tratadas para sustituir agua potable, como ya mencionamos con anterioridad, es una muy buena opción para sustituir el agua potable que se extrae de los mantos o de las fuentes de agua potable. Esta opción es atractiva para zonas desérticas de escasa lluvia cuyos inventarios de agua potable disminuyen progresivamente.

El uso sustitutivo de las aguas residuales tratadas no solo es una opción para lugares secos, también el encarecimiento del agua potable puede ser un incentivo para emplear aguas tratadas en usos de consumo no directo, siempre y cuando los costos de tratamiento de las aguas residuales para obtener aguas tratadas con características similares o mejores a las del agua potable sean menores que el costo del agua potable.

Los procesos empleados para recuperación de las aguas residuales son los siguientes:

Digestión anóxica de las aguas con tratamiento secundario: Si las aguas provienen de un tratamiento secundario, el contenido de nitrógeno y fósforo debe disminuirse a niveles en los cuales ya no sea posible la eutroficación, y este es un requisito indispensable si el agua a recuperar se va a emplear en sustitución del agua potable.

En el tratamiento anóxico, las bacterias anóxicas convierten los nitratos y nitritos a nitrógeno libre. Solo se requiere remover uno de los dos nutrientes para evitar la eutroficación, por lo que si el agua no contiene nitrógeno, los organismos autotróficos como las algas y otros microorganismos muy problemáticos ya no se desarrollan en el medio.

Si se emplean otros procesos que además de nitrógeno remueven fósforo, la calidad del agua es mayor y al carecer de nutrientes la posibilidad de crecimiento microbiano será mínima.

Filtración en medios granulares y microfiltración: La filtración en medios granulares es típica para remover partículas suspendidas. Es de bajo costo de inversión, de operación y mantenimiento pero su efectividad está limitada a separar partículas mayores de 100 micrones de diámetro.

La microfiltración es una técnica que remueve partículas de menor tamaño y la calidad del agua obtenida es mayor. La gran desventaja de la microfiltración es la formación de un conglomerado de partículas que crece continuamente con los sólidos suspendidos depositados en la superficie del filtro y termina por impedir completamente el paso del agua.

Cuando se forma la película de lodos en la parte exterior del elemento de filtración, el volumen de agua que pasa a través del medio filtrante disminuye y también la calidad del agua se deteriora por lo que es necesario limpiar el elemento filtrante e iniciar un nuevo ciclo de microfiltración.

Durante la filtración, las partículas son retenidas en la parte externa del elemento. La mayoría de los sólidos retenidos quedan expuestos en la superficie y pueden retirarse y separarse lavando el filtro, pero algunas partículas penetran la película y se integran a la estructura del material filtrante.

Eventualmente la cantidad de partículas que pasan a la estructura interna del material filtrante son tantas que aunque el filtro se lave y se limpie, ya no es conveniente emplear el mismo cartucho de filtración y es necesario cambiar el elemento por uno nuevo.

Una de las grandes desventajas de la microfiltración es el taponamiento de los elementos de filtración, por lo que es necesario un cambio periódico de estos, y la frecuencia de estos cambios depende de la cantidad de partículas presentes en el agua a tratar.

Ultrafiltración (UF): La ultrafiltración es otra opción para el pulido de las aguas tratadas. La ultrafiltración es efectuada en películas o membranas que tienen diámetros tan pequeños como 100,000, 10,000 y hasta 5,000 daltons.

Por UF es posible separar del agua microorganismos, virus y hasta macromoléculas.

Esta técnica de filtración en membrana es la que mayores avances en lo tecnológico y en aplicaciones ha tenido en los últimos años.

Actualmente se emplea en la industria de lácteos, en la esterilización en frío de la cerveza, en clarificación de jugos y extractos de frutas, en diálisis, en separaciones y fraccionamiento de proteínas y en muchos otros usos. En tratamiento de aguas tiene aplicación como un medio de filtración para remoción de partículas coloidales que no pueden ser separados por medios granulares o microfiltración, además de que es posible retener y filtrar parcialmente microorganismos patógenos y no patógenos.

Los avances en la tecnología de polímeros ha hecho posible la manufactura de películas de ultrafiltración con un gran número de huecos microscópicos a través de los cuales pasa el agua pero no las partículas, microorganismos o macromoléculas. Con estas películas más eficientes, la filtración y separación de partículas puede realizarse a presiones relativamente bajas, por lo que no se requiere de mucha energía para efectuar estas separaciones. El emplear bajas presiones de operación evita que las partículas penetran en la estructura de la película y es muy fácil su separación y desprendimiento de la película del polímero filtrante en el proceso de limpieza de la membrana.

