



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLÁN"



PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN PARA LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
LEONEL LÓPEZ MARTÍNEZ

ASESOR:
M. EN C. RAÚL PINEDA OLMEDO



MÉXICO, D.F.

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

"Siempre, antes de realizar un sueño, el Alma del Mundo decide comprobar todo aquello que fue aprendido durante el recorrido del camino. Hace esto no porque sea mala, sino para que podamos, junto con nuestro sueño, conquistar también las lecciones que aprendimos mientras íbamos hacia él. Es el momento en el que la mayor parte de las personas desiste. Es lo que llamamos, en el lenguaje del desierto, "morir de sed cuando las palmeras ya aparecieron en el horizonte".

(El Alquimista)

A mis padres:

Rene López Martínez y Arcelia Martínez Licón, por exhortarme a luchar intensamente durante las batallas más complejas, disfrutando de cada uno de los triunfos y conservando la serenidad de aquellas tantas derrotas. Gracias por sus sabios consejos.

A mis hermanas:

Arlin y Ambar, por el respaldo y apoyo ilimitado en todos los eventos de mi estancia en este planeta, y por el cariño que existe entre nosotros.

A mi sobrino:

Ever Rodríguez, por compartir las primeras experiencias de tu existencia como un par de infantes soñadores.

A mis abuelos:

Onoria y Encarnación, por ese inmenso apoyo y cariño incondicional que me brindaron en todo momento.

A mis amigos:

Randú López, Felipe, Juan Lara, Verónica Sánchez, Carlos Alberto, Aarón Zapatero y Víctor Olivares, por el recuerdo de las vivencias que compartimos juntos y de la gran amistad que perdurará por siempre.

Al M. en Ing. Raúl Pineda Olmedo:

Por compartir sus valiosos conocimientos y brindar su apoyo en la realización de este trabajo

A los profesores:

Ing. Hermenegildo Arcos Serrano
Ing. Alberto Dávila Cabrera
Ing. Salvador Acevedo Márquez
Ing. Carlos Rosales Aguilar

Revisado por la Dirección General de Biotecnología
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso
contenido de mi trabajo receptor.
NOMBRE: Leonel López Ntz

FECHA: 15 - Mayo / 2022

FIRMA: [Firma]

[Firma manuscrita]

**PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN PARA
LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE
TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL
MUNICIPAL**

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.....	3
1.1. AGUA RESIDUAL MUNICIPAL.....	4
1.2. TRATAMIENTO PRELIMINAR.....	4
1.2.1. Rejas de barras.....	5
1.2.2. Cribas o tamices.....	6
1.2.3. Desmenzadores.....	6
1.2.4. Desarenadores.....	7
1.2.5. Tanques de preaeración.....	8
1.3. TRATAMIENTO PRIMARIO.....	8
1.3.1. Tanques sépticos.....	8
1.3.2. Tanques de doble acción.....	9
1.3.3. Tanques de sedimentación simple.....	10
1.4. TRATAMIENTO SECUNDARIO.....	12
1.4.1. Tratamiento fisicoquímico.....	12
1.4.1.1. Precipitación química.....	12
1.4.1.2. Coagulación química.....	13
1.4.1.3. Floculación.....	13
1.4.2. Tratamiento biológico.....	14
1.4.3. Proceso aerobio.....	14
1.4.3.1. Filtros biológicos.....	14
1.4.3.1.1. Filtros goteadores.....	14
1.4.3.1.2. Lechos de contacto.....	15
1.4.3.1.3. Filtros de arena intermitentes.....	15
1.4.3.1.4. Filtros percoladores.....	16
1.4.3.2. Lodos activados.....	17
1.4.3.3. Lagunas de estabilización.....	18
1.4.3.4. Biodiscos.....	18
1.4.4. Proceso anaerobio.....	19
1.4.4.1. Proceso anaerobio de contacto.....	19
1.4.4.2. Filtros anaerobios.....	19
1.4.4.3. Digestor anaerobio con flujo ascendente y capa de lodo (UASB).....	20
1.5. CLORACIÓN.....	20
CAPITULO 2. GENERALIDADES DE LOS LODOS.....	22
2.1. LODOS PRIMARIOS.....	23
2.2. LODOS QUÍMICOS.....	25
2.3. LODOS BIOLÓGICOS.....	25
2.4. CONCENTRACIÓN DE LODO – CLARIFICADORES PRIMARIOS.....	27
2.5. CARACTERÍSTICAS DE LODOS RESIDUALES.....	30
2.5.1. Gravedad específica y volatilidad.....	30
2.5.2. Concentración preliminar de lodos (espesamiento).....	31

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.5.3. Hidratación y carga superficial de las partículas.....	32
2.5.4. Tamaño de partícula.....	33
2.5.5. Compresibilidad.....	34
2.5.6. Temperatura del lodo.....	34
2.5.7. Proporción de sólidos volátiles con sólidos fijos.....	34
2.5.8. pH del lodo.....	35
2.5.9. Septicidad.....	35

CAPITULO 3. PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS PREVIOS Y SUBSECUENTES A LA DESHIDRATACIÓN..... 36

3.1. PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO.....	37
3.1.1. Digestión aerobia de lodos.....	38
3.1.2. Digestión anaerobia de lodos.....	38
3.2. ESPESAMIENTO DE LODOS.....	39
3.2.1. Espesamiento por gravedad.....	40
3.2.1.1. Ventajas.....	41
3.2.1.2. Desventajas.....	41
3.2.2. Espesamiento por flotación.....	41
3.2.3. Espesamiento por centrifugación.....	42
3.3. DESHIDRATACIÓN.....	42
3.3.1. Procesos de deshidratación por aire.....	43
3.3.1.1. Ventajas y desventajas.....	43
3.3.2. Procesos mecánicos de deshidratación.....	43
3.3.2.1. Ventajas y desventajas.....	44
3.4. EVACUACIÓN.....	45
3.4.1. Métodos de evacuación.....	45
3.4.1.1. Aplicación sobre el terreno.....	46
3.4.1.1.1. Almacenamiento o vertido en tiraderos.....	46
3.4.1.1.2. Lagunas de oxidación.....	47
3.4.1.2. Aplicación de biosólidos.....	47
3.4.1.2.1. Composta.....	47
3.4.1.2.2. Pílas.....	47
3.4.1.3. Rellenos sanitarios.....	47
3.4.1.4. Incineración.....	49
3.4.1.5. Sistema Ver Tech.....	51
3.4.1.5.1. Descarga de gases.....	52
3.4.1.5.2. Efluentes líquidos.....	52
3.4.1.5.3. Productos finales sólidos.....	52
3.4.1.5.4. Reutilización de productos finales.....	52

CAPITULO 4. ACONDICIONAMIENTO DE LODOS..... 54

4.1. NEUTRALIZACIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS DE LODO.....	56
4.2. UNIÓN DE PARTÍCULAS DISPERSAS EN AGREGADOS.....	56
4.3. FACTORES QUE AFECTAN EL ACONDICIONAMIENTO.....	56
4.4. ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO INORGÁNICO.....	58
4.4.1. Cloruro férrico.....	58

4.4.2. Cal.....	58
4.4.3. Dosificación.....	59
4.4.4. Otros tipos de acondicionadores inorgánicos.....	59
4.5. POLÍMEROS ORGÁNICOS.....	60
4.5.1. Composición y estado físico.....	60
4.5.2. Estructura en solución.....	61
4.5.3. Polímeros secos.....	62
4.5.4. Polímeros líquidos.....	63
4.5.5. Carga de polímero.....	66
4.5.6. Dosificación típica de polímero.....	66
4.5.6.1. Filtro prensa de banda.....	66
4.5.6.2. Centrifugas de camisa maciza.....	67
4.5.6.3. Filtros al vacío.....	67
4.5.6.4. Filtros prensa.....	68
4.6. DISEÑO DE INSTALACIÓN.....	68
4.6.1. Aditivos.....	68
4.6.2. Selección de acondicionadores químicos.....	68
4.6.2.1. Prueba de precipitado.....	69
4.6.2.2. Prueba de hoja de filtrado.....	69
4.7. ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.....	70
4.7.1. Tratamiento con calor.....	71
4.7.2. Oxidación de baja presión.....	72

CAPITULO 5. PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN POR AIRE..... 74

5.1. LECHOS DE SECADO DE LODOS.....	75
5.1.1. LECHOS DE ARENA.....	75
5.1.1.1. Consideraciones de diseño.....	76
5.1.1.1.1. Tiempo de secado.....	77
5.1.1.1.2. Número de aplicaciones.....	77
5.1.1.1.3. Diseño de carga de sólidos.....	78
5.1.1.1.4. Espesor de la capa final de lodo.....	78
5.1.1.2. Especificaciones.....	79
5.1.1.3. Operación y mantenimiento.....	79
5.1.2. LECHOS DE ARENA POR CONGELAMIENTO.....	80
5.1.2.1. Consideraciones de diseño.....	80
5.1.2.1.1. Espesor de la capa de congelamiento o deshielo.....	80
5.1.2.2. Especificaciones.....	81
5.1.2.3. Operación y mantenimiento.....	81
5.1.3. LECHOS DE SECADO POR VACÍO.....	82
5.1.3.1. Consideraciones de diseño.....	83
5.1.3.2. Especificaciones.....	83
5.1.3.3. Operación y mantenimiento.....	84
5.1.4. LECHOS POR MALLAS DE ESCURRIMIENTO.....	85
5.1.4.1. Consideraciones de diseño.....	85
5.1.4.2. Especificaciones.....	86
5.1.4.3. Operación y mantenimiento.....	86
5.1.5. LECHOS PAVIMENTADOS.....	86

5.1.5.1. Consideraciones de diseño.....	87
5.1.5.1.1. Área de lecho y pérdida de agua.....	88
5.1.5.2. Especificaciones y desempeño.....	89
5.1.5.3. Operación y mantenimiento.....	89
5.2. LAGUNAS DE LODOS.....	90
5.2.1. Consideraciones de diseño.....	90
5.2.2. Elementos estructurales.....	91
5.2.3. Desempeño.....	91
5.2.4. Operación y mantenimiento.....	91

CAPITULO 6. PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN MECÁNICA..... 93

6.1. FILTRO PRENSA DE BANDA.....	94
6.1.1. Teoría de operación.....	95
6.1.2. Descripción mecánica.....	97
6.1.3. Características de desempeño.....	99
6.2. CENTRIFUGAS.....	100
6.2.1. Descripción general.....	100
6.2.2. Aplicaciones.....	102
6.2.3. Teoría general de diseño.....	102
6.2.3.1. Prueba de laboratorio.....	105
6.2.4. Componentes, operación y control.....	105
6.2.4.1. Camisa y scroll.....	106
6.2.4.2. Velocidad diferencial entre camisa y scroll.....	108
6.2.4.3. Represas de sobreflujo.....	109
6.2.4.4. Bombas de carga y conductos de lodo.....	109
6.2.5. Variables del proceso.....	109
6.2.5.1. Rango de carga.....	110
6.2.5.2. Características del lodo.....	110
6.2.5.3. Acondicionamiento químico.....	110
6.2.5.4. Temperatura del lodo.....	110
6.2.5.5. Características de desempeño.....	111
6.2.6. Tratamiento preliminar.....	111
6.2.7. Sólidos de la torta y manejo del concentrado.....	112
6.2.8. Criterio de selección de equipo general.....	112
6.2.8.1. Capacidad.....	113
6.2.8.2. Centrifugas G-Alta vs G-Baja.....	113
6.2.8.3. Control de velocidad diferencial.....	113
6.2.8.4. Control de carga de químicos.....	114
6.2.8.5. Resistencia a la abrasión.....	114
6.2.8.6. Materiales de construcción.....	114
6.3. FILTRO PRENSA.....	114
6.3.1. Filtro prensa de placas de volumen fijo.....	115
6.3.2. Filtro prensa de volumen variable.....	116
6.3.3. Bases para el diseño del sistema.....	117
6.3.4. Procesos y equipo de soporte.....	117
6.3.5. Factores de operación y características de desempeño.....	119
6.4. FILTRACIÓN AL VACÍO.....	120

6.4.1. Equipo de soporte.....	122
6.4.2. Factores de desempeño y operación.....	123
6.4.2.1. Variables de la máquina.....	123
6.4.2.2. Otras variables del proceso.....	124
6.4.2.3. Datos de desempeño.....	125
6.4.3. Criterio de selección del equipo.....	126
CONCLUSIÓN.....	128
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	130
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	135

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El aumento y la expansión territorial de la población, trae consigo la aportación de más contaminantes al descargar sus aguas residuales municipales en los cuerpos de agua receptores, y en muchas ocasiones, sin tratamiento alguno. Estas descargas de aguas residuales afectan indudablemente la salud del hombre y al medio ambiente, por lo que es necesario someterlas a un proceso de tratamiento.

El proceso de tratamiento del agua residual municipal consiste de tres pasos básicos. El primero abarca el cribado y sedimentación de los sólidos grandes. El segundo aplica la remoción de los sólidos y materiales disueltos más pequeños, a través de un procedimiento biológico que recurre de la ayuda de microorganismos, los cuales se alimentan de los contaminantes contenidos en el agua residual. Y por último, se lleva a cabo la extracción de los microorganismos excedentes utilizados durante la limpieza del agua residual. Estos organismos excedentes se denominan "lodos", los cuales son concentrados para su tratamiento y/o disposición ulterior.

El volumen de lodos generados es cada vez mayor, y tiende a aumentar debido a las nuevas técnicas de tratamiento y acondicionamiento del agua residual. Dichos lodos poseen un alto contenido de agua, por lo que su transporte y manejo no es sencillo ni económico.

En México no existen procedimientos específicos para la deshidratación de los lodos provenientes del tratamiento del agua residual municipal, por lo que la mayoría de las plantas de tratamiento carecen de sistemas para el manejo y disposición de estos residuos. Así mismo, los lodos constituyen uno de los problemas más difíciles de solucionar en las plantas de tratamiento de agua residual, ya que por su alto contenido de agua ocupan espacios bastante grandes y son difíciles de manejar.

Por ser de gran interés, este trabajo se enfoca en la problemática de los elevados volúmenes de lodos generados durante el tratamiento del agua residual municipal; brindando alternativas para su reducción a través de diferentes procesos de deshidratación.

CAPITULO 1

TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

CAPITULO 1

TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso de separación parcial de sólidos en el efluente de agua contaminada, permitiendo que el resto de los sólidos orgánicos complejos putrescibles queden convertidos en sólidos minerales o en sólidos orgánicos relativamente estables. La magnitud de este cambio depende del proceso de tratamiento utilizado. Una vez completados los procesos de tratamiento, es aun necesario tratar, reciclar o disponer de los líquidos y sólidos que hayan sido separados.

El tratamiento de las aguas residuales se divide principalmente en los siguientes procesos:

- Tratamiento preliminar.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Cloración.

1.1. AGUA RESIDUAL MUNICIPAL

Las aguas residuales municipales son fundamentalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido impurificadas por diversos usos. Desde el punto de vista de su origen, resultan de la combinación de líquidos o desechos arrastrados por el agua, procedentes de casas habitación, edificios comerciales e instituciones, junto con las provenientes de los establecimientos industriales, aguas subterráneas, superficiales o de precipitación.

Las aguas residuales municipales son líquidos turbios que contienen material sólido en suspensión. Cuando son frescas, su color es gris y tienen un olor a moho no desagradable. En ellas flotan cantidades variables de materia. Con el transcurso del tiempo, el color cambia gradualmente de gris a negro, desarrollándose un olor ofensivo y desagradable. En este caso se denominan aguas residuales sépticas.

La composición de las aguas residuales incluye agua, sólidos disueltos y sólidos suspendidos. La cantidad de sólidos es generalmente muy pequeña, casi siempre menos de 0.1 % en peso, pero es la fracción que presenta el mayor problema para su tratamiento y disposición. El agua provee solamente el volumen y es el vehículo para el transporte de los sólidos. Los sólidos pueden estar disueltos, suspendidos o flotantes.

La cantidad o volumen de aguas residuales que se producen varía de acuerdo con la población y otros factores. Un municipio exclusivamente residencial con alcantarillas bien construidas, en las que no se infiltre agua de la precipitación pluvial, puede producir aproximadamente 160 litros /día por persona.

1.2. TRATAMIENTO PRELIMINAR

Fundamentalmente el tratamiento preliminar consiste en eliminar materias gruesas, como arenas, basuras y otros residuos de las aguas residuales, que puedan dañar o interferir con los procesos de tratamiento posteriores, o dañar el equipo de bombeo. Por lo tanto, los dispositivos para el tratamiento preliminar se diseñan para los siguientes objetivos:

- Separar o disminuir el tamaño de los sólidos orgánicos grandes que flotan o están suspendidos. Estos sólidos generalmente consisten en trozos de madera, telas, papel, basura, y una parte de materia fecal.
- Separar los sólidos inorgánicos pesados, como la arena, la grava e incluso objetos metálicos; a todo lo cual se llama arena.

- Separar cantidades excesivas de grasas y aceites.

Para alcanzar los objetivos de un tratamiento preliminar se emplean los siguientes dispositivos:

- Rejas de barras.
- Cribas o tamices.
- Desmenzadores, ya sea molinos, cortadoras o trituradoras.
- Desarenadores.
- Tanques de preaeración.

1.2.1. Rejas de barras

Las rejas están formadas por barras metálicas verticales o inclinadas de sección circular, rectangular o trapecial, espaciadas a intervalos iguales desde 2 hasta 15 cm, pero generalmente tienen claros de 2.5 a 5 cm. Aunque algunas veces se usan las rejas grandes en posición vertical, la regla general es que deben instalarse con un ángulo de 30 a 60 grados con la vertical. Las rejas pueden ser de limpieza manual o de limpieza mecánica por medio de rastrillos automáticos. Se recomienda que las rejas que se limpian a mano se instalen dando una inclinación de 30 a 45 grados con la vertical. Los sólidos separados por estos utensilios, se eliminan enterrándolos o incinerándolos, o se reducen de tamaño con las trituradoras o desmenzadoras y se reintegran a las aguas residuales. En las figuras 1.1 y 1.2 se muestra un sistema de rejas de limpieza manual y mecánica respectivamente.

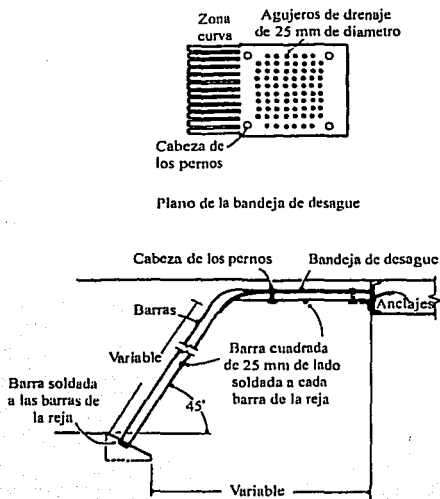


Figura 1.1 Reja de limpieza manual.

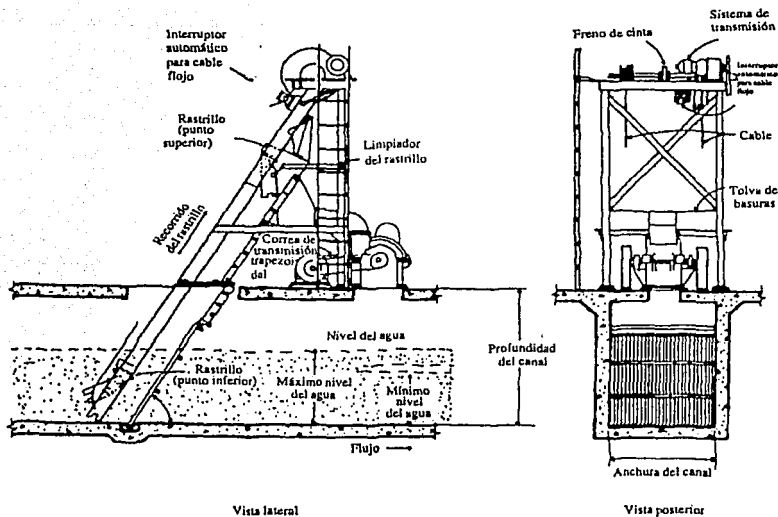


Figura 1.2 Reja de limpieza mecánica.

1.2.2. Cribas o tamices

Las cribas o tamices son rejillas con aberturas de 22-32 mm (malla 6-60). Estas forman parte de equipos patentados consistentes de placas de metal perforadas, como discos, tambores rotatorios o placas metálicas encadenadas en bandas sin fin. Pueden utilizarse en lugares donde no haya suficiente espacio para colocar un tanque de sedimentación, y en lugares donde se desee remover sólo una pequeña cantidad de la materia suspendida para la disposición final del efluente.

Los tamices modernos son de tipo tambor o disco, provistos de una tela de malla fina de acero inoxidable o de un material poroso. Se encuentran en el mercado con dimensiones entre 1.2 a 5.4 m de diámetro. En algunas plantas de tratamiento de agua municipal se utilizan este tipo de tamices, colocados para la protección de las boquillas de los filtros percoladores.

1.2.3. Desmenuzadores

Los molinos, cortadoras o trituradoras, son dispositivos que sirven para romper o cortar los sólidos hasta un tamaño tal que permita que sean reintegrados en las aguas residuales sin peligro de obstruir las bombas o las tuberías o afectar los sistemas posteriores de tratamiento. También se pueden utilizar para triturar los sólidos que separan las cribas, o pueden ser combinaciones de cribas y cortadoras que se instalen dentro del canal por donde fluyen las aguas residuales, de manera que se logre su objetivo sin necesidad de separar los sólidos estas. Estos últimos dispositivos los construyen diversas marcas comerciales. En la mayoría de los casos, son de hojas dentadas o afiladas, fijas o móviles, que actúan de continuo para reducir los sólidos a un tamaño tal que puedan pasar a través de las cribas o rejas que tienen aberturas de hasta 6 mm. Algunos de estos aparatos están diseñados para operar como bombas de poca succión.

1.2.4. Desarenadores

Las aguas residuales contienen cantidades relativamente grandes de sólidos inorgánicos como arena, cenizas y grava, a los que generalmente se les llama arena. La cantidad es muy variable y depende de muchos factores; pero principalmente de que si el alcantarillado colector es del tipo sanitario o combinado. Las arenas pueden dañar a las bombas por abrasión y causar serias dificultades operativas en los tanques de sedimentación y en la digestión de los lodos, debido a que se acumulan alrededor de la salidas y causan obstrucciones. Por esta razón, es práctica común eliminar este material por medio de las cámaras desarenadoras.

Los desarenadores se diseñan en forma de grandes canales. En estos canales la velocidad se disminuye lo suficiente para permitir que los sólidos inorgánicos pesados se depositen y el material orgánico se mantenga en suspensión (menor a 0.2 mm). Los desarenadores de canal deben diseñarse de manera que la velocidad se pueda controlar para que se acerque lo más posible a 30 cm/seg. El tiempo de retención debe basarse en el tamaño de las partículas que deben separarse, varía de 20 segundos a un minuto.

Las cámaras desarenadoras (Fig. 1.3) se localizan antes de las bombas o de los desmenuzadores. Su limpieza se lleva a cabo por medios manuales o mecánicos, para esto son usados rastrillos. Estas unidades requieren de menor espacio para el almacenamiento de arenas que las unidades de operación manual.

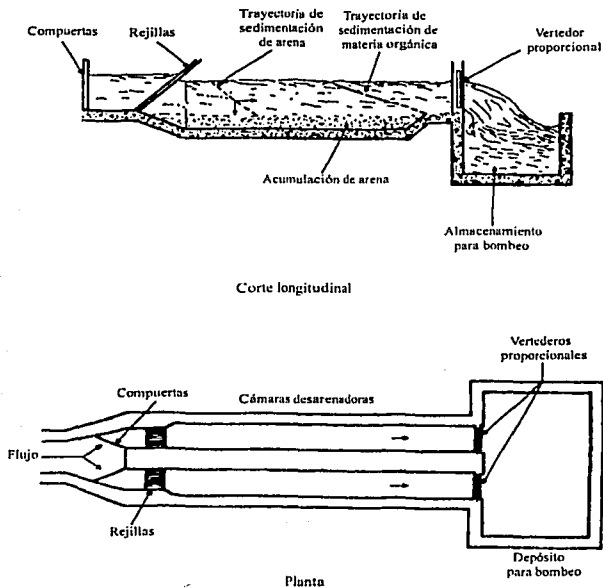


Figura 1.3 Cámara desarenadora

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los desarenadores de limpieza manual que se usan con aguas residuales combinadas, deben limpiarse después de cada lluvia fuerte. Cuando se utilizan unidades mecánicas, se deben limpiar a intervalos regulares para evitar una carga indebida sobre el mecanismo limpiador.

1.2.5. Tanques de preaeración

Se recomienda brindar una preaeración a las aguas residuales antes del tratamiento primario para lograr lo siguiente:

- Obtener una mayor eliminación de sólidos suspendidos en los tanques de sedimentación.
- Ayudar a la eliminación de grasas y aceites que arrastren las aguas residuales.
- Refrescar las aguas residuales sépticas antes de llevar a cabo el tratamiento.
- Disminuir la DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno).

La preaeración se logra a través de la inyección de aire en las aguas residuales durante un periodo de 20 a 30 minutos a una velocidad predeterminada. Esto puede llevarse a cabo forzando el paso de aire comprimido a través de las aguas residuales, a razón de 0.75 litros de aire por litro de agua residual.

La agitación de las aguas residuales en presencia del aire, tiende a aglomerar o flocular los sólidos suspendidos más ligeros, formándose masas más pesadas que se asientan rápidamente en los tanques de sedimentación. También contribuye a la separación de la grasa o aceite de las aguas residuales y sus sólidos llevándolos a la superficie. Por la acción del aire también se restauran las condiciones aerobias en las aguas residuales sépticas, favoreciendo su tratamiento subsecuente.

Los dispositivos y el equipo que se utilizan para introducir aire en las aguas residuales son los mismos, o similares a los que se utilizan en el proceso de lodos activados.

1.3. TRATAMIENTO PRIMARIO

Los dispositivos que se utilizan en el tratamiento primario están diseñados para remover de las aguas residuales los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, mediante el proceso físico de sedimentación. Esto se lleva a cabo reduciendo la velocidad del flujo hasta 1 o 2 cm/seg en un tanque de sedimentación, durante el tiempo suficiente, para dejar que se depositen la mayor parte de los sólidos sedimentables (principalmente orgánicos), separándose de la corriente de aguas residuales.

Los principales dispositivos para el tratamiento primario son los tanques de sedimentación, algunos de los cuales también tienen la función de servir para la descomposición de los sólidos orgánicos sedimentados, lo cual se conoce como digestión de lodos. Los diversos tipos de tanques que se utilizan en este proceso son los siguientes:

- Tanques sépticos
- Tanques de doble acción
- Tanques de sedimentación simple

1.3.1. Tanques sépticos

Los tanques sépticos son uno de los dispositivos de tratamiento primario más antiguos. Están diseñados para mantener a las aguas residuales a una velocidad muy baja y bajo condiciones aerobias, por un periodo de 12 a 24 horas, durante el cual se realiza la eliminación de sólidos. Estos sólidos se descomponen en el fondo del tanque, produciendo gases que arrastran a los sólidos y los obligan a subir a la superficie, permaneciendo como una nata hasta que se escapa el gas y vuelven a sedimentarse. Esta continua flotación y subsecuente sedimentación de los sólidos los lleva con la corriente de aguas residuales hasta la salida, por lo que eventualmente salen algunos sólidos con el efluente, frustrando parcialmente el propósito del tanque. Debido a los

largos periodos de retención y a la mezcla con los sólidos en descomposición, las aguas residuales salen del tanque en una condición séptica que dificulta su tratamiento secundario.

1.3.2. Tanques de doble acción

Estos tanques, conocidos como tanques Imhoff, se idearon para corregir los dos efectos principales del tanque séptico que son:

1. Impedir que los sólidos que se han separado de las aguas residuales se mezclen nuevamente con ellas, permitiendo la retención de estos para su descomposición en la misma unidad.
2. Proporcionar un efluente adaptable para su tratamiento posterior.

El contacto entre las aguas residuales y los lodos que se digieren anaeróbicamente queda prácticamente eliminado y se disminuye el periodo de retención en el tanque. El tanque puede ser rectangular o circular, y se divide en tres compartimentos o cámaras, que son: 1) sección superior que se conoce como cámara de derrame continuo o compartimento de sedimentación; 2) sección inferior que se conoce como cámara de digestión de lodos y, 3), respiradero y cámara de natas.

Durante la operación, todas las aguas residuales fluyen a través del compartimento superior. Los sólidos se depositan en el fondo de este compartimento con pendientes aproximadamente de 1.4 unidades en la vertical para 1 en la horizontal, resbalando y pasando por una ranura que existe en el fondo. Una de las partes inclinadas del fondo se prolonga cuando menos unos 15 cm mas allá de la ranura, lo cual crea una trampa que impide que los gases o partículas de lodos en digestión que están en la sección inferior, se pongan en contacto con las aguas residuales que están en la sección superior. Los gases y partículas ascendentes de lodo son desviados hacia la cámara de natas y respiradero. Esto elimina la principal desventaja del tanque séptico. Las ventilas deben tener una superficie de cuando menos un 20 % de la superficie total del tanque.

La descarga de lodos debe hacerse antes de que su nivel ascienda cerca de 45 cm de distancia de la ranura del compartimento de sedimentación. Es mejor descargar pequeñas cantidades con frecuencia, que grandes cantidades dejando pasar mucho tiempo. Los lodos deben descargarse a una velocidad moderada y regular para que no se forme un canal a través de ellos, y que permita que se descarguen lodos parcialmente digeridos y parte del liquido que haya sobre los lodos digeridos. Antes de las temperaturas invernales, se deben descargar casi todos los lodos, con excepción de los que se necesitan para siembra (20 % aproximadamente), dejando así el espacio necesario para los que se acumulen durante el invierno, cuando la digestión es muy lenta.

Después de cada descarga de lodos, las líneas de descarga deben drenarse y llenarse con agua o con aguas residuales, para impedir que los lodos se endurezcan y obturen la tubería. Se debe hacer todo lo posible para impedir la formación de espumas, ya que están asociadas con la condición de acidez en los lodos. La acidez se puede prevenir mediante un tratamiento con cal. Los tanques Imhoff (Fig. 1.4), proveen la sedimentación y digestión de los lodos en una sola unidad y deben producir un efluente primario de calidad satisfactoria, eliminando de 40 a 60 % de sólidos suspendidos y reduciéndose la DBO de un 25 a 35 %.

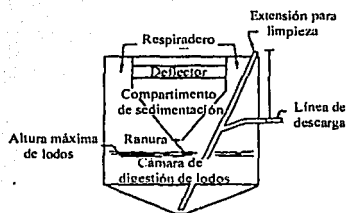
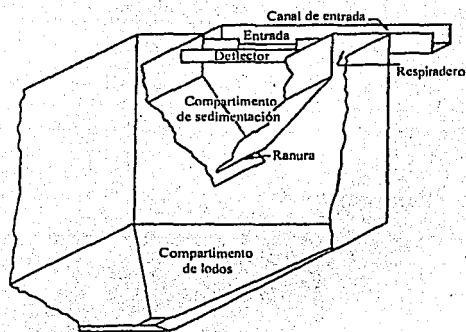


Figura 1.4 Tanque de Imhoff.

1.3.3. Tanques de sedimentación simple

La función principal de los tanques de sedimentación simple, también llamados clarificadores primarios, consiste en separar los sólidos sedimentables de las aguas residuales, mediante el proceso de sedimentación. Los sólidos sedimentados se sustraen continuamente o a intervalos frecuentes, para no dar tiempo a que se desarrolle la descomposición con formación de gases. Los sólidos pueden irse acumulando por gravedad, en una tolva o embudo, o hacia un punto mas bajo del fondo del tanque, de donde se bombean o descargan por la acción de la presión hidrostática. Este método ha sido reemplazado por el uso de equipo mecánico para recolectar los sólidos en la tolva o embudo, de donde son descargados por bombeo.

Los tanques que tienen equipo mecánico para la recolección de los sólidos se conocen como tanques de sedimentación simple con limpieza mecánica. Estos tanques pueden ser rectangulares, circulares o cuadrados, pero todos operan por el mismo principio de recolectar los sólidos sedimentados por medio de rastras de movimiento lento que los empujan hacia el sitio de descarga.

En los tanques rectangulares (Figura 1.5), las rastras se fijan cerca de las orillas a una cadena sin fin que pasa sobre engranes o ruedas dentadas, accionados por medio de motores. Las rastras se hacen pasar lentamente rozando el fondo del tanque, empujando los sólidos sedimentados hacia una tolva de lodos localizada en el extremo de entrada del tanque, luego son levantadas por la cadena hacia la superficie del tanque en donde, parcialmente sumergidas, sirven para empujar los sólidos flotantes, las grasas y los aceites a un recolector de natas situado en el extremo de salida del tanque. Otro tipo de mecanismo consiste en un puente viajero del mismo ancho del tanque, del cual se suspende una paleta que empuja a los sólidos hacia el punto de descarga y otra paleta despumadora para los sólidos flotantes, las grasas y los aceites. Estas paletas trabajan solamente al moverse el puente en una dirección, quedando sueltas cuando se les hace regresar en dirección contraria. En este tipo de tanques, las aguas residuales entran en un extremo y fluyen horizontalmente hacia el otro extremo.

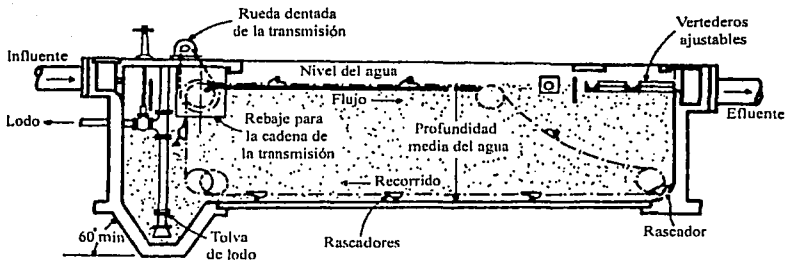


Figura 1.5 Tanque rectangular de sedimentación simple.

Los tanques circulares tienen armaduras horizontales fijas a un eje central impulsado por un motor, (Fig. 1.6). El fondo de los tanques está inclinado hacia el centro y las rastras mueven a los sólidos sedimentados hacia la tolva o embudo de lodos que hay en el centro. Las armaduras desnatadoras están sujetas a la flecha central en la superficie, para recolectar los sólidos flotantes, las grasas y los aceites. Las aguas residuales entran por el centro y fluyen radialmente, en sentido horizontal, hacia la periferia.

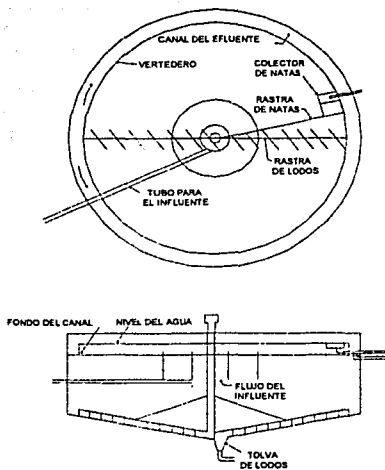


Figura 1.6 Tanque circular de sedimentación simple.

En los tanques cuadrados el mecanismo es similar al de los tanques circulares. La diferencia principal estriba en que una o ambas armaduras rígidas, están equipadas con paletas articuladas, las cuales llegan hasta las cuatro esquinas del tanque y arrastran los sólidos de estas zonas hacia la trayectoria circular del mecanismo. El influente de aguas residuales puede pasar por el centro y fluir hacia los cuatro lados, o entrar por un lado y atravesar el tanque.

Los lodos deben descargarse del tanque al menos una vez al día. No se considera como buena practica la descarga de lodos con una cantidad excesiva de agua, pues esta ocupa lugar en el espacio de almacenamiento de lodos y consume calor en los tanques de digestión. Si se mantiene una capa de lodos de 30 a 45 cm en la tolva de lodos, y se bombean cantidades cortas a intervalos frecuentes y a baja velocidad, es más fácil lograr una alta concentración de sólidos en los lodos. La bomba de lodos debe tener un muestreador, para que se tenga una guía de la operación. El registro de descarga de lodos, debe estudiarse para cada planta, basándose en observaciones y pruebas, teniendo en cuenta que no se busca rapidez en la descarga de los lodos, sino eliminar lodos concentrados, mientras estén aun frescos y en que quede limpio el fondo del tanque al terminar el ciclo de descarga.

Los tanques de sedimentación simple proveen resultados similares que los tanques Imhoff. Deben eliminarse cerca de 90 a 95 % de sólidos sedimentables, o sea de un 40 a 60 % de sólidos suspendidos totales de las aguas residuales. La DBO debe disminuir de un 25 a 35 %.

1.4. TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario es el proceso complementario de la depuración de las aguas residuales, consistente en una serie de operaciones y procesos químicos y/o biológicos al que son sometidos los efluentes del tratamiento primario.

Durante el tratamiento preliminar y tratamiento primario se separan gran parte de los sólidos suspendidos y sedimentables que fueron retenidos por los sistemas de rejillas, desarenadores, trituradores y aquellos que no tuvieron la capacidad de sedimentarse en el tiempo de retención límite en los clarificadores primarios. Así, se tiene que los efluentes de un tratamiento primario, contienen aún sólidos suspendidos finos, sedimentables (principalmente coloides) y solubles, los cuales deben ser separados para tener una agua apropiada para su disposición final en los cuerpos receptores. Los procesos utilizados en el tratamiento secundario se clasifican en fisicoquímicos y biológicos.

1.4.1. Tratamiento fisicoquímico

El tratamiento fisicoquímico puede servir para favorecer la sedimentación de la materia en suspensión; pero es utilizado principalmente para eliminar la materia coloidal y los sólidos orgánicos disueltos, los cuales sin reactivos químicos jamás sedimentarían. Estas sustancias son responsables de la turbidez, color y DBO de las aguas residuales. Los procesos fisicoquímicos involucran las operaciones unitarias y los procesos de precipitación química, coagulación química, floculación y sedimentación o filtración.

1.4.1.1. Precipitación química

La precipitación química involucra la adición de reactivos químicos específicos para eliminar las sustancias disueltas en el agua en su estado natural con el fin de potabilizarla, o separar los contaminantes en las aguas residuales. En la precipitación química se separan las sustancias disueltas del agua o agua residual por medio de productos químicos solubles, los cuales al agregarse al agua, son liberados y sus iones reaccionan con los iones existentes en ella, formando precipitados. En los procesos fisicoquímicos se emplean muy diversas sustancias como precipitantes. En la Tabla 1.1 se muestran los más comunes. El grado de clasificación obtenida depende de la cantidad del reactivo usado y del cuidado con que se controle el proceso.

Tabla 1.1 Productos químicos usados para la precipitación química de las aguas residuales.

Producto químico	Formula química	Peso molecular
Sulfato de alumina	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666.7
Sulfato de hierro	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278.0
Acido sulfúrico	H_2SO_4	98.0
Anhidrido sulfuroso	SO_2	64.0
Cloruro férrico	$FeCl_3$	162.1
Sulfato férrico	$Fe_2(SO_4)_3$	400.0
Cal (apagada)	$Ca(OH)_2$	94.0
Cal (viva)	CaO	56.0

Para el proceso de precipitación química, además de los reactivos químicos empleados, son importantes y complementarias las operaciones de dosificación, mezclado, floculación o agitación, y clarificación secundaria o filtración.

En el tratamiento químico se generan lodos residuales, compuestos por flocúlos producidos por los reactivos químicos empleados y los sólidos (suspendidos, sedimentables y disueltos) separados del agua residual.

1.4.1.2. Coagulación química

Los efluentes de los sistemas de tratamiento primario, contienen material finamente dividido y coloides, los cuales por sus características fisicoquímicas no pudieron ser separados por dicho tratamiento. Un coloide se puede definir como una partícula que se mantiene en suspensión debido a su tamaño extremadamente pequeño (1 a $200 \text{ m } \mu$), estado de hidratación y carga eléctrica superficial.

Existen dos tipos de coloides, los hidrofóbicos y los hidrofílicos, que los hace reaccionar diferente de los medios en que se encuentran. Los coloides hidrofílicos pueden alcanzar valores muy altos de viscosidad y formar geles, en cambio los hidrofóbicos no cambian su viscosidad por efecto de la concentración.

La coagulación es la desestabilización de un coloide a partir de la neutralización de su carga eléctrica (Capítulo 4.1.) y la agregación de partículas finas en suspensión. La coagulación se lleva a cabo por medio de compuestos químicos que son adicionados en el agua residual para propiciar la formación de flocúlos.

En la coagulación química se efectúan reacciones químicas que desestabilizan las partículas en suspensión, propiciando su unión para formar flocúlos y mediante una agitación mecánica controlada se facilita el encuentro de las partículas, acelerando el proceso de floculación. Los flocúlos se separan por sedimentación o filtración.

1.4.1.3. Floculación

La floculación es la operación unitaria aplicada a las aguas residuales, para que por medio de sustancias químicas (polielectrólitos) se aumente el contacto entre las partículas finas en la coagulación, para formar flocúlos, los cuales sedimentan más fácilmente.

La coagulación se ve favorecida por la agitación moderada del agua residual, por medio de paletas a baja velocidad. Si la agitación es demasiado rápida, los flocúlos se rompen, por tal motivo debe controlarse la velocidad dentro de un rango en el que se puedan formar los flocúlos grandes para que se sedimenten. Los compuestos utilizados en la floculación son polielectrólitos de origen natural o sintético. El funcionamiento de un polielectrolito es específico dependiendo del tamaño, densidad y carga de las partículas a flocular, y del pH del polímero en solución.

1.4.2. Tratamiento biológico

El tratamiento biológico de las aguas residuales, tiene como finalidad remover la materia orgánica en estado coloidal y disuelta, la cual no fue removida con el tratamiento primario. Este tratamiento se realiza por medio de una combinación de operaciones unitarias.

El tratamiento biológico se lleva a cabo por la transferencia de la materia orgánica del agua residual hacia la película o floculo (biomasa), por contacto interfacial, adsorción y absorciones asociadas. La materia orgánica es utilizada por los microorganismos para su metabolismo y generación de células nuevas, las células viejas mueren precipitándose al fondo.

La eficiencia de los procesos biológicos depende de las características de las aguas residuales, condiciones ambientales del sistema (pH, temperatura, aereación o anaerobiosis, nutrientes, etc.) y tipo de microorganismos.

Los procesos biológicos para el tratamiento de las aguas residuales, constan de equipo que pone en contacto la materia orgánica con los microorganismos adecuados, durante el tiempo suficiente para llevar a cabo su oxidación bajo condiciones aerobias o anaerobias. Estos procesos se clasifican de acuerdo al requerimiento de oxígeno por parte de los microorganismos utilizados en la biodegradación de la materia orgánica en los siguientes:

- Tratamiento aerobio. La estabilización de la materia orgánica se efectúa en presencia de oxígeno.
- Tratamiento anaerobio. El proceso de estabilización de la materia orgánica se realiza en ausencia de oxígeno.

1.4.3. Proceso aerobio

El tratamiento aerobio se lleva a cabo por microorganismos aerobios y/o facultativos, que se desarrollan en presencia de oxígeno, degradando la materia orgánica en compuestos más estables. Entre los procesos que efectúan el tratamiento biológico aerobio se tienen los siguientes:

- Filtros biológicos
- Lodos activados
- Lagunas de estabilización
- Biodiscos

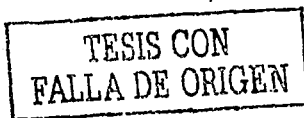
1.4.3.1. Filtros biológicos

Los filtros biológicos remueven la materia orgánica de las aguas residuales por medio de la biomasa que se encuentra adherida a la superficie del material filtrante, la cual debe ser inerte a la biodegradación. La biodegradación de la materia orgánica en los filtros biológicos se realiza por medio de la oxidación aerobia, floculación biológica y descomposición anaerobia.

