



AUTORES

Leonel Contreras Gómez,
Alejandra Martín Domínguez,
Arturo González Herrera,
Martín Piña Soberanis,
María de Lourdes
Rivera Huerta

Diseño funcional de sistemas de filtración directa a presión para remover arsénico o hierro y manganeso de agua para uso y consumo humano

COLECCIÓN
INVESTIGACIÓN



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

Diseño funcional de sistemas de filtración directa a presión para remover arsénico o hierro y manganeso de agua para uso y consumo humano

Autores

Leonel Contreras Gómez, Alejandra Martín Domínguez,
Arturo González Herrera, Martín Piña Soberanis,
María de Lourdes Rivera Huerta



IMTA

Octubre, 2022

577.22 Contreras, Leonel (autor)
L22 *Diseño funcional de sistemas de filtración directa a presión para remover arsénico o hierro y manganeso de agua para uso y consumo humano/* Autores: Leonel Contreras Gómez, Alejandra Martín Domínguez, Arturo González Herrera, Martín Piña Soberanis, María de Lourdes Rivera Huerta, autores. -- Jiutepec, Mor. : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2022.
203 p.

ISBN: 78-607-8629-29-9

ISBN colección Técnica: 978-607-8629-24-4

1. Hidráulica 2. Cómputo 3. Datos

AUTORES

Leonel Contreras Gómez, Alejandra Martín Domínguez, Arturo González Herrera, Martín Piña Soberanis, María de Lourdes Rivera Huerta

D.R. © 2021 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,
62550 Jiutepec, Mor., México
Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Cuidado de la edición: Jesús Hernández Sánchez, Gema Alín Martínez Ocampo

Diseño editorial y formación: Gema Alín Martínez Ocampo

Diseño de portada: Gema Alín Martínez Ocampo

Fotografías de entrada de capítulo: Archivo IMTA

Fotografía de portada: <https://www.pexels.com/es-es/>

Webmaster: Claudia Patricia Martínez Salgado

<https://doi.org/10.24850/b-imta-2022-09>

ISBN: 78-607-8629-29-9

ISBN colección Técnica: 978-607-8629-24-4

Agosto de 2022, Jiutepec, Morelos

Hecho en México / Made in Mexico

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Las opiniones, datos y citas presentados en esta obra son responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan, necesariamente, los puntos de vista de la institución que edita esta publicación.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

Índice

Prólogo	i
Introducción	v
Contaminantes de estudio	v
Hierro y manganeso	v
Arsénico	vii
Filtración directa	viii
1. Parámetros de diseño	1
1.1. Datos de operación	1
1.2. Tasas de filtración y retrolavado recomendadas	1
1.3. Área de filtración requerida	2
1.4. Velocidades en tuberías	3
1.5. Materiales filtrantes	3
2. Selección del número y tamaño de filtros	5
2.1. Área de filtración por filtro	5
2.2. Diámetro comercial de filtro	6
2.3. Área comercial de filtro	8
2.4. Tasa de filtración de diseño	8
2.5. Tamaño de los filtros	10
2.5.1. Altura del cuerpo del filtro	10
2.5.2. Presión de diseño	10
2.5.3. Espesor del cuerpo del filtro	12
2.5.4. Espesor de las tapas toriesféricas	13
2.5.5. Altura de las tapas toriesféricas	14
2.5.6. Peso del filtro	14
2.6. Número de toberas	15
2.7. Tuberías	19
2.7.1. Diámetros de tuberías	22
2.7.1.1. Tuberías de agua cruda y agua tratada	23
2.7.1.2. Tuberías de conexión a filtros AC y AT	25
2.7.1.3. Tuberías de agua de retrolavado	27
2.7.1.4. Tubería de recirculación de agua clarificada	28
2.7.1.5. Tubería de extracción de lodos	31
2.7.2. Longitudes de tuberías	33
2.7.2.1. Tuberías de agua cruda	33
2.7.2.2. Tuberías de agua tratada	35
2.7.2.3. Tubería de conexión a filtro desde el múltiple de agua cruda	36
2.7.2.4. Tubería de conexión de filtros a múltiple de agua tratada ..	37
2.7.2.5. Tubería de entrada de agua para el retrolavado de filtros ...	38
2.7.2.6. Tubería de salida del agua de retrolavado de los filtros	40
2.7.2.7. Tubería de recirculación	42
2.7.2.8. Tubería de extracción de lodos	43

2.8.	Sedimentador	43
2.8.1.	Diámetro del tanque sedimentador	44
2.8.2.	Diseño de la tolva	44
2.8.3.	Diseño del cilindro del sedimentador	46
2.8.4.	Espesor del cuerpo del sedimentador	46
2.8.5.	Peso de la tolva	47
2.8.6.	Peso del cilindro del sedimentador	48
2.8.7.	Peso de la tapa del sedimentador	49
2.8.8.	Tanque de lodos	49
2.9.	Tanque de agua cruda o agua tratada	50
2.9.1.	Volumen de concreto	51
2.9.2.	Cantidad de acero de refuerzo	55
2.9.3.	Superficie de cimbra	55
2.10.	Capacidad del equipo de bombeo	56
2.10.1.	Carga de bombeo de retrolavado	56
2.10.1.1.	Pérdida de carga por fricción en la tubería de retrolavado	59
2.10.1.2.	Pérdidas de carga locales en la tubería de retrolavado	61
2.10.2.	Potencia del equipo de bombeo de retrolavado	61
2.10.2.1.	Potencia de la bomba	61
2.10.2.2.	Potencia del motor	62
2.11.	Menor costo de operación	62
2.11.1.	Costo de energía	63
2.11.1.1.	Para el periodo de abril a octubre	65
2.11.1.2.	Para el periodo de octubre a abril	66
2.11.1.3.	Cargo promedio anual	66
2.11.2.	Costo por retrolavado	66
2.12.	Menor costo total	67
2.12.1.	Costo de material de los filtros	67
2.12.2.	Costo de los medios filtrantes y de soporte	68
2.12.3.	Costo de toberas	69
2.12.4.	Costo del equipo de bombeo para retrolavado	69
2.12.5.	Costo de tuberías	70
2.12.6.	Costo de válvulas de mariposa	71
2.12.7.	Costo del sedimentador	73
2.12.8.	Costo del tanque de agua cruda o tratada	74
2.12.9.	Costo total	74
2.13.	Menor área de terreno	75
2.13.1.	Área de la batería de filtros	75
2.13.2.	Área del tanque sedimentador	78
2.13.3.	Área necesaria para el tanque de agua cruda o tratada y tanque de lodos	79
2.13.4.	Área total para las estructuras básicas	79
3.	Diseño de filtración y recuperación de agua de retrolavado	81
3.1.	Tasas de filtración durante la operación	81
3.1.1.	Tasa de filtración de diseño (v_{FD})	81
3.1.2.	Tasa de filtración de trabajo (v_{FT})	81