La fuerza impulsora en un sistema de ultrafiltración puede ser por medio de vacío o por presión. Cuando se emplea vacío, se dispone de un arreglo de membranas UF acomodadas todas ellas en una unidad compacta sumergida en el depósito que contiene el agua a filtrar. Una bomba genera vacío o presión negativa y es la fuerza motriz que hace que el agua pase a través de la membrana.

Si se emplea presión, el proceso es similar al convencional en un filtro cerrado. Una bomba toma el agua a filtrar y es la fuerza impulsora que hace que el agua fluya a través de la película del medio filtrante.

La presión de vacío debe ser de 10-15 psias y la presión en un sistema convencional de presión positiva es de 20-30 psias.

Este tipo de elementos retienen los sólidos y partículas que son de mayor tamaño que los poros del polímero, y como ocurre con todos los filtros terminan por saturarse y es necesario su mantenimiento.

Un ciclo de filtración en elementos UF depende de la concentración de sólidos suspendidos en el agua procesada. El ciclo puede ser de días, horas o hasta de minutos.

Cuando se tiene acumulado una cierta cantidad de sólidos en la unidad de filtración, momentáneamente se cambia el circuito en forma de operación normal a un arreglo para limpieza que consiste en lavar durante unos cuantos segundos los filtros del sistema. Para esto se hace fluir en el equipo agua producto, la cual lava y arrastra las partículas retenidas. El agua de lavado se desecha al drenaje y nuevamente el equipo está listo para su operación normal de filtrado.

Nanofiltración (NF) y Ósmosis Inversa (OI): Las técnicas de filtración o separación de sólidos disueltos y suspendidos se complementan con otras técnicas como son la nanofiltración y la ósmosis inversa.

Hasta la ultrafiltración, la separación de las partículas presentes en el agua se interpreta como un tamizado de partículas o macromoléculas, en donde éstas son separadas de la corriente de fluido principal y retenidas en la superficie exterior del soporte del filtro.

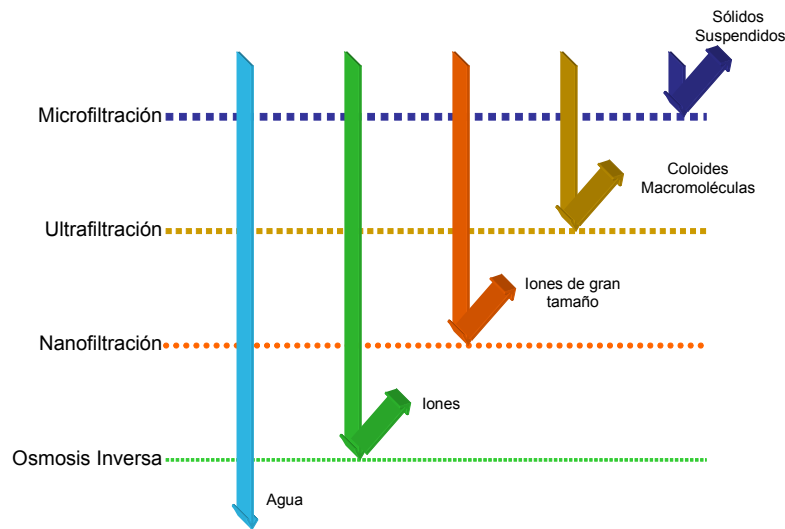
En la nanofiltración y en la hiperfiltración no es posible explicar la separación del agua de los componentes que la acompañan como una simple separación mecánica ya que las moléculas de agua son de mayor tamaño que los iones que rechazan las películas de NF y OI como son:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , etc.

En estos procesos intervienen el tamaño de los poros de la membrana pero también las cargas eléctricas son parte del fenómeno de separación ya que las partículas cargadas como los iones positivos o negativos son repelidos por la superficie de la película y no pueden pasar a través de ella.

En nanofiltración son rechazados por la película los cationes de carga y tamaño grande como:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , pero pasan iones con carga simple y de pequeño tamaño como:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

Por medio de estas dos técnicas de separación es posible incrementar la calidad del agua de reuso. Con nanofiltración se separan los cationes grandes además de moléculas y partículas de tamaño mayor a los diámetros de los poros de este tipo de membranas.

En hiperfiltración se separan todo tipo de iones y se obtiene agua desmineralizada y libre de contaminantes. Ningún proceso o técnica de filtración tiene una separación absoluta por lo que la remoción de contaminantes del agua se realiza con una eficiencia de un 90-98% y el determinar si la calidad del agua producto es suficiente para el uso específico que se pretende dar es a criterio del usuario.



**Figura 1:** Separación de partículas, moléculas e iones según su tamaño, por medio de membranas o películas sintéticas.