1.4.3.1.1. Filtros goteadores

Los filtros goteadores son dispositivos que ponen en contacto a las aguas residuales sedimentadas con los cultivos biológicos. Estos filtros son unidades resistentes que no se dañan fácilmente por cargas violentas, distinguiéndose por la estabilidad de su funcionamiento y por ser capaces de resistir malos tratos. Como en todas las unidades de tipo biológico, la temperatura les afecta; por eso, el clima frío abate la actividad biológica del filtro. Estos filtros ocupan grandes superficies y su construcción es muy costosa. En la Figura 1.7 se muestra un filtro goteador.

Los filtros goteadores deben estar precedidos por tanques de sedimentación primaria equipados con colectores de natas. Un tratamiento primario antes de estos filtros, permite aprovechar al máximo su capacidad haciendo fácilmente sedimentables a los sólidos no sedimentables, coloidales y disueltos. Estos sólidos, orgánicos en su mayor parte, no son separados de las aguas



residuales, sino que se convierten en parte integrante de los organismos vivos microscópicos o de la materia orgánica estable que se adhiere temporalmente al medio filtrante, y de la materia inorgánica que sale en el efluente. El material adherido o retenido se desprende eventualmente y es arrastrado por el efluente del filtro. Por esta razón los filtros goteadores deben preceder a tanques de sedimentación secundaria, para eliminar los sólidos de la aguas residuales.

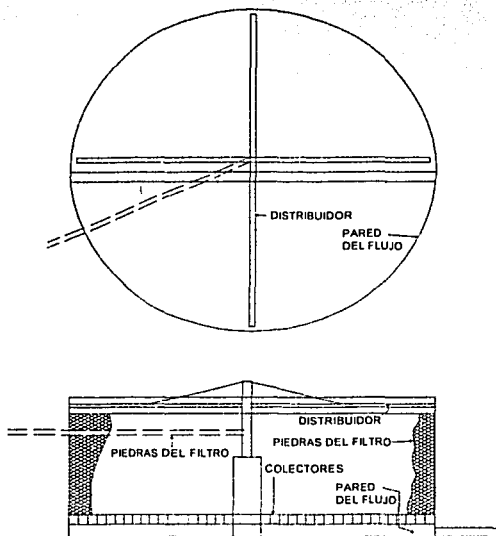


Figura 1.7 Filtro goteador.

1.4.3.1.2. Lechos de contacto

Son los sistemas más antiguos, se componen de un tanque impermeable relleno de material filtrante grueso, el cual se llena y se vacía alternadamente. Durante el periodo de contacto, mientras el filtro está lleno, la materia en suspensión se deposita sobre el material filtrante y es degradada por microorganismos anaerobios y/o facultativos. Posteriormente durante la etapa en que el tanque permanece vacío, los microorganismos se ponen en contacto con el oxígeno y oxidan la materia orgánica.

1.4.3.1.3. Filtros de arena intermitentes

Su sistema está formado de un lecho preparado de forma especial, constituido de arena o de otro material granulado, en el que se vacía intermitentemente al agua residual, la cual después de ser filtrada, es recolectada en el sistema de drenes colocados en la parte inferior del lecho. La remoción de la materia orgánica se lleva a cabo cuando se vacía el lecho y la arena queda expuesta a la aereación, los microorganismos aerobios se desarrollan en presencia del oxígeno

suministrado a través de los poros del lecho. Estos filtros tienen aplicación en el secado de lodos residuales generados de plantas de tratamiento de agua residual (Capítulo 5).

1.4.3.1.4. Filtros percoladores

Los filtros percoladores son semejantes a los lechos de contacto, solo que estos tienen un sistema de drenaje para recolectar el agua tratada y los lodos biológicos que son separados del medio, su alimentación se realiza por medio de rociadores rotatorios, con lo cual el agua se oxigena lo suficiente para mantener vivos a los microorganismos de la película. La alimentación puede ser intermitente o continua.

El sistema de filtros percoladores esta formado por sistema de distribución, sistema de drenaje, medio filtrante, sedimentador secundario y sistema de ventilación, cuando es requerido; (Figura 1.8). El sistema de distribución se encarga de suministrar el agua residual al lecho filtrante. Existen dos tipos, de distribuidor rotatorio y de boquillas pulverizadoras fijas en los vórtices de los triángulos, que cubren el lecho del filtro.

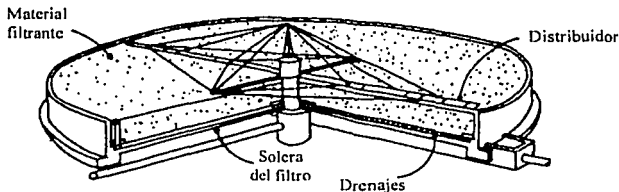


Figura 1.8 Corte de un filtro percolador.

El distribuidor rotatorio consiste de dos o más brazos montados sobre un eje central, los cuales giran sobre el lecho filtrante distribuyendo el agua residual por medio de las boquillas. El medio filtrante debe ser de área superficial elevada por unidad de volumen, económico y resistente. Generalmente se usa grava, piedra triturada, roca volcánica y materiales sintéticos. El sistema de drenaje conduce las aguas tratadas y los lodos al sedimentador secundario.

Los filtros son de forma circular, teniendo profundidades entre 1 y 6 m, aunque existen en el mercado filtros de hasta 12 m de profundidad, utilizando como medio filtrante un material plástico de diseño especial. El material de empaque utilizado en estos filtros pueden ser rocas de 2.5 a 10 cm de diámetro, anillos Rasching de cerámica de 5.08 cm de diámetro, material sintético de diferentes formas, etc.

La materia orgánica del agua residual es degradada por la película microbiana que se encuentra adherida al material filtrante. Cuando la película biológica aumenta de espesor, la oxigenación disminuye en la parte más profunda produciéndose un microsistema anaerobio cercano a la superficie del medio filtrante. En el momento en que los organismos de la superficie comienzan a morir por falta de fuente de carbono, pierden su capacidad de adhesión y son arrastrados por el medio filtrado, comenzando una nueva población en ese lugar. Este fenómeno depende de las cargas hidráulica y orgánica del filtro.

1.4.3.2. Lodos activados

El proceso de lodos activados es un proceso biológico de contacto, en el que los organismos de las aguas residuales se mezclan en un medio ambiente favorable para la descomposición aeróbica de los sólidos. La eficacia del proceso depende del oxígeno disuelto de las aguas residuales durante el tratamiento. Se emplea después de la sedimentación simple (Fig. 1.9). Las aguas residuales contienen sólidos suspendidos y coloidales, de manera que cuando se agitan en presencia del aire, los sólidos suspendidos forman núcleos sobre los cuales se desarrolla la actividad biológica formando gradualmente partículas más grandes de sólidos que se conocen como lodos activados.

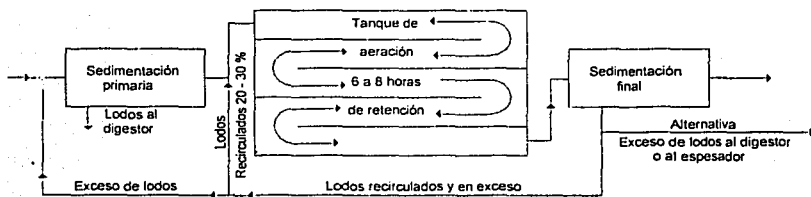


Figura 1.9 Proceso convencional de lodos activados.

Los lodos activados están formados por flóculos parduscos, que consisten en materia orgánica procedente de las aguas residuales, pobladas de bacteria y otras formas de vida. Estos lodos activados, tienen la propiedad de absorber o adsorber la materia orgánica coloidal y disuelta, incluyendo el amoníaco de las aguas residuales con lo que disminuye la cantidad de sólidos suspendidos. Los organismos utilizan como alimento al material absorbido convirtiéndolo en sólidos insolubles no putrescibles. Casi toda esta transformación es un proceso gradual. Algunas bacterias atacan las sustancias complejas originales, produciendo como desecho compuestos más simples, continuando el proceso hasta que los productos finales de desecho no pueden usarse como alimento.

La generación de lodos activados en las aguas residuales, es un proceso lento, de manera que la cantidad formada en cualquier volumen de aguas residuales durante su tratamiento es muy poca e inadecuada para tratarlas rápida y eficazmente, pues se requiere de una gran concentración de lodos activados. Esta concentración se logra recolectando los lodos producidos por cada volumen de aguas residuales tratadas y usándolos nuevamente para el tratamiento de volúmenes subsiguientes de aguas residuales. Los lodos que se vuelven a emplear en esta forma se denominan lodos recirculados. Es importante que los lodos recirculados se mezclen bien con las aguas residuales. Esto se lleva a cabo agregando los lodos recirculados a las aguas residuales sedimentadas en el extremo de alimentación del tanque de aeración, donde la agitación efectúa un mezclado rápido y satisfactorio.

Antes de disponer de las aguas residuales tratadas en un tanque de aeración hay que separar los lodos activados. Esto se hace en los tanques de sedimentación secundaria. Tales tanques son de diseño similar a los de sedimentación primaria con limpieza mecánica. El exceso de lodos activados se trata y se dispone junto con los lodos de los tanques de sedimentación primaria. La práctica más común consiste en bombear el exceso de lodos al extremo del influente del tanque de sedimentación primaria, donde se depositan junto con los sólidos de las aguas residuales crudas. Los lodos activados se sedimentan rápidamente y tienden a arrastrar parte de los sólidos no

sedimentables de las aguas residuales, disminuyendo la carga de materia orgánica y de sólidos en el tanque de aeración. En las plantas donde no se sigue este procedimiento el exceso de lodos activados se pasa a los tanques de digestión de lodos, directamente o a través de espesadores .

1.4.3.3. Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización o lagunas de oxidación son depósitos naturales o artificiales de tierra, abiertos al contacto con el sol y aire, en los cuales se lleva a cabo la biodegradación de la materia orgánica mediante la actividad metabólica de las bacterias y algas. Primero son sedimentados los sólidos y luego la materia orgánica se oxida y se estabiliza por medio de microorganismos. El proceso de la descomposición de la materia orgánica de las aguas residuales se verifica en dos etapas. La materia carbonosa es desintegrada por los microorganismos aerobios, formando bióxido de carbono, el cual es utilizado por las algas en su fotosíntesis.

La fotosíntesis es un proceso natural que se lleva a cabo en los tejidos verdes de los vegetales, bajo la influencia de la luz y la presencia de la clorofila, que es la substancia a la que le deben el color los vegetales vivos. En este proceso, el oxígeno del bióxido de carbono es liberado y se disuelve en el líquido en el que crecen las algas. Como resultado, la materia orgánica es convertida en algas y las aguas reciben oxígeno para mantener la descomposición aerobia posterior. Los sólidos de las aguas residuales entran en el tanque en un estado altamente putrescible y salen en forma de células de algas estables, las cuales dentro de ciertos límites, pueden descargarse a los cuerpos de agua receptores sin causar efectos adversos.

Las lagunas de oxidación pueden usarse como un tratamiento completo cuando reciben aguas residuales crudas, como tratamiento secundario para aguas residuales sedimentadas, o como un tratamiento adicional para efluentes de procesos secundarios. La mayoría de los tanques de estabilización tienen una profundidad de 60 a 120 cm con un flujo continuo. El suelo en el que se localicen, debe ser impermeable, de tal manera que las infiltraciones no afecten el fondo del tanque.

1.4.3.4. Biodiscos

Es un tratamiento combinado de crecimiento estacionario de biomasa, llamada biopelícula, y de lodos activados o floculos. Este equipo consiste en celdas de plástico insertadas dentro de un tubo o carcasa de diseño especial, colocadas en la periferia de una rueda de acero que es sostenida por un eje sumergido dentro de la cámara de contacto. La rueda permanece sumergida en el agua residual en un 75 % y las rotaciones del sistema pueden controlarse en forma manual o automática, con el fin de mantener un nivel óptimo de oxígeno disuelto.

El tratamiento ocurre por el crecimiento de microorganismos dentro de las celdas y superficie del tubo y en forma suspendida dentro de la cámara de contacto. El oxígeno llega a los microorganismos por compresión del aire que es atrapado al girar el tubo y es liberado burbujeando dentro de la cámara de suspensión al mismo tiempo que agita y homogeniza los lodos. La biopelícula se oxigena directamente cuando sale a la superficie.

La cámara de suspensión es acompañada por un sedimentador anexo, donde los lodos son sedimentados y una parte de ellos se recircula a la cámara de suspensión y la otra es desechada. Los tanques pueden ser construidos de acero o de concreto armado, dependiendo de su tamaño y condiciones de operación. La construcción de un biodisco, completamente equipado (tanque de contacto, sedimentador, clarificador, etc.), tiene la particularidad de convertirse en un módulo, lo cual trae la ventaja de que si se requiere ampliar la planta de tratamiento, puede realizarse acondicionando nuevos módulos al sistema.

1.4.4. Proceso anaerobio

El proceso anaerobio consiste en la degradación de la materia orgánica e inorgánica por medio de microorganismos en ausencia de oxígeno. Este sistema degrada con mayor eficiencia la materia orgánica, produciendo una mezcla de gas, llamada biogas, compuesta de metano (CH_4 [60-70 %]), dióxido de carbono (CO_2 [30 a 40 %]) y trazas de ácido sulfhídrico (H_2S) e hidrógeno (H_2). Este proceso ocurre en forma natural en los pantanos y en el fondo de las lagunas y lagos, donde no hay oxigenación.

Entre los procesos que efectúan el tratamiento biológico anaerobio se tiene:

- Proceso anaerobio de contacto
- Filtros anaerobios
- Digestor anaerobio con flujo ascendente y capa de lodo (UASB)

1.4.4.1. Proceso anaerobio de contacto

Es un proceso de crecimiento en suspensión. Se requiere de un desgasificador de vacío colocado enseguida del digestor anaerobio para eliminar las burbujas de gas que tienden a hacer flotar los sólidos en suspensión en el clarificador. El principal proceso de tratamiento anaerobio de aguas residuales se muestra en la Figura 1.10.

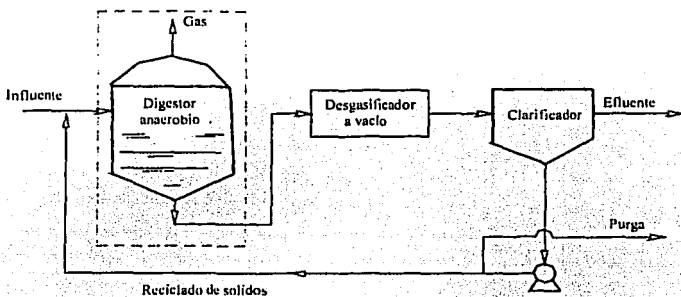


Figura 1.10 Diagrama de flujo del proceso anaerobio de contacto.

1.4.4.2. Filtros anaerobios

Los filtros anaerobios son un sistema para llevar a cabo el tratamiento anaerobio empleando un crecimiento de biomasa adherida. El filtro anaerobio es similar a un filtro percolador aerobio salvo que la carga de agua residual penetra por el fondo de la unidad y la descarga es por la parte superior. El material de relleno está sumergido completamente en el agua y por ello no hay aire dentro del sistema. Puede emplearse grava o relleno sintético. No se requiere recirculación ya que la biomasa permanece adherida al relleno del filtro y no se pierde con el efluente. Este tipo de filtro no es recomendable para el tratamiento de aguas residuales con alto contenido de sólidos en suspensión debido a problemas de taponamiento.

1.4.4.3. Digestor anaerobio con flujo ascendente y capa de lodo (UASB)

Otro tipo de digestor anaerobio es el UASB (Fig. 1.11). En este proceso el agua residual ingresa por debajo del digestor y el efluente tratado sale por la parte superior. El digestor no contiene ningún tipo de relleno para soportar el crecimiento biológico. El lodo formado en el digestor se divide en dos zonas: 1) Zona del lecho del lodo y 2), Zona de capa de lodo. La diferencia entre estas dos zonas es que el lodo en la primera es más compacta que en la segunda.

La pieza en la parte superior (venturi) sirve como sedimentador de lodo y colector de gas. La pantalla crea una zona de bajo nivel de turbulencia donde un 99 % del lodo en suspensión se sedimenta y retorna al digestor. La tolva también sirve para recuperar el gas anaerobio que sale por el centro. La biomasa está formada de partículas de 3 a 4 mm que tienen altas velocidades de sedimentación, y son retenidas casi totalmente en el digestor. Si la producción neta supera las pérdidas por arrastre en el efluente (purga), entonces existe una acumulación de biomasa en el digestor.

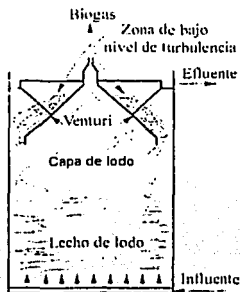


Figura 1.11 Digestor UASB.

1.5. CLORACION

La cloración de las aguas residuales consiste en la aplicación de cloro para lograr un propósito determinado. El cloro puede introducirse en forma de gas, de solución acuosa, como hipoclorito, ya sea de sodio o de calcio, los cuales al disolverse en agua, desprenden cloro. El cloro gaseoso es menos costoso, por lo que su utilización es más frecuente que el obtenido a partir de los hipocloritos. La aplicación del cloro se realiza por medio de dispositivos especiales. La cloración se agrega a las aguas residuales con los siguientes objetivos:

- Desinfección. El cloro es un desinfectante debido a su capacidad de oxidación, por lo que destruye e inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
- Reducción de la DBO. El cloro produce la reacción de la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
- Eliminación o reducción de color y olor. Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro. La capacidad oxidante del cloro se emplea para el control del olor y la eliminación del color en muchos tratamientos industriales.
- Oxidación de los iones metálicos. Los iones metálicos presentes en forma reducida se oxidan por el cloro (ferroso a férrico y manganoso a manganíco).
- Oxidación de los cianuros y productos inocuos.

Las dosis típicas de cloro requeridas para la desinfección se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Dosis típicas de cloro para la desinfección.

Tipo de efluente	Intervalo de dosificación (mg/l)
Aguas residuales sin tratar (percolación)	6-25
Sedimentación primaria	5-20
Planta de precipitación química	2-6
Filtro percolador	3-15
Lodo activado	2-8
Filtro múltiple seguido de planta de lodos activados	1-5

CAPITULO 2

GENERALIDADES DE LOS LODOS

CAPITULO 2 GENERALIDADES DE LOS LODOS

Existen diferentes tipos de lodos generados en procesos de tratamiento de agua residual; estos pueden variar en cuanto a sus características y volumen. Las principales variables que afectan la cantidad por unidad de caudal, son la dureza del agua residual, la utilización de químicos en el proceso y el grado de tratamiento. Los lodos residuales están clasificados como primarios, biológicos y químicos

Los lodos se generan de la separación física, biológica y química del tratamiento del agua residual. Los lodos incluyen cribados, arenas, espumas y otros sólidos concentrados en el agua residual. Muchas plantas de tratamiento emplean la sedimentación primaria, la cual es precedida por el tratamiento biológico que utiliza un proceso convencional de lodos activados para el tratamiento secundario. El poco seco de los sólidos de los lodos primarios, puede variar hasta en un 50 % de sólidos totales y su manejo es más fácil que el de los lodos biológicos y químicos.

La remoción de los sólidos está en función de su naturaleza. La adición de químicos en las aguas crudas para la remoción de fósforo o coagulación de partículas no sedimentables, puede generar grandes cantidades de precipitados. La cantidad de sólidos químicos producidos en el tratamiento químico del agua residual, depende del tipo y cantidad de químicos agregados, composición del agua residual, coagulación y eficiencia de la clarificación.

2.1. LODOS PRIMARIOS

Los lodos primarios en comparación con los lodos biológicos y químicos, requieren de un menor grado de acondicionamiento y pueden ser deshidratados mecánicamente más rápido. La deshidratación produce una torta de lodo mas seca y con mayor eficiencia en la captura de sólidos que para la mayoría de los lodos biológicos y químicos. Se puede estimar la producción de lodo primario para una planta de tratamiento en particular, a través de la determinación de la cantidad de Sólidos Suspendedos Totales (SST) y de la fijación de la eficiencia de remoción. Una remoción eficiente de SST en la sedimentación primaria es del orden de 50 a 65 % para lodos municipales.

La producción de lodos primarios está determinada por la concentración total de SST del clarificador primario. Se debe asegurar que la muestra del influente sea la misma que la del influente del clarificador primario, exenta de sólidos reciclados. Es necesario realizar algunos ajustes para considerar los sólidos reciclados removidos de la clarificación primaria. Los SST reciclados pueden alcanzar de 15 a 20 % del influente de SST y el reciclado de DBO_5 es de 8 a 15 % del influente de DBO_5 . A diferencia de los lodos secundarios, la volatilibilidad de los lodos primarios puede variar considerablemente día con día. Esto es originado por los sistemas de alcantarillado combinados y la infiltración abundante.

Las cargas domésticas y comerciales de sólidos suspendidos totales volátiles (SSV) no varían considerablemente alrededor de todo el año. Se puede tener un incremento temporal por los efectos de lluvias tempranas durante condiciones de climas húmedos. Estos efectos se dan con el transporte de sólidos acumulados en las alcantarillas y con el lavado de las calles en donde existen sistemas de drenaje combinados. Los SSV pueden variar ampliamente debido a las descargas temporales o industriales variables, y la remoción primaria de SST y DBO_5 puede incluso variar de acuerdo con la naturaleza de los sólidos.

Los diseñadores deben anticipar que la reducción del contenido volátil de los lodos primarios genera mayor cantidad de lodos, aunque el incremento de la carga de SSV sea muy pequeño o nulo. La producción de lodo en el contenido volátil menor es 30 % mayor que la cantidad de lodo producido en climas secos. El contenido volátil menor de lodo, es más fácil de manejar debido a

su contenido de arenas. El diseño del manejo de lodo debe basarse en las cantidades mayores de sólidos del lodo.

La eficiencia de la clarificación primaria es importante debido no solamente a que el lodo es más fácil de manejar, sino que también la unidad de producción (kg/kg) del lodo secundario es parcialmente dependiente de la relación SST/DBO₅ en la mezcla clarificada. La Figura 2.1 muestra la producción y la concentración de una torta de lodo deshidratada de varias proporciones de lodo primario crudo (RPS) y lodo residual activado (WAS). Cuando se utilizan clarificadores primarios, la cantidad total de los sólidos producidos es mas baja que la suma de RPS y WAS, pero la retención de agua en los sólidos biológicos aumenta.

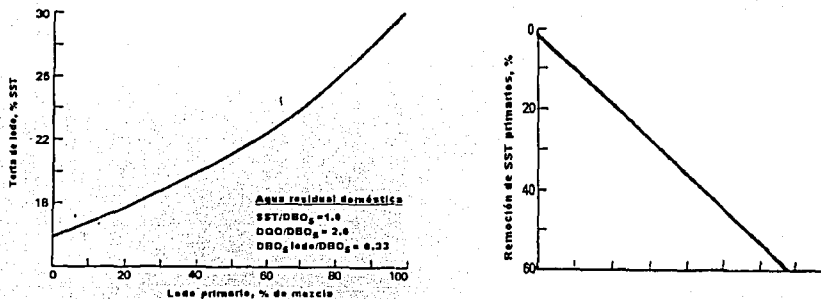


Figura 2.1 Sólidos de la torta en función del clarificador primario y proporción de PS:WAS.

En aquellos casos cuando se requiera una concentración mayor de sólidos en la torta de lodo, se debe proveer un tratamiento primario óptimo. Los requerimientos del clarificador primario pueden determinarse experimentalmente a través de pruebas de laboratorio, o a través de la evaluación de las características de desempeño de las unidades existentes, considerando diferentes gastos.

El desempeño del clarificador depende de la proporción del sobretlujado (OFR, m³/m²/día) y de la profundidad del vertedero (SWD) del clarificador. Para alcanzar un desempeño óptimo en los clarificadores primarios circulares se debe tener:

$$\begin{aligned} \text{OFR, max} &\leq 4.5 \text{ SWD}^2 & (\text{SWD} = 2 \leq 3 \text{ m}) \\ \text{OFR, max} &\leq 12.25 \text{ SWD} & (\text{SWD} = 3 \leq 5 \text{ m}) \end{aligned}$$

Para los clarificadores rectangulares, el largo de la ruta de caudal es muy importante para vencer los disturbios de entrada. La profundidad del fondo es de gran importancia. Para fondos de 30 m de largo, la proporción largo-ancho es de 5:1. Los fondos que tienen longitudes de 30 a 65 m de largo y 4 a 5 m de profundidad brindan excelentes resultados.

2.2. LODOS QUÍMICOS

La adición de químicos en el agua cruda residual para la remoción de fósforo y coagulación de sólidos no sedimentables, genera grandes cantidades de lodos. La cantidad de sólidos producidos en el tratamiento químico del agua residual, depende del tipo y cantidad de químicos añadidos, componentes químicos del agua residual, desempeño de la clarificación y coagulación. Es muy difícil estimar la cantidad de sólidos químicos que son generados. Se recomienda hacer pruebas de precipitado para estimar las cantidades de lodo químico.

La Tabla 2.1 provee las cantidades estimadas de sólidos suspendidos y químicos producidos en un tanque de sedimentación primario hipotético que procesa agua residual tratada con cal, sulfato de aluminio y cloruro férrico. El uso de polielectrólitos puede incrementar la captura de sólidos en el clarificador. La remoción de los SST es del rango de 75 a 85 % y la remoción del DBO₅ es del 55 al 70 % de acuerdo con las características del agua residual.

Tabla 2.1 Producción típica de lodos primarios y primarios - químicos.

Modo de operación	Dosificación química (mg/l)	Remoción de SST crudos (mg/l)	Remoción de DBO ₅ (mg/l)	Cantidad de lodo químico producido (mg/l)
Sedimentación	-	120	60	-
Adición de polímero	0.5-3.0	150	90	-
Ayuda ¹ de CaO	200	160	120	128
FeCl ₃ (como Fe) ³	12	160	120	47
Al ₂ SO ₄ (como Al) ³	12	160	120	46

1 Basado en 200 mg/l de DBO₅, 200 mg/l de SST y 10 mg/l de TP en lodo crudo; el efluente primario es \leq 2mg/l de fósforo total.

2 Varía debido a la dureza permanente en el agua, se utilizó 35 mg/l precipitados como CaCO₃.

3 Podrá requerir adición de polímero para aumentar la clarificación.

La DBO₅ soluble químicamente definida es menor que la DBO₅ soluble filtrada, debido a que una porción de la DBO₅ coloidal se aglomera y sedimenta. Los precipitados sólidos se definen como Ca₃(PO₄)₂, CaCO₃, FePO₄, Fe(OH)₃, AlPO₄ y Al(OH)₃. Algunos de estos precipitados se hidratan y generan cantidades de lodo mayores a las que se muestran en la Tabla 2.1. Los sólidos de lodo se calientan a temperaturas de 103° a 105° C para un análisis de sólidos, y durante dicha prueba se pierde cierta humedad. Sin embargo, la hidratación de la humedad afecta adversamente la capacidad del lodo para los procesos de espesamiento y deshidratación.

2.3. LODOS BIOLÓGICOS

Los procesos de tratamiento aerobios y anaerobios generan lodos biológicos. Las cantidades y propiedades varían de acuerdo al rango de crecimiento metabólico de los organismos presentes. La concentración y volumen de los lodos biológicos está determinada por la operación de los clarificadores y de la sedimentación, y son más difíciles de espesar y deshidratar que los lodos primarios y químicos.

Los lodos del tanque de sedimentación secundario de un filtro percolador, consisten de materia orgánica parcialmente descompuesta. Son de color café oscuro, floculentos, de aspecto más homogéneo y tienen menos olor que los lodos crudos. Los lodos en exceso separados del proceso de lodos activados, están parcialmente descompuestos, son de color café dorado y floculentos y tienen un olor a tierra no desagradable. El lodo de los tanques sépticos y de doble acción es negro cuando su almacenamiento es prolongado, no es ofensivo y tiene un olor a alquitrán caliente, hule quemado.

La producción de lodo biológico varía en cada planta de tratamiento de acuerdo con las características del agua y los parámetros biológicos de diseño. Una agua residual con un alto nivel de DCO/DBO₅ produce una mayor cantidad de sólidos de lodo. La producción neta (Y_N) se determina con las ecuaciones 2.1 y 2.2.

$$Y_N = a \text{ DBO}_{5R} - b(M) \quad (2.1)$$

$$1/SRT = a(F_R/M) - b \quad (2.2)$$

donde,

- SRT = edad de lodo aerobio, días
- SRT = M/Y_N
- F_R = DBO₅ (removido), kg/día
- M = MLSS o MLVSS, kg
- a = síntesis, kg/kg DBO_{5R}
- b = decaimiento endógeno, día⁻¹
- Y_N = producción neta, kg SST o kg SSV

Los valores de la relación DCO/DBO₅ y SST/DBO₅ deben especificarse para poder diseñar la producción neta en función de la SRT y temperatura. Los valores a y b son variables; y el SRT y la temperatura dependientes. La producción de lodo es mayor durante las temperaturas bajas, por lo que se recomienda utilizar el periodo más frío del año para proyectar la producción máxima de lodo cuando la carga es uniforme a lo largo de todo el año.

La Figura 2.2 indica el rango de producción de lodo esperado para temperaturas entre 10 y 30°C en función de la SRT, con y sin tratamiento primario. En este caso, el agua residual es una agua residual doméstica típica con valor de DCO de 400 mg/l, 200 mg/l de DBO₅ y SST y efluente del clarificador primario como se indica en la Figura 2.2. Esta curva no debe utilizarse para aguas residuales que tengan diferentes rangos relativos de DCO/DBO₅/SST en el agua residual cruda o en el efluente primario sedimentado.

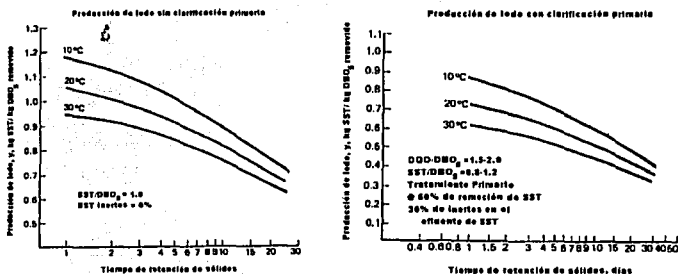


Figura 2.2 Proceso de balance de masa.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Durante la remoción del fósforo se incrementa considerablemente la producción neta de lodo. El balance de fósforo [efluente primario (PE) a efluente final (FE)] provee un método fácil y directo para determinar la producción neta, la SRT y el sistema MCRT (tiempo de residencia celular promedio). La ecuación 2.3 describe el procedimiento.

$$SRT = \frac{(MLSS - kg)(\%P/100)}{(PETP - FETP)(m^3/d)(1000)} \quad (2.3)$$

$$MCRT = \frac{MLSS + SST \text{ del clarificador}}{MLSS} (SRT)$$

$$\text{Producción de lodo} = \frac{MLSS}{SRT} \text{ o } \frac{MLSS + SST \text{ del clarificador}}{MCRT}$$

donde,

MLSS = sólidos suspendidos de licor mezclado

SST = sólidos suspendidos totales

PETP = efluente primario de la planta de tratamiento, m³/día

FETP = efluente final de la planta de tratamiento, m³/día

Se utilizan sales de metal para la precipitación de fósforo en los sistemas de película biológica suspendida. Las sales utilizadas más comúnmente son el cloruro férrico, sulfato férrico y sales de aluminio. También se pueden utilizar para este proceso baños de ácidos, sulfato ferroso, cloruro ferroso y cloruro de aluminio. Para la utilización de sales de metal es necesario proveer una alcalinidad adicional en el tanque de aereación. El exceso de sales forma hidróxidos del metal y se precipita. El fósforo residual en niveles bajos es dependiente del pH, y puede ser más económico incrementar el pH con la adición de alcalinidad ya que esta no produce lodo excedente.

2.4. CONCENTRACIÓN DE LODO - CLARIFICADORES PRIMARIOS

La concentración del influente de lodo es un factor importante en las unidades de procesamiento de lodo tal como en la de digestión y deshidratación. En instalaciones de gran tamaño, la aplicación de un espesamiento preliminar separado, puede ser un proceso económicamente viable, sin embargo, este no se aplica en las instalaciones con gastos menores a 0.2 m³/s.

La mayoría de las plantas pequeñas, no poseen métodos de espesamiento y utilizan las unidades primarias de tratamiento para la resedimentación y espesamiento de los sólidos crudos primarios y secundarios (Fig. 2.3). El tiempo de retención aumenta considerablemente en los clarificadores primarios que funcionan como espesadores. Los tiempos de retención excesivos son la causa principal de olores ofensivos y aumento de la capa de lodo sobre la línea de descarga.

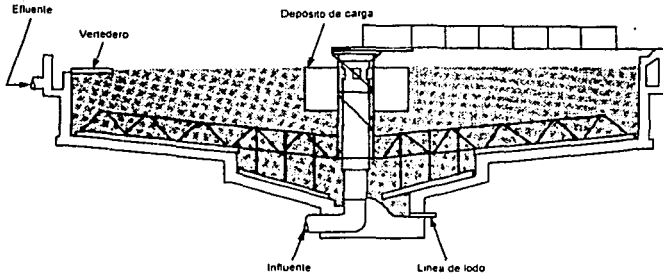


Figura 2.3 Combinación de un clarificador - espesador primario.

Cuando el clarificador primario es utilizado para funciones combinadas de clarificación de agua residual y conductor del concentrado de lodo para los procesos de digestión o deshidratación, la configuración de diseño convencional del clarificador primario es inapropiada. Esto se aplica para los clarificadores primarios en las instalaciones pequeñas, donde es necesario tener de 1.5 a 2 días de SRT en el clarificador para crear una capa de lodo de 1.0 a 1.5 m sobre la línea de descarga. El aumento de lodo crea un flujo bajo más espeso e interfiere con la clarificación y algunas veces se originan gases, olores y lodos flotantes.

Para prevenir estos problemas, es necesario construir los clarificadores más pequeños con una pendiente de piso estándar de 2.75:12. Para clarificadores de mayor tamaño, se puede utilizar una pendiente doble, donde la pendiente interna sea de 2.75:12 (zona de espesamiento) y la externa de 1:12. En un clarificador primario, solo se requiere del 40 al 50 % del diámetro para el espesamiento del lodo, por lo que se puede modificar la pendiente del piso a un radio medio.

La Figura 2.4 muestra algunas configuraciones típicas de pisos de clarificadores; solamente tres son recomendados para un proceso combinado eficiente de la clarificación y espesamiento. El clarificador tipo A es el diseño utilizado más frecuente, pero no es apropiado para procesos combinados de clarificación y espesamiento. Los clarificadores tipo B, C y D brindan un mejor desempeño en términos de concentración de lodo espesado y menor depósito de éste; por lo que, generan un lodo más fresco y con mayor flexibilidad para las funciones de remoción y operación.

El clarificador tipo D brinda una mayor concentración de lodo debido a su semejanza con el diseño de un espesador, posee un depósito de lodo más cargado y un depósito de lodo más cerca del punto de descarga. La capa de lodo se forma en la zona inferior con un SRT superior a un día. La pendiente es de 0.5 a 1.0:12 en el área externa y de 2.5 a 3.0:12 en la zona de espesamiento.

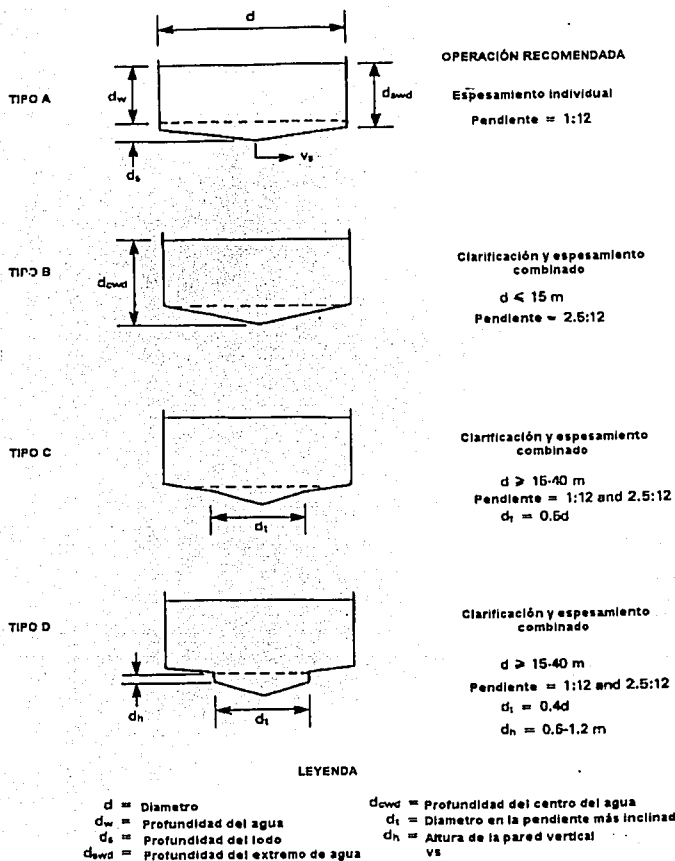


Figura 2.4 Efecto de la configuración del piso sobre la ubicación de la capa y acumulación del lodo.

El clarificador tipo B es un diseño simple y apropiado para clarificadores mayores a 15 m de diámetro. La pendiente del fondo es de 2.5 a 3.0:12 con las pendientes más inclinadas orientadas hacia el diámetro más pequeño. La profundidad de la sección de cono (d_c) no debe ser menor a 1 m. Para diámetros superiores entre 15 y 18 m, la profundidad de excavación se convierte en un factor y la mayor parte del volumen del cono no es necesaria para el almacenamiento del lodo.

Los clarificadores tipo C son utilizados para operaciones industriales de clarificación y espesamiento de gran tamaño. La configuración ha sido utilizada para las etapas de tratamiento de lodos primarios y secundarios. Así como en el clarificador tipo D, la pendiente de la zona externa disminuye a medida que el diámetro aumenta, ya que para conservar el depósito, el transporte y la profundidad del lodo son críticos en la zona de espesamiento. Las pendientes de piso de 0.5:12 en la zona externa son comunes por encima de los 30 m de diámetro para minimizar la profundidad total de la unidad. Mientras que los clarificadores tipo C y D mayores a 60 m con capacidades de área mayores a 1394 m², emplean el proceso de espesamiento por separado.

Las instalaciones pequeñas de tratamiento (con gastos menores a 0.2 m³/s) que utilizan clarificadores primarios, pueden emplear una pendiente de piso de 2.0 a 2.5:12 en los clarificadores secundarios. Esta pendiente reduce los problemas de operación relacionados con la conservación de un elevado MLSS (sólidos suspendidos de licor mezclado); esto se debe a que se origina un aumento en el retorno de la concentración y un decremento en el volumen de lodo. La planta es más eficiente y fácil de operar para los remanentes húmedos y sólidos.

Se recomienda para aquellas instalaciones grandes que no cuenten con clarificadores primarios, una concentración preliminar del lodo residual activado antes del proceso de deshidratación por dos razones: 1) para reducir el volumen; 2) para brindar cierta holgura entre el programa de debilitación de sólidos y el programa de operación de deshidratación. El propósito de una concentración preliminar es para incrementar entre un 50 y 100 % de la concentración de lodo residual activado. Se utiliza el espesamiento por flotación y gravedad con el fin de reducir del 4 al 7 % del volumen de sólidos totales, antes de ser sometidos a los procesos subsiguientes.

2.5. CARACTERÍSTICAS DE LODOS RESIDUALES

Para evacuar el lodo generado de las plantas de tratamiento de la manera más eficiente, es importante conocer las características de los sólidos y el lodo que se va a procesar. Las características varían de acuerdo al origen de los sólidos y lodo, edad, y tipos de procesos al que se ha sometido.

2.5.1. Gravedad específica y volatilidad

La gravedad específica del lodo está en función de la cantidad de arena y partículas finas inertes. Estas partículas orgánicas tienen una gravedad específica de 2.5 a 2.9. La Tabla 2.2 muestra la gravedad específica y volátil que podrán alcanzar los lodos con un buen desarenamiento. La gravedad específica de los sólidos es baja y varía de acuerdo con el influente.

La gravedad específica de los filtros biológicos de lodo es mayor que la de los lodos activados. Esto se debe a un IVL (Índice Volumétrico del lodo) menor y un rango mayor de asentamiento. La gravedad específica de los lodos después de la digestión anaerobia aumenta debido a la reducción de las partes acuosas y aumento del contenido inerte.

Tabla 2.2 Gravedad específica de lodos residuales.

Tipo de lodo	Volatilibilidad (%)	Rango de gravedad específica (%)
RPS	75-80	1 + 0.010 (% SST) a
WAS	80-85	1 + 0.012 (% SST) 1 + 0.007 (% SST) a
TF y RBC	75-80	1 + 0.012 (% SST) 1 + 0.015 (% SST) a
RPS + WAS	75-85	1 + 0.025 (% SST) 1 + 0.004 (% SST) a
		1 + 0.006 (% SST)

RPS = Lodo crudo primario
 WAS = Lodo activado residual
 TF = Filtro goteador
 RBC = Filtro percolador

2.5.2. Concentración preliminar de lodos (espesamiento)

Los lodos crudos primarios son los más fáciles de espesar, seguidos por los lodos de filtros biológicos. Los lodos residuales activados son los más difíciles de espesar si la IVL es elevada. Los lodos químicos producidos de la adición de sales de metal se espesan muy parecido a los lodos residuales activados con un IVL de 100 ml/g, pero son más estables. El envejecimiento del lodo después de la remoción del agua residual cruda o del ambiente aerobio, causa un deterioro en la calidad del espesamiento.

En la Tabla 2.3 se muestran datos provenientes de algunas plantas de tratamiento tipo con diferentes clases de lodos. Los resultados por obtener en el clarificador primario son dependientes de su diseño. El espesamiento aumenta parcialmente el sobrenadante del lodo, pero origina una considerable remoción de la fase líquida. El propósito es reducir el volumen de lodo para ser estabilizado, deshidratado o transportado. En la Figura 2.5 se muestra la importancia del espesamiento previo a la deshidratación mecánica. El espesamiento se puede llevar a cabo con un espesamiento parcial con los siguientes equipos: clarificadores primarios o secundarios, espesadores por gravedad, centrifugas, filtros prensa de banda y dispositivos de tambor rotatorios.

El espesamiento por gravedad de lodo crudo o primario digerido es un proceso eficiente y económico. El lodo primario digerido anaerobicamente es digerido en el digestor secundario. La utilización de los tanques primarios para la captura y espesamiento del influente de agua residual y de sólidos recirculados de lodo residual activado, no es económica ni eficiente en las plantas grandes. Esta práctica genera un aumento en la producción de lodo activado debido al incremento de la carga de sólidos en el sistema de aeración. Los resultados pueden ser deficientes si se utiliza tanques primarios para concentrar sólidos de lodos residuales activados, si la configuración del fondo no es propicia para el espesamiento.

Tabla 2.3 Espesamiento de lodos residuales.

Tipo de lodo	Concentración de SST, %				
	Clarificador primario	Flotación	Espesador por gravedad	Espesador de banda	Centrífuga
RPS	4 - 7	-	8 - 10	9 - 12	9 - 12
WAS	-	3 - 5	2 - 2.5	4 - 6	4 - 6
RPS + WAS	2.5 - 4	4 - 6	4 - 5	5 - 7	5 - 7

La utilización de los espesadores por gravedad para la mezcla de lodos crudos primarios y residuales activados puede generar diversos resultados. Muchos de los resultados deficientes se deben a una o varias de las siguientes causas:

- La concentración del influente de RPS + WAS es > 0.5 de porcentaje de SST.
- El RPS es muy séptico.
- El WAS > fracción de RPS.
- La dilución del agua secundaria no es apropiada.
- La pendiente del piso es < 2.5:12, originando una excesiva retención de sólidos.
- El lodo no es removido continuamente.