3.1.3.	Tasa de filtración de trabajo durante el retrolavado (v_{FTR}).....	82
3.2.	Dimensionamiento de filtros.....	83
3.3.	Retrolavado y lodos.....	84
3.3.1.	Volumen de agua de retrolavado, de lodos y de recirculación	85
3.3.2.	Tanque sedimentador	86
3.3.3.	Tanque de lodos	87
3.4.	Diámetro de tuberías.....	87
3.4.1.	Tubería de agua cruda y agua tratada.....	88
3.4.2.	Tubería de conexión a filtros AC y de conexión a filtros AT.....	88
3.4.3.	Tubería de retrolavado.....	88
3.4.4.	Tubería de recirculación de agua clarificada.....	88
3.4.5.	Tubería de extracción de lodos del sedimentador	89
3.5.	Espesores	89
3.5.1.	Presiones de diseño de los filtros	89
3.5.2.	Cuerpo del filtro	89
3.5.3.	Tapas toriesféricas	89
3.5.4.	Sedimentador	90
3.6.	Pérdidas de carga	90
3.6.1.	Por toberas	90
3.6.1.1.	Número de toberas.....	90
3.6.1.2.	Durante la filtración	90
3.6.1.3.	Durante el retrolavado.....	96
3.6.2.	Por tuberías y filtros durante la filtración	99
3.6.2.1.	Pérdidas por fricción en tuberías.....	100
3.6.2.2.	Pérdidas locales en tuberías	108
3.6.2.3.	Pérdidas de carga en el filtro	109
3.6.2.4.	Pérdida de carga total durante la filtración	116
3.6.3.	Por tuberías y filtros durante el retrolavado.....	117
3.6.3.1.	Pérdidas por fricción en tuberías	117
3.6.3.2.	Pérdidas locales en tuberías.....	118
3.6.3.3.	Pérdidas de carga en el filtro	119
3.6.3.4.	Pérdida de carga total durante el retrolavado.....	123

4. Tanques de agua cruda y agua tratada125

4.1.	Dimensiones de la cámara de bombeo	126
4.1.1.	Caudal por equipo de bombeo	126
4.1.2.	Diámetro de la campana de succión de la bomba.....	128
4.1.3.	Sumergencia	129
4.1.4.	Nivel mínimo del agua en el tanque.....	130
4.1.5.	Ancho mínimo de la cámara de bombeo del tanque.....	132
4.1.6.	Largo mínimo de la cámara de bombeo del tanque.....	133
4.2.	Tanque de agua cruda.....	134
4.3.	Tanque de agua tratada	136

5. Equipos de bombeo139

5.1.	Equipo de bombeo a filtros.....	139
5.2.	Equipo de bombeo de retrolavado	139
5.3.	Equipo de bombeo de distribución.....	140

5.4.	Equipo de bombeo de recirculación.....	140
5.5.	Carga neta de succión positiva disponible (NPSH)	141
6.	Reactivos	145
6.1.	Química del cloro.....	145
6.2.	Química del hierro.....	146
6.3.	Química del manganeso	147
6.4.	Química del arsénico	148
6.5.	Dosis de reactivos	149
6.5.1.	Ácido hipocloroso (HOCl)	149
6.5.2.	Gas cloro (Cl ₂)	150
6.5.3.	Hipoclorito de sodio (NaOCl).....	151
6.5.4.	Cloruro férrico (FeCl ₃)	151
6.5.5.	Polímero	152
6.6.	Flujo másico de reactivos.....	153
6.7.	Flujo volumétrico de reactivos.....	155
6.8.	Cantidad de reactivos en almacenamiento.....	156
7.	Costos de operación	159
7.1.	Costos por día	159
7.1.1.	Costo de reactivos por día.....	160
7.1.1.1.	Gas cloro (Cl ₂).....	160
7.1.1.2.	Hipoclorito de sodio (NaOCl)	160
7.1.1.3.	Cloruro férrico (FeCl ₃).....	161
7.1.1.4.	Polímero	161
7.1.1.5.	Costo total de reactivos por día.....	162
7.1.2.	Costo de energía eléctrica por día	162
7.1.2.1.	Bombeo a filtros.....	162
7.1.2.2.	Retrolavado	163
7.1.2.3.	Bombeo a distribución o a tanque de almacenamiento	163
7.1.2.4.	Recirculación	163
7.1.2.5.	Costo total de energía eléctrica por día.....	164
7.1.3.	Costo de mano de obra y mantenimiento por día	164
7.1.3.1.	Mano de obra	164
7.1.3.2.	Mantenimiento	165
7.1.3.3.	Costo total de mano de obra y mantenimiento por día.....	166
7.2.	Costos por metro cúbico de agua tratada	166
7.2.1.	Costo de reactivos por metro cúbico tratado	167
7.2.1.1.	Gas cloro (Cl ₂).....	167
7.2.1.2.	Hipoclorito de sodio (NaOCl).....	167
7.2.1.3.	Cloruro férrico (FeCl ₃)	167
7.2.1.4.	Polímero	168
7.2.1.5.	Costo total de reactivos por metro cúbico tratado.....	168
7.2.2.	Costo de energía eléctrica por metro cúbico tratado	168
7.2.2.1.	Bombeo a filtros.....	168
7.2.2.2.	Retrolavado	169
7.2.2.3.	Bombeo a distribución o a tanque de almacenamiento	169
7.2.2.4.	Recirculación	169
7.2.2.5.	Costo total de energía eléctrica por metro cúbico tratado	170

7.2.3. Costo de mano de obra y mantenimiento por metro cúbico tratado	170
7.2.3.1. Mano de obra.....	170
7.2.3.2. Mantenimiento	171
7.2.3.3. Costo total de mano de obra y mantenimiento por metro cúbico tratado.....	171
7.3. Costo total de operación.....	171

Anexos	175
---------------------	------------

Referencias	191
--------------------------	------------

Índice figuras	194
-----------------------------	------------

Índice tablas	196
----------------------------	------------



Prólogo

Existen muchos métodos para la remoción de arsénico en agua de abastecimiento público. En 2010, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua evaluó a escala piloto siete tecnologías para remoción de arsénico considerando eficiencia, complejidad, costos de inversión y operación (nanofiltración, coagulación-floculación-sedimentación-filtración en lechos granulares, electrocoagulación, adsorción en medios específicos, deionización capacitiva coagulación-microfiltración y filtración directa). La más favorable resultó ser la coagulación-floculación-sedimentación-filtración, sin embargo, en estudios posteriores se demostró que cuando la concentración del arsénico es menor a 0.150 mg/L, la filtración directa (constituida por procesos de oxidación, coagulación y filtración en lecho dual arena-antracita) es la opción más conveniente por su sencillez en operación y mantenimiento, así como por tener el menor costo de tratamiento; incluso, está recomendada por la USEPA en su documento *Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems*, EPA 816-R-03-014, 2003.