Tratamiento con carbón activado: El carbón activado es un medio adsorbente de compuestos químicos que ocasionalmente se encuentran en el agua y que degradan su calidad. Restos de solventes industriales, herbicidas, pesticidas, trihalometanos y otros compuestos indeseables son adsorbidos por el carbón activado y separados del agua.

El carbón se emplea en forma de polvo o en forma granular. Si se aplica como polvo, el área de contacto es mayor y también su efectividad, pero es necesario separar el polvo del agua después del tratamiento. Si se emplea en forma granular, el carbón se tiene en una columna y el agua fluye por este lecho poroso, en su contacto el carbón adsorbe y retiene los componentes que se desea separar. En este caso no se requiere separar el carbón del agua ya que por su tamaño el carbón granular es retenido en la columna y el agua fluye del filtro de carbón.

Eventualmente el lecho de carbón activado debe cambiarse porque esta agotado, esto es, su superficie activa se ha saturado. Cuando esto ocurre se renueva la carga de carbón y el carbón agotado se envía a relleno sanitario, o si la cantidad de carbón es muy grande y es económicamente más conveniente, en un horno se calienta a más de 900°C y se reactiva regresando el material a su condición original.

Tratamiento con ozono: el ozono no solo puede emplearse como desinfectante, su alto poder de oxidación también causa la conversión de compuestos indeseables a otros de naturaleza menos agresiva o tóxica. La naturaleza oxidante del gas ozono puede romper enlaces químicos en una molécula y los compuestos son degradados de esta forma.

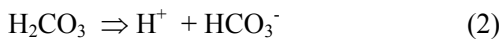
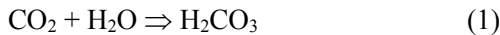
Un tratamiento previo con ozono del agua procesada para su reuso, desinfecta y mantiene en control el crecimiento microbiológico y además mejora la calidad del agua al descomponer compuestos refractarios que se puedan encontrar en las aguas a reutilizar.

Precipitación cal/soda ash: el proceso de precipitación con cal y soda ash no solo disminuye la dureza del agua de proceso, también coprecipitan muchas otras sustancias indeseables presentes siempre en las aguas residuales con tratamiento secundario como son: materia orgánica en forma coloidal, metales como fierro, manganeso y otros tóxicos que coprecipitan como hidróxidos y que son arrastrados por los coágulos de carbonato de calcio y de hidróxido de magnesio que se forman en las condiciones altamente alcalinas que prevalecen en el reactor.

Grasas y aceites residuales que no se degradan o separan en el tratamiento biológico, también son adsorbidas o encapsuladas por el conglomerado de partículas que se forman y son arrastradas al fondo del reactor donde son extraídos con los lodos.

Otra ventaja del proceso cal/soda ash es que el pH tan alto que se tiene en el reactor y que es indispensable para la reacción, produce la muerte e inactividad de los microorganismos, por lo que este también es un efectivo medio de desinfección.

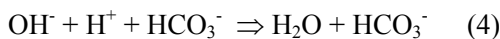
El efluente del reactor de precipitación debe neutralizarse y para recuperar la alcalinidad se inyecta bióxido de carbono ocurriendo las siguientes reacciones:



Y la suma de las reacciones 1 y 2 es:



Si existe alcalinidad de hidróxidos como es el caso en el proceso cal soda ash, el ión hidrógeno reacciona con el radical hidroxilo y el agua queda con alcalinidad de bicarbonatos que es lo deseable.



El proceso cal/soda ash es muy empleado en la práctica, en plantas recicladoras de aguas residuales por su eficiencia en la remoción de contaminantes a costos relativamente bajos.

**8.3 RECICLADO DE AGUAS:** El reuso de las aguas residuales tratadas es una práctica en aumento. La demanda creciente de agua y el agotamiento de las fuentes de abastecimiento, fomenta el reuso y reciclado de las aguas residuales tratadas.

Las tecnologías de tratamiento disponibles y su costo cada vez mas accesible, hacen posible el tratamiento de las aguas residuales para limpiarlas y depurarlas a niveles en los cuales se obtienen aguas con calidad igual o mejor a las de las aguas que se tienen en las fuentes convencionales de abastecimiento de agua potable.

El reuso directo que implica su consumo en sustitución de las fuentes naturales no es aceptada por la sociedad y seguramente no lo será en el corto plazo.

La depuración de estas aguas y su reinyección a las fuentes convencionales de abastecimiento, implica un uso indirecto de estas aguas tratadas y la práctica es rutinaria en algunas ciudades importantes

Otro uso de las aguas tratadas es en actividades industriales como por ejemplo en la generación de energía eléctrica donde se requiere de agua de alta calidad y no existe oposición ni riesgo en su uso.