La utilización de otros métodos, como centrífugas de camisa, filtración de banda y sistemas de tambor rotatorios ha incrementado debido a que estos brindan resultados confiables y efectivos sobre el espesamiento de lodo residual activado.

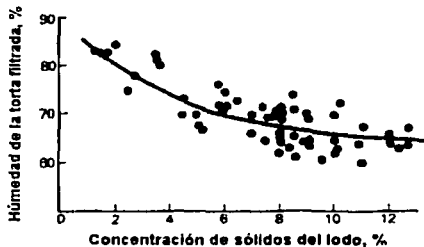


Figura 2.5 Efecto de la carga de sólidos sobre el desempeño de los filtros al vacío rotatorios.

2.5.3. Hidratación y carga superficial de las partículas

Las partículas de lodo tienen una carga superficial negativa e intentan repelerse a medida que se juntan. Las partículas de lodo atraen débilmente las moléculas del agua a su superficie (hidratación) ya sea por un enlace químico débil o por acción capilar. El acondicionamiento químico se utiliza para contrarrestar los efectos de hidratación y de carga superficial. Los químicos utilizados son los polímeros orgánicos; cal, cloruro férrico y algunas otras sales metálicas. Su trabajo consiste en reducir o eliminar la fuerza repulsiva con la finalidad de permitir que las

partículas se junten o floculen. Por lo que el agua podrá removerse más fácil y rápidamente durante el proceso subsecuente de deshidratación mecánica.

2.5.4. Tamaño de partícula

El tamaño de la partícula es un factor muy importante que afecta a la deshidratación. A medida que el tamaño promedio de la partícula disminuye, el área superficial y la proporción de superficie-volumen aumenta para una masa de lodo dada. Las causas originadas del aumento de la superficie del área incluyen las siguientes:

- Mayor repulsión entre partículas debido a la mayor área de la superficie cargada negativamente.
- Mayor atracción del agua a la superficie de la partícula debido a la formación de más espacios para enlaces químicos.

El tamaño de la partícula está influenciado por la fuente del lodo y tratamiento previo. Los lodos primarios, debido a su mayor contenido de materiales orgánicos y fibrosos, tienen un tamaño promedio mayor que las partículas de los lodos secundarios. Esto se debe a que los sólidos finos suspendidos y coloidales tienden a pasar a través del clarificador primario. Las partículas que pasan a través del clarificador primario son removidas en el clarificador secundario y también la materia celular floculada menos densa formada durante el tratamiento biológico. El proceso de lodos activados, además de remover la mayor parte de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sirve para capturar, remover y recuperar la mayor parte de los materiales residuales a través de la bioagulación y floculación. Como resultado, el lodo activado es más fino que el lodo primario, pues está conformado entre el 60 y 90 % por material celular orgánico con gran contenido de agua.

En la Tabla 2.4 se muestra la dificultad relativa de remoción de agua de un lodo primario digerido sin flocular, que contiene varias fracciones de tamaño de partícula. Como se observa en la Tabla, la Resistencia Específica a la filtración de un lodo sin fraccionar está dominada por la Resistencia Específica del material menor a 5 micras de tamaño, aunque este material constituye cerca del 14 % de peso en sólidos totales. La Resistencia Específica es una medida de la deshidratación específica del lodo. Si la Resistencia Específica es menor, la deshidratación del lodo es mayor. La Resistencia Específica se define como la presión requerida para producir un régimen unitario de flujo a través de una torta de lodo de peso unitario de sólidos secos por unidad de área cuando la viscosidad de los líquidos es unitaria. Los valores específicos son determinados de experimentos de filtración de laboratorio.

Tabla 2.4 Deshidratación de lodos en función del tamaño de partícula.

Diámetro	Resistencia Específica	Porcentaje de partículas totales
micrones	sec ² /g	
Muestra original, sin fragmentar	10.4 x 10 ⁹	
> 100	2.3 x 10 ⁹	10.2
5- 100	4.6 x 10 ⁹	75.5
1 - 5	13.8 x 10 ⁹	8.5
< 1		5.9

En la Tabla 2.5 se muestran los valores de Resistencia Específica para diferentes tipos de lodos, tratados químicamente y sin tratar. Debido a que la Resistencia Específica máxima para obtener

una deshidratación mecánica viable, se encuentra entre valores $\leq 10.0 \times 10^7 \text{ sec}^2/\text{g}$, ninguno de estos lodos es fácil de deshidratar. En la Tabla 2.5 se observa que los valores de Resistencia Específica pueden variar significativamente. Se ha demostrado que los lodos crudos acondicionados apropiadamente son casi siempre los más fáciles de deshidratar, seguidos por los lodos primarios digeridos bien digeridos y por último los lodos activados.

Tabla 2.5 Resistencia Específica de varios tipos de lodos.

Tipo de lodo	Resistencia Específica sec ² /g
Crudo	10 - 30 x 10 ⁹
Crudo (coagulado)	3 - 10 x 10 ⁷
Digerido	3 - 30 x 10 ⁹
Digerido (coagulado)	2 - 20 x 10 ⁷
Activado	4 - 12 x 10 ⁹

La estabilización del lodo a través de los procesos aerobio y anaerobios origina la destrucción de una parte de la materia orgánica y la producción de partículas acuosas, las cuales son más difíciles de deshidratar. Una porción significativa del lodo acuoso se destruye en el proceso de estabilización de 30 a 40 %.

2.5.5. Compresibilidad

Las partículas del lodo son hidrofílicas y compresibles a tal grado que origina deformación de las partículas y reducción del área libre entre ellas. Esta reducción del volumen impide el movimiento del agua a través de la parte comprimida de la torta de lodo, y reduce el grado de deshidratación. Un acondicionamiento adecuado mejora la deshidratación debido a la producción de una matriz de sólidos floculentos en aguas relativamente transparentes previas a la filtración. Cuando la matriz se deposita en un medio filtrante, la torta abultada retiene una porosidad substancial. La caída de presión muy alta a través de los floculos del lodo puede suscitar que la torta de lodo se rompa y que el rango de filtración disminuya. El resultado neto del acondicionamiento es la remoción rápida del agua, debida a un nivel elevado de remoción de agua al inicio del ciclo de filtración.

2.5.6. Temperatura del lodo

A medida que la temperatura del lodo incrementa, la viscosidad del agua presente en la masa de lodo disminuye. La viscosidad es importante en el proceso de deshidratación por centrifugas, debido a que la sedimentación es la clave primordial del proceso.

2.5.7. Proporción de sólidos volátiles con sólidos fijos

Los lodos tienden a deshidratarse mejor a medida que el porcentaje de sólidos fijos aumenta. Ciertos fabricantes de centrifugas tipo G-alta, utilizan el porcentaje de sólidos fijos como parametro de diseño del equipo. De acuerdo con estos fabricantes, la torta de lodo generada de una centrifuga de deshidratación de lodos primarios digeridos anaerobicamente y activados, muestra un cambio positivo del 5 % de su concentración de sólidos cuando el porcentaje de sólidos volátiles disminuye de 70 a 50 %. Sin embargo, debido a que la digestión también genera partículas más pequeñas, el área superficial más elevada da como resultado más humedad. La aproximación anterior del contenido volátil para la torta de sólidos debe ser utilizada cautelosamente y sometida a una prueba preliminar cuando sea requerida.

2.5.8. pH del lodo

El pH del lodo afecta la carga de la superficie sobre las partículas de lodo. Por lo tanto el pH influye en el criterio de selección del polímero para el acondicionamiento. Generalmente se utilizan polímeros aniónicos cuando el lodo ha sido sometido al acondicionamiento con cal y su pH es elevado. Los polímeros catiónicos son recomendables para pH ligeramente superiores o inferiores al neutral. En algunos casos los polímeros catiónicos pueden ser efectivos para pH superiores a 12.

2.5.9. Septicidad

Los lodos sépticos son más difíciles de deshidratar y requieren de dosificaciones mayores de acondicionadores químicos que los lodos frescos. Este fenómeno se debe a la reducción de las características de la superficie creada por la conversión biológica. La deshidratación de los lodos sépticos puede generar un lodo más húmedo y de menor volumen. Por esta razón, se recomienda evitar el almacenamiento del lodo crudo.

CAPITULO 3
PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS
PREVIOS Y SUBSECUENTES A LA
DESHIDRATACIÓN

CAPITULO 3

PROCESOS DE TRATAMIENTO DE LODOS PREVIOS Y SUBSECUENTES A LA DESHIDRATACION

Para evaluar o seleccionar el proceso de deshidratación óptimo, el diseñador debe considerar los procesos de tratamiento previos y subsecuentes. Un proceso de deshidratación no puede ser evaluado sin haber examinado los procesos involucrados anteriormente en relación con el sistema de manejo de sólidos. Dicha evaluación puede transformarse en un procedimiento complejo debido al gran número de combinaciones de unidades de tratamiento disponibles de separación sólido-líquido, espesamiento, deshidratación y evacuación. En la Figura 3.1 se muestra un esquema general del sistema de manejo de sólidos y los procesos de tratamiento más comunes para realizar cada una de estas funciones.

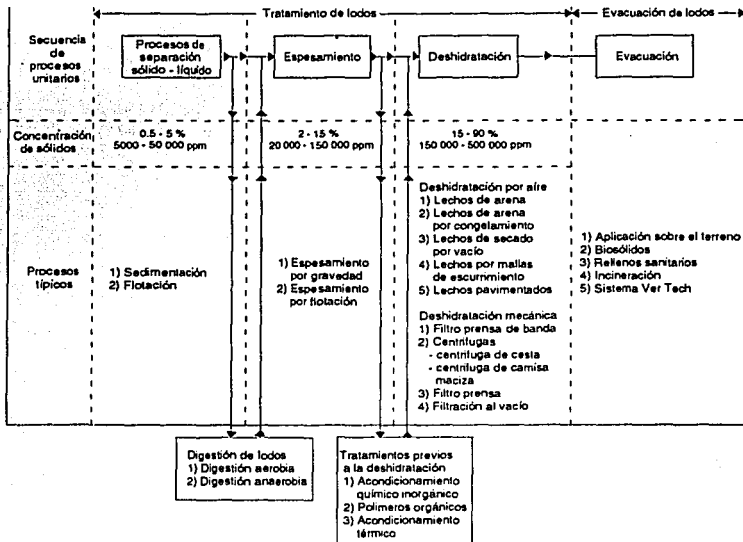


Figura 3.1 Diagrama de procesos para tratamiento y evacuación de lodos.

3.1 PROCESOS DE SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO

Una alternativa para la secuencia de los procesos considerados, es la reducción del contenido de compuestos orgánicos y volátiles a través de una digestión (aerobia o anaerobia). El lodo resultante de la digestión con un contenido considerablemente inferior de materia orgánica, se conoce como lodo estabilizado. Los objetivos principales de la estabilización son la reducción o eliminación de olores

molestos, reducción del volumen de líquido o masa de sólidos a tratar en operaciones sucesivas (hasta en un 5 %), y la reducción de microorganismos patógenos en los lodos.

3.1.1. Digestión aerobia de lodos

La digestión aerobia es un proceso en el cual se produce una aeración de la mezcla de lodo digerible en la clarificación primaria y tratamiento biológico aerobio por un periodo significativo de tiempo, con la obtención de una destrucción de células y disminución de sólidos suspendidos volátiles (SSV). El objetivo de la digestión aerobia es reducir el total de lodos que se deben evacuar posteriormente. Esta reducción es el resultado de la conversión por oxidación de una parte sustancial del lodo en productos volátiles (CO_2 , NH_3 , H_2).

La Figura 3.2 muestra un diagrama del proceso continuo de un digestor de lodos que incluye sedimentador primario y un proceso de lodos activados. Cuando la cantidad de lodo a digerir es pequeña se utiliza digestión en discontinuo, seguida de una descarga intermitente de lodo digerido. En el digestor de la Figura 3.2 se maneja una mezcla de lodos del clarificador primario y secundario. En el caso de la digestión aerobia, los tiempos de residencia son menores que en los procesos anaerobios, lo que significa menor inversión en el tamaño del digestor. Los costos de energía para la aeración pueden ser un factor importante para las plantas de gran tamaño.

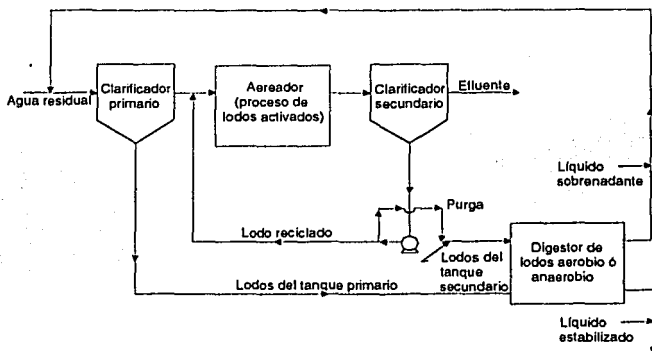


Figura 3.2 Diagrama de proceso de la digestión aerobia de lodos.

3.1.2. Digestión anaerobia de lodos

En 1904 Imhoff obtuvo la patente del diseño de reactores de digestión anaerobia, conocidos como tanques Imhoff. La mayoría de los procesos de digestión de lodos son anaerobios, aunque la utilización de la digestión aerobia se está popularizando, especialmente en pequeñas unidades. Los digestores de lodos anaerobios son de dos tipos: digestores de una etapa y digestores de dos etapas.

El proceso de digestión se favorece por temperaturas altas (entre 24 y 40 °C), lo que exige que el lodo en digestión se caliente mediante serpentines de vapor dentro del reactor, o por medio de un calentador externo de lodos. El lodo bruto se introduce en la zona donde existe la digestión activa y predomina la producción de gas. El gas al elevarse arrastra partículas de lodo y otras materias formando un sobrenadante que se separa del digestor. El lodo digerido se extrae por el fondo del tanque. El gas se

recoge por la parte superior del digestor, y se utiliza como un combustible debido a su alto contenido de metano (Figura 3.3).

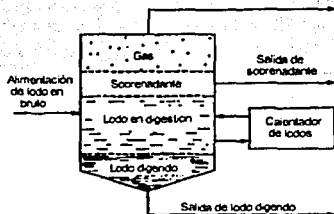


Figura 3.3 Digestor anaerobio de lodo de una etapa.

El tiempo de residencia en los procesos de una etapa es bastante alto, del orden de 30 a 60 días, aún para digestores con adición de calor. La razón de este tiempo de retención tan extenso es el hecho de que solamente 1/3 del volumen del tanque se utiliza para digestión activa. Como resultado de la obtención de un volumen tan bajo, este proceso no se recomienda para plantas de digestión de lodos con capacidades superiores a 4 000 m³/día.

El objetivo fundamental de un digestor de dos etapas es conseguir una mejor utilización volumétrica. La primera etapa se usa únicamente para digestión y la segunda sirve como separador de sólido-líquido y permite la recogida de gas. El tiempo de retención de la primera etapa es normalmente de 10 a 15 días. Solo se calienta la primera etapa. La mezcla se realiza en la primera etapa por medios mecánicos o por recirculación de gas (Figura 3.4).

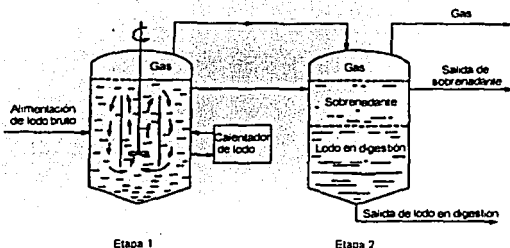


Figura 3.3 Digestor anaerobio de lodo de dos etapas.

3.2. ESPESAMIENTO DE LODOS

El espesamiento se define como el proceso de remoción parcial del agua en el lodo para alcanzar cierta reducción del volumen. El material generado es aun un fluido. Se utiliza en las plantas de tratamiento de agua residual para concentrar los sólidos e incrementar la eficiencia de los procesos de tratamiento posteriores. El espesamiento es económicamente viable debido a la reducción considerable de volumen.

Tal reducción puede proveer un ahorro significativo en el costo de los procesos de deshidratación, digestión u otros subsiguientes.

La ubicación adecuada de un espesador en una planta de tratamiento de agua residual es muy importante. Cuando el lodo es sometido a una digestión, el espesamiento de la mezcla de lodos primarios y activados trabaja eficientemente. Por el otro lado, si los lodos primarios y secundarios van a ser sometidos a una deshidratación o incineración, los lodos deben espesarse separadamente y mezclarse inmediatamente antes de esta. Los tres métodos más comunes para el espesamiento de lodos son: por gravedad, flotación y métodos de centrifugación.

3.2.1. Espesamiento por gravedad

El espesamiento por gravedad es el proceso de concentración más común, simple y económico en las plantas de tratamiento de agua residual municipal. Este proceso consiste de una sedimentación similar a la que ocurre en los tanques de sedimentación simple, con la diferencia de que el objetivo primordial es la concentración del lodo; y por lo tanto el sobre flujo de agua residual del clarificador pasa a ser de segundo orden. Este proceso es inverso al de sedimentación - clarificación. En comparación con la etapa inicial de la clarificación, la acción del espesamiento es relativamente lenta.

Los sólidos del lodo son colectados por decantación en un cárcamo. El efluente es desalojado por un vertedero. El grado de espesamiento de los lodos depende de algunos factores; el más importante es el tipo de lodo por espesar. El lodo biológico, principalmente del proceso de lodos activados, no se concentra al mismo grado que los lodos primarios. Los lodos activados son espesados por el proceso de flotación. El grado de tratamiento biológico y la relación de lodo primario a secundario (biológico), afecta la concentración final de sólidos obtenida en el espesamiento por gravedad.

Los flujos bajos pueden originar problemas de olores ofensivos. La calidad del líquido removido de los sólidos del lodo, es un factor importante en cualquier operación de espesamiento, debido a que este es regresado al proceso de tratamiento. La operación correcta de un espesador debe tener un mínimo de descomposición anaerobia y una captura de sólidos mayor del 90 %. En un espesador por gravedad, el lodo pasa a través de todas las concentraciones entre el influente y los sólidos asentados. Las partículas diluidas en suspensión se asientan libremente hasta que alcanzan la zona de lodo en el fondo de la plantilla. A medida que aumenta la concentración de la suspensión, se desarrolla una mayor interacción entre las partículas debido al decremento en la velocidad de sedimentación. Existen cuatro zonas en un sistema de espesamiento por gravedad:

1. Zona de clarificación en la parte superior compuesta por líquido transparente de sobrenadante.
2. Zona de asentamiento caracterizada por un rango constante de sedimentación.
3. Zona de compresión caracterizada por un decremento en el rango de sedimentación de sólidos.
4. Zona de compactación en donde el rango de sedimentación es muy bajo.

En la zona de asentamiento, las partículas se sedimentan bajo condiciones graduales pero su concentración permanece intacta. El nivel de sedimentación en esta zona puede usarse para determinar el área requerida de la clarificación del agua residual. En la zona de compresión, la concentración de sólidos se incrementa a medida que el agua es forzada hacia arriba a través de los espacios libres. La zona de compactación es la última zona, y se define como el área sostenida por los sólidos bajo esta.

El espesor de la capa de lodo en un espesador es un parámetro importante en consideración con la concentración final de sólidos. Para espesores mayores a 1 m, existe un aumento significativo en la resistencia al flujo de agua desde la capa de lodo. A medida que el lodo se acumula en las capas más profundas, se vuelve séptico, generando gas y un lodo muy abultado que no se compacta fácilmente. El aumento de la retención de sólidos en la capa de lodo, origina un incremento en la concentración de sólidos; solo hasta cierto rango. Para una compactación máxima, se sugiere un intervalo de 24 horas.

La concentración de sólidos asentados aumenta a medida que el tiempo de retención aumenta en la zona de compresión de espesor constante.

Es recomendable aplicar un agitado suave en la capa de lodo para facilitar la compactación, pero este grado de compactación depende del tipo de lodo. El lodo concentrado puede ser agitado ligeramente con el brazo del rastrillo mecánico del espesador, el cual genera burbujas de gas, previene la segregación de los sólidos de lodo y los mantiene moviéndose hacia el centro del espesador para ser removidos. Otro parámetro importante en el proceso de espesamiento es el Índice Volumétrico de lodo (IVL), el cual se define como el volumen de la capa de lodo dividido entre el volumen de lodo bombeado diario desde el espesador. Este número indica el potencial de asentamiento y las características de compactación de los sólidos de lodo. Un índice muy alto, indica un lodo abultado difícil de deshidratar y compactar.

3.2.1.1. Ventajas

- Brinda una mayor capacidad de almacenamiento de lodo.
- Requiere de una operación menos especializada.
- Brinda un costo bajo en operación y mantenimiento.

3.2.1.2. Desventajas

- Requiere de una extensa área de espacio/suelo.
- Contribuye a la producción de olores ofensivos.
- En algunos casos la separación de sólido-líquido es irregular.
- En algunos casos produce la menor concentración de sólidos de lodo.

3.2.2. Espesamiento por flotación

El espesamiento por flotación trabaja mejor en lodos muy pesados. Muchos lodos que se encuentran en el de agua residual poseen una gravedad específica aproximada de 1.0, y por lo tanto su sedimentación es muy pobre. Las unidades de espesamiento por flotación, son útiles en las plantas de tratamiento de agua residual para el manejo del lodo residual activado, debido a que tienen la ventaja de ofrecer una concentración mayor de sólidos y un costo inicial de equipo más bajo que en las unidades de espesamiento por gravedad.

El proceso de espesamiento por flotación es simplemente un espesamiento por gravedad pero invertido. En vez de esperar que las partículas de lodo se asienten en el fondo del tanque, la flotación utiliza pequeñas burbujas de aire que se adhieren a las partículas de lodo, llevándolas a la superficie en donde son extraídas como lodo espesado. Cierta porción del efluente se bombea de la unidad, o del efluente de la planta, al tanque de retención presurizado de 413 a 482 kPa. El aire se inyecta en el tanque de descarga a una velocidad controlada y se mezcla por la acción de una bomba controladora de aeración. El flujo se mide a través del sistema de reciclaje y se controla por una válvula localizada antes del mezclador con el influente de lodo. El flujo reciclado y el influente son mezclados en una cámara ubicada en la entrada de la unidad. Si se requiere la utilización de polímeros, generalmente se agregan en esta zona.

Se puede recurrir a la aplicación de diferentes tipos de químicos para los diferentes procesos de flotación por aire. La finalidad es aumentar la carga de sólidos admisibles, aumentar el porcentaje de sólidos flotantes e incrementar la transparencia del influente. El lodo residual activado puede ser espesado entre 3 y 5 % de sólidos sin la adición de químicos y puede incrementar de 4 a 6 % con la adición de ellos.

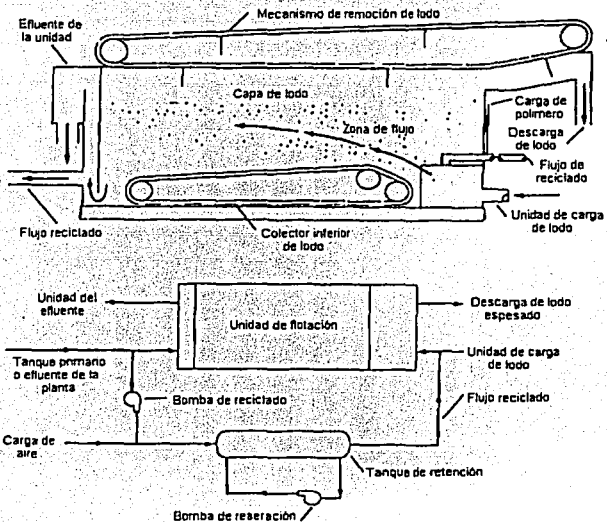


Figura 3.4 Proceso de espesamiento por flotación.

3.2.3. Espesamiento por centrifugación

La utilización de centrifugas para el espesamiento de lodos es limitada debido a su costo elevado. Se ha utilizado el espesamiento por centrifugación para lodos residuales activados en donde existen limitantes de espacio o características que hacen a los demás procesos inadecuados. Se pueden generar concentraciones entre 5 y 8 % de sólidos a través de este proceso.

3.3. DESHIDRATACIÓN

El objetivo primordial de la deshidratación es remover la parte líquida (agua), reduciendo así su volumen. Esto genera un lodo que actúa como un sólido y no como un líquido, y por consiguiente facilita los procesos subsecuentes de manejo, tratamiento y disposición final. Los dispositivos de deshidratación utilizan varias técnicas para la eliminación de la parte líquida. Algunas se basan en la evaporación y percolación natural, mientras que los aparatos de deshidratación mecánica utilizan medios físicos, asistidos mecánicamente para acelerar el proceso. Los medios físicos utilizados incluyen la filtración, prensado, acción capilar, extracción por vacío, separación y compactación por centrifugación.

Algunos lodos, especialmente los lodos digeridos por vía aerobia, no poseen buenas características para su deshidratación mecánica. Estos lodos se pueden deshidratar, con buenos resultados, en los lechos de secado. Cuando se desea deshidratar un lodo mecánicamente es difícil escoger el dispositivo óptimo de deshidratación, por lo que es necesario llevar a cabo estudios de laboratorio o pruebas en planta piloto. Los procesos de deshidratación disponibles se dividen en dos grupos: Procesos de deshidratación por aire y Procesos mecánicos de deshidratación.

3.3.1. Procesos de deshidratación por aire

Los procesos de deshidratación por aire son sistemas de eliminación de agua por medios naturales como son la percolación y evaporación; estos procesos son menos complejos que los mecánicos, pero requieren de una superficie bastante grande y demandan mayor mano de obra. Los procesos de deshidratación por aire se dividen en los siguientes sistemas:

1. Lechos de secado de lodos

- Lechos de arena
- Lechos de arena por congelamiento
- Lechos de secado por vacío
- Lechos con mallas de escurrimiento
- Lechos pavimentados

2. Lagunas de lodo

3.3.1.1. Ventajas y desventajas

<i>Sistema de deshidratación</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Lechos de secado	<ul style="list-style-type: none">▪ Cuando se dispone de bastante superficie, es el método de menor costo inicial.▪ El seguimiento y preparación de los operadores no es elevado.▪ Bajo consumo de energía.▪ Bajo o nulo consumo de productos químicos.▪ Menos sensible a la variabilidad de las características del lodo.▪ Mayor contenido de sólidos que los métodos mecánicos.	<ul style="list-style-type: none">▪ Precisa grandes superficies de terreno.▪ Precisa lodos estabilizados.▪ El diseño debe tomar en cuenta las condiciones climáticas.▪ La remoción del lodo demanda bastante mano de obra.
Lagunas de lodo	<ul style="list-style-type: none">▪ Bajo consumo energético.▪ Nulo consumo de productos químicos.▪ Estabilización adicional de la materia orgánica.▪ En los casos en que se dispone de superficie, el costo de inversión es bajo.▪ Es el método que requiere menor preparación de los operarios.	<ul style="list-style-type: none">▪ Posibles problemas de olores ofensivos y vectores.▪ Posible riesgo de contaminación subterránea.▪ Mayor ocupación de terreno que los métodos mecánicos.▪ La apariencia puede resultar desagradable a la vista.▪ El diseño debe tomar en cuenta las condiciones climáticas.

3.3.2. Procesos mecánicos de deshidratación

Los procesos mecánicos de deshidratación, se distinguen por la utilización de medios físicos con aplicaciones mecánicas, esto permite acelerar el proceso. Los procesos mecánicos requieren de una superficie menor para poder ser ejecutados, no toman en cuenta las condiciones ambientales y no generan olores ofensivos. Los procesos de deshidratación mecánicos (Capítulo 6), se dividen en los siguientes sistemas:

1. Filtro prensa de banda
2. Centrifugas
3. Filtro prensa
4. Filtración al vacío

3.3.2.1. Ventajas y desventajas

Sistema de deshidratación	Ventajas	Desventajas
Filtro prensa de banda	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajos costos energéticos. ▪ Bajo costo de inversión y mantenimiento. ▪ Mecánica menos compleja y facilidad de mantenimiento. ▪ Las máquinas de alta presión permiten la producción de una torta muy seca. ▪ El apagado del sistema requiere un esfuerzo mínimo. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitación en la producción hidráulica. Muy sensible a las características del lodo alimentado. ▪ La vida útil del medio es corta comparada con los dispositivos que emplean medios de tela. ▪ En general, no se recomienda automatizar el funcionamiento.
Centrifugas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se pueden utilizar las mismas maquinas para las operaciones de espesamiento y deshidratación. ▪ Puede no ser necesario el acondicionamiento químico. ▪ Apariencia limpia, mínimos problemas de olores, posibilidad de arranque y apagado rápidos. ▪ Muy flexible a la hora de cumplir las exigencias normativas. ▪ No se ven afectados por la presencia de arenas. ▪ Resultados excelentes con lodos de difícil tratamiento. ▪ Facilidad de instalación. ▪ Produce una torta de lodo relativamente seca. ▪ La relación costo/capacidad es baja. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacidad limitada. ▪ Excepto en el caso de filtros al vacío, es el de mayor consumo energético por unidad de lodo deshidratado. ▪ El caudal del sobrenadante puede generar cargas de recirculación elevadas. ▪ En el caso del lodo de fácil deshidratación, se eleva el costo del sistema en la relación costo/capacidad. Para la mayoría de los lodos, produce la menor concentración de sólidos en la torta. ▪ Vibraciones. ▪ El desgaste puede suponer un grave problema de mantenimiento. ▪ Precisa la eliminación de arenas. ▪ Es necesario disponer de personal altamente calificado.
Filtro prensa	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La mayor concentración de sólidos en la torta. ▪ Baja concentración de sólidos suspendidos en el líquido filtrado. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funcionamiento discontinuo. ▪ Elevado costo de los equipos. ▪ Elevado costo de la mano de Oobra. ▪ Necesidad de una estructura de soporte especial. ▪ Los equipos ocupan una gran superficie. ▪ Es necesario disponer de personal de mantenimiento calificado. ▪ Los sólidos adicionales generados por la gran cantidad de productos químicos añadidos precisan ser evacuados.
Filtración al vacío	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No es necesario disponer de personal calificado. ▪ En equipos de funcionamiento continuo, los costos de mantenimiento son bajos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El consumo energético por unidad de lodo deshidratado es el mayor de todos. ▪ El seguimiento por parte de los operadores debe ser continuo. ▪ Las bombas de vacío son ruidosas. ▪ El líquido filtrado, de acuerdo con el medio filtrante, puede tener un elevado contenido de sólidos.

3.4 EVACUACIÓN

El manejo de lodo tiene un fuerte impacto en el medio ambiente, y esto varía de acuerdo al método de evacuación seleccionado. Para tomar en cuenta los métodos de evacuación final, se debe considerar los siguientes factores:

- *Impacto sobre el aire.*- macropartículas; olores; contaminantes de aire obtenidos del método de tratamiento seleccionado; contaminación del aire proveniente de los vehículos de transporte del producto final e impactos sobre el aire de la generación de materiales utilizados en el proceso.
- *Impacto sobre el agua.*- escurrimiento sobre aguas superficiales; Impactos en los acuíferos debido a la filtración de lixiviados; efluentes de descarga y problemas de olores ofensivos.
- *Impacto sobre el suelo.*- contaminación de suelo con alto grado de nutrientes, metales pesados y restricción del uso de suelo.
- *Requerimientos Reglamentarios.*- el sistema de manejo de lodos requiere de permisos establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas vigentes, cualquier tipo de tecnología debe cumplir con las leyes estatales y federales, y los límites máximos permisibles están basados en los efectos adversos a la salud del hombre.

3.4.1. Métodos de evacuación

Los métodos más comunes de evacuación de lodos generados en plantas de tratamiento de agua residual municipal son los siguientes: aplicación sobre el terreno, distribución y comercialización, rellenos sanitarios e incineración. También se han creado algunos métodos de tecnología avanzada para cumplir con los requerimientos ambientales y económicos de disposición final, como el sistema Ver Tech. La cantidad de lodo a utilizar o evacuar afecta la viabilidad técnica, económica y ambiental de las varias opciones de disposición. Se debe considerar la cantidad de lodo de dos maneras:

1. Volumen de lodo saturado (contenido de agua y contenido de sólidos).
2. Masa o peso del lodo deshidratado.

Algunos procesos de tratamiento de lodos reducen el volumen de lodo y otros reducen o incrementan la masa. La composición del lodo puede limitar las posibilidades de su manejo, evacuación o brindar otras opciones más atractivas. Los cinco factores más importantes a tomar en cuenta son:

- Contenido orgánico
- nutrientes
- Patógenos
- Metales
- Toxicidad

En la Tabla 3.1 se lista la importancia o aceptabilidad de los compuestos del lodo en comparación con las opciones de manejo o evacuación.

Tabla 3.1 Importancia y aceptabilidad de compuestos de lodo en comparación con las opciones de manejo o evacuación.

Compuestos	Aplicación al terreno	Rellenos sanitarios	Incineración	Sistema VerTech
Contenido orgánico	MA	MA	NA	AR
Nutrientes	NA	MA	AR	AR
Patógenos	NA	MA	AR	AR

Metales	NA	NA	NA	AR
Tóxicos Inorgánicos	NA	NA	NA	AR

NA.- No aceptable
 MA.- Moderadamente aceptable
 AR.- Aceptable y recomendado

Otros factores clave que afectan el método de selección de manejo/evacuación del lodo son los siguientes:

1. Requerimientos de tratamiento de lodos
 - Deshidratación
 - Estabilización
2. Tamaño del Municipio
3. Requerimientos de suelo
 - Suelo disponible
 - Hidrogeología
4. Almacenaje
5. Calidad de lodo
6. Aceptación del público
7. Requerimientos de transporte
8. Usos de energía
9. Requerimientos reglamentarios
10. Factores de costo

Para evaluar las opciones de evacuación de lodo, es necesario tomar en cuenta cada uno de los impactos tanto de la localidad así como ambientales. El manejo adecuado del lodo es una opción para conservar los recursos naturales y reutilizar / reciclar dichos materiales para beneficio de la comunidad y del medio ambiente.

3.4.1.1. Aplicación sobre el terreno

Existen diversas maneras de aplicar los lodos sobre el suelo, las cuales están en función de las normas ambientales. Entre los sistemas para la aplicación de lodos sobre el terreno se tienen los siguientes:

- Almacenamiento o vertido en tiraderos
- Lagunas de oxidación
- Aplicación de biosólidos

3.4.1.1.1 Almacenamiento o vertido en tiraderos

El almacenamiento o vertido de lodos puede ser un método económico si se dispone de suelo a bajo costo. Este proceso se lleva a cabo en una fosa en donde el líquido sobrenadante se recoge continuamente, hasta que finalmente esta queda totalmente llena de sólidos (en un periodo de 2 a 3 años se puede obtener una humedad del 50 al 60 %, y por lo tanto se recomienda ubicar una nueva localidad para comenzar nuevamente el ciclo).

3.4.1.1.2 Lagunas de oxidación

El método de lagunas por oxidación es aquel en que el tratamiento se realiza por tres mecanismos: degradación de la materia orgánica, fijación de metales pesados y transformación de compuestos orgánicos complejos en otros más sencillos. La materia orgánica es atacada por microorganismos aerobios (bacterias, hongos, etc.) que existen en el suelo. El ataque transforma a la materia orgánica en dióxido de carbono, compuestos orgánicos más sencillos y nuevos microorganismos. La aeración se mantiene con la ayuda de tractores u otros implementos agrícolas que muevan el lodo constantemente. Los metales son fijados al suelo por mecanismos de intercambio iónico: metales pesados tóxicos como el cromo, plomo, mercurio y cadmio intercambiados por otros metales no tóxicos como el sodio, potasio, litio, calcio y otros disponibles en el suelo.

En el terreno se aplican capas sucesivas, cada una con finalidades específicas. En la capa superficial se produce la degradación aerobia y fijación de los metales pesados. La capa siguiente, por sus características de permeabilidad, permite el escurrimiento de las aguas pluviales y de los líquidos resultantes del tratamiento de la primera capa, a un sistema de canalización. Estas canalizaciones desaguan en un sistema de tratamiento de aguas residuales constituido por lagunas aereadas.

La siguiente capa consiste de arcillas compactadas cuya finalidad es impedir que el material resultante del tratamiento pueda contaminar el manto freático.

3.4.1.2. Aplicación de biosólidos

Los lodos deshidratados previamente, que cumplen con los requerimientos para su aplicación sobre el terreno, se reciclan y se denominan biosólidos. Los biosólidos tienen la finalidad de mejorar o servir como suplemento del suelo, ya que estos proveen una amplia fuente de elementos esenciales requeridos para el crecimiento de las plantas, entre ellos el fósforo y nitrógeno. Los biosólidos también se pueden utilizar para aplicaciones de agricultura, silvicultura y mejoramiento de suelos. Los biosólidos se pueden reciclar de distintas maneras, entre las más comunes se encuentran la composta y las pilas.

3.4.1.2.1. Composta

La composta es la mezcla de sólidos espesados o deshidratados del lodo (concentrados entre 4 y 25 %) con pequeños trozos de madera, a la que se permite su descomposición. Esta mezcla descompuesta puede ser utilizada como fertilizante en los cultivos de hortalizas, arboles o proyectos de mejoramiento de suelos. La composta se puede aplicar directamente sobre el suelo o mezclarse con él durante su aplicación.

3.4.1.2.2. Pílas

Las mezclas deshidratadas que se concentran por encima de 25 % de sólidos, se pueden deshidratar nuevamente hasta un 95 % y convertirse entonces en pilas. Estas pilas pueden utilizarse como acondicionadores de los suelos de ornato o sobre campos de golf, ya que los lodos proporcionan los nutrientes de fosfatos y nitratos que el suelo requiere.

3.4.1.3. Rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios son los espacios físicos utilizados para disponer los lodos sobre la superficie del suelo, donde son compactados, cubiertos y monitoreados. El término celda se utiliza para describir el volumen del material colocado en el relleno durante un periodo operacional, regularmente 1 día (Figura 3.5). Una celda contiene el residuo deshidratado y el material que lo cubre diariamente. El material que lo cubre tiene un espesor regularmente de 15 a 30 cm de suelos nativos u otros materiales alternos tal como la composta. El propósito de cubrir diariamente la celda es para prevenir el esparcimiento de los materiales residuales; aislarlo de roedores, moscas y otros vectores infecciosos y para controlar el acceso del agua dentro del relleno durante su operación.

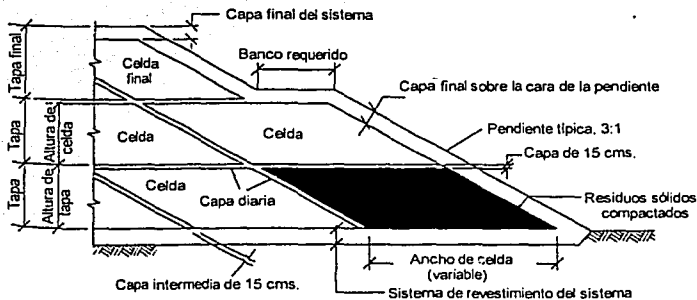


Figura 3.5 Corte transversal de un relleno sanitario.

La tapa es una capa completa de celdas sobre el área activa del relleno. Regularmente, los rellenos sanitarios están conformados por una serie de capas. Casi siempre se utiliza un banco donde la altura del relleno excede entre 1.27 y 1.91 m. Los bancos son utilizados para mantener la estabilidad de la pendiente, para la ubicación de los conductos de escurrimiento del agua superficial y para la ubicación de la línea de recuperación de gas. La tapa final incluye el cierre. La capa final se aplica a la superficie total del relleno de suelo y/o materiales de geomembrana diseñados para aumentar el escurrimiento superficial, interceptar el agua percolada y mantener la vegetación superficial. El líquido que se colecta en el fondo del relleno se conoce como lixiviado.

En los rellenos profundos, el lixiviado se colecta en puntos intermedios. El lixiviado es el resultado de la precolación de la precipitación, escurrimientos e irrigaciones a que está sujeto el relleno. El lixiviado contiene una porción del agua del residuo e infiltraciones subterráneas. Los lixivios contienen una variedad de compuestos químicos derivados de los materiales depositados en el relleno sanitario y de los productos de las reacciones químicas y bioquímicas que ocurren dentro del relleno sanitario (Figura 3.6).

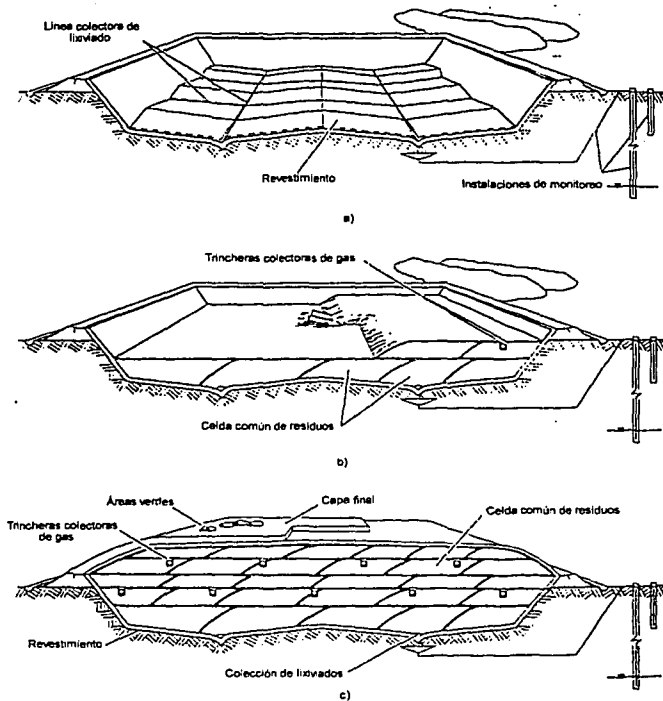


Figura 3.6 Etapas de un relleno sanitario: (a) excavación y revestimiento de la base, (b) colocación de los residuos sólidos en el relleno y, (c) capa final.

3.4.1.4. Incineración

La incineración se emplea con frecuencia en países desarrollados. A veces es posible conseguir una combustión automantenida, una vez utilizado un combustible auxiliar para elevar la temperatura de un horno por encima del punto de ignición. Los productos de combustión son fundamentalmente dióxido de carbono, dióxido de azufre y ceniza. Suelen utilizarse dos tipos de equipos: de cámara múltiple y de lecho fluidizado para secado y combustión. En la Figura 3.7 muestra un esquema de un horno de cámara múltiple.

La Incineración ha sido una opción de evacuación desde hace muchos años, pero la combustión del lodo esta plagada de problemas que restringen esta alternativa de disposición. Las desventajas de este método de evacuación son:

- La combustión de lodos y residuos, causan problemas de contaminación de aire debido a la producción de gases y materiales volátiles tóxicos.
- La combustión de los residuos, principalmente del lodo, consiste de un proceso de intensa energía, lo que requiere de un manejo especial y genera elevados costos de operación.
- Incremento en los costos debido al equipo requerido. No solamente los costos del incinerador, sino que también del equipo de control de contaminación de aire, pruebas, operación, mantenimiento, mano de obra y disposición de la ceniza generada.
- Reducción de los recursos naturales debido al proceso de combustión para generar energía.