En el caso de la remoción de manganeso, cuando este elemento se encuentra en el agua en estado oxidado y precipitado, se elimina usando tratamientos clásicos de separación como sedimentación y filtración. Los problemas se agudizan cuando se encuentra en forma soluble, ya que para su eliminación se emplea un proceso de oxidación seguido por coagulación, sedimentación y/o filtración de los precipitados resultantes. Existen otros procesos de remoción que incluyen: oxidación y adsorción sobre óxidos de manganeso, intercambio iónico, procesos biológicos y tratamiento en la fuente de abastecimiento.

Cuando el hierro y el manganeso se encuentran juntos, o únicamente el manganeso, existe una opción eficiente, sencilla y económica para su remoción, se trata de una tecnología desarrollada por el IMTA mediante el uso de zeolita natural tipo clinoptilolita recubierta con óxidos de manganeso.

Para ambos sistemas de tratamiento (remoción de arsénico, así como de hierro y manganeso) se puede aplicar la filtración directa, por lo que la metodología de dimensionamiento es similar, con ciertas particularidades en cuanto a: tasas de filtración, tipo y espesor de lechos filtrantes, tipo de reactivos, tasas de retrolavado, tiempos de sedimentación para el espesado de los lodos, entre otros.

En México, el proceso de filtración directa (FD) se encuentra ubicado en el 2° lugar por el caudal producido (20.324 m³/s) y en el 4° lugar por el número de plantas (113) construidas en el país (CONAGUA, 2019).

Los principales riesgos que tiene este tipo de sistema son el diseño, construcción y operación inadecuada, lo que conlleva a una mala calidad del agua.

Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de la secuencia de cálculo para el diseño de procesos e hidráulica de plantas potabilizadoras de FD con filtros a presión. Está dirigido a profesionales del área de ingeniería que se dediquen al desarrollo de proyectos funcionales y ejecutivos de plantas potabilizadoras y a los supervisores de los mismos.

La estructura se basa en la experiencia del IMTA, información especializada, normas y manuales técnicos vigentes referentes a metodología, criterios y recomendaciones para calcular: el número de filtros y sus dimensiones, diámetros de tuberías, capacidad de tanque de agua tratada, dimensión de espesor de lodos producto del retrolavado de filtros, cárcamos de lodos y de agua tratada, volúmenes y tiempos de recirculación de agua clarificada del espesor para optimizar el proceso, así como el arreglo general de la planta potabilizadora.

El diseño de este tipo de sistemas, aunque se puede encontrar en diferentes libros especializados, no está sistematizado para cubrir todos los elementos que se requieren en la conceptualización de diseños funcionales completos, que sirvan a su vez para el diseño ejecutivo que lleve a la construcción de las potabilizadoras.

Este libro es una guía, paso a paso, de todos los cálculos necesarios para dimensionar los componentes requeridos para que una planta potabilizadora de FD, utilizada en la remoción de hierro y manganeso, o arsénico, funcione adecuadamente.

En la introducción se menciona la problemática en la salud de los consumidores y en la infraestructura hidráulica que representa la presencia en el agua para abastecimiento público de los contaminantes de interés, así como la descripción general de lo que implica el uso de la filtración directa en la remoción de estos contaminantes. También se señala la información requerida para iniciar los cálculos y el diagrama que rige el diseño de este tipo de sistemas.

1 *Parámetros de diseño.*

Se dan recomendaciones importantes sobre los valores que deben tener los parámetros de operación, los cuales son el resultado de muchos años de experiencia del grupo de potabilización del IMTA, en el diseño y operación de este tipo de sistemas para la remoción de hierro y manganeso, así como arsénico.

2 *Selección del número y tamaño de Filtros.*

Es una parte importante del proceso de diseño, porque permite seleccionar el número y tamaño de los filtros, con base en los costos de operación, inversión o de menor área requerida, optimizando la configuración de la planta potabilizadora.

3 *Diseño de filtración y recuperación de agua de retrolavado.*

Una vez seleccionada la mejor configuración se dimensionan todos los componentes de la planta: estructura de los filtros, sistema de retrolavado de filtros y tratamiento de lodos, diámetro de tuberías, pérdidas de carga, entre otros.

4 *Tanques de agua cruda y tratada.*

Proporciona todos los elementos para el dimensionamiento de los tanques de almacenamiento de agua cruda y/o agua tratada.

5 *Equipos de bombeo.*

Se calcula la capacidad de los equipos de bombeo requeridos para la filtración, el retrolavado, la distribución del agua a la red y de recirculación para recuperar el agua de retrolavado.

6 *Reactivos.*

Se hacen los cálculos para estimar los requerimientos de los reactivos químicos, como el cloro, cloruro férrico y polímero, según sea el caso del contaminante a remover.

7 *Costos de operación.*

Se calculan los costos de operación, desglosados por requerimientos de reactivos, energía eléctrica, mano de obra y mantenimiento. Esto permite tener un estimado preliminar, necesario en todo proyecto funcional, del costo por metro cúbico de agua tratada.



Introducción

Contaminantes de estudio

Hierro y manganeso

El hierro y el manganeso se encuentran generalmente juntos en agua subterránea que tiene un contenido alto en dióxido de carbono y bajo en oxígeno disuelto, por lo que ambos elementos se encuentran en forma reducida y disuelta como hierro ferroso Fe(II) e ion manganesoso Mn(II). El agua natural que contiene estos metales, al ser bebida, no produce efectos nocivos a la salud, sin embargo, cuando se expone al aire se oxida el hierro a Fe(III) y el manganeso a Mn(IV), lo que provoca la formación de precipitados coloidales que vuelven turbia, coloreada y altamente inaceptable al agua desde el punto de vista estético; además de que manchan la ropa y los muebles de baño en contacto con esta agua y causan obstrucción en los sistemas de distribución. El hierro también imparte sabor al agua, el cual es detectable a concentraciones mayores a 0.3 mg/L.

Las razones antes expuestas son la base para que la normatividad mexicana, a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua (NOM-127), haya limitado la concentración de estos elementos en agua para uso y consumo humano en 0.3 mg/L para el hierro y en 0.15 mg/L para el manganeso.

Para separar estos contaminantes del agua puede emplearse un método de oxidación, lo que provoca la formación controlada de precipitados, sin embargo, ambos pueden formar complejos estables cuando el agua contiene además materia orgánica (sustancias húmicas), lo que dificulta el tratamiento. En ausencia de materia orgánica la oxidación del hierro se logra rápidamente mediante cloración o aireación, y los sólidos particulados producidos pueden retenerse eficientemente en filtros granulares de lecho profundo. Por su parte, la oxidación de manganeso es una reacción lenta con cualquiera de los dos oxidantes mencionados anteriormente y para su aceleración es necesario incrementar el pH del agua a valores superiores a 9.5 cuando se utiliza aireación, y mayores a 8.4 con cloro. Es posible remover el manganeso a valores de pH natural del agua mediante el uso de otros oxidantes químicos más fuertes, como el

permanganato de potasio o el ozono, pero tienen la desventaja del alto costo asociado y de requerir un cuidadoso control en la dosificación.