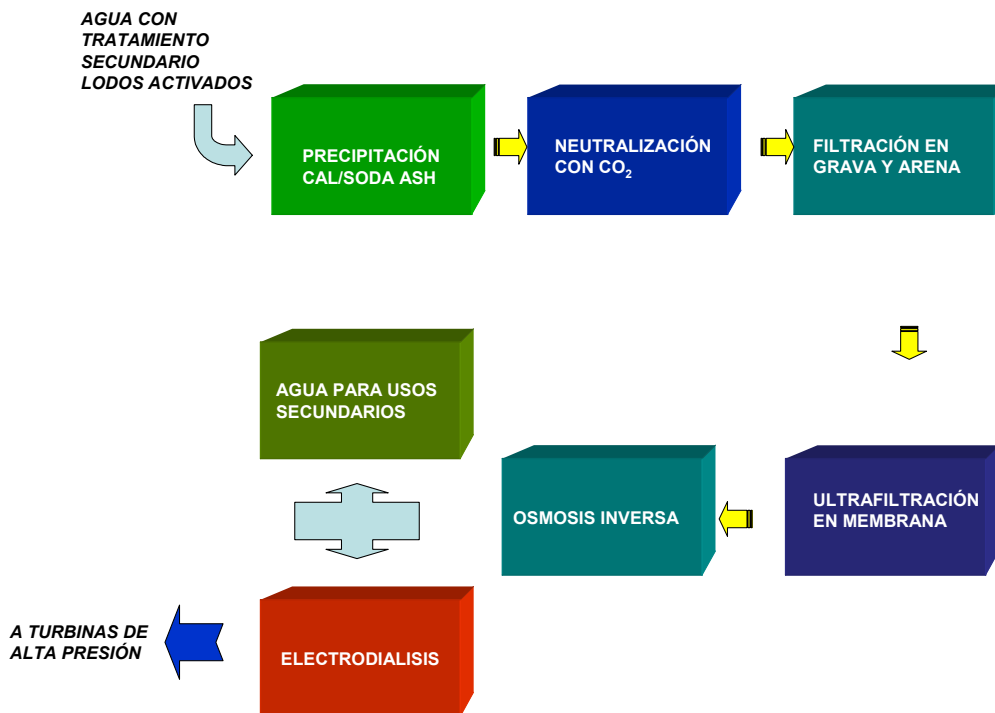
Los sistemas de tratamiento para depurar las aguas y darles calidad de agua potable, implica procesos que no siempre son los mismos en plantas que producen aguas potables a partir de las aguas residuales, Aun y cuando los procesos difieran, se tiene finalmente agua que cumple con las normas de calidad de agua potable.

Como ejemplo de un sistema de reciclado de aguas para usos indirectos, es el que se tienen en algunas plantas generadoras de energía, que requieren agua de optima calidad para generar vapor para las turbinas de la planta.

Un prototipo de estas plantas es el que se representa en la figura 2.

Parte de las aguas residuales producidas en la ciudad son colectadas y se les da tratamiento convencional con el proceso de lodos activados, que como ya se ha mencionado implica un proceso biológico para reducir la DBO a niveles de 20-50 mg/L.

El agua con tratamiento secundario pasa a un proceso de precipitación cal/soda ash, con lo cual se desinfecta el agua por la alta alcalinidad que se debe tener para remover como hidróxidos el calcio y magnesio presente en el agua procesada.



**Figura 2:** Sistema de procesos avanzados para reuso de las aguas residuales con tratamiento secundario y producción de agua ultrapura.

La precipitación en el proceso cal/soda ash no solo es de calcio y magnesio, algunos otros elementos indeseables que se encuentran presentes en el agua tratada precipitan como hidróxidos, como es el caso de fosfatos, hierro, manganeso, cobre y otros metales. También en el proceso cal/soda ash, los coágulos y flóculos que se forman, atrapan partículas de materia orgánica residual y arrastran estas al fondo del tanque sedimentador, donde son separadas del agua producto.

Luego de una neutralización con bióxido de carbono, el agua recupera su alcalinidad y el pH se estabiliza y luego pasa a una filtración en lechos de grava y arena.

La ultrafiltración remueve trazas de materia coloidal que el agua pueda contener y el agua pasa a un proceso de osmosis inversa, donde se tiene un rechazo que es agua que se puede emplear en riego, servicios sanitarios, como agua de limpieza, etc.

Otro de los efluentes del proceso de osmosis es agua de alta calidad y prácticamente libre de sales. Debido a que en las turbinas de alta presión se requiere de calidad ultrapura, las trazas de sales minerales que el agua aun pueda contener se remueven por electrodiálisis, obteniéndose después de este proceso agua ultrapura calidad megaohm.

Estas plantas de tratamiento con procesos avanzados, que ya existen y se encuentran en operación, demuestran que es posible obtener aguas de excelente calidad a partir de las aguas que desechamos el sistema de drenaje.