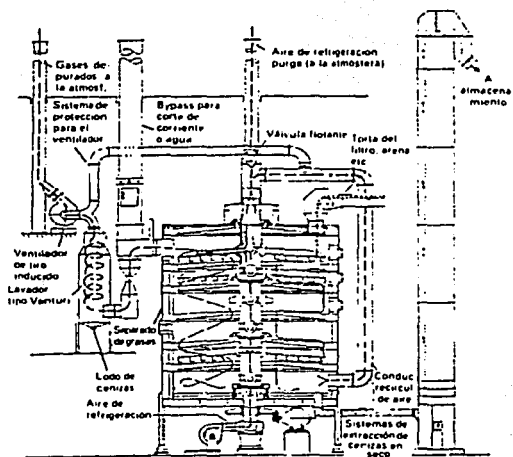


Figura 3.7 Diagrama de flujo de la combustión de un horno de hogar múltiple para la incineración de lodos.

El lodo pasa en flujo descendente a través de una serie de cámaras. La vaporización tiene lugar en los superiores, seguida de incineración en los inferiores. Las cenizas del fondo se recogen por un sistema de extracción en seco, pudiendo disponerse de sistemas húmedos. Los gases de escape que salen por la parte superior pasan a través de un lavador de alta energía tipo Venturi, para separar las cenizas volantes arrastradas. La temperatura del horno es de unos 600-1000 °C. El horno esta refrigerado por aire, que se hace circular por un ventilador; parte se recircula y otra se emite a la atmósfera controlándose la temperatura a través del ajuste del aire purgado, ajuste que se consigue con la apertura de las válvulas de los conductos de purga y reciclado.

La Figura 3.8 muestra el esquema de un lecho fluidizado. El lodo entra en un lecho de arena fluidizado con aire, a una temperatura de 760 a 820 °C. Se produce un secado y combustión rápida de lodo, siendo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

la ceniza arrastrada por los gases de combustión, y recogida en su mayor parte por un sistema separado de lavado de gases. Se requiere combustible auxiliar al menos para el arranque del proceso.

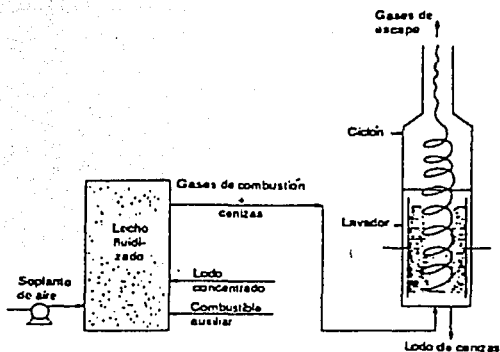


Figura 3.8 Esquema de un lecho fluidizado.

3.4.1.5. Sistema Ver Tech

Las cantidades generadas de lodo municipal han crecido a un paso acelerado. Además, los métodos de tratamiento avanzados, producen lodos más difíciles de evacuar. El sistema Ver Tech es un método de tecnología avanzada, el cual utiliza el proceso de la fase acuosa de oxidación para convertir al lodo en bióxido de carbono, agua y en un producto final estéril e inerte que puede ser reciclado.

Generalmente el 96 % de los sólidos volátiles del lodo son removidos por este proceso, con un 80 % de reducción en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) del influente. La destrucción de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) y de la DBO se da en un recipiente vertical de oxidación. El montaje inferior consiste de varias camisas concéntricas de acero encajonadas en concreto. El montaje es totalmente cerrado y protegiendo los acuíferos subterráneos. La profundidad total del montaje es alrededor de 1220 a 1524 m. La cabeza hidráulica superior ubicada en el fondo del recipiente de oxidación toma ventaja de las fuerzas naturales de gravedad. Esto permite alcanzar condiciones de 10 342 kPa y 277 °C sin la necesidad de utilizar bombeo mecánico y mantener las condiciones sobresaturadas del líquido a lo largo de toda la zona de oxidación del medio acuoso. Este proceso es óptimo y consistente en el tratamiento de lodos, autosuficiente, ya que la reacción de la fase de oxidación genera su propio calor metabólico. La temperatura del proceso esta controlada por un sistema de enfriamiento el cual también recupera energía de esta reacción. La energía se puede recuperar como agua caliente, vapor o ser utilizada para generar electricidad (Figura 3.9).

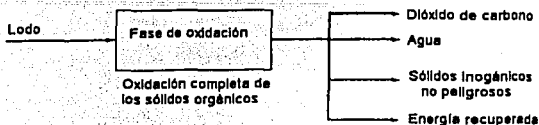


DIAGRAMA DEL PROCESO GENERAL

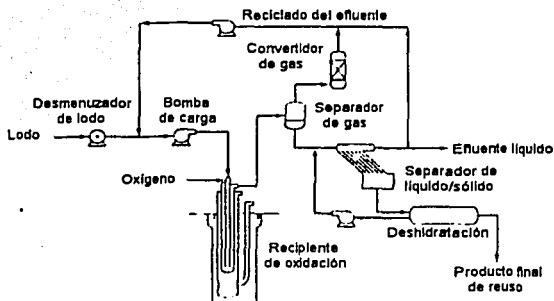


Figura 3.9 Sistema de tratamiento VerTech

3.4.1.5.1 Descarga de gases

La descarga de gases producida por el sistema Ver Tech consiste principalmente de dióxido de carbono y biogas extraído directamente del proceso sin tratamiento posterior. Cualquier impureza en la descarga de gases como remanentes de compuestos orgánicos, etc., se encuentran generalmente bajo los niveles de concentración máximos permisibles para emitidos al medio ambiente.

3.4.1.5.2 Efluentes líquidos

Los caudales de los efluentes líquidos del sistema Ver Tech han sido diseñados para cumplir casi con cualquier requerimiento. Los efluentes pueden contener ácidos diluidos y amoníaco en solución acuosa, prácticamente sin sólidos suspendidos. La mayoría de estos materiales acuosos son biodegradables.

3.4.1.5.3 Productos finales sólidos

Los productos finales sólidos remanentes, después de haber procesado el lodo en el sistema Ver Tech, son sólidos inertes, estériles y no tóxicos que pueden reutilizarse. Los sólidos consisten de todos los materiales inertes del caudal de entrada, así como también óxidos de metales pesados que originalmente estaban contenidos en el influente de lodo. Se ha demostrado que este producto final es inofensivo y estable, y puede ser dispuesto como relleno sanitario o reutilizado sin ninguna restricción.

3.4.1.5.4 Reutilización de productos finales

La reutilización de los productos finales del sistema Ver Tech, ha sido probada y utilizada en productos de arcilla recocidos; principalmente ladrillos para la construcción. Se ha demostrado que la adición de estos productos aumenta las propiedades de resistencia y durabilidad en las piezas de ladrillos. La

adición de estos productos finales en la industria de la construcción, puede ejercer un impacto directo sobre los costos de manufactura y energía, y poder ofrecer la oportunidad de reciclar estos sólidos.

CAPITULO 4

ACONDICIONAMIENTO DE LODOS

CAPITULO 4

ACONDICIONAMIENTO DE LODOS

El acondicionamiento de lodos se lleva a cabo con el fin incrementar las propiedades de sedimentación y deshidratación. Las partículas sólidas presentes en el lodo necesitan acondicionarse debido a que son partículas de tamaño fino, hidratadas y con carga electrostática. El tipo de acondicionamiento es función de las características de los sólidos y depende principalmente de dos reacciones:

1. El agua y los solutos son absorbidos hacia la superficie de la partícula de lodo, reduciendo su gravedad específica.
2. La superficie de la partícula tiende a adquirir una carga eléctrica por la absorción preferente de los iones de la solución o por la ionización de los grupos funcionales compuestos. Los lodos generados en plantas de tratamiento de agua residual, generalmente poseen una carga negativa, la cual se debe a la absorción preferente de los iones de hidróxido o por la ionización de los grupos carboxil.

Uno de los objetivos del acondicionamiento del lodo es el ajuste de las condiciones físicas y químicas para la reducción de la carga en la partícula, la cual da como resultado la liberación del agua y agregación de partículas. Los mecanismos más comunes considerados para el acondicionamiento del lodo son los siguientes:

- Neutralización de partículas cargadas del lodo
- Unión de partículas dispersas en agregados
- Factores auxiliares

Los tres sistemas de acondicionamiento más comunes son los químicos inorgánicos, los polímeros orgánicos y los térmicos. En la Tabla 4.1 se muestran y comparan los efectos de los procesos de acondicionamiento en una mezcla de lodos primarios y activados.

Tabla 4.1 Efectos del acondicionamiento con químicos orgánicos, polímeros orgánicos o térmicos sobre mezclas de lodos residuales primarios y activados.

	Químicos Inorgánicos	Polímeros Orgánicos	Térmico
Mecanismo acondicionante	Coagulación y floculación	Coagulación y floculación	Altera las propiedades de la superficie y rompe la membrana de las células, libera los químicos, hidrólisis.
Efecto sobre los niveles de carga de sólidos disponibles	Aumenta	Aumenta	Aumenta considerablemente.
Efecto sobre el flujo sobrenadante	Aumenta la captura de los sólidos suspendidos	Aumenta la captura de los sólidos suspendidos	Causa un aumento considerable en el color, sólidos suspendidos, DBO soluble, NH ₃ -N y DQO.
Efecto sobre la mano de obra	Muy poco	Muy poco	Requiere de operadores calificados y de un programa preventivo de mantenimiento.
Efecto sobre la masa de lodo	Demasiado	Ninguno	Reduce la masa presente pero puede aumentar la masa a través del reciclado.

El acondicionamiento brinda una mejor eficiencia en los procesos de deshidratación subsecuentes. Cualquier evaluación de un proceso de acondicionamiento debe tomar en cuenta el costo de

Inversión, operación y mantenimiento del sistema. Estos costos incluyen el impacto sobre los influentes de los procesos de otras plantas, efluentes de la misma planta y calidad del aire generado.

4.1. NEUTRALIZACIÓN DE PARTÍCULAS CARGADAS DE LODO

Muchas de las partículas del agua residual poseen una carga neta negativa. Estas partículas atraen a una capa de iones con carga positiva las cuales se estrechan alrededor de éstas y forman lo que se denomina la capa Stern. Fuera de esta capa se encuentra otra capa libre de iones con carga positiva y negativa llamada capa difusora. Las dos fuerzas predominantes que afectan las interacciones de la partícula son las fuerzas electrostáticas van der Waals de repulsión y atracción. La reducción de la carga coloidal se debe a la adición de polielectrólitos y químicos inorgánicos con cargas opuestas a la del coloide. Esta reducción en la carga altera el equilibrio entre las fuerzas electrostáticas de repulsión y aquellas de atracción de la masa por lo que predominan las fuerzas de van der Waals. La agregación de las partículas es provocada por la desorción del agua enlazada. Después de la neutralización de la carga, se puede aumentar la agregación o floculación de las partículas por la adición de otros acondicionadores. Se recomienda la aplicación de un floculante para obtener una deshidratación eficiente.

4.2. UNIÓN DE PARTÍCULAS DISPERSAS EN AGREGADOS

Los iones de los metales polivalentes (férico, ferroso y aluminio) se hidrolizan en el agua para producir complejos polinucleares. Estos aditivos comúnmente se complementan con el uso de cal para incrementar la agregación y control del pH. Los coagulantes férricos consisten en sales, las cuales liberan iones férricos trivalentes cuando son disueltos en el agua. Las sales de hierro usadas regularmente contienen cloruro férrico (FeCl_3) y sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$). Los iones férricos disueltos son altamente reactivos y pueden formar compuestos con los hidróxidos, carbonatos, fosfatos y detergentes. El grado de carga y complejidad de los compuestos depende del pH. El ion férrico reacciona como un ácido muy débil con la alcalinidad del bicarbonato.

La cal hidratada, el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y la cal dolomítica ($\text{Ca}(\text{OH})_2\text{MgO}$) son utilizadas como acondicionadores en los lodos residuales. La naturaleza alcalina de la cal ha sido de gran ayuda para controlar los malos olores y los problemas de infecciones. La efectividad de la cal como agente acondicionador se debe a la deshidratación y contracción coloidal del hidróxido de calcio. Los cationes liberados del calcio precipitan eficazmente los carbonatos, los fosfatos y los detergentes con un rendimiento que depende del pH del lodo.

4.3. FACTORES QUE AFECTAN EL ACONDICIONAMIENTO

Los sólidos del agua residual están compuestos de cribados, arenillas, espumas y lodos. Los lodos del agua residual consisten de sólidos primarios, secundarios y químicos de diferentes mezclas de partículas orgánicas e inorgánicas. Los distintos tipos de lodos poseen diferentes concentraciones de agua, grados de hidratación y química superficial. Las características que afectan el proceso de deshidratación del lodo (por lo que es esencial su acondicionamiento) son el tamaño, distribución, interacción y carga superficial de las partículas.

El factor más importante que influye en el proceso de deshidratación, es el tamaño de la partícula. A medida que el tamaño de las partículas disminuye, principalmente del mezclado o triturado, la proporción de superficie/volumen aumenta exponencialmente. Un aumento en el área superficial implica una mayor hidratación, mayor demanda química de oxígeno e incremento en la resistencia sobre la deshidratación (Figura 4.1).

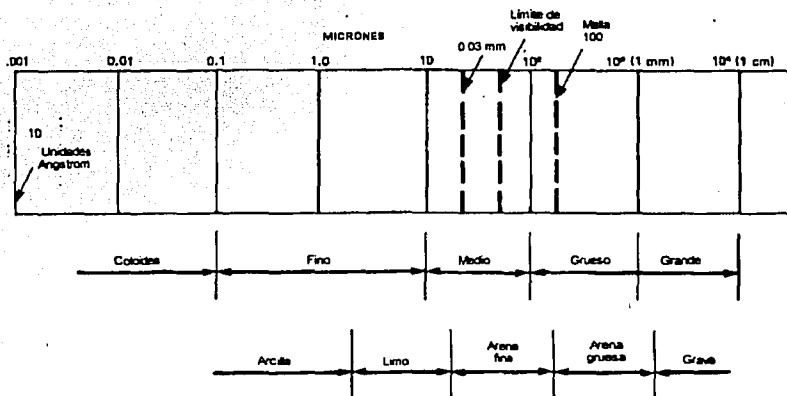


Figura 4.1 Distribución de tamaño en partículas de materiales comunes.

Las aguas residuales municipales crudas contienen una gran cantidad de coloides y finos, que debido a su tamaño (1 a 10 micrones), no pueden ser capturados en los clarificadores primarios cuando no se aplica una coagulación o floculación previa. Los procesos secundarios biológicos, además de remover la DBO, también remueven los coloides y finos del agua residual. Como resultado de esto, los lodos biológicos (especialmente los lodos activados), son difíciles de deshidratar y por lo tanto requieren de una alta concentración de acondicionadores químicos.

El principal objetivo del acondicionamiento es aumentar el tamaño de las partículas pequeñas en agregados más grandes. El acondicionamiento es un proceso mixto de coagulación y floculación. La coagulación involucra la desestabilización de las partículas de lodo a través del decremento de la magnitud de las interacciones repulsivas electrostáticas entre las partículas. Este proceso se da a través de la compresión de la doble capa eléctrica que envuelve a cada partícula. La floculación va seguida de la coagulación y la aglomeración se da a través del mezclado suave de la materia coloidal y suspendida.

Se debe evitar que el lodo esté sujeto a esfuerzos, ya que los flóculos pueden sufrir desprendimientos. Se recomienda que el mezclado provea sólo la energía suficiente para dispersar el acondicionador a través de todo el lodo y permitir la agregación de las partículas y coloides. Los factores que afectan la eficiencia del acondicionamiento son el pH, el oxígeno disuelto, el potencial redox, la concentración de carbonatos, detergentes, aceites, grasas y materia orgánica degradable.

El pH afecta el equilibrio de adsorción e ionización de las partículas dispersas en el lodo. El oxígeno disuelto y el potencial redox afectan la carga y la solubilidad. La presencia de fosfatos, carbonatos y detergentes puede causar precipitación, la cual puede inactivar al lodo y a los agentes del acondicionamiento. El aceite y las grasas presentes en los lodos crudos pueden interferir con el medio de deshidratación. La actividad biológica dentro del lodo da como resultado

un cambio de composición del peso molecular y grado de carga, por lo que altera la absorción y solubilidad, y por consiguiente la deshidratación.

4.4. ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO INORGÁNICO

El acondicionamiento químico inorgánico se asocia principalmente con los procesos de filtración al vacío y filtro prensa. Los químicos normalmente utilizados en el acondicionamiento de lodos generados de las plantas de tratamiento de agua residual municipal son la cal y el cloruro férrico. Muy raras veces se utiliza sulfato ferroso, cloruro ferroso y sulfato de aluminio.

4.4.1. Cloruro férrico

Se puede agregar cloruro férrico conjuntamente con cal en el lodo como paso inicial. El cloruro férrico se hidroliza en el agua y forma compuestos solubles de hierro cargados positivamente, que neutralizan a los sólidos cargados negativamente y de esta manera se forman agregados. El cloruro férrico reacciona también con el bicarbonato para formar hidróxidos que se pueden utilizar como floculantes. Se recomienda utilizar soluciones concentradas sin diluir adquiridas del distribuidor (30 a 40 %), ya que su dilución puede originar reacciones de hidrólisis y precipitaciones de hidróxido férrico.

El cloruro férrico puede almacenarse por periodos extensos sin el peligro de que este se deteriore. Generalmente se almacena en tanques superficiales. El cloruro férrico se cristaliza a temperaturas bajas, lo que indica que los tanques de almacenamiento deben estar en el interior o contar con calefacción (Tabla 3.2). Una propiedad importante del cloruro férrico es su naturaleza corrosiva; por lo que se recomienda utilizar materiales especiales para su manejo. Algunos materiales pueden ser epóxicos, hule, cerámica, PVC y vinil. Se debe evitar el contacto con la piel y los ojos utilizando todo el tiempo guantes y delantales de hule, caretas, y lentes.

Tabla 4.2 Temperaturas de cristalización para soluciones de Cloruro Férrico.

Concentración de la solución %FeCl ₃	Temperatura de congelamiento de una solución sin agitar	
	°C	°F
20	-21	-5
40	-23	-10
45	-1	+30

4.4.2. Cal

La cal hidratada se utiliza conjuntamente con las sales férricas de hierro. La cal posee algunas propiedades pequeñas de deshidratación sobre los coloides, pero su utilización para el acondicionamiento se debe a su eficacia en el control de pH, reducción de olores y desinfección. El CaCO₃ (carbonato de calcio) formado por la reacción de cal y bicarbonato, genera una estructura granular que aumenta la porosidad del lodo y reduce su compresibilidad.

La cal se encuentra disponible de dos distintas maneras, cal viva (CaO) y cal hidratada (Ca(OH)₂). Cuando se utiliza cal viva generalmente se agrega agua, la cual la convierte en hidróxido de calcio antes de su incorporación en el lodo. Este proceso, el cual se denomina apacamiento, produce calor por lo que se requiere de equipo especial. La cal viva esta disponible en tres concentraciones: alta (88 a 96 % de CaO), media (75 a 87 % de CaO) y baja (50 a 74 % de CaO). Estos niveles pueden afectar la habilidad de apacamiento del material y deben ser consideradas para su selección. Solo la cal viva de alta reactividad y de rápido apacamiento, debe ser utilizada

para el acondicionamiento. La cal viva debe ser almacenada en una área seca, debido a que reacciona con la humedad del aire y puede llegar a ser inutilizable.

La cal hidratada es más fácil de utilizar debido a que no requiere de aplacamiento, su mezclado en el agua es más simple (menor producción de calor) y no requiere de condiciones de almacenamiento especial. Aunque en comparación con la cal viva, su costo es más elevado y es más difícil de obtener. Como regla general, se recomienda el uso de cal viva para aplicaciones que requieren de más de 1 tonelada por día.

4.4.3. Dosificación

Las sales de hierro, como el cloruro férrico, se agregan normalmente en una proporción de 20 a 62 kg/mg de sólidos secos en el influente de lodo, con o sin la adición de cal. La dosificación de cal regularmente varía de 75 a 277 kg/Mg de sólidos secos deshidratados (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Dosificaciones típicas de acondicionamiento de Cloruro Férrico y Cal para lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Residual.

Tipo de lodo	Filtro al vacío		Filtro prensa	
	FeCl ₃	CaO	FeCl ₃	CaO
Crudo:				
Primario	40-80	160-200	80-120	20-280
WAS	120-200	0-320	140-200	400-500
Primario + TF	40-80	180-240		
Primario + WAS	50-120	180-320		
Primario + WAS (séptico)	50-80	240-300		
Digerido aeróbicamente:				
Primario	50-80	0-100		
Primario + WAS	60-120	0-150		
Digerido anaeróbicamente:				
Primario	60-100	200-260		
Primario + WAS	60-120	300-420		
Primario + TF	80-120	250-350		
Acondicionado Térmicamente:	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno

El acondicionamiento químico inorgánico incrementa la masa de lodo. El diseñador debe esperar aproximadamente 1 kg de lodo adicional por cada kg de cal y cloruro férrico añadido. Esto incrementa la cantidad de lodo por disponer y baja el valor de combustión para la incineración. Sin embargo, el uso de la cal puede ser benéfico debido a sus efectos de estabilización del lodo.

4.4.4. Otros tipos de acondicionadores inorgánicos

Algunos otros tipos de materiales inorgánicos, como son el carbón, el polvo del horno de cemento y la ceniza, han sido utilizados para el acondicionamiento del lodo.

- **Carbón.** El carbón pulverizado ha sido utilizado exitosamente como un agente acondicionador en los lodos tratados en centrifugas y filtros al vacío. El mayor beneficio de la adición de polvo de carbón en el influente de las centrifugas, es el incremento de la concentración de los sólidos de la torta. Debido al incremento de la remoción de humedad, los costos de combustible para la combustión del lodo pueden reducirse de 60 a 90 %.

- Polvo de los hornos de la fabricación de cemento. Se ha utilizado exitosamente para acondicionar el lodo antes de su deshidratación en los filtros al vacío y después de su estabilización. El polvo de horno es un subproducto de las industrias de cal y cemento y cuenta con un alto contenido de calcio y potasio. Aproximadamente se requiere del doble de polvo de horno para alcanzar el mismo pH brindado por la cal, pero su costo es solamente el 30 % de ésta.
- Ceniza. Las cenizas volantes de las plantas de energía y de la incineración de lodos pueden ser utilizadas para incrementar el nivel de deshidratación del lodo, aumentar el desprendimiento y los sólidos en la torta, y en algunas ocasiones reducir el nivel de dosificación de otros tipos acondicionadores. La ceniza se puede utilizar también como capa preliminar o como cuerpo de carga en los sistemas de deshidratación con altas presiones de filtración.

4.5. POLÍMEROS ORGÁNICOS

Los polímeros han sido utilizados para acondicionar lodos primarios, mezclas de lodos primarios y secundarios de fácil deshidratación, y para procesos de deshidratación por medio de filtración al vacío y centrifugas de camisa maciza. Se han realizado algunas mejoras en la efectividad de los polímeros para permitir su uso en todos los procesos de deshidratación. Las razones de selección del uso de polímeros en comparación con los químicos orgánicos son:

- Se produce una cantidad adicional pequeña de masa de lodo. Los acondicionadores químicos inorgánicos incrementan la masa de lodo de 15 a 30 %.
- Si se elige utilizar al lodo como combustible para la incineración, los polímeros no disminuyen el valor de combustión.
- Permiten operaciones de manejo de material con mayor limpieza.
- Reducen problemas de operación y mantenimiento.

La selección de un polímero adecuado requiere de la interacción entre el diseñador y los distribuidores del polímero, y entre el equipo y los operadores de la planta. Las evaluaciones deben realizarse en el lugar mismo, y si es posible, con los lodos por acondicionar.

4.5.1. Composición y estado físico

Los polímeros son químicos de cadenas largas especialmente solubles en el agua. Los polímeros pueden sintetizarse completamente de monómeros, o pueden construirse de la adición química de monómeros funcionales o grupos de polímeros producidos naturalmente. Un monómero es una unidad subalterna o unidad repetida de la cual son creados los polímeros a través de varios tipos de reacciones de polimerización. El elemento principal más utilizado de los monómeros en los polímeros orgánicos sintéticos es la acrilamida. Cuando los monómeros son combinados para formar una molécula bastante larga con peso molecular de millones, se origina otro elemento llamado poliacrilamida. La poliacrilamida es un elemento esencialmente no iónico, no posee una carga eléctrica neta en soluciones acuosas. Aunque, bajo ciertas condiciones y con algunos sólidos, la poliacrilamida puede ser suficientemente activa en la superficie y actuar como floculante.

Los floculantes poliacrilamida del tipo aniónico poseen una carga eléctrica negativa en soluciones acuosas y son generados por la hidrólisis del grupo amida (NH_2) o por la combinación de monómeros acrilamida con monómeros aniónicos. Las poliacrilamidas catiónicas poseen una carga positiva en soluciones acuosas y pueden prepararse mediante la modificación química de la poliacrilamida no iónica o con la combinación de monómeros catiónicos con acrilamida. Cuando los monómeros catiónicos se copolimerizan con la acrilamida en distintas proporciones, se genera una familia de polímeros catiónicos con diferentes grados de carga y peso molecular. Estos polímeros son los más utilizados para el acondicionamiento de lodo debido a que la mayoría de sus sólidos poseen una carga negativa. Las características del lodo por procesar y el tipo de equipo de deshidratación utilizado puede determinar cual de los polímeros catiónicos trabaja mejor y sigue siendo el más económico.

Los polímeros se encuentran disponibles en el mercado en polvo o líquido. Los líquidos existen como soluciones solubles en agua o emulsiones en aceite. Los polvos tienen una fecha de caducidad de uno a varios años, mientras que la mayoría de los líquidos caducan entre 6 y 12 meses y se deben proteger de la variación de temperatura. Los polímeros pueden adquirirse de varios pesos moleculares y distintas densidades de carga, las cuales pueden afectar sus características de acondicionamiento y su reacción con el lodo.

4.5.2. Estructura en solución

Los polímeros orgánicos se disuelven en el agua para formar soluciones de diferente viscosidad. La viscosidad obtenida depende del peso molecular, grado de carga iónica y contenido de sal del agua diluida. Se ha estimado que una dosis de 0.2 mg/l de polímero con un peso molecular de 100,000 puede proveer 120 trillones de cadenas activas por litro de agua tratada. La deshidratación es originada por las características físicas y químicas de las partículas del lodo. Los polímeros en solución actúan a través de la adición de las partículas de lodo (Figura 4.2) causando los siguientes fenómenos:

- Desorción del agua superficial retenida.
- Neutralización de la carga
- Aglomeración de pequeñas macropartículas por la segregación entre partículas.

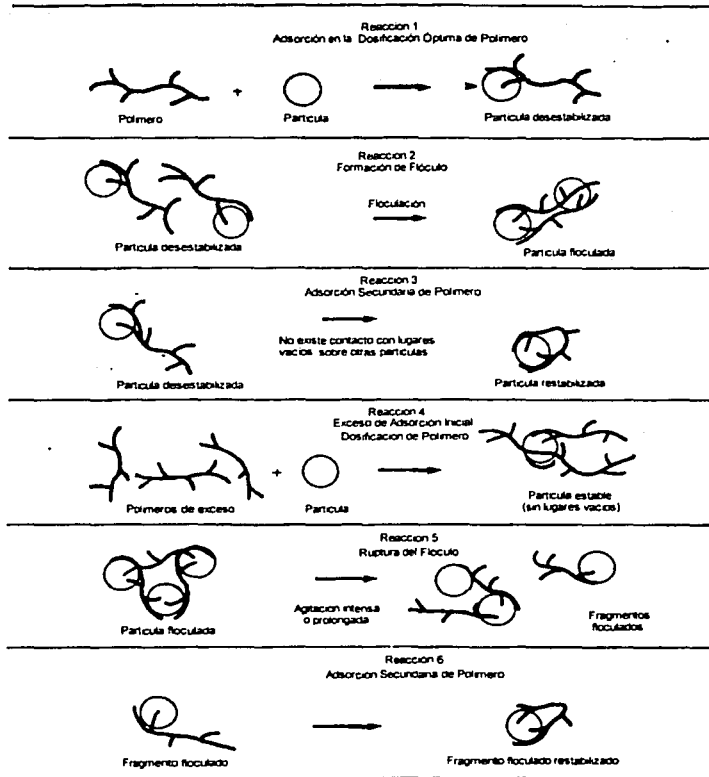


Figura 4.2 Representación esquemática del modelo de segregación para la desestabilización de los coloides por la aplicación de polímeros.

4.5.3. Polímeros secos

Los polímeros secos se encuentran disponibles en forma de polvo, granulados, gotas u hojuelas. La forma se determina su proceso de manufactura. Los polímeros secos son demasiado activos (contenido de químicos poliméricos en el producto). La concentración activa de sólidos es bastante alta (entre 90 y 95 %). Los polímeros secos no deben exponerse a la humedad debido a que tienden a consolidarse y por consiguiente se vuelven inservibles (Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Polímeros catiónicos secos representativos (Copolímeros Poliacrilamida).

Densidad Catiónica Relativa ¹	Peso Molecular ²	Dosificación Aproximada kg/Mg sólidos secos
Baja	Muy Alto	0.25 - 5.0
Media	Alto	1.0 - 5.0
Alta	Medio Alto	1.0 - 5.0

1 Bajo: < 10 moles %
 Medio: 10 - 25 moles %
 Alto: > 25 moles %

2 Muy alto: 4,000,000 - 8,000,000
 Alto: 1,000,000 - 4,000,000
 Medio alto: 500,000 - 1,000,000

La disolución del polímero seco requiere de bastante cuidado. Un sistema típico de mezclado de polímero seco (Figura 4.3), contiene algunos componentes importantes. El sistema debe incluir un equipo de rociado preliminar de polímero sobre las partículas, antes de su ingreso al tanque de mezclado. Después del ingreso, se debe mezclar suavemente hasta obtener una disolución completa. El mezclado se debe llevar a cabo por lo menos durante 60 minutos para obtener una mezcla uniforme de todo el polímero. El polímero sin disolver puede originar problemas, incluyendo obstrucción de tuberías, bombas, atascamiento medios filtrantes. Durante el proceso de envejecimiento del lodo, la molécula se desenrolla y toma una forma que le permite originar la floculación del lodo. Cuando no existe un periodo previo de envejecimiento, el polímero no desempeña una buena función.

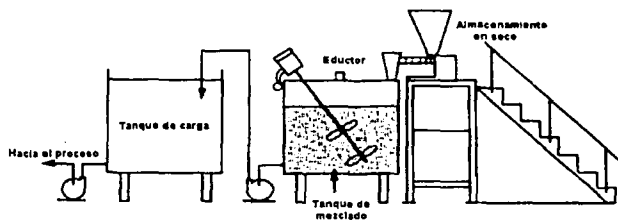


Figura 4.3 Sistema de mezclado de polímero seco.

4.5.4. Polímeros líquidos

Los polímeros líquidos están disponibles en varios niveles de actividad (porcentaje de sólidos activos). La concentración del material polimérico que el fabricante puede disolver en el agua esta en función de la viscosidad de la solución final. La Tabla 4.5 muestra diversos tipos de polímeros catiónicos líquidos, los cuales son soluciones concentradas en agua o emulsiones suspendidas en aceites de hidrocarburo.

Tabla 4.5 Polímeros Catiónicos representativos

Tipo	Densidad Relativa Catiónica	Peso Molecular	Porcentaje de Sólidos
Tipo de Solución:			
Producto Mannich	Alta	Alto – Muy Alto	4 – 8
Polyamine Terclario	Alta	Bajo	20 – 50
Polyamine Cuaternario	Alta	Muy Bajo – Medio	20 – 50
Polyamine Cuaternario DADM	Alta	Bajo – Medio	20 – 40
Tipo de Emulsión:			
Polyacrilamida	Baja	Alto – Muy Alto	25 - 60
Copolymer	Media		
	Alta		

Los polímeros en solución a base de agua se pueden adquirir en tambos de 208 litros, en recipientes de 1,040 litros o en cantidades espesas alrededor de 1,900 a 2,300 litros. Para climas fríos, las áreas de almacenamiento deben estar localizadas dentro de la misma instalación y contar con calefacción. Cuando se requiera colocar el tanque de almacenamiento de polímero espesado en el exterior, entonces el tanque debe contar con calor para mantener la viscosidad de la solución lo más baja posible y permitir su bombeo. Los polímeros forman soluciones verdaderas, por lo que el mezclado del concentrado del polímero no es requerido.

El tanque de almacenamiento del polímero espesado debe estar equipado con mirillas y sensores de nivel inferior y superior. El sensor de nivel inferior se puede conectar a un panel de control en el área de operaciones. Este sensor puede estar ajustado para hacer sonar una alarma cuando exista una cierta cantidad de polímero remanente en el tanque, permitiendo que el personal de la planta solicite la adquisición de más polímero para evitar quedarse sin material. El sensor de nivel superior es de gran importancia durante la operación de distribución para asegurar que no exista un derrame del polímero. El polímero es extremadamente difícil de limpiar por lo que es necesario tomar precauciones para prevenir derrames.

Para transportar el polímero de los tambos a los tanques de mezclado eficazmente, el operador debe utilizar una bomba de transferencia o un equipo de descarga. Las bombas de transferencia de polímero también se pueden utilizar para bombear el material del tanque de almacenamiento al tanque de mezclado y deben ser del tipo de cavidad progresiva, para evitar que las moléculas de polímero estén sujetas las fuerzas cortantes de gran magnitud. Se recomienda incluir un distribuidor en el panel de control de la bomba. El operador puede ajustar el distribuidor a un intervalo específico, y entonces la bomba puede transferir la cantidad exacta de polímero al tanque de mezclado. La bomba debe estar calibrada para un ciclo regular para permitir que una cantidad exacta de polímero sea bombeada en ese intervalo de tiempo. El diseñador debe asegurar que el ajuste del distribuidor pueda cambiarse con facilidad cada vez que sea necesario.

Para el sistema de preparación (Figura 4.4) de este tipo de polímero, se debe incluir un tanque de mezclado y un tanque de almacenamiento para el polímero diluido. El operador puede utilizar el 0.1 % de la solución de polímero. Se recomienda que el concentrado de polímero y el agua se mezclen por 30 minutos para garantizar una solución homogénea. El polímero diluido es estable durante las siguientes 24 horas. Por lo tanto, solamente se debe preparar el polímero requerido en cada periodo.

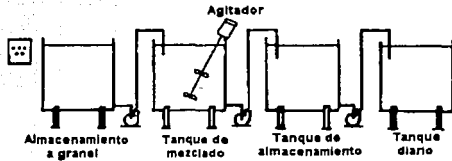


Figura 4.4 Sistema de mezclado de polímero líquido

Las emulsiones son dispersiones de partículas de polímero en un aceite de hidrocarburo. Los agentes activos superficiales se requieren para prevenir la separación de la fase de aceite - polímero sobre la fase de agua. Se pueden esperar reacciones elevadas con emulsiones de 25 a 50 %. Las emulsiones se encuentran disponibles en tamaños de 208 litros, recipientes de 1,040 litros o en cantidades espesadas. Los requerimientos del almacenamiento son los mismos que para las soluciones en agua, pero se debe evitar que la emulsión entre en contacto con el agua antes del mezclado y la temperatura del lugar de almacenamiento debe ser constante. Una exposición prematura con el agua origina que el polímero se coagule. El mezclado y envejecimiento de los polímeros a base de emulsión requieren también de cuidados. En la Figura 4.5 se muestra un sistema de composición de polímero a base de emulsión. Se puede incluir equipo de automatización compacta y portátil de carga de polímero para servicio en la línea que no requiera de un proceso de mezclado discontinuo o de tanques de envejecimiento.

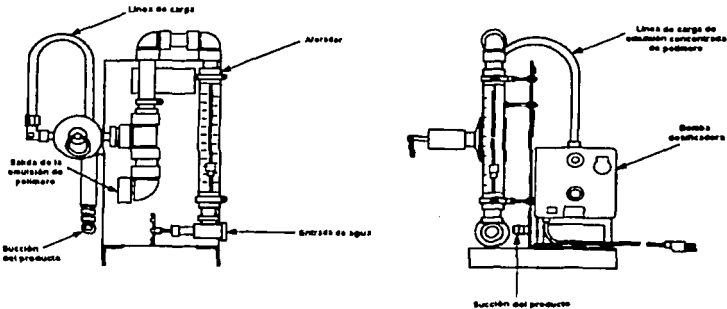


Figura 4.5 Sistema de emulsión de polímero

Se recomienda romper inicialmente la emulsión. Normalmente se utiliza un dispersador de alta presión para tocar y romper la emulsión. El polímero debe ser envejecido por lo menos 30 minutos después de haber sido diluido para su uso.

4.5.5. Carga de polímero

Un sistema típico de carga de polímero debe incluir un tanque de uso diario, bombas de carga, un sistema de dilución de agua y puntos alternados de carga para las unidades de deshidratación. Se puede incluir un mezclador estático en línea. El tanque de uso diario debe estar diseñado para retener un suministro de 1 día o menos de polímero diluido, estar hecho de fibra de vidrio (la cual provea la mayor resistencia a la corrosión) y equipado con un mezclador de baja velocidad y una mirilla o nivel de calibración.

Se recomienda que las bombas de carga sean del tipo de cavidad progresiva para garantizar que la cantidad mínima de fuerzas cortantes se ejerzan sobre el polímero (se pueden utilizar bombas de diafragma). Estas bombas deben calibrarse semanalmente para asegurar dosificaciones adecuadas de polímero. Al utilizar bombas de velocidad variable, el personal podrá ajustar la dosificación del polímero para compensar los cambios en las características del lodo. Es muy importante tener cuidado con la dosificación, ya que esto puede producir un lodo muy difícil de deshidratar. El agua de dilución en la línea es una parte esencial en el uso de polímero. Esta agua diluye posteriormente al polímero y lo hace dispersarse más fácilmente en el lodo lo acondiciona más eficazmente. Comúnmente se necesitan de 4 a 15 l/min de agua para el proceso de dilución de acuerdo al rango de carga de polímero.

La ubicación de los puntos de carga de polímero puede afectar el desempeño del polímero de la unidad de deshidratación. Para las centrifugas, el punto de carga de polímero está dentro de la unidad de deshidratación. Sin embargo, para los filtros prensa de banda, se debe incluir no menos de 3 puntos de carga; uno adyacente a la unidad de deshidratación, el segundo debe estar dentro de la línea de alimentación de lodo de 1 a 1.5 m aguas arriba y el último de 6 a 9 m aguas arriba. Para obtener un desempeño exitoso se recomienda conectar los puntos de carga dentro de la línea de lodo aguas arriba de la unidad. En este caso, el lodo tendrá más tiempo para el mezclado con el polímero y por lo tanto formará mejores flóculos. Sin embargo, se debe evitar un mezclado exagerado debido a que las fuerzas excesivas pueden desprender a los flóculos frágiles.

4.5.6. Dosificación típica de polímero

4.5.6.1. Filtro prensa de banda

Los filtros prensa de banda, comparados con otros procesos mecánicos de deshidratación, requieren de una optimización en la dosificación de polímero en función de las características del lodo proveniente. Un acondicionamiento pobre origina una percolación inadecuada del agua libre en la zona de deshidratación por gravedad, la cual puede causar un sobreflujo de lodo en la zona de gravedad o una extrusión en la zona de presión. Un acondicionamiento pobre de los sólidos puede también taponar u obstruir el filtro banda. Un acondicionamiento excesivo puede causar taponamientos y originar problemas con la extracción del lodo de la banda debido a su consistencia pegajosa. Además, un lodo muy floculado puede drenar tan rápido que los sólidos no son distribuidos uniformemente a lo largo del medio poroso. Una distribución no uniforme puede causar problemas de tracción de la banda y producir una torta de una calidad pobre. En la Tabla 4.6 se listan los niveles típicos de dosificación de polímeros secos para acondicionar lodos previos a la deshidratación por filtros prensa de banda.

Tabla 4.6 - Dosificación típica de polímero seco para Filtros Prensa de Banda.

Tipo de Lodo	Kg de polímero seco por Mg de sólidos secos	Valores Típicos
Crudo:		
Primario	1 - 4.5	2.5
Primario + TF	1.5 - 7.5	5
Primario + WAS	1 - 10	3.5
WAS	1 - 10	5
Digeridos Aerobicamente:		
Primario + WAS	2 - 7.5	5
Digeridos Anaerobicamente:		
Primario	1 - 5	1.5
Primario + WAS	1.5 - 7.5	3

4.5.6.2. Centrifugas de camisa maciza

Las centrifugas de camisa maciza requieren de la adición de polímero para proporcionar un buen desempeño en lodos generados de plantas de tratamiento de agua residual (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Dosificación típica de polímero seco para Centrifugas de camisa maciza.

Tipo de Lodo	Kg de polímero seco por Mg de sólidos secos	Valores Típicos
Crudo:		
Primario	1 - 3.5	2
Primario + WAS	2 - 7.5	4
Digeridos Anaerobicamente:		
Primario	3 - 5	3
Primario + WAS	3.5 - 7.5	4
Acondicionados Termicamente:		
Primario + WAS	1.5 - 2.5	1.5
Primario + TF	3.5 - 7.5	4

4.5.6.3. Filtros al vacío

Muchas plantas de tratamiento en varios países utilizan el cloruro férrico y la cal como acondicionador. Pero el polímero puede ofrecer varias ventajas, como costos más bajos y menos problemas en el manejo del material. Además, la masa de sólidos por disponer no se incrementa como ocurre con los acondicionadores orgánicos, y el contenido volátil de la torta de lodo es mayor (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Dosificación típica de polímero seco para Filtros al Vacío.

Tipo de Lodo	Kg de polímero seco por Mg de sólidos secos	Valores Típicos
Crudo:		
Primario	0.25 - 0.5	0.5
Primario + TF	1.25 - 2.5	2
Primario + WAS	2 - 5	3
WAS	4 - 7.5	6
Digeridos Anaerobicamente:		
Primario	0.75 - 2	0.75
Primario + WAS	2.5 - 6	3.5

4.5.6.4. Filtros prensa

Se ha experimentado con polímeros en instalaciones de filtros prensa para poder reemplazar la utilización del acondicionamiento inorgánico. Algunos de los polímeros nuevos en el mercado brindan un buen desempeño en los filtros banda. Las ventajas de utilizar polímeros son los costos más bajos, la reducción de manejo de material y un incremento nulo en la masa de lodo por disponer.

4.6. DISEÑO DE INSTALACIÓN

El primer paso para diseñar una instalación es la determinación de la cantidad y tipo de lodo por producirse en la planta de tratamiento. Las estimaciones (Capítulo 7.2.6.) pueden ser utilizadas para calcular la cantidad de lodo por producir. Otro método para estimar la cantidad de lodo es a través de la utilización de los siguientes promedios:

- 3 litros de 4 % de sólidos, los lodos primarios son producidos por m³ de agua residual tratada.
- 26 litros de 1 % de sólidos, los lodos activados son producidos por m³ de agua residual tratada.

El diseñador debe tener cuidado al tomar en cuenta las ecuaciones generalizadas o los promedios, debido a que éstas no consideran condiciones inusuales en una comunidad en particular que pueda afectar la cantidad de lodo. El diseñador debe determinar los rangos de producción del residuo a través de pruebas piloto en la planta. El tipo de lodo producido es determinado por las características y por el proceso de tratamiento del agua residual. Cada tipo de lodo tiene diferentes requerimientos para su acondicionamiento.

4.6.1. Aditivos

El uso del permanganato de potasio, el cual es utilizado para controlar los olores ofensivos, ha demostrado reducir los niveles de dosificación de polímero de 5 a 15 % en unidades de deshidratación mecánica.

4.6.2. Selección de acondicionadores químicos

Se deben tomar en cuenta distintos factores para la selección de los acondicionadores químicos en una planta en particular. Estos factores incluyen el desempeño, manejo de material, requerimientos de almacenamiento, tipos de unidades de deshidratación, método de disposición final y económicos. Por lo tanto, el acondicionamiento con polímero es la mejor opción en comparación con los químicos orgánicos. El acondicionamiento con polímero también es la mejor opción si el espacio de almacenamiento es mínimo o si existe un problema en el manejo del material. Existen diferentes pruebas las cuales el diseñador puede realizar en forma económica y

rápida para proporcionar información sobre el desempeño del acondicionador. En tales pruebas también se puede estimar la cantidad de agentes que serán requeridos. Si no existe una muestra de lodo disponible de la planta, el diseñador puede tomar lodo de una planta piloto o de otra planta similar. El acondicionador debe ser evaluado una vez que la planta esta en marcha.