La oxidación con aire se recomienda para agua que contiene solo hierro, con concentraciones mayores a 5 mg/L, con el fin de disminuir los costos de reactivos para la oxidación; sin embargo, se deberá realizar un análisis de costo de construcción y operación del sistema para determinar cuál es la mejor alternativa. Dependiendo de las características del agua puede ser necesario un tiempo de reacción de algunos minutos después de la aireación. El equipo usado en este proceso es comúnmente un aireador, un tanque de contacto y filtros granulares de lecho dual antracita-arena para retener los precipitados.

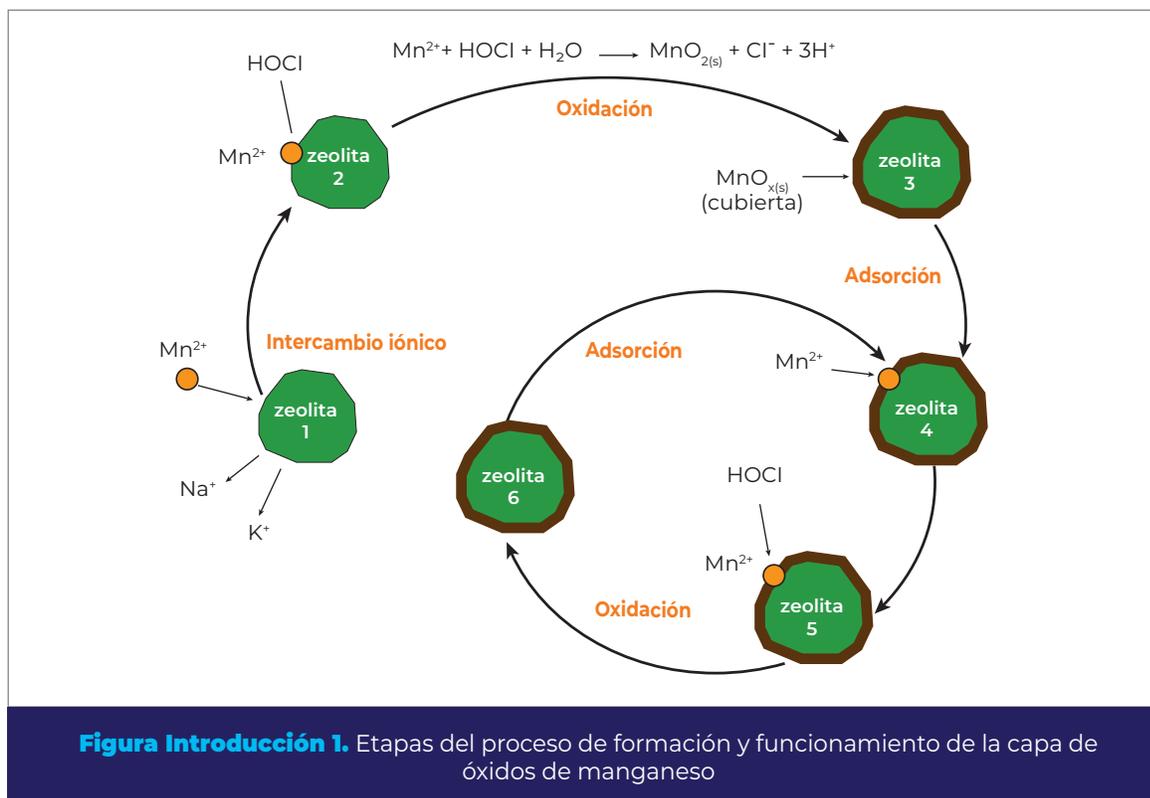
El proceso de cloración-filtración consiste normalmente de un sistema de dosificación de gas cloro o hipoclorito, con filtros de lecho dual arena-antracita, y se sugiere para tratar agua que contiene sólo hierro en concentraciones menores a 5 mg/L.

Por otro lado, para la remoción por separado o simultánea de hierro y manganeso¹, la tecnología desarrollada por el IMTA se basa en la combinación de tres etapas: a) la adsorción-oxidación del manganeso disuelto sobre un lecho de zeolita natural granular recubierta con óxidos de manganeso y b) la oxidación, precipitación y retención de las partículas de hierro en el mismo lecho.

Para la remoción de manganeso la técnica consiste en la combinación de tres procesos que se llevan a cabo en un sistema de filtración: 1) intercambio iónico como fase inicial, donde el manganeso disuelto se fija en la superficie de zeolita natural granular, 2) la posterior oxidación del manganeso sobre la superficie del medio, la cual permite la formación de una película de óxidos ($MnOx(s)$) sobre el grano del material y 3) la remoción del manganeso disuelto en el agua, por adsorción sobre la película de óxidos formada sobre el grano del material. La Figura Introducción 1 muestra esta secuencia. Esta película tiene alta selectividad por los iones de manganeso, $Mn(II)$. Oxidando el manganeso adsorbido en la superficie del grano se regenera la capacidad de adsorción del medio, asegurando una continua remoción de manganeso durante la filtración.

Este proceso presenta aspectos positivos tales como: largas carreras de operación debido a que la adsorción genera poca pérdida de carga hidráulica en el lecho; el adsorbente se regenera con la aplicación continua de cloro o hipoclorito de sodio, permitiendo que siempre se mantenga una alta capacidad de adsorción del manganeso disuelto, el material se acondiciona in-situ sin la necesidad de adicionar otras sustancias químicas, además de la alta disponibilidad de la zeolita en México.

¹ Aplica para concentraciones máximas de Fe y Mn de 2 y 3 mg/L respectivamente. Para $Fe > 2$ mg/L se recomienda su remoción total o parcial previa hasta alcanzar esta concentración máxima, y para $Mn > 3$ mg/L implementar un proceso de filtración por etapas (en serie).



Arsénico

El agua de las fuentes de abastecimiento puede contener arsénico, y una exposición continua al mismo mediante su ingestión puede ocasionar un riesgo significativo de cáncer y lesiones cutáneas entre otras afecciones a la salud. El límite permisible que establece la nueva NOM-127 es de 0.1 mg/L, al igual que el valor de referencia de las Guías para la Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Estudios realizados por el IMTA (IMTA, 2013a) pusieron en evidencia la eficiencia de la filtración directa como la mejor opción para remover arsénico hasta concentraciones de 0.150 mg/L (a concentraciones mayores se generan demasiados lodos que acortan las carreras de filtración). Esto dio lugar al diseño y construcción de varias plantas potabilizadoras en la Comarca Lagunera.

El esquema de tratamiento de una planta potabilizadora de filtración directa para remoción de arsénico consiste en lo siguiente: el agua se somete a oxidación en línea con cloro o hipoclorito de sodio, con la finalidad de convertir todo el As (III) a As(V); posteriormente se realiza la coagulación en línea por la adición de cloruro férrico ($FeCl_3$). Los procesos anteriores promueven la adsorción y co-precipitación del arsénico con los flóculos (diminutos conglomerados) de hidróxido de hierro producido, los cuales pueden ser removidos en filtros rápidos, con lecho dual de arena-antracita.

Filtración directa

Se define a la filtración directa como un proceso fisicoquímico de tratamiento de agua que se conforma por la adición de reactivos en línea y filtración. Lo más común es que esté constituido por: a) oxidación en línea y filtración, o b) coagulación en línea a la entrada de filtros granulares. Este segundo proceso se utiliza para clarificación de agua superficial con baja turbiedad (<20 NTU) y bajo color (<25 U Pt-Co), por lo que no requiere unidades de floculación y sedimentación.

La filtración directa por lo tanto puede ser usada en la remoción de hierro y/o manganeso (oxidación + filtración/adsorción), o de arsénico (oxidación + coagulación + filtración).

Los principales parámetros que determinan su eficiencia están ligados a las características del agua de entrada (contenido de arsénico, hierro, manganeso y/o turbiedad), características del medio filtrante (tipo, tamaño efectivo del grano, espesor del lecho, coeficiente de distribución) y condiciones de operación (tamaño de los flóculos, tasas y tiempos de filtración y retrolavado).

Este tipo de sistemas pueden implementarse tanto en filtros a presión como a gravedad y los factores operacionales son similares (U.S. EPA, 2006). Con base en la experiencia propia del IMTA, se recomienda seleccionar filtros a presión para tratar caudales inferiores a los 150 L/s, debido a que con caudales más elevados se incrementa el número de filtros requeridos y, por lo tanto, su operación se hace más compleja y costosa (IMTA, 2017a). Sin embargo, es recomendable realizar un análisis de costo de construcción y operación para ambos tipos de filtros y seleccionar la opción más viable para el caso particular de cada planta.

En la Figura Introducción 2 se muestra las diferencias básicas entre los filtros que operan a presión y a gravedad, y en la Figura Introducción 3 un diagrama de proceso general de un sistema de filtración directa con filtros a presión. Cabe mencionar que este libro solamente se enfoca en el diseño de filtros a presión.

Para remoción de arsénico con este proceso, es posible obtener agua con concentración de arsénico menor a 0.010 mg/L, valor que cumple con el límite permisible de la NOM-127 y el valor de referencia de las Guías de Calidad de Agua Potable de la OMS. En cuanto al hierro y al manganeso, se logran calidades que cumplen sin problema con la normatividad.

Para cualquier aplicación del proceso de FD, es importante que las potabilizadoras incluyan un sistema de recuperación del agua empleada en el retrolavado de los filtros,

que consta de un sedimentador para separar los lodos (precipitados de hidróxidos de hierro o manganeso), la dosificación de polímero en la tubería de descarga de filtros al sedimentador y un filtro prensa para desaguado de los lodos. El agua clarificada del sedimentador se recircula al inicio del sistema de tratamiento. También se sugiere que el agua potabilizada se almacene en un tanque, desde donde se envíe a la red de distribución por bombeo; esto es más recomendable que inyectar el agua a la red directamente de la salida de los filtros, para evitar problemas en la operación de la potabilizadora por los cambios de presión en la red.

La secuencia de cálculo que se muestra en la Figura Introducción 4 es la propuesta general para baterías de filtros a presión, de flujo descendente y tasa constante, empacados con uno o dos medios filtrantes. El inicio de los cálculos se basa en seleccionar el número de filtros más adecuado para cumplir con los parámetros de operación, y que a su vez sea el arreglo óptimo dependiendo de tres criterios establecidos en esta metodología: el menor costo de operación, la menor cantidad de terreno o el menor costo de inversión.

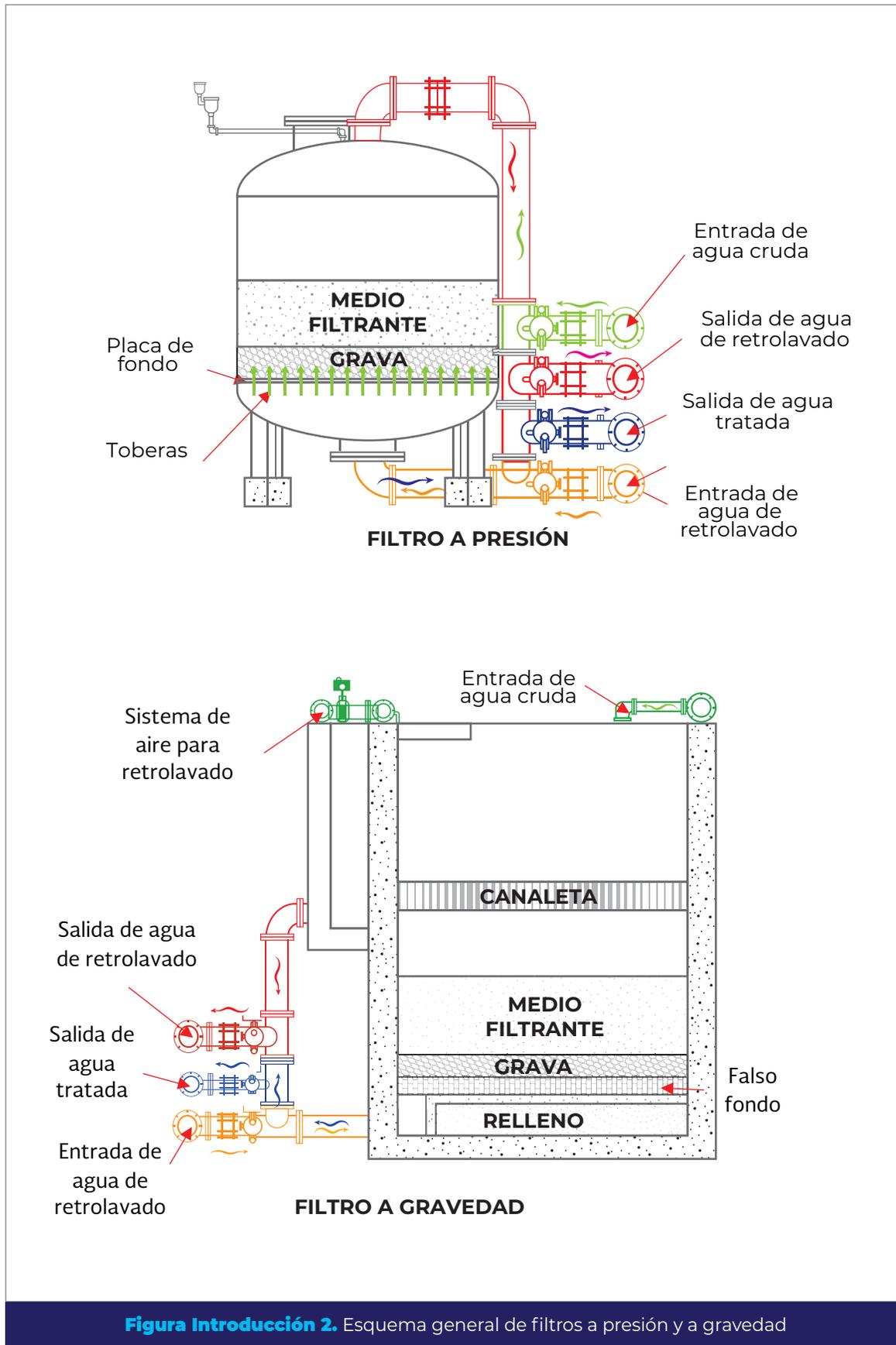


Figura Introducción 2. Esquema general de filtros a presión y a gravedad



Figura Introducción 3. Esquema general de proceso de una planta potabilizadora de filtración directa con filtros a presión