4.6.2.1. Prueba de precipitado

La prueba de precipitado es utilizada para proteger los agentes acondicionantes cuando el diseñador se enfrenta a una amplia variedad de productos potencialmente activos. Esta prueba se realiza tomando de 4 a 6 tubos de precipitado de aproximadamente 1 litro de capacidad y llenándose con 600 ml de lodo. Se preparan diferentes tipos de soluciones de acondicionamiento químico de acuerdo con las instrucciones del fabricante. El acondicionamiento químico puede incluir cloruro férrico, cal y hasta 4 polielectrolitos distintos. Cada uno de los acondicionadores químicos puede ser agregado en cada una de las diferentes muestras de lodo con niveles de dosificación sugeridos por el fabricante o con los niveles sugeridos anteriormente. Los tubos se colocan sobre una agitadora en posición debajo de una paleta de gran tamaño. La paleta debe apenas librar el fondo de la charola. El agitador debe estar ajustado a 75 rpm. El químico diluido se vierte en la charola de filtrado y se mezcla por 30 segundos. Al finalizar el operador puede parar la agitadora, remover la paleta y observar la formación del floculo y el asentamiento.

4.6.2.2. Prueba de hoja de filtrado

La prueba de hoja de filtrado se utiliza para evaluar la deshidratación por un filtro al vacío. La prueba se realiza a través del ensamblado de un aparato de hoja de filtrado como se muestra en la Figura 4.6. La tela del filtrado debe ser proyectada de fabrica para dicho uso en particular o ser tela de filtrado de filamento.

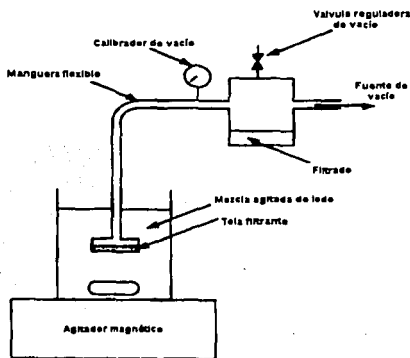


Figura 4.6 Aparato de Hoja de Filtrado.

Un aparato de prueba de precipitado se utiliza para preparar lodo acondicionado químicamente en al menos lotes de dos litros por cada ciclo de filtrado. Los acondicionadores químicos se colocan en el aparato de prueba de precipitado, con un tiempo de 2 a 4 minutos para el mezclado y la floculación. El mezclado debe ser lento (10 rpm). Un mezclado rápido puede afectar en los resultados de la prueba.

Se transfieren 2 litros del lodo acondicionado químicamente al tubo de precipitado, se mide la temperatura y la hoja de filtrado se sumerge en ella 5 cm debajo de la superficie. Se aplica después 51 cm de Hg de vacío a la hoja de filtrado y se toma el tiempo. Al transcurrir 45 segundos de tiempo se retira la hoja y se seca durante 90 segundos. Se mide el espesamiento de la torta y se vierte en un plato pesado previamente. Se pesa el plato con la torta y se transfiera a un horno de secado. Al terminar el secado por aire, la torta debe ser secada, pesada, volatizada, secada nuevamente y pesada una vez más.

Se deben realizar las siguientes evaluaciones por cada corrida:

- Volumen del filtrado, ml
- Temperatura, °C
- Peso húmedo de la torta filtrada, g
- Peso seco de la torta filtrada, g
- Peso seco de la ceniza, g
- Concentración de sólidos totales de la torta, ST, porcentaje de peso húmedo
- Concentración de sólidos volátiles de los sólidos de la torta, SV, porcentaje de sólidos totales

El ciclo de la prueba dura 3 minutos; 45 segundos de tiempo de conformación, 90 segundos de tiempo de secado y 45 segundos de tiempo de descarga.

4.7. ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

El acondicionamiento térmico aumenta las características de deshidratación del lodo a través de la aplicación simultánea de calor y presión. Este proceso consiste de un flujo continuo en el cual se calienta el lodo en un reactor a temperaturas entre 177° y 204° C bajo presiones de 1720 a 2750 kPa por periodos de 15 a 40 minutos. Se pueden realizar dos modificaciones básicas en el procedimiento de acondicionamiento térmico para el tratamiento del agua residual. Una de ellas consiste en agregar aire durante el proceso (Oxidación de Baja Presión, OBP). La otra no incluye la adición de aire (Tratamiento con Calor, TC). Estos dos tipos de procesos producen un lodo biológicamente estable con características de deshidratación favorables.

El lodo del agua residual contiene sólidos inertes y celulares que forman una estructura gelatinosa. La porción líquida consiste de agua enlazada, la cual envuelve a los sólidos de la partícula y al agua de hidratación que se encuentra dentro de los sólidos celulares. El acondicionamiento térmico incrementa la deshidratación del lodo a través de su exposición a presiones y temperaturas elevadas dentro de un reactor confinado; permitiendo la coagulación de los sólidos, rompiendo la estructura gelatinosa y separando el agua enlazada de las partículas sólidas. También se origina la hidrólisis de la proteína del lodo. Las células se rompen y se libera el agua, originando la coalescencia de los sólidos de la partícula. En su estado acondicionado el lodo es fácil de deshidratar (30 y 50 % de sólidos), en la mayoría de los casos sin la necesidad de la adición de químicos.

Una porción de sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el lodo se encuentra solubilizada como resultado del rompimiento de la estructura del lodo. La solubilización de los SSV aumenta su biodegradabilidad. Aunque la solubilización no cambia el contenido de carbón orgánico total del lodo, esta no origina un incremento en la DBO₅. La DBO₅ producida es la consideración primordial en el reciclado de los flujos. La solubilización de los SSV y la producción de DBO₅ resultante para los sistemas TC puede calcularse con la ecuación 4.1:

$$\begin{aligned} \text{SSV} &= 0.1 \text{ PS} + 0.4 \text{ WAS} \\ \text{DBO}_5 &= 0.07 \text{ PS} + 0.3 \text{ WAS} \end{aligned} \quad (4.1)$$

donde,

SSV = Sólidos suspendidos volátiles solubilizados, kg secos

PS = Lodo primario, kg secos

WAS = Lodos residuales activados, kg secos

DBO₅ = Demanda bioquímica de oxígeno de 5 días producida por la solubilización de los SSV, kg

El lodo acondicionado térmicamente puede ser deshidratado en filtros al vacío, filtros prensa de banda, filtros prensa variables, centrifugas o lechos de arena. Los sólidos deshidratados pueden ser incinerados o dispuestos en rellenos sanitarios u otros métodos de aplicación sobre el suelo.

4.7.1. Tratamiento con calor

En este proceso continuo, el lodo es molido hasta reducir el tamaño de sus partículas hasta 0.64 cm o menor, se bombea hacia un intercambiador de calor y después hacia un reactor (Figura 4.7).

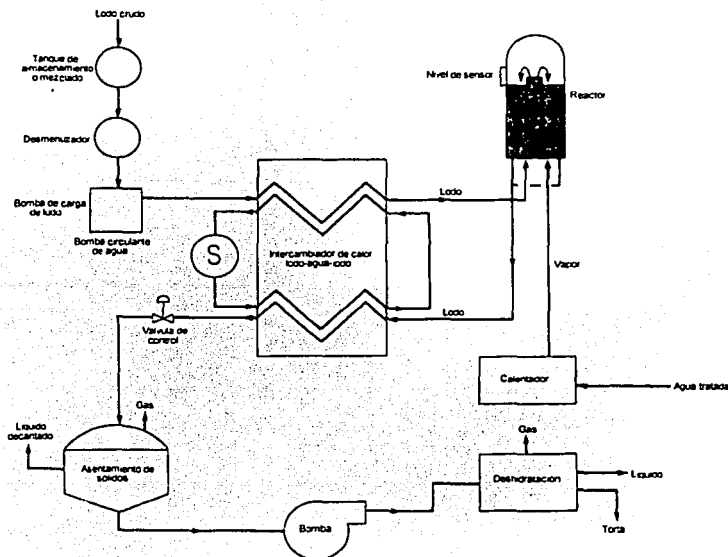


Figura 4.7 Diagrama de flujo de un proceso de tratamiento con calor.

La descarga de presión normal de la bomba de carga es de 1720 kPa. Dentro del intercambiador de calor, la temperatura del lodo asciende de la temperatura ambiente hasta valores entre 149°C y

177°C. Una vez que el lodo se evacua del intercambiador de calor, entra en la línea de carga del reactor, donde se inyecta vapor a través de una boquilla y se mezcla. El vapor y el lodo circulan hacia la superficie del reactor a través de la línea de carga. El lodo caliente es retenido por un período de tiempo en el reactor y se recircula a través del intercambiador de calor para ser enfriado hasta 49 °C. Desde el punto de descarga, el lodo acondicionado fluye por una válvula de control, la cual controla el nivel y presión del lodo en el reactor, hacia un tanque de decantación. El tanque de decantación permite un asentamiento y compactación rápida de las partículas de lodo y liberación de gas. El lodo sedimentado se bombea hacia el dispositivo de deshidratación. El proceso de liberación de gases puede ser tratado por diversos métodos de control de olores.

4.7.2. Oxidación de baja presión

El lodo crudo se hace pasar a través de un desmenuzador donde las partículas se reducen hasta un tamaño menor que 0.64 cm. El lodo desmenuzado se bombea a un rango de 2750 kPa a través de un intercambiador de calor seguido por un reactor OBP. La Figura 4.8 muestra un diagrama esquemático de un sistema OBP. Se introduce una presión elevada de aire del sistema compresor en el flujo de lodo aguas arriba del intercambiador de calor. El aire incrementa la transmisión de calor y convierte los productos de sulfuro contenidos en el lodo en sulfatos, reduciendo ligeramente el olor de los gases desprendidos.

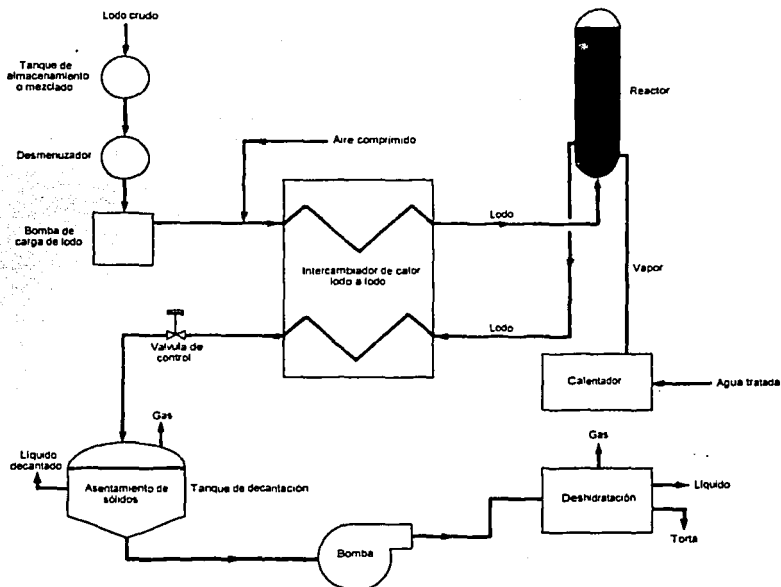


Figura 4.8 Diagrama de flujo del proceso de oxidación de baja presión.

El flujo de lodo y aire pasan a través del intercambiador y el lodo es precalentado por el lodo recirculado en proceso del reactor OBP. La mezcla de lodo y aire ingresan al reactor a una temperatura entre 149°C y 160°C. El vapor se inyecta directamente dentro del reactor para incrementar la temperatura de la mezcla hasta 177°C. Los productos combinados suben lentamente en el reactor y se origina una ligera reacción de calor u oxidación, generando una pequeña cantidad de calor. Desde el punto medio del reactor hasta la salida, la temperatura del lodo aumenta aproximadamente 10° C debido a la reacción de calor del lodo, contribuyendo a un aumento total de temperatura desde la entrada hasta la salida del reactor de 40° C. El tiempo de retención o tiempo de cocido en el reactor esta basado en el volumen y la altura de la línea de descarga. El tiempo de retención esta controlado por el aire, vapor y rangos de flujo del lodo hacia el reactor.

Después de salir del reactor OBP, el producto parcialmente oxidado fluye de regreso hacia el intercambiador de calor y libera calor a la mezcla ascendente de lodo/aire. Una vez que el producto parcialmente oxidado alcanza la válvula de control, la temperatura varia entre 43°C y 54°C. Esta válvula controla la presión en el reactor. Desde la válvula se liberan los gases y el lodo acondicionado térmicamente. Los sólidos sedimentados son bombeados a un dispositivo de deshidratación antes de su disposición final. El proceso de liberación de gases puede ser tratado por diversos métodos de control de olores.

CAPITULO 5

PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN POR AIRE

CAPITULO 5

PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN POR AIRE

- El término "secado de aire" como se cita en esta tesis, se refiere a las técnicas de deshidratación por las cuales se remueve humedad del lodo a través de infiltración natural, evaporación o por inducción de drenaje. Puede existir algún tipo de ayuda mecánica, como volteo y mezclado de lodo sobre los lechos pavimentados o alguna inducción de vacío, pero el movimiento del agua es controlado por fuerzas naturales. Los procesos de secado descritos en éste capítulo varían del concepto más antiguo de deshidratación (lechos de arena) a las técnicas desarrolladas más recientes. Los procesos de deshidratación incluyen los siguientes:

- Lechos de arena
- Lechos de arena por congelamiento
- Lechos de secado por vacío
- Lechos por mallas de escurrimiento
- Lechos pavimentados

Los procesos de secado son menos complejos, más fáciles de manejar y requieren menor consumo de energía para operar que los sistemas mecánicos de secado. Sin embargo, estos procesos requieren de un área de suelo muy grande y demandan mayor cantidad de mano de obra, en especial para la remoción de la torta de lodo. Se sugiere que los procesos de secado por aire se apliquen en localidades pequeñas y medianas con efluentes de agua residual menores a 7,500 m³/d. Los procesos de secado son técnicamente viables para gastos mayores, pero la necesidad de mas área de suelo restringe la viabilidad económica en algunas localidades. Se debe dar gran énfasis a la aplicación de los procesos de secado en todas las localidades pequeñas y medianas, y en aquellas instalaciones de gran tamaño ubicadas en climas áridos y semiáridos en donde existe suelo disponible.

Los lechos de arena, la deshidratación por congelamiento y los lechos pavimentados pueden producir fácilmente una torta de lodo entre 25 y 40 % de sólidos, y que puede exceder hasta en un 60 % con un tiempo adicional de secado. Estos tres procesos pueden producir un lodo más seco que cualquiera de los procesos mecánicos de deshidratación descritos en el capítulo 6.

5.1. LECHOS DE SECADO DE LODOS

Los lechos de secado de lodos son uno de los métodos más económicos de eliminación de agua utilizados en plantas de tratamiento pequeñas y medianas de efluentes tanto domésticos como industriales. La viabilidad económica depende en gran medida de la disponibilidad de terrenos a precios accesibles y de las condiciones climáticas favorables (seco y caluroso; o demasiado frío como para la aplicación de lechos de arena por congelamiento) de máxima evaporación. El área necesaria es función de la precipitación y evaporación previsible, y de las características de los lodos (los lodos gelatinosos requieren mayor área).

5.1.1. LECHOS DE ARENA

Los lechos de arena han sido utilizados con gran éxito, para la deshidratación de lodos, desde que el tratamiento del agua residual se convirtió en una tecnología reconocida. La deshidratación en los lechos de arena se da a través de dos mecanismos (Figura 5.1): Percolación (o infiltración) de agua a través del lecho de arena. La proporción de agua eliminada por este mecanismo es del 20 al 55 %, dependiendo del contenido inicial de sólidos en el lodo y de las características de estos. La percolación suele completarse en un lapso de 1 a 5 días, alcanzando una concentración de sólidos del 15 al 25 %.

1. Evaporación de agua a través de los mecanismos de radiación y convección. La velocidad de evaporación es más lenta que la de percolación y depende de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire.

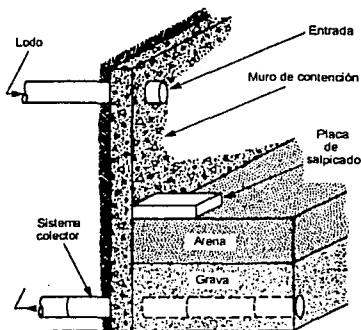


Figura 5.1 Lecho de arena con muros de contención de concreto.

Los muros de contención pueden construirse de concreto reforzado, además de madera o de concreto. La construcción de ademes tiene la ventaja de poder realizar ajustes sobre la profundidad total del lecho, un factor importante para el proceso por inducción a congelamiento.

5.1.1.1. Consideraciones de diseño

El parámetro crítico de diseño es el área superficial de arena del lecho requerido para realizar la evaporación y percolación necesaria en el tiempo especificado. Algunas dependencias estatales especifican los criterios de deshidratación en lechos sobre datos de carga per capita; por lo que es necesario obtener estos valores antes de cualquier diseño de un proyecto específico. Estos criterios de carga per capita son válidos si se incluyen todas las condiciones reales, pero este no es siempre el caso en los sistemas modernos. La aproximación preferente es basar el diseño en la carga de masa de sólidos (Tabla 5.1). Los valores para lodos primarios digeridos y residuales activados (WAS) en lechos sin cubierta varían de 60 a 100 kg/m²/año. Estos valores se pueden incrementar de 85 a 140 kg/m²/año para lechos cubiertos, y un aumento es posible si se utilizan coagulantes para acondicionar el lodo antes de su tendido sobre el lecho. El valor máximo de estos rangos se aplica para climas cálidos y para lodos que drenan fácilmente.

Tabla 5.1 Criterio de carga para lodos por digestión aerobia sin acondicionar sobre lechos de arena descubiertos.

Tipo de Lodo	Carga de Masa (kg/m ² /año)
Primarios	120 - 200
Primario avanzado de bajo rango TF	100 - 160
Primario avanzado WAS	60 - 100

La eficiencia de un lecho de arena depende de los siguientes factores:

- Concentración de sólidos requerida en el lodo sometido a la deshidratación.
- Concentración de sólidos en el lodo aplicado.
- Tipo de lodo por aplicar (estabilizado, espesado, acondicionado).
- Rangos de evaporación y percolación.

La concentración de sólidos requerida depende de los requerimientos técnicos o reglamentarios para la reutilización y disposición final. Si no existe algún requerimiento especial, la torta de lodo es manejable cuando su concentración de sólidos es del 25 al 30 % y puede ser extraída del lecho sin pérdida excesiva de arena. El agua se puede remover del lodo a través de percolación y evaporación. La cantidad de agua por remover a través de la percolación, depende del tipo de lodo por aplicar. La percolación puede alcanzar hasta un 25 % de la remoción de agua para algunos lodos primarios digeridos y activados. La percolación total se alcanza en un lapso de 3 a 5 días.

El margen de evaporación esta en función de las condiciones climáticas locales y de las características superficiales del lodo. Los valores de la evaporación temporal pueden ser obtenidos de datos estadísticos locales o de valores de evaporación en lagunas. Debido a que la capa formada en la superficie del lodo no permite la evaporación, los valores estadísticos de evaporación se deben ajustar al diseñar el lecho de arena. Se puede utilizar un factor de ajuste de 0.6 obtenido experimentalmente. Una vez que se produce agrietamiento, el grado de evaporación debe aproximarse a los valores de los datos estadísticos.

5.1.1.1.1. Tiempo de secado

El tiempo de secado por aplicación individual esta dado por:

$$t_d = \frac{(y_o)(1 - s_o / s_f)(1 - D)}{(k_e)(E_v)} \quad (5.1)$$

donde,

- t_d = tiempo de deshidratación por aplicación individual, mes
- y_o = altura de la capa inicial aplicada de lodo, cm
- s_o = concentración inicial de sólidos secos requerida para deshidratar el lodo, %
- s_f = concentración final de sólidos secos requerida para deshidratar el lodo, %
- D = porción de agua removida por escurrimiento, porcentaje como decimal
- E_v = evaporación local promedio durante el tiempo t_d , cm/mes
- k_e = factor de reducción para evaporación de lodo contra superficie libre del agua, porcentaje como decimal
- = 0.6 (se recomienda una prueba piloto para obtener este valor)

5.1.1.1.2. Número de aplicaciones

El número de aplicaciones durante la temporada de operación esta dado por:

$$N = \frac{n_v}{t_d} = \frac{(n_v)(E_{vn})(k_e)}{(y_o)(1 - s_o / s_f)(1 - D)} \quad (5.2)$$

donde,

- N = numero de aplicaciones de lodo
- n_v = duración de la temporada de operación, o un incremento si la evaporación es significativamente diferente, mes
- E_{vn} = evaporación local promedio durante el periodo n_v , cm/mes

5.1.1.1.3. Diseño de carga de sólidos

El diseño de carga de sólidos esta dado por:

$$L = (C)(s_o) \frac{(n_v)(E_m)(k_r)}{(1 - s_o / s_f)(1 - D)} \quad (5.3)$$

donde,

L = carga de sólidos durante el periodo n_v , kg/m^2

C = factor de conversión (para el lodo se asume una gravedad específica de 1.04)
= 10.4 unidades métricas

La carga anual de sólidos se determina a través de la sumatoria de los resultados de la ecuación 5.3 para los diversos periodos operacionales, sobre un ciclo anual completo. Para obtener una aproximación inicial, se asume n_v igual a 12 y se usa la evaporación promedio local para E_m , cuando los lechos son operados alrededor de todo el año. En la Figura 5.2 se muestra esta relación con datos provenientes de 13 plantas en operación en los Estados Unidos de América (Pennsylvania, Ohio, Nueva York, California, Texas, Illinois y Carolina del Norte).

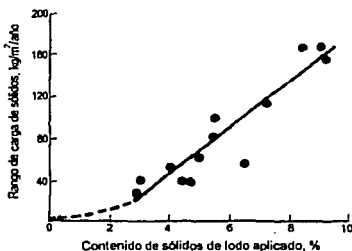


Figura 5.2 Niveles de carga de sólidos para lechos de arena vs contenido de sólidos de lodo aplicado.

Para mantener el costo de operación tan bajo como sea posible, la meta es alcanzar la máxima carga posible de sólidos con el menor número de aplicaciones y ciclos de remoción. La carga anual de sólidos depende de la concentración de los sólidos en el lodo aplicado. El aumento en el contenido de sólidos entre 2 y 4 % puede incrementar el grado de carga al doble y reducir el área requerida del lecho a la mitad. Esta relación muestra la ventaja de espesar o acondicionar el lodo antes de su aplicación sobre el lecho. No se recomienda aumentar el contenido de sólidos por debajo de 8 %, ya que el lodo no escurre ni se distribuye uniformemente sobre todo el lecho.

5.1.1.1.4. Espesor de la capa final de lodo

El espesor final de la torta deshidratada de lodo esta dado por:

$$y_f = (y_o) \frac{s_o}{s_f} \quad (5.4)$$

donde,

y_f = espesor final de la torta deshidratada de lodo, cm.

Las capas delgadas de lodo secan más rápido que las gruesas, pero la carga anual de sólidos es independiente del espesor de cada capa aplicada. Al usar capas muy delgadas se tienen algunas desventajas, como el incremento en la operación y mantenimiento (se debe remover una porción de lodo deshidratado antes de cada aplicación), mayor pérdida de arena en el lecho y por lo tanto un incremento en el costo. Se recomienda utilizar capas de 20 cm de espesor, para evitar una pérdida excesiva de arena.

5.1.1.2. Especificaciones

El área total de un lecho se subdivide en múltiples celdas. Es conveniente diseñar las celdas para que una o dos puedan contener el volumen total registrado del lodo producido en un digestor. El espesor del lecho es función del método de remoción. Se recomienda que las instalaciones pequeñas y medianas, con métodos de remoción manuales o semiautomáticos, utilicen lechos de arena de 6 m de ancho. Para lechos más anchos se deben utilizar métodos de remoción mecánicos, y se deben incluir rampas de acceso en cada celda o si es necesario pasillos pavimentados para el acarreo del equipo mecánico. Se recomienda que los lechos de arena tengan una longitud de 30 a 60 m para lodos muy diluidos y que no excedan de 15 a 25 m cuando se utilizan polímeros para el acondicionamiento de los lodos.

El lodo puede ser aplicado a cada celda a través de una línea con válvula, o a través de un canal con compuerta a lo largo del perímetro del lodo. Un canal es más fácil de limpiar, pero es más difícil de operar para los climas fríos. Las válvulas en la red de alcantarillado deben estar protegidas contra congelamiento en los climas fríos, debido a que las líneas adyacentes nunca drenan completamente. Es indispensable colocar en el lecho una placa contra salpicado en cada punto de entrada del lodo para minimizar la erosión de la arena. Se recomienda utilizar una capa de arena de al menos 30 cm. Algunas veces se pueden utilizar capas de 46 cm para extender la vida útil del lecho. Se debe colocar arena nueva sobre el lecho cada vez que se retira la torta del lodo, ya que la pérdida de arena es inevitable. Algunas características con las que debe cumplir la arena son:

- Partículas limpias y duras, sin arcilla, limo o materia orgánica
- Tamaño de partícula. de 0.3 a 0.75 mm
- Coeficiente de uniformidad < 3.5

Se recomienda una capa de grava de 20 a 46 cm de ancho, con tamaños de partícula de 3 a 25 mm. Si la remoción de la torta de lodo es por medios mecánicos, entonces es necesario aumentar la capa de grava para proteger la red de drenaje.

Los drenes subterráneos están contruidos de tubería de plástico o asbesto cemento con juntas abiertas. Las ramas de los drenes subterráneos principales deben ser al menos de 10 cm de diámetro y estar colocadas con una pendiente del 1 % como mínimo. El espaciado de estas ramas varía de 2.5 a 6 m de acuerdo al tipo de lodo que se pretenda remover. Las ramas de los drenes laterales conectadas a los tubos de desagüe principal, deben estar centradas a 2.5 m entre sí. Los lechos con cubierta pueden ser usados en áreas de gran precipitación del país para extender las distintas temporadas de operaciones de secado. Existen diseños estandarizados con cubiertas de vidrio o plástico disponibles para los lechos.

5.1.1.3. Operación y mantenimiento

El espesor óptimo del lodo por aplicar se determina por la experiencia; este espesor varía de 20 a 45 cm. Se debe agregar continuamente algún tipo de acondicionamiento químico durante la fase de bombeo, sobre los puntos del sistema donde se asegure un mezclado correcto. Se deben

construir múltiples puntos para la dosificación del polímero en el sistema. Estos puntos de dosificación deben estar localizados enseguida de la bomba de succión, de la bomba de descarga y del punto de descarga del lecho. Tal vez no se requiera utilizar todos los puntos de dosificación, pero el arreglo permite la optimización una vez que se haya puesto en operación el sistema.

El mantenimiento de los lechos involucra el cambio periódico de arena perdida durante la remoción de la torta de lodo, nivelado y escarificado de la superficie de arena antes de la dosificación y remoción de la capa vegetal. Los olores no son un problema para los lodos bien estabilizados. Para controlar los olores se puede agregar hipoclorito de calcio, permanganato de potasio o cloruro ferroso durante la aplicación del lodo sobre el lecho de arena.

El tiempo requerido para las actividades de operación y mantenimiento esta en función del tamaño de la instalación y del número de ciclos de operación alrededor de todo el año. Algunas instalaciones pequeñas (< 100 m², con 100 kg/m²/año) pueden requerir cerca de 4 hr/año/m², mientras que en las instalaciones más grandes (> 4000 m², con 100 kg/m²/año) se necesitan menos de 0.5 hr/año/m².

5.1.2. LECHOS DE ARENA POR CONGELAMIENTO

El congelamiento y deshielo de un lodo lo convierte de un material con consistencia gelatinosa a un material de tipo granular que se infiltra fácilmente. La concentración de sólidos superior al 20 % se logra tan pronto que el material se descongela y se puede alcanzar de un 50 a un 70 % con un tiempo adicional de secado. El congelamiento se puede aplicar sobre cualquier tipo de lodo, pero es más efectivo con los lodos químicos y bioquímicos que no drenan fácilmente. La inversión de energía, para obtener congelamiento - deshielo por medios artificiales es prohibitiva, ya que la viabilidad económica depende del congelamiento natural.

5.1.2.1. Consideraciones de Diseño

Un lodo muy diluido incrementa el costo del proceso debido al requerimiento de más área para los lechos de congelamiento; un lodo espesado entre un rango de 3 y 7 % de sólidos trabaja muy bien. Se recomienda el uso de la estabilización en los lodos residuales para eliminar los malos olores durante la etapa de deshielo y secado y para cumplir con los requerimientos de disposición final.

El diseño del sistema de deshidratación por congelamiento se debe basar en las condiciones más desfavorables para asegurar un desempeño exitoso. Si se pretende aplicar un congelamiento de lodo anualmente, el diseño debe basarse en el invierno más cálido durante el periodo de aplicación (regularmente 20 años) y en el espesor de la capa la cual se congela en un tiempo razonable si el ciclo ocurre durante el invierno. Es esencial que la capa se congele completamente para alcanzar las ventajas de la deshidratación. En muchas localidades, no se puede obtener el congelamiento en todo el espesor de la capa, por lo que se recomienda la aplicación de los ciclos de congelamiento-deshielo alternadamente en la parte superficial. Algunas investigaciones indican capas de 8 cm de espesor para localidades con climas fríos moderados.

5.1.2.1.1. Espesor de la capa de congelamiento o deshielo

La capa de lodo por congelamiento - deshielo se puede obtener con la ecuación 5.5:

$$Y = (m) (\Delta T \cdot t)^{1/2} \quad (5.5)$$

Y = capa de congelamiento - deshielo, cm.

m = coeficiente de proporcionalidad, depende de la conductividad térmica, calor latente o fusión, y densidad del material expuesto al congelamiento, cm (°C • d)^{1/2}.

$\Delta T \cdot t$ = índice de congelamiento o deshielo, °C • d.

ΔT = diferencia entre temperatura ambiente promedio y temperatura de congelamiento, °C.
 t = periodo de tiempo de diseño, número de días.

El coeficiente de proporcionalidad fue determinado experimentalmente con lodos generados de agua residual y es valido para niveles de sólidos entre 0 y 7 %. El índice de congelamiento y deshielo es una característica ambiental de cada localidad en particular. Los valores son publicados algunas veces o pueden obtenerse de los registros meteorológicos. Si se elige una capa de 8 cm de espesor para el diseño preliminar, es posible hacer entonces un arreglo en la ecuación 5.1 y obtener el tiempo de congelamiento de la capa en diseño usando la ecuación 5.6:

$$\Sigma \Delta T \cdot t = (Y/m)^2 \quad (5.6)$$

con $Y = 8$ cm y $m = 2.04$ cm (°C • d)^{-1/2}, la ecuación 5-6 se convierte en:

$$\Sigma \Delta T \cdot t = 15.38 \text{ °C} \cdot \text{d}$$

Con la ecuación anterior y los registros meteorológicos locales, se puede determinar el numero de capas de cada invierno. El año con el menor numero de capas es el año de control de diseño.

5.1.2.2. Especificaciones

La instalación básica es la misma que para un lecho de arena convencional. La diferencia de diseño notable es el aumento del bordo libre para contener el espesor de la capa diseñada de lodo congelado. El potencial máximo de congelamiento ocurre cuando el lodo es expuesto a condiciones climáticas extremas, por lo que al tratar de cubrir el lecho, utilizando cubiertas, o al aplicar el lodo en una zanja profunda solo se reducen los grados de congelamiento. Se recomienda decantar el sobrenadante antes de comenzar el invierno. Una vez que la última capa de lodo se ha congelado, se pueden realizar perforaciones sobre esta con el fin de bombear el lodo hacia la superficie para ser congelado en capas.

Una manera efectiva de proveer un bordo libre óptimo y permitir la exposición del lodo a las condiciones del invierno, es a través del uso de ademes de madera o de concreto, para poder aumentar la profundidad del muro de contención del lecho a medida que avanza el invierno. El sistema de carga de lodo debe estar diseñado para aplicarse sobre cada capa del material previamente congelado. Se puede utilizar un hidrante y una manguera como sistema de carga de lodo.

5.1.2.3. Operación y mantenimiento

El requerimiento operacional más crítico es asegurar un congelamiento completo de la capa de lodo antes de la siguiente aplicación. Para hacer esta determinación en instalaciones pequeñas, se puede probar manualmente con un pico o una hacha sobre la capa de lodo. También se puede utilizar un dispositivo de sensores de temperatura a control remoto, como los termopares, pero estos no indican directamente el inicio o el término del congelamiento, debido a que la temperatura se mantiene en 0°C una vez que todo el calor latente se ha disipado. El operador debe llevar los análisis de datos de la temperatura diaria promedio y de otras condiciones climáticas durante el congelamiento, deshielo y fase de secado. Con esta información y algo de experiencia, el operador puede desarrollar un criterio específico para la aplicación y remoción de lodos en la localidad.

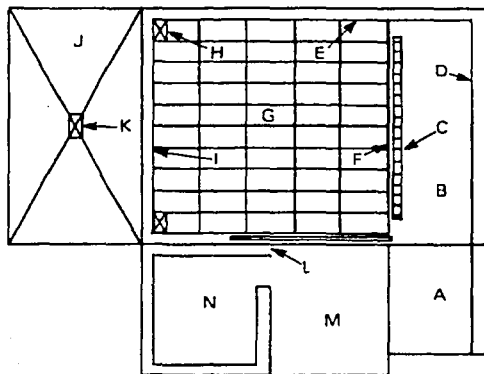
La presencia de la lluvia durante la fase final de secado no afecta considerablemente. La lluvia puede producir un deshielo parcial del material previamente congelado. El material derretido debe ser removido; ya que de otra manera no se puede aplicar la siguiente capa de lodo hasta que el agua se haya drenado o congelado nuevamente. Una ligera capa de nieve, < 5 cm justo antes o durante la etapa de congelamiento no es de gran preocupación, debido a que la masa de agua es

mínima y la nieve ayuda como sistema inicial de enfriamiento sobre la capa de lodo. Una pesada capa de nieve actúa como una barrera aislante y retarda el grado de congelamiento. Las capas de nieve mayores a 5 cm, deben removerse del lecho con un soplador de nieve o cargador frontal antes de la siguiente aplicación de lodo.

En muchas ocasiones es más económico combinar el proceso de congelamiento - deshielo con la adición de polímeros y/o espesamiento sobre los lechos durante los meses más cálidos. Para poder optimizar el uso de los lechos, el operador debe aplicar solamente la cantidad de lodo por congelar. La remoción de la torta de lodo puede ser a mediados de Mayo de cada año. El sistema de diseño provee un procedimiento conservador basado en las condiciones más desfavorables. El operador puede realizar los ajustes necesarios dependiendo de las condiciones ambientales durante cada invierno.

5.1.3. LECHOS DE SECADO POR VACÍO

Esta tecnología de deshidratación aplica un vacío debajo de un medio filtrante de placas rígidas y porosas sobre las cuales se vierte el lodo acondicionado químicamente. Las compuertas de vacío liberan agua a través de la placa y esencialmente todos los sólidos del lodo son retenidos encima, formando una torta con un espesor uniforme (Figura 5.3).



- | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> A. Rampa de acceso B. Área de desnivel del lecho C. Área de drenado D. Bordillo E. Línea de distribución de lodo F. Sistema de cerramiento del lecho G. Medio de placas H. Esquina de drenado I. Muro de contención del lecho J. Área de carga a camiones K. Área de drenado | <ul style="list-style-type: none"> L. Distribución de agua de lavado M. Tanque de carga de lodo N. Edificio de control con: <ul style="list-style-type: none"> - Bombas de carga de lodo - Sistema de polímero - Bombas de vacío - Panel de control - Receptor de filtrado / bombas (de bajo nivel) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Figura 5.3 Vista en planta de un lecho de secado por vacío.

5.1.3.1. Consideraciones de diseño

La base de diseño es el valor anual de producción promedio de lodo (sólidos secos) y el número de ciclos, los cuales pueden obtenerse en una semana normal de trabajo. La eficacia del diseño se puede garantizar con un incremento en el número y tamaño de los lechos. Un sistema de dos lechos es el requerimiento estándar mínimo. Si la producción de lodo excede en una tonelada de sólidos secos por día, entonces se recomienda un sistema de tres lechos.

Un sistema diseñado adecuadamente de tres lechos, con un ciclo total de 24 horas, puede utilizar dos de los lechos para la deshidratación de la operación diaria con el tercero inactivo. Cada lecho en el sistema debe estar diseñado para deshidratar, como mínimo, un 70 % de la masa de lodo promedio diaria proveniente del sistema de tratamiento. Este diseño permite que el sistema de deshidratación sea operado por un máximo de 5 días a la semana, y proveer la deshidratación de la acumulación del lodo por 7 días. Si el lodo no es deshidratado apropiadamente durante las 24 horas permitidas, entonces el tercer lecho puede ser utilizado durante los días subsiguientes para deshidratar la mitad de la producción diaria de lodo, o los otros dos lechos pueden ser usados durante el fin de semana para poner al corriente de nuevo al sistema. Se toma como aceptable una carga de sólidos de 10 kg/m²/ciclo. Se pueden realizar ajustes basados con la eficiencia de la operación considerados por el diseñador.

5.1.3.2. Especificaciones

Los lechos de secado por vacío son equipos privados y existen algunas diferencias en los componentes ofertados por los múltiples distribuidores. La descripción genérica de los elementos más comunes son:

- Estructura de soporte, ya sea una losa plana de concreto o rocas niveladas encima de una losa de concreto con pendiente, sobre la cual se coloca el medio de placas.
- Un muro de concreto que cubra los tres lados del lecho y un sistema de acceso en el cuarto muro, para permitir la contención del lodo acondicionado sobre las placas y la remoción subsiguiente de la torta deshidratada de lodo.
- Un sistema colector de drenaje para el filtrado entre las placas y la losa de concreto subyacente.
- Un medio de placas selladas alrededor de los bordes adyacentes y de los muros de la estructura de concreto contenedora.
- Sistema de carga y mezclado de polímero para introducirlo en forma diluida en el influente del lodo, y así proveer una adecuada floculación.
- Líneas para la distribución del lodo, ubicadas sobre los muros de la estructura contenedora.
- Un vertedero hermético de filtrado adyacente al lecho y conectado al sistema colector/drenaje de filtrado.
- Bombas de operación flotantes de filtrado localizadas en el vertedero para transportar el filtrado colectado a las instalaciones de la planta de tratamiento.
- Un sistema de vacío conectado al vertedero de filtrado para inducir un vacío parcial entre el sistema colector de drenaje subterráneo y la capa de lodo acondicionada al medio de placas.
- Una fuente de alta presión, 480 a 830 kPa, de agua limpia para la limpieza de la superficie del medio de placas después de cada remoción de la torta de lodo deshidratada.
- Coladeras para la colección del agua de lavado del medio de placas. Si las coladeras se encuentran dentro del lecho, entonces estas deben contar con tapaderas o sellos para asegurar de que no exista pérdida del lodo aplicado.
- Un sistema de bombeo para transportar el agua de lavado a la planta de tratamiento. Se requiere de un vertedero individual para el agua de lavado, y en ocasiones utilizar un flujo directo por gravedad hacia la planta.
- Un panel de control para operar todos los componentes mecánicos y eléctricos del sistema. Están diseñados para permitir una secuencia tanto manual como automática del ciclo operacional.
- En la mayoría de los casos un área de cubierta para todos los componentes mecánicos y eléctricos del sistema, incluyendo la bomba de filtrado, sistema de vacío, de polímero y panel de control.

- Si se opera todo el año durante los climas fríos o lluviosos, se requerirá de una instalación cerrada con calefacción durante las épocas de helada.
- Un cargador frontal para permitir la remoción mecánica de la torta de lodo sobre el lecho.

5.1.3.3. Operación y mantenimiento

El ciclo operacional típico incluye las siguientes actividades:

- Al inicio del ciclo las bombas neumáticas se encuentran apagadas, el sistema de contención mecánico del lecho en posición, las bombas de filtrado en automático, se debe mezclar suficiente polímero y haber disponible, y las coladeras sobre el lecho deben estar cubiertas y selladas. La válvula de filtrado puede abrirse o cerrarse. La superficie del medio puede estar seca, mojada o cubierta con una película delgada de agua (< 1.5 cm), que varía de acuerdo con cada sistema particular.
- Abrir las válvulas de la línea de alimentación de lodo, con la bomba de inyección de polímero en operación.
- Si se comienza el ciclo con la bomba de filtrado en posición de cerrado, esta se puede abrir en cuanto el medio de placas este cubierto completamente con lodo bien floculado. Con la apertura de esta válvula se permite el comienzo de la percolación. Si la separación de los sólidos del lodo es buena y se forma algo de sobrenadante, entonces es posible decantarlo previamente a la apertura de la válvula de filtrado.
- Una vez que se haya aplicado el volumen de lodo deseado sobre el lecho, las bombas de inyección de lodo y polímero se pueden apagar.
- Se permite que la percolación continúe hasta que el operador considere que la proporción de colección de filtrado es demasiado lenta. El tiempo de percolación puede variar de 30 minutos hasta algunas horas después de haberse completado la aplicación de lodo.
- El operador puede comenzar el ciclo de vacío al finalizar la percolación. La secuencia de vacío se realiza por niveles, empezando de 5 a 8 cm Hg por una hora, seguido de 13 a 15 Hg por otra hora adicional y finalizando con uno de 25 a 30 Hg. Este último nivel de vacío continúa hasta que el lodo se seque lo suficientemente hasta quebrarse. En este nivel se pierde el sistema de vacío.
- Algunas veces se requiere de una fase de evaporación adicional para producir una torta de lodo manejable. La concentración mínima de sólidos para alcanzar esta condición es del orden de 10 a 12 % para muchos lodos, pero puede ser inferior para ciertos otros. El tiempo requerido de evaporación es variable y puede ser determinado de acuerdo con los datos específicos del lugar.
- Se abre el sistema de contención mecánico del lecho para permitir el acceso y realizar la remoción del lodo deshidratado. Normalmente se puede utilizar un tractor con un cucharón frontal, excepto en aquellas instalaciones demasiado pequeñas.
- El cargador frontal no puede remover completamente toda la torta de lodo. Las cantidades remanentes de lodo sobre el lecho pueden removerse manualmente con pala o recogedor. Una cuidadosa remoción de este material permite una limpieza final óptima.
- Se aplica un lavado de limpieza manual con manguera y boquilla, en los extremos más alejados de las coladeras. Esta etapa de limpieza del medio, así como el acondicionamiento de polímero, son los aspectos más críticos para el sistema de operación. Las placas deben limpiarse escrupulosamente entre ciclo y ciclo de operación, con la finalidad de evitar la pérdida de permeabilidad. Esta limpieza completa un ciclo de operación y el lecho se encuentra listo para otra carga de lodo.

La selección de polímero, tiempo de madurez y eficiencia de control de mezclado y dosificación, son variables sujetas a criterio del operador, y estas afectan el desempeño del proceso. Se recomienda evitar la sobredosificación debido al elevado costo de los polímeros. Puede originar un progresivo atascamiento en las placas y requerir de un procedimiento de limpieza especial para alcanzar la permeabilidad de la placa. La limpieza de las placas es muy importante. Si no se realiza adecuada y regularmente, el medio de placas tiende a obstruirse. El diseño debe incluir coladeras de tamaño y ubicación precisas, presión suficiente de agua y la selección adecuada de

una manguera con boquilla. El medio de placas puede perder permeabilidad con el tiempo aunque tengan buen mantenimiento, debido a la acumulación de aceites y grasas u otras sustancias. Se recomiendan las siguientes medidas de limpieza para los medios de placas filtrantes en un lecho de secado por vacío.