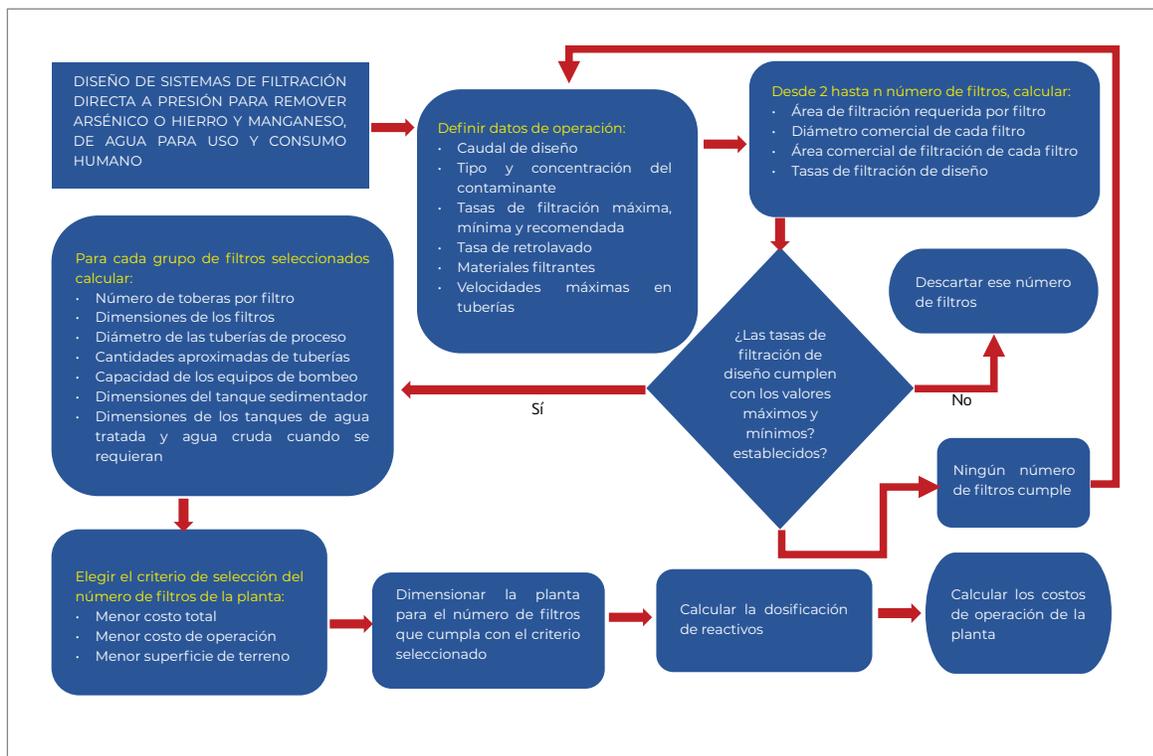


Figura Introducción 4. Diagrama general de cálculo de sistemas de filtración directa a presión



Parámetros de diseño

1

Los parámetros de diseño que se muestran a continuación son básicos para iniciar el cálculo de los filtros y se deben establecer como datos de entrada a la secuencia descrita en la Figura 1.4.

1.1. Datos de operación

Los datos de operación que se deben establecer inicialmente para el dimensionamiento de las unidades, dependen de las necesidades específicas del tratamiento y del sitio en donde se construirá la planta. En la Tabla 1.1, se indican los valores sugeridos por el IMTA para el caso de la remoción de arsénico, o hierro y manganeso; sin embargo, estos se deben adaptar a cada sitio y condición en particular.

Tabla 1.1. Variables de operación con valores sugeridos para iniciar el cálculo de la planta potabilizadora

	Notación	Valor sugerido	Unidad
Tiempo de retrolavado	t_{RET}	10	min
Tiempo de sedimentación del agua del retrolavado	t_{SED}	2	h
Tiempo de recirculación de agua clarificada	t_{REC}	3	h
Tiempo de extracción de lodos del sedimentador	Z_L	10	min
Tiempo de extracción del tanque de lodos al filtro prensa	t_{LC}	120	min
Tiempo de almacenamiento en tanque de agua cruda	t_{TAC}	0.25	h
Tiempo de almacenamiento en tanque de agua tratada	t_{TAT}	0.50	h
Tiempo de operación de la planta por día	t_{OP}	24	h

1.2. Tasas de filtración y retrolavado recomendadas

La tasa o velocidad de filtración es el caudal de agua que pasa en sentido descendente por unidad de área transversal del medio filtrante y por unidad de tiempo;

sus unidades más comunes son $\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$. La tasa de retrolavado también se define como el caudal de agua que pasa por unidad de área transversal por unidad de tiempo, pero a contraflujo o sentido ascendente. La selección de las tasas de filtración y retrolavado depende principalmente de la concentración y tipo de contaminante en el influente. En la Tabla 1.2 se muestran valores para tasas de filtración y en la Tabla 1.3 para tasas de retrolavado, sugeridos por el IMTA con base en experimentación, así como experiencia en diseño y operación de potabilizadoras de este tipo.

Tabla 1.2. Tasas de filtración recomendadas para filtración directa operando a flujo descendente

Parámetro de diseño	Unidad	Objetivo del tratamiento	
		Remoción de hierro y manganeso	Remoción de arsénico
Tasa de filtración mínima (v_{FTMIN})	($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$)	10	4
Tasa de filtración máxima (v_{FTMAX})	($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$)	12	7
Tasa de filtración máxima durante el retrolavado (v_{FTRMAX})	($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$)	15	10

Tabla 1.3. Tasa de retrolavado y carreras de filtración recomendadas para filtración directa operando a flujo descendente

Contaminante	Concentración (mg/L)	Parámetro de operación	
		Tasa de retrolavado v_{RET} ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$)	Carrera de filtración (Frecuencia de retrolavado) $FREC_{RET}$ (h)
Manganeso	0.15 a 0.30	40	24
	0.30 a 0.60	50	24
	0.60 a 1.0	60	24
	> 1.0	70	12
Hierro	0.30 a 1.0	50	24
	1.0 a 2.0	60	24
	> 2.0	70	12
Arsénico	0.025 a 0.075	60	48
	0.075 a 0.150	70	24

1.3. Área de filtración requerida

El área total de filtración de la batería de filtros se define por la relación del caudal de diseño sobre la tasa de filtración de trabajo recomendada (OPS/CEPIS, 2006).

$$A_{TF} = \frac{Q_D}{v_{FTR}}$$

Ecuación 1.1.

Donde:

- A_{TF} = Área total de filtración requerida (m²).
 Q_D = Caudal de diseño de la batería de filtros (m³/h).
 v_{FTR} = Tasa de filtración de trabajo recomendada (m³/m² h), ver Tabla 2.

Tabla 1.4. Características del medio filtrante recomendadas para remoción de arsénico o hierro y manganeso por filtración directa

Contaminante	Hierro y manganeso	Arsénico	
	Zeolita natural	Antracita	Arena sílica
Medio filtrante			
Espesor (m)	0.60 ²	0.30 ¹	0.70 ¹
Tamaño efectivo d_{10} (mm)	0.4 – 0.7 ^{2,3}	0.6 – 0.7 ¹	0.30 a 0.35 ¹
Coeficiente de uniformidad	≤1.50 ^{1,2}		
Expansión mínima de lecho durante el retrolavado exp (%)	30 ³	70 ^{*1}	
Densidad real (kg/m ³)	1,772	1,473	2,650
Densidad aparente (kg/m ³)	989	972	1,540

*Total con los dos medios;

¹ (IMTA, 2000); ² (IMTA, 2001); ³ (IMTA, 2019)

1.4. Velocidades en tuberías

Las velocidades permisibles del líquido en un conducto están gobernadas por las características del material y la magnitud de los fenómenos transitorios. La velocidad máxima será aquella con la cual no se ocasione erosión en las paredes de la tubería, ni se generen pérdidas de presión por fricción elevadas. Algunos valores recopilados por la CONAGUA (2015b) se presentan en el Anexo 8.1 para diferentes materiales, y se utilizarán en el cálculo del diámetro de las tuberías de agua cruda, agua de retrolavado, agua tratada y extracción de lodos.

1.5. Materiales filtrantes

El espesor de los lechos filtrantes, así como el tipo de lecho, dependerá del contaminante a remover y del tipo de proceso realizado. El IMTA recomienda las características mostradas en la Tabla 1.4 para el caso específico de remoción de arsénico o de hierro y manganeso, al utilizar filtración directa.



Selección del número y tamaño de filtros



Una vez obtenida el área de filtración total requerida, el siguiente paso es comprobar qué diámetro y número de filtros son los más convenientes. Para ello se lleva a cabo una secuencia de cálculos para configuraciones de filtros entre 2 y 20 unidades, la cual se describe en los subcapítulos siguientes.

Ya que se han determinado las posibles configuraciones que cumplan con las tasas de filtración de trabajo máximas y mínimas, la selección del número y tamaño de filtros más adecuados para el proceso dependerá del factor al que se le quiera dar más importancia, a escoger entre: a) costo de operación por retrolavado, considerando la energía eléctrica para retrolavar todos los filtros durante un año; b) costo total de inversión más operación, que incluye filtros, tuberías, válvulas, medios filtrantes y de soporte, tanque de agua cruda o tratada, tanque sedimentador, equipo de bombeo de retrolavado, toberas y el costo energía de un año del equipo de retrolavado; c) área de superficie mínima requerida para el arreglo general de los componentes del proceso.

En todos los cálculos que siguen, la notación (2, 3, ..., n) indica que el valor de las variables depende del número de filtros correspondiente a la configuración analizada. En la Figura 2.1 se muestran las dimensiones que se requieren calcular para el diseño de un filtro a presión.

2.1. Área de filtración por filtro

Para cada configuración se calcula el área de los filtros (OPS/CEPIS, 2006) con base en el área total de filtración (A_{TF}):

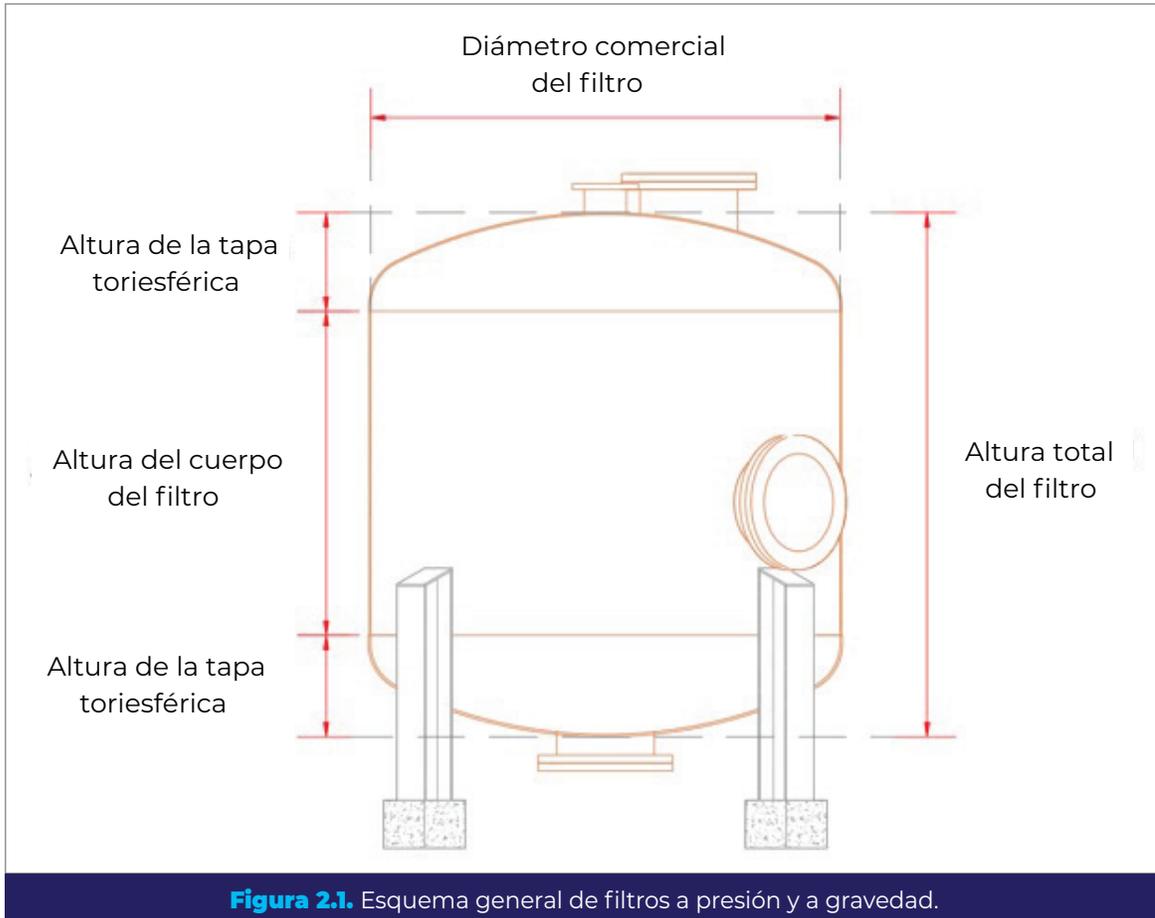
$$A_{F(2,3,\dots,n)} = \frac{A_{TF}}{N_{F(2,3,\dots,n)}}$$

Ecuación 2.1.