- Limpieza con agua caliente a gran presión.
- Ácido clorhídrico comercial de 1 % de concentración.
- Fosfato trisódico de 0.25 a 0.5 %.
- Hipoclorito de sodio o calcio de 1 % disponible de cloro.
- Limpiadores a base de enzima.

5.1.4. LECHOS POR MALLAS DE ESCURRIMIENTO

El proceso por mallas de escurrimiento es similar al de secado por vacío. El medio filtrante de este proceso consiste de una malla con ranuras en forma de cuña de 0.25mm de ancho. La malla sirve para retener la torta de lodo y permitir la percolación a través de las ranuras (Figura 5.4).

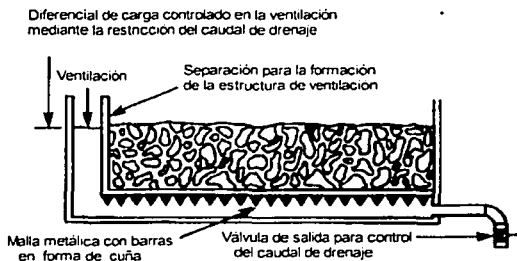


Figura 5.4 Sección transversal de malla metálica de escurrimiento.

El agua entra por debajo del lecho, y lo llena con una profundidad de 1 cm sobre la superficie del medio. Después, se aplica el lodo previamente acondicionado con polímero. Se abre parcialmente la válvula para controlar el nivel de percolación durante 2 horas. Al terminar esta fase, la válvula se abre totalmente para permitir que la torta de lodo se filtre. El periodo inicial estático del lodo en el lecho inundado le permite sedimentarse sobre la superficie del medio y formar entonces una zona de filtración. Esto crea una gran ventaja para las condiciones de flujo saturado a través del lodo y del medio. La percolación actúa mejor bajo condiciones saturadas en ausencia de aire, porque se crea una pequeña succión hidrostática sobre el lecho.

5.1.4.1. Consideraciones de diseño

Debido a que los sistemas por mallas de escurrimiento son equipos privados, el criterio de carga se desarrolla conjuntamente con el distribuidor. Se pueden utilizar plataformas a escala o unidades piloto para desarrollar un criterio de carga y dosificación de polímero para un lodo en particular.

La carga de sólidos típica en los lodos varía de 2 a 5 kg/m² por ciclo de operación. El número de ciclos de operación por año varía, dependiendo del tipo del sistema a utilizar y de otras condiciones locales. En un ciclo normal de 24 horas la carga anual puede exceder los 1600 kg/m². Estas cargas anuales sobrepasan las cargas de los lechos de arena por una magnitud bastante grande.

Se requiere de una instalación cerrada con calefacción para mantener la producción en localidades con climas fríos o periodos extensos de invierno. El proceso de lechos por mallas de escurrimiento se aplica eficientemente para los sistemas pequeños, en localidades con climas moderados y con área de suelo restringida.

En muchos sistemas operativos la torta de lodo se remueve enseguida de la fase de percolación para mantener niveles elevados de producción. La torta de lodo en este punto contiene de 8 a 12 % de sólidos (después de 24 horas) y es manejable, pero aún se encuentra húmeda. La producción de una torta más seca implica una mayor estancia sobre el lecho, o la remoción hacia una área de almacenaje para ser deshidratada por evaporación.

5.1.4.2. Especificaciones

El medio puede estar construido de acero inoxidable o de poliuretano. El medio construido de acero inoxidable requiere de un soporte adicional en el lecho. Los módulos interconectados de poliuretano se soportan por sí solos y forman un espacio de drenaje poco profundo debajo de la superficie del medio. Cualquier tipo de medio puede soportar cargadores frontales para la remoción de la torta de lodo. Las instalaciones pequeñas pueden utilizar bandejas de metal con cierta inclinación para la remoción de la torta. En este caso solo basta inclinar la bandeja hasta que la torta resbale y caiga. Pueden ser adecuados para el proceso de lechos por mallas de escurrimiento, o se puede construir una nueva plantilla de concreto.

5.1.4.3. Operación y mantenimiento

El método básico de operación y mantenimiento es similar a los de lechos de secado por vacío. La obstrucción de la superficie es menos común con este proceso, pero también puede ser posible si la rutina de limpieza no se hace apropiadamente. El acondicionamiento con polímero es primordial para un desempeño exitoso. La dosificación del polímero es similar a la utilizada para los lechos de secado por vacío. La profundidad típica del lodo para una aplicación individual varía entre 10 y 25 cm. La profundidad óptima es determinada a través de la experiencia. En algunos casos, es posible aplicar una secuencia múltiple de capas, con decantación de sobrenadante previa a la fase de percolación.

Se debe tener cuidado en la etapa de remoción de lodo, ya que los cargadores frontales pueden dañar la superficie de plástico. El procedimiento adecuado requiere del manejo directo hacia dentro y fuera del lecho. Las vueltas bruscas o deslizamientos pueden causar un daño estructural sobre las superficies moldeadas de poliuretano. Es importante que el operador maneje cuidadosamente el nivel inicial de percolación para asegurar una infiltración máxima de agua durante esta fase. Si el rango es muy lento, el tiempo total del ciclo se incrementa, y si el rango es muy alto, entonces tal vez no ocurra una percolación completa. Las recomendaciones de infiltración dadas por el distribuidor pueden ser usadas inicialmente y después modificarse.

5.1.5. LECHOS PAVIMENTADOS

Los lechos pavimentados utilizan un pavimento de concreto o de asfalto colocado sobre una sub-base de grava porosa. Las áreas sin pavimentar, construidas como drenes de arena, están colocadas alrededor del perímetro o a lo largo del centro del lecho para colectar y transportar el agua percolada. La ventaja de este proceso es la capacidad de utilizar equipo pesado para la extracción del lodo. La experiencia ha demostrado que el pavimento impide la percolación, por lo que el área total del lecho tiene que ser mayor que las de los lechos de arena para alcanzar los mismos resultados en el mismo periodo de tiempo.

Algunos lechos pavimentados utilizan un tractor ensamblado con una barrena horizontal, u otro equipo, para mezclar y airear constantemente el lodo. El mezclado y la aeración rompen la corteza de la superficie que impide la evaporación, permitiendo una deshidratación más rápida que la de los lechos de arena convencionales. Parte del equipo fue diseñado originalmente para

operaciones de composteo pero sirve de igual manera para la deshidratación de lechos pavimentados. Los lechos de drenes subterráneos son utilizados todavía en algunas localidades, pero la aproximación más viable en cuanto a costo para localidades con climas óptimos, es construir un lecho pavimentado impermeable a bajo costo y depender de la decantación del sobrenadante y de la evaporación dada por el mezclado de la perforación - aeración para alcanzar el nivel de deshidratación deseado (Figura 5.5).

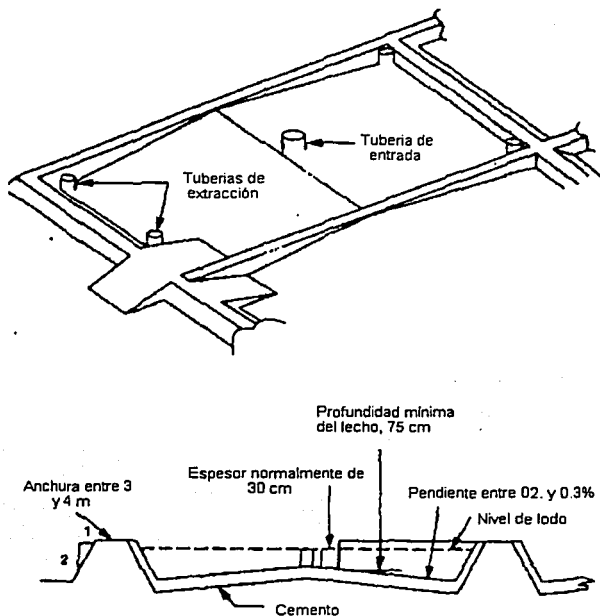


Figura 5.5 Lecho pavimentado diseñado para decantación y evaporación.

5.1.5.1. Consideraciones de diseño

El parámetro de diseño crítico para los lechos pavimentados, así como también para los lechos de arena y lagunas de lodo es el área superficial requerida y tiempo determinado para deshidratar el lodo al nivel de sólidos. Debido a la ausencia de la percolación en la mayoría de los lechos pavimentados, la única manera de remoción de agua es a través de decantación y evaporación. Esta pérdida de agua depende de la barrenación - aeración mecánica manteniendo la evaporación del lodo cerca de un potencial máximo. Los lechos pavimentados pueden ser utilizados en cualquier región, pero debido a que la eliminación de agua en los lodos se da principalmente por evaporación, se recomiendan para las zonas áridas y semiáridas.

Los lechos utilizan dispositivos para eliminar el sobrenadante; algunos lodos pueden eliminar del 20 al 30 % de agua por este conducto. Si el lodo posee buenas características de asentamiento,

es posible utilizar varios ciclos de decantación previos a la fase de evaporación. El rango de evaporación para un sitio en particular puede determinarse con pruebas piloto o asumiendo como fracción de evaporación una proporción de la evaporación local. Un estudio en Nuevo México, E.U.; demostró que la proporción de evaporación de lodos mezclados y alreados fue de 58.7 % del agua libre de la evaporación local del sitio. Esa relación puede ser válida para otras regiones. Para proyectos de gran escala, en donde los costos de suelo pueden ser muy significativos, se debe hacer una prueba piloto para obtener este rango de evaporación y optimizar el diseño.

5.1.5.1.1. Área de lecho y pérdida de agua

El área de lecho requerida para un lecho pavimentado y la pérdida de agua se determinan con las ecuaciones 5.8 a 5.12:

$$W_0 = (1.04)(S) \left[\frac{1 - S_0}{S_0} \right] \quad (5.8)$$

donde,

- W_0 = contenido total de agua en el lodo aplicado, kg/año.
- 1.04 = gravedad específica asumida a los sólidos de lodo.
- S = producción anual de lodo, sólidos secos, kg.
- s_0 = sólidos secos en lodo aplicado, porcentaje como decimal.

El contenido de agua después de la decantación esta dado por:

$$W_D = (1.04)(S) \left[\frac{1 - S_d}{S_d} \right] \quad (5.9)$$

donde,

- W_D = agua total remanente después de la decantación, kg/año.
- s_d = sólidos secos en el lodo después de la decantación, porcentaje como decimal.

El contenido de agua por remover a través de la evaporación esta dado por:

$$W_E = W_D - (1.04)(S) \left[\frac{1 - S_e}{S_e} \right] + (P)(A)(1000) \quad (5.10)$$

donde,

- W_E = agua por evaporarse después de la decantación, kg/año.
- s_e = sólidos secos requeridos después de la evaporación, porcentaje como decimal.
- P = precipitación anual, m.
- A = área del lecho, m^2 .

Cuando el sistema no permite la decantación, se utiliza W_0 en la ecuación 5.10 en lugar de W_D .

El rango de evaporación para una región específica estará dada por:

$$R_e = (10)(k_e)(E_p) \quad (5.11)$$

donde,

es posible utilizar varios ciclos de decantación previos a la fase de evaporación. El rango de evaporación para un sitio en particular puede determinarse con pruebas piloto o asumiendo como fracción de evaporación una proporción de la evaporación local. Un estudio en Nuevo México, E.U.; demostró que la proporción de evaporación de lodos mezclados y alreados fue de 58.7 % del agua libre de la evaporación local del sitio. Esa relación puede ser válida para otras regiones. Para proyectos de gran escala, en donde los costos de suelo pueden ser muy significativos, se debe hacer una prueba piloto para obtener este rango de evaporación y optimizar el diseño.

5.1.5.1.1. Área de lecho y pérdida de agua

El área de lecho requerida para un lecho pavimentado y la pérdida de agua se determinan con las ecuaciones 5.8 a 5.12:

$$W_0 = (1.04)(S) \left[\frac{1 - S_0}{S_0} \right] \quad (5.8)$$

donde,

W_0 = contenido total de agua en el lodo aplicado, kg/año.

1.04 = gravedad específica asumida a los sólidos de lodo.

S = producción anual de lodo, sólidos secos, kg.

s_0 = sólidos secos en lodo aplicado, porcentaje como decimal.

El contenido de agua después de la decantación esta dado por:

$$W_D = (1.04)(S) \left[\frac{1 - S_d}{S_d} \right] \quad (5.9)$$

donde,

W_D = agua total remanente después de la decantación, kg/año.

s_d = sólidos secos en el lodo después de la decantación, porcentaje como decimal.

El contenido de agua por remover a través de la evaporación esta dado por:

$$W_E = W_D - (1.04)(S) \left[\frac{1 - S_e}{S_e} \right] + (P)(A)(1000) \quad (5.10)$$

donde,

W_E = agua por evaporarse después de la decantación, kg/año.

s_e = sólidos secos requeridos después de la evaporación, porcentaje como decimal.

P = precipitación anual, m.

A = área del lecho, m².

Cuando el sistema no permite la decantación, se utiliza W_0 en la ecuación 5.10 en lugar de W_D .

El rango de evaporación para una región específica estará dada por:

$$R_e = (10)(k_e)(E_p) \quad (5.11)$$

donde,

- R_e = evaporación potencial para el lodo en un lecho pavimentado con mezclado y aireado, kg/m²/año.
 k_e = factor de reducción para la evaporación de lodo contra una superficie de agua libre, porcentaje como decimal.
 = 0.6 (se recomienda una prueba piloto para determinar este valor en proyectos de gran tamaño).
 E_p = rango de evaporación de agua libre local, cm/año.

El área requerida de un lecho pavimentado se calcula por la combinación de la ecuación 5.10 y 5.11.

$$A = \frac{(1.04)(S)[(1 - s_d) / s_d - (1 - s_e) / s_e] + (P)(A)(1000)}{R_e} \quad (5.12)$$

donde,

A = área del lecho pavimentado, m².

El área total de diseño debe dividirse en tres lechos como mínimo para brindar cierto rango de flexibilidad. Un análisis minucioso mensual de la base de datos del clima y nivel de producción de lodo deseado, permite determinar la cantidad óptima de lechos requeridos. Tal vez no sea necesario utilizar todos los lechos para los meses más calurosos. Para asegurar un diseño exitoso, las ecuaciones mencionadas asumen que la precipitación que cae sobre el lecho, debe ser removida solamente por evaporación. Se recomienda que las instalaciones pequeñas diseñen la orientación de los lechos para obtener la máxima recepción de radiación solar.

5.1.5.2. Especificaciones y desempeño

Los lechos pavimentados pueden construirse con pavimento de concreto o asfalto, con o sin drenes. La alternativa más económica es utilizar suelo cementado como pavimento de la superficie del lecho. El uso de una configuración rectangular alargada aumenta la eficiencia del lecho, debido a que reduce el tiempo requerido del equipo de volteo de barrenación - aeración. Se pueden utilizar estructuras de acceso y decantación. La profundidad total mínima del lecho debe ser de 0.7 m para suministrar un bordo libre sobre la capa común de 30 cm de lodo. Otros elementos importantes son las líneas de conducción del lodo y decantación, y los equipos de barrenación - aeración. Existe una gran variedad de tamaños y formas de equipos, y el diseñador debe buscar la asistencia técnica con el distribuidor para determinar el número y tamaño óptimo para cada operación.

A través del uso de lodos digeridos o estabilizados, se eliminan los malos olores y se satisfacen los requerimientos reglamentarios para su disposición final. La fase de decantación requiere de 2 a 3 días para el asentamiento del lodo y de 1 a 2 días para la decantación de cada incremento de lodo aplicado, de acuerdo con las características de cada lodo. El periodo final de evaporación depende de las condiciones ambientales ocurridas después de la aplicación del lodo sobre el lecho y del uso regular del equipo de barrenación - aeración. Para los climas áridos se puede alcanzar un nivel de sólidos entre 40 y 50 % en un periodo de 30 a 40 días, con una capa de lodo de 30 cm en función de la época del año y de la efectividad de la decantación. Una capa de lodo de 1 m bajo las mismas condiciones puede requerir de 100 a 250 días para alcanzar un 50 % de sólidos dependiendo de la época de aplicación del lodo.

5.1.5.3. Operación y mantenimiento

La tarea fundamental de la operación es la aplicación, decantación, mezclado, aeración y remoción del lodo. De acuerdo con el tamaño de la instalación y época del año, el lodo debe mezclarse sobre el lecho múltiples veces por semana para mantener sus condiciones de

evaporación favorables. Las labores de mantenimiento incluyen el mantenimiento continuo del equipo de barrenación - aeración, bomba del lodo y red de tubería, tubería de decantación, tubería de drenaje, lechos y diques. Si el sitio experimenta tiempo glacial en los meses de invierno, las válvulas y bombas del sistema deben estar protegidas e inspeccionadas periódicamente durante los periodos de congelamiento.

5.2. LAGUNAS DE LODO

Se debe hacer una distinción entre lagunas de deshidratación de lodo y lagunas de lodo destinadas para almacenamiento. Cierta deshidratación se da en las lagunas de almacenamiento, pero la finalidad primordial es proveer un almacenamiento temporal o semipermanente. Las lagunas de lodo son operadas en ciclos regulares para deshidratar lodos. Un ciclo de operación típico incluye las siguientes actividades:

- El lodo líquido bien estabilizado se bombea dentro de la laguna, por un periodo de varios meses.
- Se decanta el sobrenadante, continua o intermitentemente, de la superficie de la laguna y se recircula a la planta de tratamiento.
- Las operaciones de llenado y decantación están condicionadas hasta alcanzar la profundidad de diseño del lodo.
- La corteza de la superficie se rompe constantemente y se remueve durante el periodo de secado.
- El lodo deshidratado se remueve con algún tipo de equipo mecánico de remoción.
- La reparación y el mantenimiento se ejecutan mientras la laguna esta vacía.

El ciclo completo para una laguna individual es alrededor de 1 a 3 años, de acuerdo en la concentración final de sólidos requerida, clima local, profundidad del lodo aplicado y manejo. Se recomienda que el lodo esté estabilizado antes de su adición en la laguna con el propósito de minimizar los problemas de olores ofensivos. En ocasiones los olores, moscas y mosquitos pueden ser un problema, por lo que se recomienda un lugar remoto.

5.2.1. Consideraciones de Diseño

Las lagunas de lodo eran ubicadas en suelos con permeabilidades moderadas para tomar ventaja de la filtración subterránea y percolación. Esta practica es obsoleta, debido a la protección de las aguas subterráneas. Si existe un acuífero con un potencial elevado de agua potable en el sitio, es necesario aislar la laguna o de otra manera restringir la percolación. Al menos que se instale un fondo de arena y drenes subterráneos, los únicos mecanismos de deshidratación remanentes son la decantación del sobrenadante y la evaporación.

Las lagunas de lodo son similares a un lecho profundo de arena con drenaje restringido. La profundidad del lodo en la laguna puede ser entre 0.7 y 1.4 m. La carga de sólidos para las lagunas de secado varia entre 36 a 39 kg/año/m². Se requiere un mínimo de dos celdas para garantizar la disponibilidad del espacio de almacenamiento durante las condiciones de mantenimiento, limpieza y emergencia.

La evaporación y decantación son los medios principales para la eliminación del agua, aunque también se cuente con una red de drenaje subterránea. El área requerida de la superficie de la laguna esta en función de la temperatura, precipitación y nivel de evaporación local. Se pueden utilizar las ecuaciones 5.8 a 5.12 para calcular los requerimientos del área superficial, o asumiendo que el agua estancada se decanta continuamente, el calculo de diseño para la evaporación es similar al de las ecuaciones 5.1 a 5.4. El agua por remover de las lagunas de lodo, consta de una porción del contenido húmedo más otra porción de la precipitación que se infiltra en la masa del lodo. La evaporación favorece este proceso de deshidratación en los climas áridos y semiáridos. Es posible facilitar el secado con un dispositivo que consiste de un tractor con un tornillo helicoidal

frontal para empujar el lodo y mezclarlo. Esto ayuda a abrir la capa superficial y exponer el material húmedo inferior.

5.2.2. Elementos Estructurales

Los muros de contención para las lagunas de secado son diques de suelo de 0.7 a 1.4 m de alto con una pendiente de lado de 1:3. Se recomienda que la laguna sea rectangular para facilitar la remoción del lodo. El equipo requerido consta de líneas y bombas de carga de lodo, líneas de decantación y equipo de remoción. Se pueden incluir camiones, cargadores frontales, bulldozers o líneas de dragado, en función con el tamaño de la operación.

5.2.3. Desempeño

Se espera una concentración de sólidos de entre 15 y 40 % en el lodo removido de la laguna de secado; estas concentraciones pueden aumentar en los climas áridos. Las lagunas de secado también comparten el mismo problema que los demás procesos de secado de aire, pues la corteza superficial se forma prematuramente en la etapa de evaporación, la cual restringe la pérdida de agua para la evaporación posterior. Este problema se minimiza con los lechos pavimentados que utilizan equipo para el volteo y mezclado del lodo. Estos equipos se pueden utilizar en las lagunas de secado si la profundidad del lodo lo permite. Los dispositivos de flotación también pueden ser utilizados (Figura 5.6).

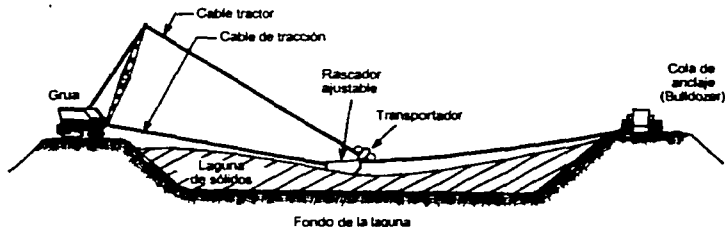


Figura 5.6 Sistema de cable y rasqueta para Lagunas de Secado de Lodo.

5.2.4. Operación y Mantenimiento

Las actividades rutinarias de operación consisten de aplicaciones y decantaciones secuenciales de lodo hasta obtener el volumen de diseño de la laguna. La remoción periódica de la corteza asegura una evaporación continua. La remoción del lodo es una labor intensa pero no ocurre frecuentemente. Las actividades de mantenimiento incluyen el cuidado del equipo y diques y control de la formación de vegetación. Algunas lagunas de lodo pueden requerir de un control de insectos y olores ofensivos. La Figura 5.7 muestra los requerimientos de mano de obra de una laguna de secado.

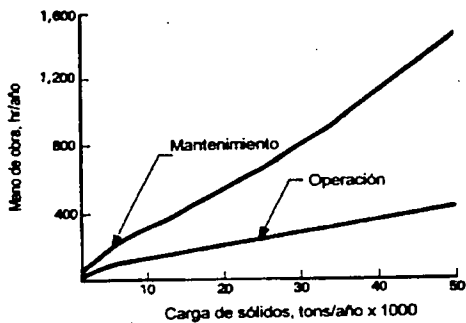


Figura 5.7 Requerimientos de mano de obra para Lagunas de Secado de Lodos.

CAPITULO 6

PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN MECÁNICA

CAPITULO 6

PROCESOS DE DESHIDRATACIÓN MECÁNICA

Algunas condiciones que favorecen la utilización de la deshidratación mecánica son las siguientes:

- Estético. En áreas desarrolladas, en donde existe demanda de suelo y la utilización de los procesos de deshidratación por aire pudieran ser ofensivos.
- Clima. Las condiciones climáticas desfavorables no son convenientes para los procesos de deshidratación por aire.
- Costos. El transporte de material líquido a distancias considerables, no es tan económico como el transporte del material deshidratado.
- Limitantes del lugar. Falta de suelo disponible dentro de una distancia considerable para el transporte del líquido (o lodo que no sea apto para aplicaciones sobre el terreno).

6.1. FILTRO PRENSA DE BANDA

El filtro prensa de banda fue diseñado originalmente para deshidratar pulpa de papel y se modificó posteriormente para deshidratar lodos residuales. El filtro banda está diseñado sobre un concepto muy simple. Se hace pasar lodo intercalado entre dos bandas porosas tensionadas encima y debajo de varios rodillos de diferentes diámetros. Se puede ejercer una mayor presión sobre el lodo a medida que se disminuye el diámetro del rodillo, y de esta manera se elimina el agua. Aunque existen diferentes diseños de filtros prensa, todos ellos incluyen las siguientes características básicas (Figura 6.1):

- Zona de acondicionamiento de polímero.
- Zona de percolación.
- Zona de baja presión.
- Zonas de alta presión.

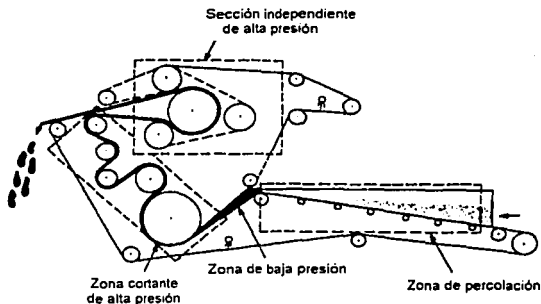


Figura 6-1 Esquema simplificado de un filtro prensa de banda.

La zona de acondicionamiento de polímero puede estar formada por un tanque pequeño, de 265 a 379 litros, localizado de 0.6 a 1.8 metros de la prensa; un tambor rotatorio sujeto a la cresta de la prensa o a un inyector en línea. Regularmente el fabricante de la prensa proporciona la unidad de acondicionamiento de polímero junto con el filtro prensa de banda. La zona de percolación puede estar compuesta por una banda plana o ligeramente inclinada. En esta zona se deshidrata el lodo a través de filtración por gravedad del agua libre y se debe esperar un aumento del 5 al 10 % de la concentración de sólidos en el influente de lodo. Se pueden presentar problemas en esta zona, como el desprendimiento de lodo entre las bandas o taponamiento de la malla cuando el lodo no escurre apropiadamente. La filtración libre del agua esta en función del tipo de lodo, su calidad, acondicionamiento, tamiz de la malla y diseño de la zona de percolación.

La zona de baja presión es el área donde las bandas superiores e inferiores se juntan con el lodo dentro de ellas conformando la torta de lodo. La zona de baja presión es muy importante debido a que prepara al lodo en una torta firme la cual puede resistir los esfuerzos cortantes dentro de la zona de alta presión. En la zona de alta presión, la fuerza ejercida sobre el lodo se debe al movimiento de las bandas superiores e inferiores, a medida que se hacen pasar una serie de rodillos debajo de ellas con diámetros cada vez más pequeños. Algunas instalaciones poseen una zona de alta presión independiente, la cual utiliza bandas o cilindros hidráulicos para aumentar la presión del lodo, y obtener una torta de lodo más seca. La producción de una torta bastante seca es de gran interés para las instalaciones que utilizan la incineración como método de disposición final.

6.1.1. Teoría de operación

La zona de alta presión es crítica para obtener un buen desempeño de la prensa. Para describir los diversos efectos en la zona típica de alta presión (Figura 6.2), se puede utilizar las ecuaciones de diseño de Rubel y Hager Inc.

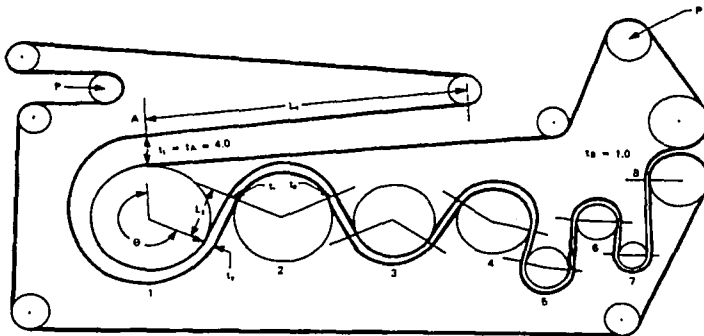


Figura 6.2 Zona típica de alta presión.

Las ecuaciones de Rubel y Hager Inc. pueden utilizarse para calcular los siguientes parámetros:

- Presión sobre la torta de lodo debida al aumento de torsión (fuerza requerida para jalar la banda a través de la prensa).

$$p_1 = 2 F_1/D = 1700 \text{ HP}'/(D) \text{ (fpm)} \quad (6.1)$$

donde,

- p_1 = presión máxima sobre la torta de lodo debida a F_1 .
- F_1 = kg de fuerza debida al momento de torsión por cm de anchura de banda.
- D = diámetro de rodillo, cm.
- HP' = caballo de fuerza por cm de anchura de banda por banda.
- fpm = velocidad de la banda, m/min.

- Presión sobre la torta de lodo debida a la tensión de la banda (para prensas que utilizan cilindros neumáticos o hidráulicos para tensionar las bandas).

$$p_2 = 2 F_2/D + 2P\cos[a/(DWY/2)] \quad (6.2)$$

donde,

- p_2 = presión promedio sobre la torta de lodo debida a la fuerza F_2 .
- F_2 = kg de fuerza debida a la tensión por cm de anchura de banda requerida para prevenir el alojamiento de bandas y generar tracción en los rodillos.
- P = fuerza resultante del rodillo en marcha sujeto a tensión. Existe facilidad para el ajuste y medición de la presión por el operador.
- a = ángulo entre la fuerza resultante del rodillo y el eje del cilindro en marcha.
- D = diámetro del rodillo, cm.
- W = anchura activa de la banda, cm.
- Y = ángulo de envoltura de la banda en el rodillo en marcha.

- Presión sobre la torta de lodo debida a la elasticidad de la banda.

$$p_3 = 2 F_3/2 \quad (6.3)$$

donde,

- p_3 = presión promedio sobre la torta de lodo debida a F_3 .
- F_3 = kg de fuerza debida a la elasticidad de la banda por cm de anchura de banda.

$$F_3 = 2 eE/D \quad (6.4)$$

- D = diámetro del rodillo, cm.
- E = modulo de elasticidad de la banda.
- e = deformación unitaria de la banda, Δ / L_1 .
- Δ = deformación de la banda ($L_0 - L_1$), cm.
- L_1 = longitud de la tangente de la banda que ingresa al rodillo.
- L_0 = longitud de la banda externa alrededor del rodillo entre los puntos tangentes sobre los rodillos adyacentes.
- L_1 = longitud de la banda interior alrededor del rodillo entre los puntos tangentes sobre los rodillos adyacentes.

- Presión total sobre la torta de lodo en cualquier rodillo.

$$p = p_1 + p_2 + p_3 \quad (6.5)$$

$$p = 2 [F_1 + F_2 + F_3]/D \quad (6.6)$$

Con estas ecuaciones se puede calcular la presión total que actúa sobre la torta de lodo en cada rodillo, y garantizar de que exista un aumento gradual de presión en cada uno. Estas ecuaciones también permiten obtener los diámetros de los rodillos de los ejes y el tamaño requerido de los cojinetes. Se recomienda comparar los resultados con los especificados por el fabricante.

6.1.2. Descripción mecánica

Los componentes mecánicos básicos de un filtro prensa de banda son los siguientes:

- Bandas de deshidratación.
- Rodillos y cojinetes.
- Seguimiento de bandas y sistema de tensión.
- Controles y transmisión.
- Sistema de lavado de bandas.

Las bandas de deshidratación son hechas de fibras de monofilamento de poliéster, debido a que los tipos de lodo varían considerablemente en cada planta de tratamiento. Es importante que los fabricantes y diseñadores traten de evaluar con diferentes tipos de tejidos, permeabilidades y capacidades de retención de sólidos, con el fin de obtener el mejor desempeño.

Se debe diseñar el reemplazo de las bandas lo más sencillo posible, con tiempos muertos mínimos, para asegurar una deshidratación continua. Existen dos diferentes tipos de bandas: bandas seccionadas y continuas. Las bandas seccionadas están unidas con un dispositivo de empalme llamada junta de cliper. Estas bandas son las más comunes en el mercado y pueden utilizarse en todos los modelos de filtros prensa de banda. Las bandas continuas pueden ser utilizadas solamente en ciertas prensas y son más complicadas de instalar. El diseñador puede consultar al fabricante para la selección de la banda adecuada.

Los rodillos y los cojinetes son los componentes mecánicos principales del filtro prensa de banda. Los rodillos proveen la presión y la fuerza que permite que ocurra la deshidratación, pero también garantizan una tensión y un soporte adecuado para las bandas. El dispositivo de tensión es la llave de control una vez que los tamaños de los rodillos han sido establecidos. El diámetro de los rodillos y los ejes son parámetros de diseño clave y se deben evaluar. Los cojinetes son extremadamente importantes debido a que ellos son los que soportan y guían a los rodillos.

Los controles deben estar concentrados dentro de la prensa o en un panel de control remoto (Figura 6.3) y deben contar con un sistema de secuencia automática de encendido y apagado, instrumentación de alineamiento y de tensión de bandas, calibradores de presión y engranes de seguridad. Los paneles deben estar diseñados con controles centralizados y engranes de seguridad apropiados, y si es posible, se deben ubicar en un área lejos del ruido, de los olores y la humedad. Cada pieza del equipo debe estar interconectada de manera que cada unidad comience en secuencia. El apagado automático del equipo de deshidratación se llevará a cabo para cualquiera de las siguientes condiciones críticas:

- Falla en la banda transportadora.
- Falla en el tanque de acondicionamiento del lodo.
- Desalineación de la banda.
- Tensión insuficiente de la banda.
- Perdida del sistema neumático o hidráulico de presión.
- Baja presión de agua para el lavado de la banda.

- Parada de emergencia.
- Nivel elevado de lodo en la sección de percolación.
- Apagado de la bomba de carga de polímero.

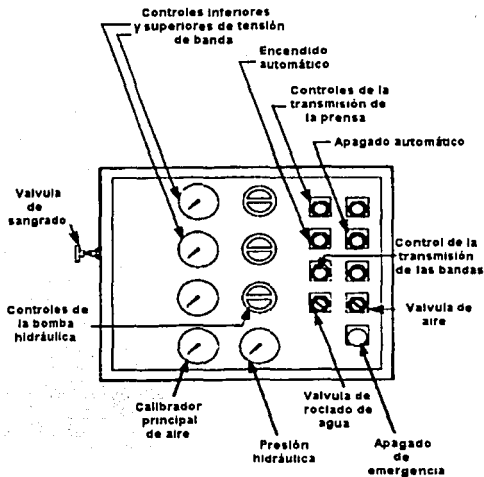


Figura 6.3 Panel de control de un filtro de banda para un sistema de deshidratación.

El sistema de lavado de banda debe incluir una bomba de agua de alta presión, un conjunto de barras rociadoras para la limpieza de las bandas superiores e inferiores y un dispositivo de rociado de limpieza. El lavado se lleva a cabo después de haber removido la torta de cada banda con agua potable o agua tratada de alta calidad. Debido al requerimiento elevado de agua para el lavado de las prensas de banda (3.16 Vs por metro de anchura de banda), es más económico utilizar el efluente de la planta de tratamiento. Por lo tanto, cuando se diseña un sistema de lavado, se debe asegurar que las bombas, tuberías y boquillas tengan la capacidad de conducir el efluente de alta calidad de la planta. Para utilizar el efluente de la planta de tratamiento, se debe instalar un sistema eficiente de filtración colocado aguas arriba de la prensa para garantizar que esté libre de sólidos que puedan obstruir las boquillas de rociado. Las boquillas de rociado deben diseñarse con acceso sencillo para conseguir una limpieza total de los filtros banda. Algunas prensas pueden equiparse con cepillos de acero inoxidable dentro de la cabeza del rociador para limpieza automática de las boquillas, sin la necesidad de removerse de la prensa (Figura 6.4). Se recomienda utilizar este sistema de limpieza, debido a la facilidad y menor consumo de tiempo de operación en relación con los sistemas de limpieza manual.

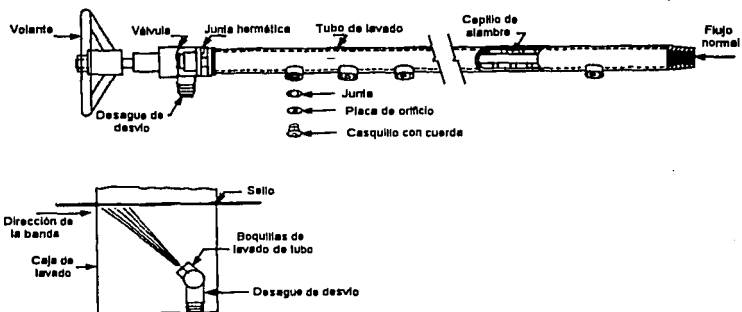


Figura 6.4 Barras de rociado equipadas con cepillos de lavado.

6.1.3. Características de desempeño

Los filtros prensa de banda pueden deshidratar la mayoría de lodos generados en plantas de tratamiento de agua residual municipal. Estos lodos deben estar acondicionados con polímero para garantizar un desempeño exitoso. La adición de polímero produce un fenómeno conocido como superfloculación. La superfloculación es la formación de flóculos fuertes y largos los cuales causan que el agua libre se drene del lodo fácilmente hacia la zona de percolación del filtro prensa de banda. La superfloculación produce también un lodo que resiste a las presiones generadas durante el proceso de deshidratación y previene su desprendimiento entre las bandas de la prensa. Regularmente se utilizan polímeros catiónicos para el acondicionamiento de lodos. Se puede utilizar un sistema combinado de polímeros, polímero catiónico más la adición de polímero aniónico o no iónico, con el fin de mejorar el desprendimiento de la torta de la banda superior de deshidratación.

La conducción del lodo y polímero hacia la unidad de deshidratación es través de una línea de tubería. Es importante ubicar varios puntos de carga de polímero; se recomienda uno en la unidad de acondicionamiento, otro de 0.6 a 0.9 m aguas arriba de la unidad ubicado dentro de la tubería de alimentación de lodo y otro aproximadamente a 7.6 m aguas arriba. En las instalaciones que utilizan cargas de dos tipos de polímero, se recomienda que el polímero aniónico o no iónico se agregue antes de la bomba de lodo. La ubicación del punto de carga es muy importante para una instalación nueva en donde las características del lodo no son conocidas, pero también es de gran importancia para cualquier planta, ya que las características del lodo pueden cambiar periódicamente. Por lo tanto, con el diseño de varios puntos de carga de polímero, el diseñador puede garantizar flexibilidad y un desempeño óptimo.

Los olores ofensivos pueden ser un problema durante el tiempo de operación de los filtros prensa de banda. Los olores se pueden controlar con sistemas de ventilación que garanticen mantener un lodo fresco. Se recomienda la adición de permanganato de potasio para neutralizar los olores causados por los químicos. El permanganato de potasio, $KMnO_4$, es un agente altamente oxidante que convierte al sulfuro de hidrogeno en sulfato inodoro.

6.2. CENTRIFUGAS

La deshidratación centrífuga es un proceso que utiliza la fuerza desarrollada por una rotación rápida de una camisa cilíndrica para separar sólidos y líquidos en el lodo. En este proceso básico, la mezcla de lodo ingresada a la centrífuga es forzada hacia las paredes interiores de la camisa formando un tanque de sólidos y líquidos. La diferencia de densidades origina que los sólidos del lodo se separen en dos capas diferentes (sólidos de lodo, "torta", y líquido, "concentrado"). Se utilizan dos tipos de centrifugas para deshidratar lodos municipales: centrifuga de cesta y centrifuga de camisa maciza. Estos dos tipos de centrifugas se diferencian por el método de carga y descarga del lodo, magnitud de fuerza centrífuga aplicada, costo y desempeño.

6.2.1. Descripción general

La centrifuga de camisa maciza se caracteriza por poseer una camisa giratoria cilíndrica o cónica. Se adapta un tornillo helicoidal transportador (scroll) dentro de la camisa con una pequeña holgura entre sus bordes externos y de la superficie interna de la camisa. Este tornillo transportador gira a una velocidad ligeramente menor o mayor que la de la camisa. Esta diferencia se conoce como velocidad diferencial, la cual permite el transporte de los sólidos de la zona de carga estacionaria hacia la zona de deshidratación, en donde el lodo es descargado. La Figura 6.5 muestra el empuje sobre los sólidos colectados por el scroll a lo largo de las paredes de la camisa y por encima de la zona de deshidratación, que está localizada en el extremo mas estrecho de la camisa para su descarga y deshidratación final.

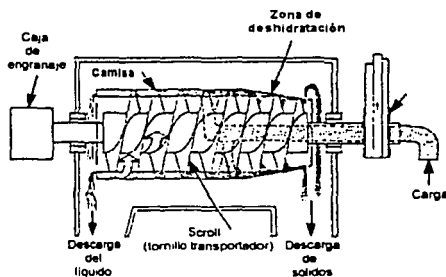


Figura 6.5 Centrifuga transportadora de descarga de camisa maciza.

La velocidad diferencial entre la camisa y el tornillo transportador se logra a través de diferentes métodos. Uno puede ser utilizando una caja de velocidades de doble salida, que imparte diferentes velocidades en función de la proporción de los cambios. Es posible variar el grado de salida a través del manejo de dos ejes separados de entrada. Otro método, es proveer un sistema de control de velocidad automática en función del tornillo transportador que pueda maximizar la concentración de sólidos.

La centrifuga de camisa maciza opera en cualquiera de las dos siguientes modalidades: contracorriente o de corriente continua. Las diferencias entre las dos son la ubicación de los puertos de carga del lodo, la remoción del concentrado y los patrones de flujo interno de las fases líquido/sólido. En la centrifuga de contracorriente el influente de lodo se introduce a través de la línea de alimentación sobre o cerca de la junta de las secciones cilíndricas y cónicas de la camisa; los sólidos se mueven hacia el borde cónico de la maquina mientras que el concentrado fluye en

dirección opuesta (Figura 6.5). Bajo la influencia de la fuerza centrífuga, los sólidos del lodo son empujados hacia las paredes de la camisa. Los sólidos son retirados gradualmente por el scroll a lo largo de las paredes de la camisa hacia la superficie de la zona de deshidratación..

De esta fase, los sólidos de la torta de lodo caen en una tolva de descarga. El concentrado, que es el líquido parcialmente clarificado compuesto por los sólidos mas pequeños y finos sin flocular, fluye alrededor y a través del scroll hacia el extremo de descarga del líquido. De acuerdo con las características de las partículas del lodo, de las fuerzas gravitacionales y del tiempo de residencia, una porción de estos sólidos se sedimenta en la pared externa y es transportada al extremo de descarga de sólidos mientras que el líquido fluye sobre un vertedero ajustable. La longitud de la sección cónica (zona de deshidratación) sobre el nivel del tanque puede variar considerablemente de acuerdo con las características específicas del lodo, tipo de diseño y operación de la centrifuga.

En el modelo de corriente continua (Figura 6.6) la carga de lodo se introduce en la abertura opuesta a la zona de deshidratación. La zona de asentamiento comienza cerca o sobre el punto de carga y los sólidos viajan a todo lo largo de la camisa. El diseño de construcción es similar al de contracorriente, solo que en este el concentrado fluye en la misma dirección que los sólidos del lodo, a favor de la corriente, y es retirado por un dispositivo desnatador o tubo de retorno cerca de la junta de la camisa cilíndrica y de la sección cónica. El concentrado clarificado fluye hacia los canales dentro de su colector y regresa al extremo de carga de la máquina, en donde es descargado sobre un vertedero de placas ajustables a través de puertos de salida contruidos dentro de la cabeza de la camisa.

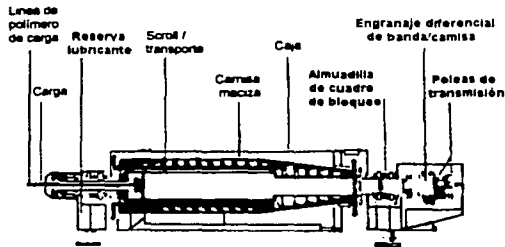


Figura 6.6 Centrifuga de camisa maciza con transmisión de scroll hidráulica.

El diseño de corriente continua de las centrifugas transportadoras es operable para velocidades menores que las de contracorriente, en el rango de 700 a 1500 gravedades, de acuerdo con el tamaño de la máquina y las propiedades del lodo. Se ha clasificado como una centrifuga de velocidad baja o denominada también centrifuga G-Baja, la cual opera de 50 a 75 % de la fuerza gravitacional de la centrifuga de alta velocidad o también llamada centrifuga G-Alta.

6.2.2. Aplicaciones

La habilidad de utilizar una centrifuga de camisa fija, ya sea para espesamiento o deshidratación, brinda cierta flexibilidad y es de gran ventaja. Una centrifuga puede ser utilizada para el espesamiento antes que un filtro prensa, reduciendo la utilización de químicos y aumentando la producción de los sólidos. Durante los tiempos muertos del filtro prensa, la centrifuga de camisa maciza puede servir como un dispositivo alterno de deshidratación. En las plantas de gran tamaño, es la capacidad de producción de lodo lo que permite el uso de unidades individuales de cualquier equipo de deshidratación. Las centrifugas más grandes son capaces de manejar de 19 a 38 Vs por unidad de acuerdo a las características del lodo. La centrifuga también tiene la habilidad de manejar cargas mayores que las de diseño y aumentos temporales en la carga hidráulica o en la concentración de sólidos, y el porcentaje de recuperación de sólidos puede ser conservada con la adición de una dosificación mayor de polímero.

En todos los procesos de deshidratación de lodos, se recomienda espesar al menos parcialmente la línea de carga de la centrifuga, para evitar que la capacidad este limitada al contenido excesivo de agua en el lodo. Los sólidos de carga están lo suficientemente pre-concentrados de modo que la capacidad del liquido de la centrifuga (Sigma) y los sólidos (Beta) sean alcanzados al mismo tiempo. Las cargas diluidas pueden generar una reducción en la capacidad de sólidos y un aumento en los requerimientos de polímero. Una proporción elevada de pre-concentrado de lodos diluidos en un espesador por gravedad, con cargas entre 200 y 400 %. mayores que las normales, puede mejorar el desempeño, reducir los costos y brindar una operación más estable a través del uso de las reservas del lodo en el espesador (Tabla 6.7).

Tabla 6.1 Espesamiento por gravedad convencional y nivel elevado de acondicionamiento preliminar.

Lodo	Convencional		Nivel elevado	
	Carga kg/m ³ /dia	Flujo bajo Porcentaje (%)	Carga kg/m ³ /dia	Flujo bajo Porcentaje (%)
P Crudo	98	8-10	195	5-6
WAS Crudo	20	1,75 + SDI	74	0,5 + SDI
(PS + WAS) (60:40)	40	4,5-5,5	98	3,5-4,0

SDI = Índice de Densidad del Lodo

6.2.3. Teoría general de diseño

La centrifuga de camisa maciza es una unidad de sedimentación de alta energía (g). Las partículas que ingresan al tanque del líquido se sedimentan hacia la pared externa con ayuda de la gravedad y resistentes por los mismos factores que disminuyen el asentamiento y resisten la compactación en los clarificadores y espesadores. La capacidad de la centrifuga también se ve afectada por el tipo, grado de remoción y concentración de sólidos. Una centrifuga posee las mismas características que un clarificador, ya que ésta es un clarificador que ha sido envuelto alrededor de una línea central que puede ser girada para generar asentamiento de sólidos. Cuando el clarificador es grande, operando a 1 G, la centrifuga clarificadora-espesadora opera en múltiplos de gravedad elevados, para separar los líquidos y sólidos de una unidad de volumen pequeño de poca profundidad. La fuerza gravitacional elevada permite una mayor remoción de agua. La velocidad de asentamiento de una partícula en un fluido bajo la influencia de la gravedad puede ser definida por la ley de Stokes:

$$V = g (\rho \text{ sólido} - \rho \text{ líquido})d^2 + 1800 \mu \quad (6.5)$$

donde,

- V = velocidad de asentamiento de la partícula sólida en el fluido, m/s
 G = aceleración debida a la gravedad, m/s²

ρ sólido = densidad de la partícula, kg/m^3
 ρ líquido = densidad del líquido, kg/m^3
 d = diámetro de la partícula principal, m
 μ = viscosidad del líquido, kg/(m x s)

La fuerza de aceleración de una centrifuga (G) definida en múltiplos de gravedad esta en función de la velocidad rotatoria de la camisa y de la distancia de la partícula desde el eje de rotación. En la centrifuga, la fuerza de aceleración G se calcula como sigue:

$$G = (2\pi N)^2 R + 60 \quad (6.6)$$

donde,

N = velocidad rotacional de la centrifuga, rev/s
 R = radio de cuerpo rotatorio del liquido, m

El valor de G puede ser sustituido por g en la ecuación anterior para determinar el rango de velocidad de asentamiento como función de R.

La centrifuga posee tres funciones que son incompatibles. La primera es la clarificación o la remoción de sólidos de la suspensión líquida, la segunda es la consolidación de las partículas sedimentadas sobre la pared de la camisa, y la última, la necesidad de transportar y deshidratar estos sólidos durante su camino hacia el exterior de la camisa. Para una fuerza gravitacional específica, la efectividad de la clarificación y de la concentración de sólidos esta en función del volumen del tanque. Un volumen grande favorece a la concentración elevada de sólidos. El volumen de detención disponible para la clarificación afecta la proporción hidráulica, la eficiencia de separación y la dosificación química. Al maximizar el volumen de clarificación (minimizar el volumen de lodo), se reduce el tiempo de compactación de los sólidos y por lo tanto se genera un lodo de baja concentración.

La capacidad de clarificación de una centrifuga de camisa maciza se mide por su valor Sigma (Σ). El valor Sigma es el área superficial promedio de un tanque de sedimentación equivalente a la capacidad de sedimentación de la centrifuga, y esta dado por la siguiente formula:

$$\Sigma = 2\pi L(w_2/g) (0.75 r_1^2 + 0.25 r_2^2) \quad (6.7)$$

donde,

Σ = capacidad hidráulica teórica, m^2 .
 L = longitud de clarificación efectiva de la camisa de la centrifuga, m (de la entrada a la salida del líquido).
 W = velocidad angular de la camisa de la centrifuga, rad/s.
 g = aceleración debida a la gravedad, 9.8 m/s^2 .
 r_2 = radio de la línea central de la centrifuga a la superficie del liquido en la camisa de la centrifuga, m.
 r_1 = radio de la línea central a la pared interior de la camisa de la centrifuga, m.

Un método mas sencillo para calcular Sigma, aplicado en centrifugas de camisa maciza, es a través de la siguiente ecuación:

$$\Sigma = P v w^2 / g [\ln (r_2/r_1)] \quad (6.8)$$

donde,

$P_v =$ volumen del tanque, m^3 .

El valor de Sigma puede ser utilizado para calcular las características de desempeño entre las centrifugas, pero tiene sus limitantes. Puede y es utilizado para aumentar proporcionalmente los resultados de las máquinas en condiciones de operación y configuración física similares. La utilización de Sigma para comparar la capacidad de una centrifuga G-Alta contra una tipo G-Baja o en aquellas donde la profundidad de los tanques es totalmente diferente es invalida.

El valor Sigma se basa en la aplicación de donde la centrifuga esta limitada por la clarificación y la capacidad de los sólidos no es incierta. La capacidad de la clarificación puede ser incrementada por el uso de químicos para inducir la floculación y sedimentación en las partículas. La efectividad de los polímeros y el aumento del área de clarificación se deriva de la consolidación del lodo, siendo el transporte el factor de proporción limitante del proceso. Esto se lleva a cabo cuando se requiere de una concentración elevada de sólidos para obtener una operación de manejo de lodo más económica. El valor de Sigma puede ser el factor limitante para el manejo de cargas diluidas.

La capacidad limitante de los sólidos de una centrifuga de camisa maciza se designa como valor Beta, y se utiliza parecido al valor Sigma.¹ La capacidad de los sólidos de una centrifuga es alcanzada en el punto donde el volumen de lodo compactado en el tanque interfiere con la separación de las fases sólido-líquido y con la disminución de la recuperación de sólidos. El volumen total del tanque (V) en una centrifuga es igual a la siguiente ecuación (Figura 6.11):

$$V = \pi (r_1^2 - r_2^2) L \quad (6.9)$$

El volumen de lodo, V_s , en el tanque con una superficie en r_3 es:

$$V_s = \pi (r_1^2 - r_3^2) L \quad (6.10)$$

El flujo de sólidos dentro de la centrifuga se expresa como Q_s , $kg\ SST/m^3$, y el flujo volumétrico de sólidos por la relación Q_s/Y_c , donde Y_c es el peso específico de los sólidos compactados, $kg\ SST/m^3$, en la porción cilíndrica de la camisa. Cuando no se origina escurrimiento de sólidos en la camisa, el tiempo (T) que viaja la partícula se puede calcular como:

$$T = L / \Delta_w SN \quad (6.11)$$

donde,

- L = longitud del cilindro, m.
- W = velocidad diferencial.
- S = espacio entre navajas transportadoras.
- N = numero de hojas.

El volumen ocupado por los sólidos durante el estado de operación estable se calcula como:

$$V_s = (Q_s/Y_c)T \quad \text{ó} \\ V_s = (Q_s/Y_c)(L/\Delta_w SN) \quad (6.12)$$

Debido a que el área de las paredes interiores de la centrifuga es:

$$A = 2\pi r_1 L \quad (6.13)$$

Entonces, el espesor de la torta (y) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$y = (V_s/A) - [Q_s/Y_c 2 \Delta_w \pi r_1 SN] \quad (6.14)$$

Se recomienda que el factor de aumento de Sigma y Beta no exceda a 3.

6.2.3.1. Prueba de laboratorio

Las pruebas de laboratorio requieren de grandes cantidades de lodo para examinar, pero estas se deterioran con el tiempo y pueden proveer resultados erróneos. Se recomienda utilizar una dosis de 5 mg/l de formaldehído para prevenir cambios en las características de deshidratación del lodo. Existen diferencias en la propuesta de diseño sobre la cámara de carga de la maquina tipo G-Alta, por lo que se sugiere realizar pruebas de campo comparativas para obtener información útil para el diseño. Esto procederá cuando la concentración de sólidos de la torta tenga un impacto significativo en las operaciones subsecuentes.

Se recomienda que las máquinas de prueba sean similares a las unidades reales. El nivel de prueba de flujo y de sólidos debe ser adecuado para proveer una descripción total de las características de operación de la máquina. Estas pruebas también se deben realizar durante las épocas más frías del año, debido a que estas son las más difíciles para la deshidratación del lodo. Si las pruebas se realizan durante las épocas más cálidas, entonces los sólidos de la torta deben descontarse para ser considerados en la operación del periodo más frío.

Es necesario utilizar una formula de recuperación para determinar la captura de los sólidos, debido a que su carga es separada entre el concentrado y la torta. La recuperación se define como la masa de sólidos en la torta dividida por la masa de sólidos en la carga. Si se mide el contenido de sólidos de la carga, del concentrado y la torta; entonces es posible calcular el porcentaje de recuperación sin la necesidad de determinar la masa total de cualquiera de los caudales. La ecuación de recuperación es:

$$R = 100 (C_w/F) [(F-C_c)/(C_w-C_c)] \quad (6.15)$$

donde,

- R = recuperación, % SST.
- C_w = sólidos de la torta, % SST (o ST).
- F = sólidos de carga, % SST.
- C_c = concentrado o sobre flujo de sólidos, % SST.

6.2.4. Componentes, operación y control

La cimentación en donde se apoya la centrifuga es una consideración muy importante de diseño. La base requiere de una cimentación sólida en la que se monte y se sostenga la unidad. Se deben colocar aislantes de vibración montados entre la base y cimentación, con el fin de reducir la vibración creada por la centrifuga. La base es de acero fabricado o fundido de bastante masa para sostener la vibración y reducir los efectos armónicos causados por un desequilibrio menor. La camisa de la centrifuga sirve como un escudo, ya que protege los ensambles rotatorios y reduce el nivel de ruido. Esta también contiene y dirige los sólidos de la torta y concentrado a medida que son descargados del ensamble rotatorio. La camisa puede estar fabricada o revestida de acero al carbón, pero los bastidores de descarga de la torta y concentrado deben ser de acero inoxidable de calidad SS 316 o mejor. Las variables listadas pueden ser fijadas por el fabricante:

- Diámetro de la camisa.
- Longitud de la camisa.
- Velocidad rotacional de la camisa.
- Angulo de la zona de deshidratación.
- Longitud de la zona de deshidratación.
- Profundidad del tanque.
- Velocidad rotacional del scroll.

- Cabeceo del Scroll.
- Punto de carga del lodo.
- Punto de carga de químicos.
- Condición de las navajas del scroll.

6.2.4.1. Camisa y scroll

La configuración de la camisa es de forma cilíndrica y cónica, pero las proporciones de cada sección pueden variar de acuerdo con el tipo de aplicación. La longitud y el ángulo de la sección cónica, las cuales actúan como zona de deshidratación, tienen un efecto importante en el desempeño individual específico de cada máquina. Los diámetros de las camisas pueden variar a partir de 183 cm con longitudes desde 427 cm. El scroll se ajusta concéntricamente dentro de la camisa. El núcleo central del scroll contiene conductos de carga y puertos de descarga del concentrado. El diseño del scroll puede variar en el paso del diámetro, el número de cintas de transporte y en las aberturas de paso para el concentrado hacia los vertederos de descarga. El scroll puede contar con una pantalla protectora para proteger la torta de lodo, previamente consolidada, de ser perturbada por el flujo de carga.

El material de construcción de la camisa de la centrífuga y del scroll, varía desde acero al carbón de alta resistencia hasta acero común inoxidable del tipo SS 316 y SS 317. En el caso de acero inoxidable, existe la preocupación de corrosión debida a concentraciones de cloruro mayores a 200 mg/l. Las plantas que reciben residuos de cloruro o infiltraciones de agua de mar, pueden tener serios problemas mecánicos si no son tomados en cuenta.

El efecto de mayor trascendencia en el mantenimiento sobre las navajas del scroll, es el causado por los desgastes abrasivos. Estos efectos están influenciados por la abrasión del lodo, fuerza centrífuga en la pared de la camisa, velocidad diferencial y resistencia de abrasión del material utilizado para formar las puntas de las navajas del scroll. Estas incluyen diferentes tipos de placas metálicas soldadas, de carburo de tungsteno y placas de cerámica. Las placas de cerámica tienen una vida útil bastante larga, un costo de reemplazo relativamente bajo y son más fáciles de instalar. El inconveniente de este tipo de placas, es que son más frágiles que los casquillos metálicos y tienden a despostillarse fácilmente, ocupan más espacio en la camisa y no forman una superficie tan suave como las metálicas. Las placas de cerámica se pueden pegar y atornillar sobre los vuelos. Una centrífuga del tipo G-Baja que utiliza material de protección de placas de cerámica puede garantizar una duración de transporte a través del scroll de 15 000 a 20 000 horas. Las placas de carburo de tungsteno pueden alcanzar una vida útil de más de 30 000 horas, pero su costo es más elevado que las placas de cerámica. Estas placas se soldan a los vuelos y solamente se requieren para la porción de la navaja cerca de la zona de deshidratación.

La geometría de la camisa y del scroll varía con cada fabricante. El incremento del diámetro de la camisa aumenta la capacidad de clarificación y transporte de sólidos. El aumento en la longitud de la camisa incrementa solo la capacidad de la clarificación. Se recomienda mantener un ángulo de zona entre 8 y 10 grados para prevenir el deslizamiento de los sólidos transportados. A medida que los sólidos emergen del tanque, el efecto de empuje se pierde y se hace más difícil el transporte de los sólidos finos, acuosos y suaves; como los lodos activados residuales hacia las fuerzas elevadas G de la centrífuga. Los ángulos de zona poco inclinados, los tanques profundos y la configuración del diseño de transporte también trabajan en conjunto con el efecto hidráulico, el cual ayuda a empujar a los sólidos sedimentados hacia la superficie de la zona de deshidratación y a eliminar los problemas de salpicado.

Una zona de deshidratación con un ángulo poco inclinado aumenta la capacidad de transporte e incrementa la calidad del concentrado, pero produce una torta más húmeda debido a la disminución del área de drenado en la zona. Inversamente, un ángulo de zona muy inclinado, produce una torta muy seca a expensas de la calidad del concentrado y de la capacidad de transporte. Con un ángulo de zona muy inclinado, se incrementa el número de fuerzas resistentes al transporte (Figura 6.7). La fuerza de deslizamiento puede aumentar 10 pliegues en la superficie

de contacto del tanque a la zona de deshidratación. Como resultado, una porción de los sólidos son suspendidos nuevamente o drenados a través de la zona y eliminados sobre el vertedero del concentrado. La decisión final de diseño del ángulo de la zona de deshidratación, depende de la importancia relativa de sólidos de la torta de mayor tamaño o de la calidad del concentrado.

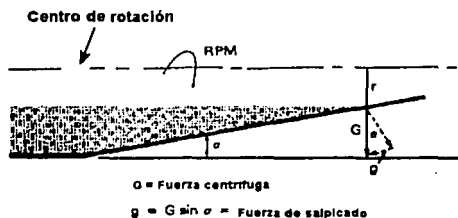


Figura 6.7 Efecto del ángulo de la camisa sobre el movimiento del lodo.

No es necesario modificar la velocidad de la camisa de la mayoría de las centrifugas, una vez que han sido instaladas. La centrifugas de camisa maciza operan a velocidades de 600 a 3000 veces la fuerza de gravedad y se clasifican en centrifugas tipo G-Baja y G-Alta. Las unidades G-Baja tienen velocidades equivalentes de 600 a 1800 Gs, y las unidades G-Alta operan de 2000 a 3000 Gs. La fuerza gravitacional es directamente proporcional al diámetro y al cuadrado de la velocidad de la camisa. Algunas consideraciones que hay que tomar en cuenta para las centrifugas de corriente continua de baja velocidad son:

- La introducción de la carga en un extremo alejado de la camisa reduce la turbulencia e incrementa la clarificación.
- La introducción de la carga no altera el lodo consolidado parcialmente.
- El consumo químico es menor debido a la baja turbulencia.
- Se puede producir un concentrado transparente y un alto contenido de sólidos con velocidades bajas sin la pérdida de la capacidad de la máquina.
- Una velocidad baja requiere de menor energía.
- Una velocidad baja reduce el desgaste y otros costos de operación y mantenimiento.
- Una velocidad baja produce menor vibración.

Las consideraciones que hay que tomar en cuenta para las centrifugas de contracorriente de alta velocidad son:

- Se puede reducir la velocidad cuando no sea necesaria.
- La mayor parte de los lodos municipales no son probados en la centrifuga antes de su instalación para determinar las características de desempeño en función de la velocidad o fuerza G.
- Las centrifugas de corriente continua sufren de un desgaste en la longitud total de la camisa y del scroll, mientras que las unidades de contracorriente utilizan una porción de la camisa, reduciendo los gastos de reparación.

Las centrifugas de contracorriente de alta velocidad son más pequeñas en tamaño que las unidades de corriente continua de baja velocidad, para capacidades hidráulicas y de sólidos semejantes. Se recomienda operar a la menor velocidad posible, cumpliendo con la capacidad y características necesarias de desempeño, para obtener un sistema de deshidratación efectivo y

económico. Las centrifugas requieren de una línea de carga estacionaria, la cual es insertada a través del centro de la caja del scroll a una distancia necesaria para alcanzar el puerto de descarga. La línea de carga puede penetrar en el extremo de descarga del concentrado o de la torta de la centrifuga de acuerdo al tamaño y diseño de la maquina.

6.2.4.2. Velocidad diferencial entre la camisa y scroll

La unidad del engranaje es del tipo cíclico y trabaja conjuntamente con el backdrive para controlar la velocidad diferencial entre la camisa y cinta transportadora. A través del control de la velocidad diferencial, se puede alcanzar un tiempo de residencia de sólidos y un contenido de sólidos de la torta óptimo en la centrifuga. El backdrive es considerado esencial cuando se lleva a cabo la deshidratación de lodos crudos, digeridos primarios-secundarios o secundarios, debido a la presencia de partículas finas. La función del backdrive puede estar acompañada por un sistema de bomba hidráulica, freno de corriente Foucault, motor de velocidad DC variable o un motor de velocidad variable tipo Reeves. Los dos sistemas backdrive más comunes son los hidráulicos y los de freno de corriente Foucault.

Las centrifugas tipo G-Alta están equipadas con el freno de corriente Foucault. Este dispositivo esta sujeto al eje de la caja de velocidades y consiste de una bobina de campo y un freno de rotor sobre el eje. Cuando se aplica un voltaje DC a la bobina de campo estacionaria, se crean flujos de líneas magnéticas en el freno rotor. La cantidad de flujo en el rotor esta en función de la velocidad diferencial entre el rotor y la bobina y también de la corriente DC aplicada a esta. Este flujo produce corrientes parásitas, las cuales generan una resistencia al volteo, o una acción de frenado. Por lo tanto, si se varía el voltaje DC aplicado a la bobina estacionaria se puede alterar la velocidad diferencial entre la camisa y el scroll.

El arreglo de backdrive más versátil es el diseño de una bomba hidráulica. Este arreglo se utiliza ampliamente debido a que elimina la necesidad de utilizar la caja de velocidades y el backdrive mecánico o eléctrico. Las velocidades diferenciales pequeñas también reducen la velocidad de las puntas del scroll, las cuales moderan el desgaste de la cinta y de la camisa o de las caras de la camisa. Debido a que cualquier cambio en la carga de sólidos, estará compensado automáticamente por un cambio en la velocidad diferencial; la operación de la centrifuga se puede adaptar para obtener una retención máxima de sólidos dentro de la camisa y scroll, sin el riesgo de obturar la maquina. La velocidad diferencial aumenta o disminuye en proporción al cambio equivalente en la torsión. Si se requiere incrementar la producción de lodo, la velocidad automática del controlador relacionado con la torsión del scroll permite que la proporción de carga aumente sin peligro de que se atasque.

Un sistema hidráulico completo elimina los problemas de fallas en la caja de velocidades, minimiza la vibración torsional y el ruido. No se requiere la utilización de un sistema backdrive/freno de corriente Foucault separado, debido a que el scroll se acciona directamente con el volumen hidráulico ajustable. A medida que la carga de sólidos en la maquina cambia, se monitorea la contra presión del scroll continuamente y la unidad hidráulica análoga incrementa o disminuye automáticamente su velocidad de acuerdo con la presión. En aquellos casos cuando la transmisión principal se desactiva, la pérdida de torsión será nula, ya que la velocidad diferencial del scroll es independiente de la velocidad de la camisa. En contraste, una centrifuga manipulada por una caja de velocidades se enfrenta con problemas relacionados con momentos de torsión. Una vez que se alcanza el limite de torsión, se puede originar una ruptura del eje, desengranje del clutch o disipación de la corriente, causando pérdida de velocidad diferencial y de torsión, e incrementando el riesgo de atascamiento de la máquina.

La presión del aceite hidráulico es una medida directa de torsión. La carga de torsión en el scroll también puede ser medida cuando se requiere controlar el nivel de carga. La unidad de control puede utilizarse para controlar la dosificación de polímero basada en la transparencia del concentrado. La velocidad diferencial controla el tiempo de residencia de los sólidos dentro de la centrifuga, puede influir en la concentración de la torta y capacidad de la máquina. Al incrementar

la velocidad diferencial de la camisa y el scroll, se origina un lodo más húmedo y aumenta la producción de lodo en la máquina. Un decremento en la velocidad diferencial produce una torta mas seca y disminuye la producción de lodo.

La recuperación del lodo para este último caso, es deficiente o requiere de una mayor dosificación de polímero. Uno de los problemas generados al operar a velocidades diferenciales demasiado bajas, es la formación de una gran acumulación de sólidos en las navajas del scroll, originando que algunos de los sólidos finos se espumen desde la superficie de la torta hacia el concentrado. Otro problema es el conectar la centrifuga cuando los sólidos son removidos a una proporción menor de la que son cargados en la máquina. La unidad backdrive puede proveer un aumento en el contenido de sólidos de la torta del 4 % o más que una máquina sin esta unidad. El backdrive aumenta la estabilidad total de desempeño de la centrifuga cuando se varía la carga de sólidos. La retroalimentación de una centrifuga con backdrive hidráulico es mucho más económica y eficaz.

6.2.4.3. Represas de sobreflujo

Debido a que en las unidades de camisa maciza la profundidad del tanque es variable, se requiere de varias horas de mano de obra para ajustar las represas de sobreflujo. La profundidad del tanque regula la calidad de la clarificación y el secado de los sólidos. Un incremento en la profundidad del tanque puede originar una recuperación mayor de sólidos en un rango específico de carga, pero la torta producida es más húmeda. Es necesario ajustar las represas cuando se requiere de un cambio mayor en el rango de carga. Cuando la profundidad del tanque se traslada hacia el tiempo de residencia de la centrifuga, puede existir una diferencia menor o nula en la recuperación y en los sólidos de la torta. Esto no se aplica para todos los tipos de lodos residuales, ni para las profundidades de los tanques que dejan una zona de deshidratación pequeña o nula. La profundidad adicional y el aumento del área transversal reduce la turbulencia y permite que los sólidos se compacten sin que interfieran con el proceso de clarificación. El uso de tanques profundos para el espesamiento y deshidratación de lodos activados, minimiza la fuerza de deslizamiento sobre la zona, originando un incremento en la eficiencia de conducción.

6.2.4.4. Bombas de carga y conductos del lodo

El control de la carga de lodo requiere de un sistema de bombeo que pueda manejar varios tipos de consistencias y cargas de lodo. Por esta razón, se recomienda que las bombas para la centrifugación sean de cavidad progresiva. Otros tipos de bombas aptas para la centrifugación son las bombas tipo Lobe, ya que estas proveen un flujo uniforme y un desplazamiento positivo. Las bombas centrifugas son menos aptas a los cambios en la consistencia de los lodos. La variación de los lodos afecta el rango de bombeo por lo que se recomienda una transmisión de velocidad variable para un control positivo de la carga de la centrifuga.

6.2.5. Variables del Proceso

Existen un número de variables en el proceso que afectan el desempeño de una centrifuga. Estas variables se listan a continuación:

- Rango de carga.
- Características del lodo.
- Tamaño de partícula.
- Forma de partícula.
- Relogía.
- Concentración de sólidos.
- Viscosidad del líquido.
- Densidad del líquido.
- Temperatura.

- Tipos de químicos agregados.
- Cantidad de químicos agregados.

6.2.5.1. Rango de carga

Una de las variables más importantes durante la operación de una centrifuga, es su rango de carga, desde el punto de vista de carga hidráulica y sólidos. La carga hidráulica en la centrifuga afecta la capacidad de clarificación, mientras que la carga de sólidos esta en función de la capacidad de conducción. Si se incrementa la carga hidráulica, la transparencia del concentrado disminuye y el consumo de químicos puede aumentar. Se requiere de un cambio en la velocidad diferencial cuando se suscitan cambios en la carga de sólidos, si la centrifuga esta operando en periodos de residencia máximos de sólidos. Se puede alcanzar una torta bastante concentrada con velocidades diferenciales mínimas y con un rango de carga que corresponda a la capacidad volumétrica reducida de conducción.

6.2.5.2. Características del lodo

Las características identificadas sobre las diversas fuentes de las aguas residuales tienen un fuerte impacto sobre la eficiencia de la deshidratación, que es medida por la capacidad de la unidad, secado del producto y recuperación de sólidos. El diseño de una planta de tratamiento de agua residual es una consideración importante en el dimensionamiento de una centrifuga y en las características de desempeño esperadas. Las partículas más grandes y pesadas son capturadas fácilmente en la centrifuga. Las partículas más finas que no pueden asentarse, deben ser aglomeradas hasta cierto tamaño con la utilización de químicos que las haga sedimentarse en el tanque hacia la pared externa donde son transportadas al punto de descarga.

A medida que la proporción de partículas finas aumenta, el lodo se hace más difícil de flocular y requiere de una mayor dosis de químicos para mantener una captura elevada de la carga de SST. Cuando la proporción de partículas finas aumenta, el contenido de humedad de la torta se incrementa. Si las partículas finas son hídricas, como en el caso de los lodos de alumbre o activados, el contenido de humedad aumenta considerablemente. El lodo incrementa sus propiedades plásticas cuando la fracción de lodos activados residuales aumenta.

6.2.5.3. Acondicionamiento químico

Se utilizan químicos orgánicos e inorgánicos para el proceso de deshidratación. Las centrifugas de camisa maciza utilizan polielectrólitos orgánicos para propósitos de floculación. El uso de los polímeros incrementa la transparencia del concentrado, la capacidad, y a menudo mejora las características de transporte y secado de la torta para ser descargada. Los polímeros aniónicos pueden permitir una mejor operación si se añaden también sales de aluminio o férricas. La mayoría de las centrifugas utilizan $FeCl_3$ en compañía de polímeros catiónicos o aniónicos. Puede ser necesario utilizar un sistema de polímero mixto cuando exista un tratamiento que este ubicado aguas arriba de la centrifuga.

6.2.5.4. Temperatura del lodo

Los lodos cálidos se deshidratan mejor que los lodos fríos. La concentración de la torta de lodos en épocas de invierno y verano puede variar desde 2 a 4 puntos en porcentaje. El posible incremento en la torta en época de verano se debe a la disminución en la viscosidad del líquido, la cual incrementa el drenado de este. Otra razón de la obtención de una torta más seca es el decremento de la densidad del líquido durante las temperaturas más cálidas. La proporción y calidad de lodos secundarios aumenta en el invierno, lo que incrementa el contenido de humedad. El calentado del lodo aumenta considerablemente los sólidos en la torta. Sin embargo, este tipo de practica no es factible, al menos que exista una fuente disponible de calor. Se requiere de 1 kg de vapor para calentar 10 kg de lodo a una temperatura de 66 °C.

6.2.5.5. Características de desempeño

La proporción de lodo primario a secundario tiene un efecto no solamente en la capacidad de la centrifuga, sino que también en la concentración de la torta y en la dosificación del polímero. El índice volumétrico del lodo (IVL) de la fracción secundaria tiene un impacto en estos parámetros. Aunque se tenga un lodo digerido, algunos de los efectos de la proporción primaria a secundaria e índice volumétrico del lodo suelen presentarse, afectando el desempeño de la centrifuga y demás equipo mecánico de deshidratación. El diseño de la planta debe estar orientado hacia la producción de una cantidad mínima de lodo secundario. Esta estrategia puede aumentar el desempeño y reducir los costos de la centrifuga. Es difícil comparar los datos obtenidos de diferentes lugares, al menos que la proporción primaria y secundaria, y las características de IVL de la fracción secundaria sean conocidas. La adición de químicos para la remoción del lodo complica esta comparación y puede hacer cualquier conclusión inválida (Tabla 6.1).

Tabla 6.1 Características de desempeño de una centrifuga.

Tipo de lodo	ST de la torta (%)	Recuperación de sólidos (%)	Polímero (kg/Mg)
Lodo crudo	28-34	90-95	1-2
Primario digerido aerobicamente	26-32	90-95	2-3
WAS crudo	14-18	90-95	6-10
WAS digerido aerobicamente	14-18	90-95	6-10
Crudo (Primario + WAS)	18-25	90-95	3-7
Digerido aerobicamente (P + WAS)	17-24	90-95	3-8
Al (OH) ₃ + AlPO ₄	12-16	90-95	1-3
Fe (OH) ₃ + FePO ₄	12-16	90-95	1-3
Lodo digerido aerobicamente o aireación extendida	12-16	90-95	6-10
Ca ₃ (PO ₄) ₂	12-16	90-95	1.5-3
CaCO ₃	40-50	90-95	0

La mezcla de los lodos puede calcularse basada en su masa pesada, asumiendo que cada fracción se deshidrata proporcionalmente a su peso en la mezcla. Los requerimientos de polímero pueden determinarse de la misma manera. Las concentraciones más elevadas de la torta se alcanzan con la proporción más favorable de lodo primario. Un nivel elevado de precipitados de hidróxido tiende a reducir el contenido de sólidos y es motivo del aumento de la fracción secundaria de sólidos. Los sólidos de una torta centrifuga pueden incrementarse de 2 a 5 % con el uso de dosificaciones excesivas de polímero. Los costos de los polímeros son mas bajos cuando la maquina opera a una capacidad reducida. Si se incrementa la capacidad de la centrifuga, se eleva el costo del polímero y se produce una torta mucho más húmeda.

6.2.6. Tratamiento preliminar

El lodo, antes de ser bombeado a la centrifuga, debe ser reducido a un tamaño de partícula del orden de 0.64 cm o menor. Esto se lleva a cabo en las unidades de las plantas de tratamiento mas pequeñas, las cuales pueden tener orificios de entrada y descarga reducidos. En las instalaciones de gran tamaño no es necesaria la reducción del lodo. Se debe incorporar un diseño de remoción eficiente de arenas. La entrada de arena mayor a la malla 65 debe ser removida de los flujos pico que ingresan a la planta. Esto significa que para flujos normales, la remoción de entradas mayores a la malla 100 se puede alcanzar fácilmente. La operación óptima de una centrifuga se alcanza cuando el nivel de carga de sólidos es constante. El propósito de minimizar la fluctuación del caudal, es obtener una mayor concentración de sólidos, mejor recuperación y menor dosificación de polímero. La intervención del operador también es reducida.

6.2.7. Sólidos de torta y manejo del concentrado

De acuerdo con las características de aplicación y composición del lodo, las características estructurales de la torta pueden variar ampliamente. La torta puede variar desde una masa aguada hasta una masa sólida relativamente seca y firme. Los sólidos al ser retirados de la máquina son macizos. Estos sólidos son descargados de la centrifuga a través de bandas transportadoras, tornillos transportadores o bombas especiales. La descarga por bomba es un medio bastante limpio de conducir sólidos a una distancia considerable. Las bombas especiales de cavidad progresiva que utilizan mecanismos de carga individuales, se utilizan para bombear la torta de la centrifuga hasta 61 m de distancia, en función de la concentración del lodo.

Bajo condiciones de operación normales de aplicación de polímeros, los sólidos del concentrado pueden constituir del 5 al 8 % de los sólidos de carga. Estos sólidos son reciclados de vuelta a la planta o a una unidad de concentración previa a la centrifugación. Estos sólidos no deben constituir una carga adicional significativa en los dispositivos de clarificación del caudal principal de la planta. Existe una DBO asociada con el concentrado de la fracción de sólidos y la DBO soluble contenida en el líquido. Se recomienda que las estimaciones de carga de lodo hacia la centrifuga incluyan un factor de al menos 10 % más del volumen para una carga de reciclado. La línea del concentrado debe ser de tamaño y pendiente apropiada para permitir una holgura de descarga de aire generado por la centrifuga. La línea del concentrado debe ser lo suficientemente grande para manejar una mezcla de espuma y agua. Cuando se emplean polímeros se puede producir una espuma estable. Si la línea es demasiado pequeña, el líquido se recircula hacia la centrifuga. La recirculación del líquido puede llegar a ser un problema si existen múltiples centrifugas descargando en una sola línea de concentrado.

6.2.8. Criterio de selección de equipo general

El criterio utilizado para seleccionar cierto tipo de centrifuga, es diferente de acuerdo con el tamaño de cada planta. El criterio para plantas pequeñas enfatiza la seguridad, con un mantenimiento y operación sencilla, mientras que para las plantas grandes el desempeño es una consideración secundaria. Los criterios generales mayores (M) y secundarios (S) se muestran en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Criterio de evaluación para equipo de deshidratación centrifuga.

	Tamaño de la planta (m ³ /s)			
	Pequeña (< 0.09)	Mediana (0.09-0.4)	Grande (> 0.4)	Nivel de centrifugación
Encendido rápido	P	S	S	1
Fiabilidad sin servicio calificado	P	S	S	2
Asistencia mínima de operación	P	S	S	1
Partes disponible	P	P	S	2
Servicio de reparación local	P	U	S	2/3
Limpieza	P	P	P	1
Nivel bajo de ruido	P	P	U	2
Costo inicial bajo	P	U	U	2
Sólidos de torta máximos	U	U	P	2
Sólidos de recuperación > 90 %	P	P	P	1
Costo de polímero	U	U	P	1
Costo de ejecución	U	U	P	3
Costo de mano de obra	P	P	P	1

P = Principal S = Secundaria U = Ultima
1 = Excelente 2 = Buena 3 = Regular

Las instalaciones pequeñas con poco personal se auxilian de unidades de operación que requieren de una mínima asistencia del operador. Las plantas grandes pueden utilizar un operador que atende diversas máquinas a la vez, manteniendo el costo de mano de obra por tonelada de sólidos lo más bajo posible. Por otro lado, se requiere de una torta demasiado seca para una combustión económica u operaciones de composteo.

6.2.8.1. Capacidad

Se recomienda que se realicen análisis independientes de operación en las unidades, aunque se despegue de la base de datos de diseño brindado por el fabricante. También se recomienda se seleccione un modelo de diseño actualizado. Algunas unidades con distintos tamaños y configuraciones deben ser adaptadas a la línea del fabricante. La capacidad de deshidratación del lodo para su instalación en una planta, esta en función del tamaño y capacidad de reparar el mal funcionamiento de la máquina en el sitio, y de la disponibilidad de un medio alternativo de descarga. Una planta pequeña tiene un alto porcentaje de capacidad de reserva comparada con una de gran tamaño. Las plantas grandes pueden tener otras dos maquinas disponibles mientras que las pequeñas solo una y un método aceptable alternativo de descarga (Tabla 6.3).

Tabla 6.3 Capacidad sugerida y numero de centrifugas.

Tamaño de la planta (m ² /s)	Flujo de lodo (m ³ /dia)	Operación (hr/día)	Centrifugas Operación + Reserva (@ m ² /día)
0.09	40	7	1 + 1 @ 6
0.22	50	7.5	1 + 1 @ 12
0.88	320	15	2 + 1 @ 12
2.19	800	22	2 + 1 @ 18
4.38	1,600	22	3 + 2 @ 25
10.95	4,000	22	4 + 2 @ 45

6.2.8.2. Centrifugas G-Alta vs G-Baja

La utilización de una fuerza mayor de gravedad rotacional en plantas medianas y grandes, incrementa el contenido de sólidos y la capacidad de la centrifuga. Sin embargo, esto no sucede con todas las aplicaciones, y se recomienda determinar la habilidad de operación de deshidratación para cargar al nivel de fuerza G-Alta. La operación de la centrifuga debe evaluarse con la aplicación de diferentes niveles de fuerza de gravedad, para asegurar que las fuerzas mínimas G sean empleadas correctamente en la aplicación específica. Esto extenderá la vida útil de la máquina. Decidir que tipo de centrifuga es la adecuada para el proceso de deshidratación, se puede determinar solo a través de pruebas y comparación de resultados. Los sólidos con una alta fuerza estructural responden favorablemente a las fuerzas G-Altas. Inversamente, si el lodo contiene cantidades abundantes de finos o materiales hídricos, como lodos de alumbre o activados, entonces las fuerzas G-Bajas pueden ser igualmente efectivas.

6.2.8.3. Control de velocidad diferencial

Todas las centrifugas deben diseñarse con un dispositivo de control de velocidad diferencial de fácil ajuste. Una opción es el freno de corrientes Foucault, el cual provee una velocidad fija entre la camisa y la banda. Otro dispositivo mejor es el controlador hidráulico de torque, el cual elimina el mantenimiento asociado con la caja de engranaje y brinda un control optimo y automático de la velocidad diferencial. Se recomienda emplear un controlador de torque de backdrive, incluso en máquinas pequeñas. Este dispositivo puede optimizar el desempeño de la maquina y producir los mejores resultados posibles en términos de sólidos de torta y recuperación. Este tipo de transmisión es eficiente ya que compensa las variaciones normales encontradas en las plantas

pequeñas. La habilidad de la transmisión para eliminar la sobrecarga de la centrifuga es una razón de peso para instalar una en ella. Cada vez que se apaga la maquina debido al bloqueo entre la camisa y el scroll, la bomba de carga se apaga automáticamente.

6.2.8.4. Control de carga de químicos

El monitoreo electrónico de la fuerza de torsión y el control de velocidad diferencial comprende el equipo básico requerido para trasladar la clarificación del concentrado en la bomba de control de carga química. A medida que la transparencia del concentrado disminuye, medida como transmitancia, la dosificación del polímero aumenta para mantener la transparencia fijada. Cuando la dosificación química es excesiva, la fijación de la fuerza de torsión se reduce manualmente para reducir el nivel de lodo en el tanque. Debido a que el control de carga del concentrado brinda una dosificación óptima de polímero, ahorra químicos y reduce la asistencia en la operación, se recomienda que este dispositivo se incorpore tanto en unidades pequeñas y grandes.

Existen dispositivos que pueden dar lectura de los niveles de concentración de sólidos en mg/l, como una unidad de dispersión de luz por absorción, conectados a la línea del concentrado para brindar información correcta de los cambios en el nivel de recuperación de la centrifuga. Esta lectura de turbidez en función de la dosis de polímero ayuda a incrementar la operación de deshidratación y proveer una base de datos del consumo del químico.

6.2.8.5. Resistencia a la abrasión

Existen aplicaciones donde los placas normales poseen una vida útil buena, pero el lodo del tratamiento de aguas residuales promedio es abrasivo. Por esta razón, se recomienda utilizar placas de cerámica o de carburo sinterizado para las unidades de deshidratación de lodos provenientes de alcantarillas. Estas placas brindan una vida normal de 15 000 a 30 000 horas y son convenientes para los niveles normales de mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual. El fabricante recomienda que otras porciones de la centrifuga sean emplacadas para extender la vida útil de la maquina completa.

6.2.8.6. Materiales de construcción

Se ha demostrado que el acero inoxidable y el acero forjado al carbón brindan un servicio satisfactorio. Las máquinas de acero inoxidable pueden desmontarse más fácilmente que las de acero al carbón después de varios años de servicio. Una de las desventajas del acero inoxidable es la tendencia a atorarse. La resistencia al cloruro es limitada en el acero inoxidable, por lo que es una consideración importante en aquellos casos donde el agua residual contiene agua de mar o cantidades excesivas de cloruro. El uso de cualquiera de los dos tipo de acero depende de las preferencias del ingeniero, pues no existe una fuerte razón técnica para inclinarse hacia uno de ellos.

6.3. FILTRO PRENSA

La presión de filtración en los dos tipos de filtro prensa, se caracteriza por ser una expresión limitada. Se requiere de un revestimiento del medio filtrante o de un suficiente acondicionamiento químico del lodo. Esto se da para materiales difíciles de deshidratar como lodos activados residuales o digeridos aeróbicamente. Las instalaciones de filtros prensa requieren de una estación de acondicionamiento químico para la deshidratación de lodos municipales. Los filtros prensa requieren de un alto grado de actividad operacional comparados con los otros procesos de deshidratación. Se recomienda utilizar filtros prensa para gastos mayores o iguales entre 1.1 y 2.2 m³/s. Por otro lado este tipo de equipo puede producir una torta mucho más seca que cualquier otro tipo de equipo convencional de deshidratación.

6.3.1. Filtro prensa de placas de volumen fijo

Un filtro prensa de placas de volumen fijo consiste en una serie de placas rectangulares, cada una con una sección entre ellas que forma el volumen en el cual se bombea el lodo para su deshidratación. Sobre cada una de las placas se ajusta una tela filtrante para retener los sólidos de lodo mientras se permite el paso del filtrado. Las placas se mantienen juntas con fuerza suficiente para que se adhieran herméticamente y puedan resistir la presión aplicada durante el proceso de filtración. Para conseguir que las placas se mantengan unidas se utilizan prensas hidráulicas o tornillos accionados mecánicamente. El lodo es bombeado al espacio existente entre las placas y se aplica una presión variable. El filtrado es forzado a pasar a través de la torta y de la tela filtrante y es descargado de la prensa por orificios de salida colocados en los extremos de las placas (Figura 6.8).

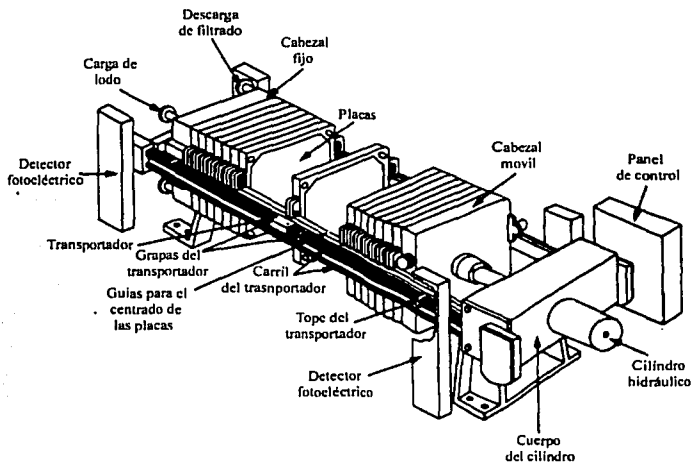


Figura 6.8 Filtro prensa de placas de volumen fijo.

Cada vez que el agua y los sólidos llenen el volumen vacío entre las telas filtrantes, y ya no exista flujo de filtrado, entonces se puede detener el bombeo. Enseguida, se separan las placas y se extrae la torta de lodo. La operación de los filtros prensa de volumen fijo se divide en dos categorías principales: unidades de baja presión y unidades de alta presión. Las unidades de baja presión operan entre 350 y 864 kPa como presión terminal; las unidades de alta presión operan entre 1040 y 1730 kPa. Las unidades de baja presión culminan en presiones cerca de 691 kPa y las de alta presión alrededor de 1380 kPa. Existen diferentes maneras de maximizar la remoción del filtrado, si se incluye un acondicionamiento efectivo y un aumento de presión. El aumento de presión se lleva a cabo en unidades de alta presión con incrementos de 350 a 520 kPa.

El espesor de la torta varía entre 25 y 38 mm, y el contenido de humedad entre 40 y 70 %. La duración del ciclo de filtración varía entre 2 y 5 horas, e incluye el tiempo necesario para llenar el

filtro, mantener la presión, abrir el filtro, lavar y descargar la torta y cerrar el filtro. En función del grado de automatización de la máquina, el operario debe realizar el seguimiento de las operaciones de alimentación, descarga y lavado del filtro .

6.3.2. Filtro prensa de volumen variable

Otro tipo de filtro prensa empleado para la deshidratación de lodo de agua residual, es el filtro prensa de placas de volumen variable, conocido también como filtro prensa de membrana o de diafragma. Este tipo de filtro es similar al de volumen fijo, excepto por el hecho de que detrás del medio filtrante se sitúa una membrana de goma (Figura 6.9) . La membrana se expande para conseguir la compresión final, reduciendo de esta forma el volumen del lodo durante la fase de compresión. Normalmente el tiempo necesario para llenar el filtro suele ser del orden de 10 a 20 minutos mientras que la aplicación constante de presión, para conseguir el contenido de sólidos deseado precisa entre 15 y 30 minutos. Los filtros prensa de volumen variable operan con presiones de 690 a 1540 kpa.

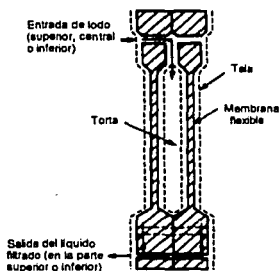


Figura 6.9 Sección transversal de un filtro de volumen variable.

La liberación del agua a presiones bajas ayuda a conservar la integridad del floculo. Después de obtener una completa liberación del agua, seguida por el periodo inicial de llenado, se puede detener el bombeo e iniciar el ciclo de diafragma. La presión de diafragma se aplica utilizando ya sea agua o aire en el lado reverso del diafragma, y se aplica una presión de 1380 a 1730 kPa sobre el lodo para obtener una deshidratación adicional. La operación de la expresión limitada; que se da al aplicar la presión de diafragma correctamente, libera cantidades adicionales de agua. El aspecto más significativo de la prensa de diafragma, es que su construcción y modo de operación permiten el uso de polímeros orgánicos como una alternativa a las técnicas de sales de hierro y acondicionamiento con cal. Aunque exista la tendencia de comprimir el lodo hacia el medio filtrante, esta es reducida a través de la eliminación de cantidades considerables de agua previas al comienzo de la operación de compresión.

Se puede alcanzar una remoción de agua del orden del 70 al 85 % durante la porción de baja presión del ciclo de las placas fijas y de la prensa de diafragma. Se puede obtener un desempeño semejante con un filtro prensa de volumen fijo a través de incrementos de presión de 2 a 3 niveles intermedios. La prensa de diafragma produce una torta más seca que el de la prensa de volumen fijo. La uniformidad de la concentración de sólidos es mucho mayor en la torta producida por la

prensa de diafragma. La aplicación continua con menor sólidos de carga en el dispositivo fijo, produce una torta con una baja fracción de sólidos cerca del punto de carga. Este tipo de problema no se origina en una prensa de diafragma debido a que el ciclo de bombeo es la primera parte del ciclo total y el diafragma tiende a remover el agua uniformemente. El tiempo de ciclo para una concentración de sólidos de torta dada es menor en una prensa de diafragma.

La necesidad de revestir la prensa del diafragma, como en la prensa de volumen fijo, es menos común. Esto se debe a que la prensa de diafragma mejora la habilidad de descarga de la torta debido al mayor contenido de sólidos en ella. Otra ventaja de la prensa de diafragma es el requerimiento de una presión de 865 a 900 kPa para que el lodo pueda ser bombeado. Las altas presiones durante el ciclo de diafragma pueden suministrarse por bombas de agua limpia o bombas de aire, se pueden reducir los costos de mantenimiento asociados por la adquisición de equipo de alta presión.

6.3.3. Bases para el diseño del sistema

Existen tres parámetros críticos para el diseño del sistema:

1. La concentración de sólidos por alcanzar en la torta para un lodo puede regular el costo de las operaciones aguas abajo y determinar la necesidad de operaciones adicionales aguas arriba, como el espesamiento.
2. La relación que existe entre la concentración de sólidos de la torta y del grado de producción, es la obtención de mayor sólidos a través de filtros prensa. Esto se da en cualquier circunstancia de operación, si es que se desea aumentar el tiempo de ciclo disminuir el grado de producción. La meta del diseñador es maximizar la producción y la concentración de sólidos para condiciones específicas de operación.
3. El tercer parámetro es la recuperación de sólidos. Los sistemas que no recuperan una cantidad considerable de sólidos, pueden requerir de un lavado constante de los medios filtrantes y originar una acumulación de sólidos finos en algunos procesos de circuito cerrado, especialmente en aquellos que circulen hacia un espesador. Las pérdidas de sólidos por arriba de 2 a 3 % de sólidos de carga se caracterizan por rasgar o adherirse a la tela filtrante. Estas acumulaciones pueden originar mayor concentración de sólidos suspendidos en el efluente. Es importante obtener una recuperación de sólidos mayor a 95 % para prevenir el reciclado de sólidos excedentes e impactos sobre algunos aspectos de la operación de la planta de tratamiento de agua residual. Los filtros prensa tienen una recuperación de sólidos mayor a 98 %.

6.3.4. Procesos y equipo de soporte

Se recomienda mantener la integridad estructural del lodo durante el proceso de prensado, ya que una estructura masiva puede prevenir el movimiento del agua a través de la torta hacia el extremo de filtrado o de descarga. En los filtros prensa de volumen fijo, el sistema de acondicionamiento más común para los lodos activados y digeridos es la adición de cal y sales de hierro. La cantidad promedio requerida es del orden de 5 % de cloruro férrico y 20 % de cal. El requerimiento de cloruro férrico esta en función de la alcalinidad del lodo. La solubilidad de la cal con valores de pH superiores a 11, es de 1 gramo por litro. Como resultado, la mayor parte de la cal se da como hidróxido de calcio parcialmente hidratado, el cual reacciona estructuralmente para crear canales de transporte del agua hacia el extremo del filtrado. Cuando el lodo es acondicionado con cal, existe la necesidad de remover el hidróxido de calcio formado sobre las placas y el medio filtrante (Tabla 6.4).

Tabla 6.4 Comparación de acondicionadores de hierro con y sin la adición de cal.

Sólidos totales del lodo ¹	Acondicionador de hierro	Dosis de hierro	CST después de la adición de hierro	Dosis de cal	Resistencia específica después de la adición de hierro y cal
%		%	sec	% CaO	10 ¹¹ m/kg
5.5	FeSO ₄ • 7H ₂ O	1.72	208	15	14.0
5.5	FeCl ₃ • 4H ₂ O	1.72	157	15	7.9
5.5	Fe ₂ (SO ₄) ₃ • 6H ₂ O	1.72	41	15	5.0
5.5	FeCl ₃ • 6H ₂ O	1.71	26	15	2.6
5.5	FeSO ₄ • 7H ₂ O	3.44	180	30	6.0
5.5	FeCl ₃ • 4H ₂ O	3.44	139	30	2.9
5.5	Fe ₂ (SO ₄) ₃ • 6H ₂ O	3.44	27	30	2.3
5.5	FeCl ₃ • 4H ₂ O	3.44	19	30	1.2
7.0	FeSO ₄ • 7H ₂ O	3.44	480	20	11.0
7.0	FeCl ₃ • 4H ₂ O	3.44	2	20	5.6
7.0	Fe ₂ (SO ₄) ₃ • 6H ₂ O	3.44	117	20	5.3
7.0	FeCl ₃ • 4H ₂ O	3.44	58	20	1.8

1 El lodo activado utilizado fue una mezcla de lodo crudo de 50% de lodo primario y 50 % de lodo activado.

2 Sin resultado debido a fallas en el laboratorio.

El envejecimiento del lodo puede incrementar en un lapso de una hora hasta en un doble la Resistencia Específica. El impacto del envejecimiento depende del tipo de floculante. La utilización de polímeros en el acondicionamiento del lodo puede producir los mismos sólidos en la torta, pero sin generar un incremento del 15 al 30 % en peso y volumen. Los procedimientos de dosificación, requerimientos de floculación, relación de presión - tiempo del filtro prensa necesaria para optimizar la dosificación de polímero y remoción de la torta de lodo dependen del lugar. Los costos de los polímeros son del 30 al 70 % de los costos de cal y sales férricas. En la Tabla 6.5 se muestran varios tipos de dosificaciones químicas y tiempos de ciclo para sólidos de tortas operadas en filtros prensa.

Tabla 6.5 Sólidos promedio de torta de filtro prensa por el método del acondicionamiento y tipo de lodo.

Método de acondicionamiento y tipo de lodo	Promedio de sólidos de torta	Solamente férrico (%)			Solamente cal (%)			Solamente polímero (kg/ton)			Tiempo de ciclo (minutos)		
		Min	Máx	Prom	Min	Máx	Prom	Min	Máx	Prom	Min	Máx	Prom
Férrico/cal													
Anaerobio	38	3	15	7	12	43	26				52	168	100
Crudo	36	1.5	12	7	15	30	23				70	330	155
Polímero													
Anaerobio	35							9.08	20.43	16.80	60	240	150
Crudo	31							3.18	8.17	5.45	50	105	82

6.3.5. Factores de operación y características de desempeño

Existen ciertas variables en el equipo y proceso que afectan la eficiencia de la filtración en la deshidratación a través de un filtro prensa fijo:

- Presión de la carga de lodo.
- El rango de la presión aplicada y del paso de flujo hacia el filtro prensa.
- Tiempo de filtración total.
- La utilización de revestimiento y cantidad de material usado.
- Químicos acondicionantes.
 - Tipo
 - Dosificación
 - Ubicación
 - Eficiencia de mezclado
 - Eficiencia de floculación
 - Frecuencia de lavado de la tela
 - Naturaleza del medio filtrante utilizado

Para un filtro prensa de diafragma existen las siguientes variables del equipo:

- Presión y rango de carga con la cual el lodo es agregado a la maquina.
- Tiempo de filtrado.
- Presión diafragma.
- Tiempo diafragma de compresión.
- Rango con el cual se incrementa la presión del diafragma.
- Químicos acondicionantes.
 - Tipo
 - Dosificación
 - Punto de adición
 - Eficiencia de mezclado
 - Eficiencia de floculación
- Tipo de medio filtrante utilizado.
- Frecuencia de lavado de la tela.

Los cambios pueden ser predecibles hasta cierto punto, y existen los mecanismos para evaluar el efecto de variación de cada uno para la optimización del sistema. No es necesario aplicar un revestimiento cuando se utilizan químicos inorgánicos en el acondicionamiento. Una dosificación de polielectrólitos también puede excluir el uso del revestimiento o protección. La aplicación de revestimiento se utiliza en aquellos casos donde el tamaño de partícula es pequeño o en donde existe una variación en la filtración y se anticipa una pérdida excesiva de sólidos finos hacia y a través del medio filtrante. La decisión final acerca del uso del revestimiento requiere de estudios de laboratorio o de campo y el tipo de lodo.

Cuando se utilizan cantidades excesivas de cal, la tela puede requerir de una mezcla de ácido con agua para su lavado. Por lo tanto, se necesita de un medio que sea resistente a los ambientes ácidos y alcalinos. Para los casos donde se utilizan polielectrólitos, la operación de lavado se acompaña de agua limpia debido a que el lodo que se incrusta en el medio se recircula a través del residuo. Algunos procesos variables, pueden controlarse por el operador. Los procesos variables son:

- El tipo de lodo por deshidratar. Crudo o primario digerido, activado, del filtro percolador o mezclas que puedan alterar el proceso de deshidratación.

- La edad y frescura del lodo. El acondicionamiento es más eficaz cuando el lodo es fresco. La Resistencia Específica incrementa el tiempo, por lo que es recomendable deshidratar el lodo en el estado más fresco posible.
- Acondicionamiento químico previo. Un acondicionamiento químico previo tiende a confundir a la aplicación del acondicionamiento en el dispositivo de deshidratación. Esto se da cuando se utilizan polímeros y estos ya han sido aplicados aguas arriba en el sistema de deshidratación. Si se presentan este tipo de condiciones, se recomienda utilizar una cantidad pequeña de polímero de carga opuesta o neutral seguida por una dosis normal del polímero utilizado. Al establecer una carga opuesta se eliminan los efectos de confusión del polímero previo degradado parcialmente sobre la superficie del lodo.
- La concentración de sólidos alcanzados en el clarificador final o en las operaciones subsiguientes de espesamiento. Se recomienda enviar al dispositivo de deshidratación una carga de lodo con un contenido de sólidos lo más elevado posible.
- Captura de sólidos. Si la torta se rompe y es descargada con limpieza, la recuperación de los sólidos suspendidos será del 99 %. Cada vez que la tela sea lavada, se incrementarán los sólidos del efluente en un mínimo.
- La concentración de la torta. La concentración de la torta debe ser lo suficientemente alta para poder desprenderse fácilmente de la tela.
- Rango de producción. La producción es dependiente de las características de liberación del agua en el lodo, tipo y cantidad de químicos y sólidos mínimos deseados en la torta.
- Condiciones bajo las cuales se produce el lodo. La filtrabilidad del lodo depende en gran parte de las condiciones bajo las cuales es producido. Esta consideración es para lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua residual municipal con alto contenido de residuos industriales de carbohidrato, los cuales pueden producir una deficiencia de nitrógeno en la porción del lodo activado de la planta. Aunque, el lodo activado con deficiencia de nitrógeno posee una Resistencia Específica mucho mayor sin ser tratado que el crecimiento de aquellos bajo condiciones de enriquecimiento de nitrógeno. La Resistencia Específica alcanzada después del acondicionamiento químico, no es tan buena como la obtenida con el crecimiento de lodos activados en condiciones excesivas de nitrógeno.

6.4. FILTRACIÓN AL VACÍO

Un filtro al vacío consiste de un tambor cilíndrico horizontal rotatorio parcialmente sumergido en un tanque de lodo. El tambor filtrante está dividido en varios compartimentos. Cada compartimento está conectado a una válvula rotatoria. Los compartimentos se dividen por puentes articulados en tres zonas: Zona de formación, Zona de secado y Zona de descarga de torta. Existen dos tipos de filtros al vacío: filtro de tambor y filtro al vacío de banda. En el caso del filtro de tambor, el tambor está cubierto con el medio filtrante y se remueve el lodo a través de un rodillo de descarga. El filtro al vacío de banda utiliza tejidos de nylon, dacrón o muelles metálicos densamente entrelazados. Para el caso de tejidos de nylon, la banda tendrá que ser separada y lavada del tambor para la descarga del lodo antes de volver a entrar en contacto con este mismo.

El tambor filtrante se sumerge de 20 a 35 % de su profundidad en un tanque de lodo acondicionado previamente; esta zona sumergida se denomina la zona de formación. La aplicación de vacío en esta zona origina que el filtrado pase a través del medio y las partículas del lodo queden retenidas sobre este. A medida que gira el tambor, cada sección gira de la zona de formación hacia la zona de secado. Esta zona comienza cuando el tambor filtrante emerge del tanque de lodo. La zona de secado representa del 40 al 60% de la superficie del tambor y termina en el punto donde se apaga el vacío interno. En este punto, la torta de lodo y la sección del tambor entran a la zona de descarga, y es aquí donde se remueve la torta del medio filtrante (Figura 6.10).

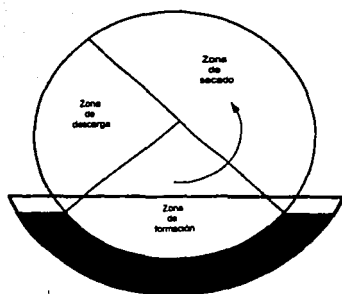


Figura 6.10 Zonas de operación de un filtro rotatorio al vacío.

La Figura 6.11 muestra una sección transversal de un filtro al vacío de banda con muelles metálicos. Este filtro utiliza dos capas de muelles fijos de acero inoxidable alrededor del tambor. Al terminar el ciclo de secado, las dos capas de los muelles dejan el tambor y se separan. De esta manera, se extrae la torta de la capa más baja de los muelles y puede ser descargada de la capa superior. La remoción de la torta de los muelles no presenta problemas cuando el lodo ha sido acondicionado correctamente. Al finalizar la descarga, los muelles se lavan con inyección de agua a presión antes de su reincorporación al tanque de lodo.

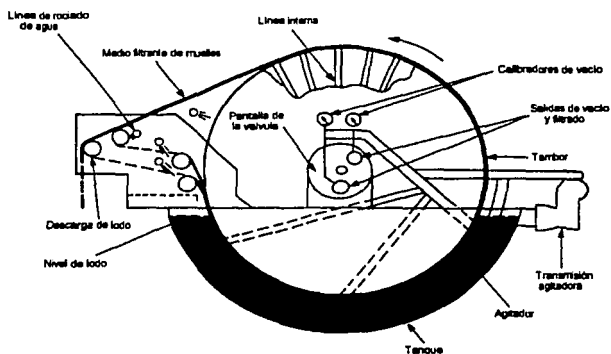


Figura 6.11 Sección transversal de un filtro al vacío de banda con muelles metálicos.

Los muelles metálicos, los cuales tienen una área descubierta de 7 a 14 %, funcionan para soportar el depósito inicial de sólidos el cual se torna para funcionar en ocasiones como medio filtrante. Debido al área descubierta de los muelles, es recomendable que la concentración de sólidos de carga sea elevada con material fibroso suficiente para prevenir la pérdida de sólidos finos. La deshidratación de lodos con partículas finas y resistentes a la floculación es deficiente en los muelles metálicos y la captura de sólidos es muy baja. Se recomienda utilizar un medio filtrante de tela en lodos sin un espesamiento previo de sólidos secundarios.

En la Figura 6.12 se muestra una sección transversal de un filtro al vacío de banda de tela. En este tipo de unidad, el medio filtrante se separa de la superficie del tambor al final de la zona de secado y pasa sobre un rodillo de descarga de diámetro pequeño para facilitar la descarga de la torta. El lavado del medio filtrante se da después de la descarga y antes del regreso al tambor para comenzar de nuevo el ciclo. Este tipo de filtro tiene una barra curvaada de diámetro pequeño entre el punto donde la banda deja al tambor y al rodillo de descarga. Esta barra ayuda a mantener la estabilidad dimensional de la banda y asegura una adecuada descarga de la torta. Para facilitar la remoción de la torta de la tela filtrante, se puede utilizar chapas rascadoras, acondicionamiento químico adicional o adición de cenizas volantes, cuando las plantas de tratamiento de agua residual producen lodos grasosos, pegajosos y que contienen cantidades excesivos de lodos residuales activados. Los medios filtrantes de fibras clasificadas producen un filtrado mucho mas limpio, pero su rango de producción es menor que el de los medios elaborados de fibra de monofilamento.

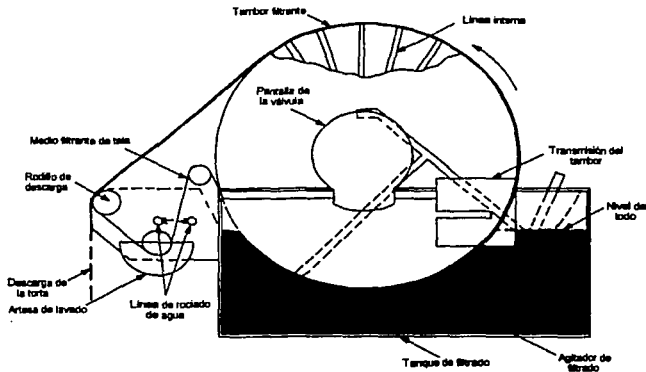


Figura 6.12 Sección transversal de un filtro al vacío de banda de tela.

6.4.1. Equipo de soporte

Los filtros al vacío se pueden adquirir con equipo auxiliar de bomba de vacío, receptor de filtrado y equipo de acondicionamiento de lodo (Figura 6.13). Se recomienda una bomba de vacío por cada filtro, aunque para plantas de gran tamaño, se pueden utilizar menos bombas cuando estén conectadas a un cabezal común. El mantenimiento de las bombas de tipo húmedo es más sencillo

- Agitación del tanque.

La velocidad del tambor establece el tiempo de ciclo y sumersión fija del tiempo de conformación y secado. La selección del medio es elaborada por el distribuidor durante la marcha del equipo. La practica ha demostrado que las telas fabricadas de monofilamento son la mejor opción, ya que resisten al taponamiento y tienen una mayor vida útil. Los cambios en el procedimiento de acondicionamiento en la mezcla o en el tiempo de retención del lodo, ejercen un fuerte impacto en la eficiencia del medio filtrante seleccionado.

6.4.2.2. Otras variables del proceso

La presión de agua de lavado para los filtros al vacío debe ser de 480 KN/m^2 . La producción se estima a través de datos obtenidos por medios filtrantes limpios. Cuando el lavado de la tela es insuficiente, el aumento del agua de lavado puede incrementar la producción de la máquina y ayudar al secado de la torta. La agitación del tanque es esencial para la formación adecuada de la torta; una sobre agitación puede originar una desprendimiento de los flóculos en el lodo, una captura deficiente de sólidos y menores cargas. Se puede requerir de chapas rascadoras, acondicionares químicos excesivos o adición de cenizas volantes para remover la torta sobre la tela filtrante de los filtros al vacío. La concentración de sólidos de carga tiene un efecto crítico en la producción del filtro y en la concentración de los sólidos finales. A mayor concentración de sólidos suspendidos de la carga de lodo, mayor será el nivel de producción del filtro rotatorio al vacío (Figura 6.14) y de la concentración de sólidos suspendidos de la torta (Figura 6.15).

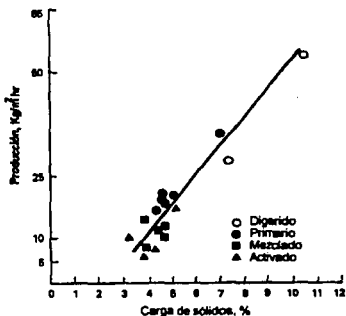


Figura 6.14 Productividad de un filtro al vacío rotatorio en función de la concentración de carga de sólidos suspendidos en el lodo.

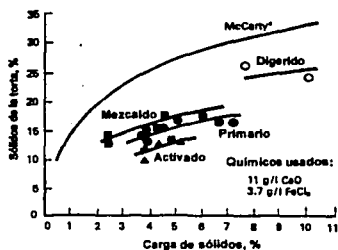


Figura 6.15 Concentración total de sólidos de torta de lodo en función de la concentración de carga de sólidos suspendidos en el lodo.

Regularmente, los lodos de las plantas de tratamiento de agua residual municipal, no se pueden concentrar en porcentajes de 5 a 6 de sólidos totales (ST) debido a que por encima de esta concentración, el lodo es más difícil de bombear, mezclarse con los químicos y distribuirse uniformemente después del acondicionamiento hacia el filtro. El aumento en los niveles de producción sin elevadas concentraciones de carga de lodo, requiere de mayores dosificaciones de químicos y origina una mayor humedad en la torta. Ambas consecuencias afectan el costo de la deshidratación y disposición final del lodo. La menor concentración de sólidos suspendidos en la carga de lodo se considera de 3 %. Con valores de concentración menores, se hace muy difícil producir tortas demasiado espesas o secas para su descarga apropiada. Por esta razón, es importante que el diseño y operación de los procesos de lodo precedentes, tomen en cuenta la concentración de sólidos óptima para el proceso de deshidratación en los filtros al vacío. La operación del proceso se puede mejorar a través del incremento de la carga de sólidos.

6.4.2.3. Datos de desempeño

Así como en los demás sistemas mecánicos de deshidratación, el desempeño óptimo depende del tipo de lodo y su concentración de sólidos, tipo y calidad de acondicionamiento, y modus operandi del filtro. La selección del nivel de vacío, grado de sumersión del tambor, tipo de medio filtrante y tiempo de ciclo, son críticos para su buen desempeño. En las Tablas 6.6 y 6.7 se muestran datos promedios obtenidos para filtros al vacío rotatorios de tela y muelles, para cada tipo de lodo indicado. Se puede producir una concentración mayor de sólidos cuando se opera al 50 % de nivel máximo.

Tabla 6.6 Desempeño típico de la deshidratación a través de filtros de vacío rotatorios – Medio filtrante de tela.

Tipo de lodo	Concentración de carga de sólidos %	Dosificación química ¹ , Kg/Mg de sólidos secos		Producción ² Kg de sólidos secos/m ² /hr	Sólidos de la torta %	
		FeCl ₃	CaO			
Crudo primario	4.5 – 9.0	20 – 40	80 – 100	17 – 40	27 – 35	
WAS	2.5 – 4.5	60 – 100	120 – 360	5 – 15	13 – 20	
P+ WAS	3 – 7	25 – 40	90 – 120		18 – 25	

P + TF	4 - 8	20 - 40	90 - 120	12 - 30	23 - 30
Digerido anaerobicamente:					
P	4 - 8	30 - 50	100 - 130	15 - 35	25 - 32
P + TF	3 - 7	40 - 60	150 - 200	15 - 35	18 - 25
P + WAS	5 - 10	40 - 60	125 - 175	17 - 40	20 - 27
Acondicionado térmicamente:					
P + WAS	6 - 15	0 ³	0	20 - 40	35 - 45

- 1 Todos los valores mostrados son de FeCl₃ y CaO puro. La dosificación debe ser ajustada para cualquiera.
- 2 La producción del filtro depende de la concentración de carga de sólidos. Incrementando la concentración de sólidos genera una mayor producción.
- 3 Algunos lodos tratados térmicamente requieren del acondicionamiento para mantener su recuperación en niveles elevados.

Tabla 6.7 Desempeño típico de la deshidratación a través de filtros de vacío rotatorios - Medio filtrante de muelles.

Tipo de lodo	Concentración de carga de sólidos %	Dosificación química ¹ , Kg/Mg de sólidos secos		Producción ² Kg de sólidos secos/m ² /hr	Sólidos de la torta	
		FeCl ₃	CaO		%	%
Crudo primario	8 - 10	20 - 40	80 - 120	30 - 40	28 - 32	
TF	4 - 6	20 - 30	50 - 70	30 - 40	20 - 32	
P + WAS	3 - 5	10 - 30	90 - 110	12 - 20	23 - 27	
Digerido anaerobicamente:						
P + TF	5 - 8	25 - 40	120 - 160	20 - 30	27 - 33	
P + WAS	4 - 6	25 - 40	100 - 150	17 - 22	20 - 25	

- 1 Todos los valores mostrados son de FeCl₃ y CaO puro. La dosificación debe ser ajustada para cualquiera.
- 2 La producción del filtro depende de la concentración de carga de sólidos. Incrementando la concentración de sólidos genera una mayor producción.

La eficiencia de la remoción de sólidos es el porcentaje real de sólidos de carga recuperados en la torta del filtro. La remoción de sólidos en los filtros al vacío, con un adecuado nivel de acondicionamiento, varía entre 85 y 98 % de un medio de malla gruesa con tejidos cerrados y de bastante lanilla. Los sólidos del filtrado reciclado imponen una carga en la planta de tratamiento y deben ser guardados hasta un mínimo práctico. Sin embargo, es necesario reducir el porcentaje de recuperación para generar una descarga mayor en el filtro y mantener la producción del lodo.

6.4.3. Criterio de selección del equipo

Los filtros al vacío no se recomiendan para las instalaciones nuevas, debido a los elevados costos de ejecución y al uso de grandes cantidades de acondicionadores (Tabla 6.8 y 6.9). Los puntos importantes a examinar en los filtros prensa son los siguientes:

- Selección del medio filtrante.
- Carga de sólidos.
- Requerimientos de acondicionamiento y diseño del subsistema de acondicionamiento.
- Tiempo de retención de lodo previo y después al acondicionamiento.
- Rango de filtración.

Tabla 6.8 Ventajas y desventajas de la filtración al vacío.

Ventajas	Desventajas
La operación es fácil de aplicar debido a que la formación y descarga de la torta de lodo es fácil.	Consumen una cantidad enorme de energía por unidad de lodo deshidratado.
No requiere de operadores calificados.	Las bombas de vacío son ruidosas.
Seguirá operando aunque la dosificación de acondicionamiento químico no sea optimizada, aunque esto puede causar problemas de descarga.	El acondicionamiento con cal y cloruro férrico puede causar problemas de limpieza.
El medio filtrante de muelles tiene una vida útil mayor comparada con cualquier tipo de tela.	La utilización de cal y cloruro férrico puede producir fuertes olores de amoníaco con lodos digeridos.
Los requerimientos de mantenimiento son bajos para una pieza de equipo en operación constante.	El mejor desempeño se alcanza en niveles de carga de 3 a 4 %. Algunos lodos bien acondicionados son filtrados apropiadamente con concentraciones menores a 2 %.
	Los costos del acondicionamiento con cloruro férrico y cal son más elevados que los polímeros. El acondicionamiento con polímero no es siempre efectivo en los filtros al vacío.

Tabla 6.9 Fallas de diseño de instalaciones de filtración al vacío.

Fallas	Problemas generados	Solución
Medio filtrante inadecuado.	Taponamientos del filtro, no brinda una adecuada captura de los sólidos y desprendimiento pobre de la torta.	Reemplazo del medio filtrante.
Utilización inadecuada del acondicionamiento químico.	Captura deficiente de sólidos, nivel bajo de carga de sólidos, y concentración baja de los sólidos de la torta.	Seleccionar los acondicionadores químicos correctos.
Presión inadecuada en las boquillas rociadoras.	Limpieza inadecuada del medio filtrante.	Proveer un bombeo con presiones no menores a 484 kPa.

CONCLUSIÓN

CONCLUSIÓN

Las conclusiones que se derivan del presente trabajo son las siguientes:

El elevado contenido de agua en los lodos generados de las plantas de tratamiento de agua residual municipal, es el factor principal que incrementa su volumen. La aplicación de la deshidratación de lodos, reduce el volumen a tal grado que el lodo adquiere las propiedades de un sólido.

El contenido de los sólidos de los lodos deshidratados es mayor que los porcentajes obtenidos a través del espesamiento.

Los procesos de deshidratación mecánica brindan la capacidad mas elevada de remoción (> 90 %) de los sólidos del influente, y por lo tanto su contenido de sólidos en la torta es mayor.

La aplicación de los procesos de deshidratación es fundamental para cualquier planta de tratamiento, ya que el manejo, tratamiento y/o disposición posterior de los lodos sin deshidratar se puede convertir en un proceso sumamente caro y complicado.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Abrasión. Acción y efecto de raer o desgastar por fricción.

Abrasivos. Material de extremada dureza usado para dar forma por pulimento, raspado o desgaste a otros materiales.

Absorción. La penetración de sustancias externas en los tejidos orgánicos, determinada por la acción de estos mismos. Penetración de una sustancia en el cuerpo de otra.

Acidez. Es la capacidad cuantitativa del agua para reaccionar con los iones hidróxilos.

Acuoso. Abundante en agua.

Adsorbente. Sustancia sólida o líquida, en cuya superficie tiene lugar la adsorción (véase), de otra sustancia.

Adsorción. Incorporación de una sustancia a la superficie de otra.

Advección. La transferencia de calor por desplazamiento horizontal en el aire.

Agua residual. Líquido de composición variada dulce y salina, superficial y subterránea que no haya sufrido degradación o alteraciones en su caudal original.

Alcalinidad. El grado en que una solución es alcalina (pH).

Alcalinidad. Es la capacidad cuantitativa del agua para reaccionar con los iones hidrógeno.

Alcalino. Reciben este calificativo los metales potasio, sodio, litio, rubidio y cesio, por obtenerse de sus respectivos álcalis mediante electrólisis.

Anión. Ión negativo, es decir, átomo o molécula que ha ganado uno o más electrones en un electrolito, siendo atraído por lo tanto el ánodo, al electrodo positivo. Los aniones comprenden los iones no metálicos, los radicales ácidos y el ión hidroxilo.

Ánodo. El electrodo por el que penetra la corriente de un elemento electrolítico de una descarga a través de un gas o de una válvula termoiónica cuando se establece el paso de la corriente, el ánodo está a una potencia positiva con respecto al cátodo, por cuya causa se dirigen hacia los electrones o iones negativos. Una fuerza electromotriz en un elemento eléctrico puede invertir la corriente interna, pero no la polaridad.

Backdrive. Transmisión de respaldo, secundaria.

Biomasa. El peso vivo de una población animal o vegetal.

Carboxil. El radical ácido $-CO(OH)$.

Catión. El ión de un electrolito que transporta carga positiva y marcha hacia el cátodo bajo la diferencia de una diferencia de potencial.

Cátodo. El electrodo a través del cual una corriente sale de un elemento electrolítico, descarga de gas o válvula termoiónica para retornar a un manantial exterior de fuerza electromotriz.

Caudal. Cantidad de agua que mana o corre.

Coagulación. La precipitación de coloides a partir de soluciones, particularmente proteínas.

Coherente. Unido, pero tan ligeramente, que los órganos coherentes pueden ser separados sin desgarro.

Cohesión. Atracción entre las moléculas de un líquido, que permite la formación de gotas y películas delgadas. Fuerzas de atracción por cuya causa las partículas se mantienen unidas para formar una pasta.

Cojinete de rodillos. Cojinete para árboles de transmisión que consiste en dos anillos de rodamiento de acero, interior y exterior, entre los cuales se alojan cierto número de rodillos de acero, sujetos a una linterna o jaula.

Cojinete. Apoyos dispuestos para sostener un árbol de rotación en su posición correcta.

Colisión. En las partículas, el contacto no es aparente al menos que haya captura. Colisión significa un casi acercamiento, tal que haya una interacción más o menos recíproca debidas a las fuerzas asociadas a las partículas, aunque no haya impacto.

Coloidal, estado. Estado de subdivisión de la materia en que el tamaño de las partículas varía desde las dimensiones correspondientes a las que constituyen las soluciones moleculares verdaderas hasta las que dan suspensiones groseras. El diámetro de las partículas se halla, pues, comprendido entre 10^{-5} y 10^{-7} cm.

Coloide. Toda sustancia que adopta fácilmente el estado coloidal.

Copolímero. Polímero formado por la reacción de mas de una especie de monómero, por ejemplo poli(estireno) butadieno.

Corrientes de Foucault. Corrientes parásitas que aparecen en las masas metálicas por efecto de la inducción y se traducen por una pérdida de energía eléctrica transformada en calor.

Decaimiento. Pérdida progresiva de radiactividad que experimenta una masa de materia radiactiva a medida que va aumentando la proporción de sus átomos estables y disminuyendo el número de las que se desintegran.

Decantación. Efecto de verter el líquido de una suspensión que ha sedimentado.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅). Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población heterogénea para oxidar en 5 días la materia orgánica de una muestra de agua.

Demanda química de oxígeno. Cantidad de oxígeno requerida para oxidar, bajo condiciones específicas, la materia orgánica y la orgánica oxidable contenida en el agua. Se expresa en mg/dm³ de oxígeno y proporciona una medida de la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas, bajo las condiciones en las que se efectúa esta prueba.

Densidad. La masa de la unidad de volumen de una sustancia, expresada en unidades tales como gramos por centímetro cúbico.

Descarga. Conjunto de aguas residuales que se vierten o disponen en algún cuerpo receptor.

Desorción. La eliminación de una sustancia de la superficie en la que esta absorbida.

Disociación. La ruptura irreversible o temporal de una molécula en átomos o moléculas más sencillas.

Eductor. Dispositivo de forma de eyector para mezclas de fluidos.

Electrodo. Conductor por medio del cual se mantiene una corriente dentro de un líquido (como el caso de un elemento electrolítico) o bien dentro de un gas (como el caso de un tubo de descarga).

Electrolito. Todo conductor electrolito, especialmente los líquidos. Sustancia que al ser disuelta en un disolvente adecuado (generalmente el agua) se conduce electrolíticamente.

Endógeno. Que se origina en el interior.

Eyector. Cualquiera de los distintos tipos de bombas de chorro utilizadas para retirar materiales fluidos de un espacio.

Formaldehídos. HCHO, punto ebullición $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$; gas de olor picante, fácilmente soluble en el agua y que generalmente se emplea como solución acuosa.

Gasto. Cantidad de fluido suministrado en la unidad de tiempo.

Inerte. Inactivo, ineficaz, estéril, inútil.

Ionización. La producción de iones por una sustancia eléctricamente neutra.

Monofilamento. Filamento simple de longitud indefinida. Se usa para suturas quirúrgicas, hilo de pescar, brochas, etc., y en diámetros más finos para tejidos.

Monómero. Sustancia formada por moléculas simples, en contraste con moléculas asociadas y polímeros.

Muelle. Dispositivo capaz de deformarse almacenando energía. Se utiliza para absorber choques, como acumulador de potencia, para mantener la presión entre dos superficies de contacto y para medir fuerzas. También se llama resorte.

Paleta. Cada una de las tablas de madera o planchas metálicas, planas o curvas, que se fijan en las ruedas hidráulicas para recibir o impulsar agua, aceite u otros líquidos.

Patógeno. Dícese de los elementos y medios que originan y desarrollan las enfermedades.

pH. Es el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno en una solución acuosa o el logaritmo del recíproco de la concentración de iones hidrógeno.

Poliamina. Nombre genérico de los cuerpos de forma $(\text{rNH}_2)_n$, en el cual r es el etileno, el propileno u otra olefina. Las poliaminas se emplean como detergentes, disolventes, etc.

Poliésteres. Serie de polímeros formada por la condensación de alcoholes polihídricos y ácidos policarboxílicos o anhídridos.

Polimerización. Combinación de varias moléculas para formar una molécula de igual fórmula empírica que las simples.

Polimorfismo. Propiedad que poseen ciertos compuestos de cristalizar en varias formas que son genéticamente distintas.

Polinuclear. Multinuclear, que tiene muchos núcleos.

Precipitación. La formación de un sólido insoluble por alguna reacción que se produce en una solución.

Redox. Abreviación de oxidación-reducción.

Reología. La ciencia de la fluidez de la materia. El estudio crítico de la elasticidad, viscosidad y plasticidad.

Scroll. Tornillo transportador, tornillo sin fin.

Síntesis. Operación inversa al análisis, consistente en combinar cuerpos simples para formar compuestos o cuerpos compuestos para obtener otros más complejos. Composición o reconstrucción de un todo a partir de sus constituyentes formados separadamente.

Sólidos disueltos. Substancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua.

Sólidos sedimentables. Materiales que se depositan en el fondo de un recipiente debido a la operación de sedimentación.

Sólidos suspendidos totales. Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos coloidales, cuyo tamaño de partícula no pase el filtro estándar de fibra de vidrio.

Sólidos totales volátiles. Cantidad de materia, capaz de volatizarse por el efecto de la calcinación a 550 °C en un tiempo de 15 a 20 minutos.

Sólidos totales. Suma de los sólidos suspendidos totales y sólidos disueltos.

Sólidos suspendidos volátiles. Sólidos constituidos por sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos coloidales, capaces de volatizarse por el efecto de la calcinación a 550 °C en un tiempo de 15 a 20 minutos.

Soluto. Dícese de la sustancia que esta disuelta en otra.

Torta de lodo. Sólidos concentrados en una porción semejante a un pastel, que son separados y atrapados mediante cualquier proceso de deshidratación.

Transmisión de velocidad variable. Accionamiento eléctrico cuya velocidad puede variar de modo continuo entre amplios límites.

Transmisión por engranaje. Conjunto de engranajes para transmisión de movimientos.

Transmisión. Cualquier sistema de piezas móviles que transmiten movimiento.

Van der Waals, fuerzas de. Fuerzas débiles de atracción que se ejercen entre moléculas o cristales.

Volátil. Transformar un cuerpo sólido o líquido en vapor o gas.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

1. Clementina Ramírez. 1992. "Tratamiento de Aguas Residuales Industriales". Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco.
2. Daniel N. Lapedes. 1981. "Diccionario de Términos Científicos y Técnicos". Marcombo, S.A., Barcelona.
3. Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York. 1986. "Manual de Tratamiento de Aguas Negras". Editorial Limusa, S.A. de C.V., México, D.F.
4. EPA 832-R-94-009. June 1994. "Biosolids Recycling: Beneficial Technology For a Better Environment". Environmental Protection Agency, United States.
5. EPA/625/1-87/014 Design Manual. September 1987. "Dewatering Municipal Wastewater Sludges". Environmental Protection Agency, United States.
6. George Tchobanoglous/Hilary Theisen/Samuel Vigil. 1993. "Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues". Irwin Mc Graw-Hill, United States.
7. Issa S. Oweis/Raj P. Khera. 1998. "Geotechnology of Waste Management, Second Edition. PWS Publishing Company, United States.
8. John Wiley and Sons, Inc. 1996. "Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales". Editorial Limusa, S.A. De C.V., México, D.F.
9. Kurt Gieck/Reiner Gieck. 30ª Edición, 2000. "Manual de Fórmulas Técnicas". Algaomega Grupo Editor, S.A. De C.V., México, D.F.
10. Metcalf & Eddy, Inc. 1996. "Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización, Vol. II". Mc Graw-Hill / Interamericana Editores, S.A. De C.V., México, D.F.
11. Paul N. Cheremisinoff. 1994. "Sludge Management and Disposal". PTR Prentice Hall, New Jersey.
12. R. S. Ramalho. 1996. "Tratamiento de Aguas Residuales". Editorial Reverté, S. A., Barcelona.
13. T. C. Collocot. 1979. "Chambers/Diccionario Científico y Tecnológico Español/Inglés/Francés/Alemán". Ediciones Omega, S.A. de C.V., Barcelona.
14. Tomás de Galiana Minyot. 1980. "Pequeño Larousse de Ciencias y Técnicas". Litografía Senefelder, México.