Donde:

$A_{F(2,3,\dots,n)}$ = Área de filtración por filtro (m^2).

- $N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).
 A_{TF} = Área total de filtración requerida (m²).
 n = Número máximo recomendado de filtros para una planta de filtración directa (el IMTA recomienda máximo 20 filtros).



2.2. Diámetro comercial de filtro

Con el área por filtro obtenida para cada configuración se procede a calcular el diámetro de filtro correspondiente, despejándolo de la fórmula del área del círculo:

$$D_{F(2,3,\dots,n)} = \sqrt{\frac{4 A_{F(2,3,\dots,n)}}{\pi}}$$

Ecuación 2.2.

Donde:

$D_{F(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de filtros (m).

De esta forma se obtendrá un diámetro de filtros correspondiente a cada configuración seleccionada; es importante señalar que en cada una de ellas el diámetro de todos los filtros es el mismo.

El diámetro calculado se debe ajustar al comercial (D_{CF}) más cercano, tomando como referencia los diámetros disponibles de proveedores y fabricantes de tapas. Debe tenerse en cuenta que la disponibilidad de diámetros también está asociada a la forma que se elija para las tapas del filtro, así como las especificaciones de diseño y fabricación de estas. Las tapas de forma toriesférica son las más usadas para filtros en el tratamiento de agua, por las presiones que resisten, los espesores requeridos y la altura resultante. Las tapas de forma semiesférica o semielíptica soportan mayores presiones con menores espesores de placa, pero resultan más altas.

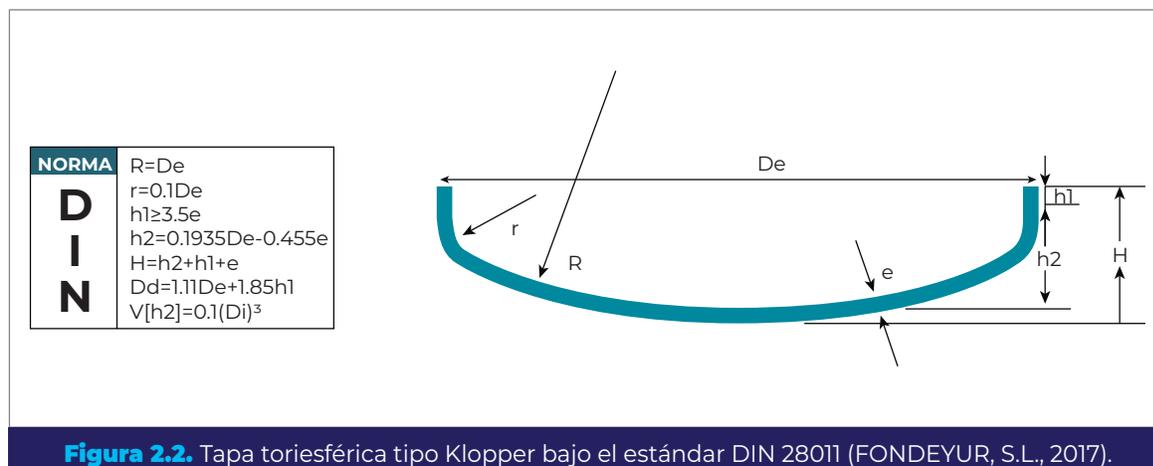
Debido a lo anterior, se recomienda la utilización de tapas toriesféricas tipo Klopper, construidas bajo el estándar DIN 28011 (Deutsches Institut Fur Normung, 2012), en el cual se especifican las dimensiones y condiciones técnicas de entrega de las tapas. Aplica para tapas toriesféricas, con o sin soldadura, que tienen un diámetro exterior de hasta 4,000 mm y un espesor de pared de hasta 50 mm. Este estándar cubre tapas de dimensiones que satisfacen las siguientes condiciones (Figura 2.2):

$$R = D_e$$

$$r = 0.1 D_e$$

Donde:

- R = Radio de abombado (m).
 D_e = Diámetro exterior de la tapa (m).
 r = Radio de rebordo (m).



Este estándar podría aplicar por analogía a tapas de diámetros mayores a 4,000 mm, sin embargo, deben hacerse consideraciones particulares para cada caso, como son: espesor de pared requerido para esos diámetros, necesidad de refuerzos estructurales en las tapas, diferentes relaciones de tamaño R/r , entre otras. Igualmente, para diámetros mayores podría ser mejor un tipo diferente de tapa; consultar el estándar DIN 28013 (Deutsches Institut Fur Normung, 2012) para tapas elipsoidales en caso de requerirlo. En el Anexo 8.2 se muestran los diámetros comerciales obtenidos de Talleres Villalón (2018).

2.3. Área comercial de filtro

Con el diámetro comercial del filtro se calcula el área comercial disponible por filtro, utilizando la ecuación del área del círculo:

$$A_{CF(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi D_{CF(2,3,\dots,n)}^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.3.}$$

Donde:

$A_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Área comercial de filtro (m²).

$D_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).

El área total de filtración disponible, con filtros de tamaño comercial, será:

$$A_{CT(2,3,\dots,n)} = A_{CF(2,3,\dots,n)} N_{F(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.4.}$$

Donde:

$A_{CT(2,3,\dots,n)}$ = Área comercial total (m²).

$N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).

2.4. Tasa de filtración de diseño

Una vez obtenidas las áreas comerciales de los filtros, lo que sigue es calcular las tasas que se obtendrán para todas las configuraciones analizadas, y desechar aquellas que no cumplan con los límites recomendados (Tabla 1.2). Utilizando la Ecuación 1.1 y la Ecuación 2.4, se tiene que:

$$v_{FD(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_D}{A_{CT(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.5.}$$

Donde:

$$\begin{aligned} v_{FD(2,3,\dots,n)} &= \text{Tasa de filtración de diseño (m}^3\text{/m}^2\text{ h).} \\ Q_D &= \text{Caudal de diseño de la batería de filtros (m}^3\text{/h).} \end{aligned}$$

Es importante considerar que, durante el lavado de uno de los filtros, el caudal de diseño se distribuye entre los filtros restantes (razón por la que se recomiendan configuraciones de dos filtros o más), de modo que el área de filtración disponible durante el retrolavado de uno de ellos será igual a:

$$A_{CTR(2,3,\dots,n)} = A_{CF(2,3,\dots,n)} (N_{F(2,3,\dots,n)} - 1) \quad \text{Ecuación 2.6.}$$

Donde:

$$A_{CTR(2,3,\dots,n)} = \text{Área comercial total disponible durante el retrolavado de un filtro (m}^2\text{).}$$

Por lo tanto, la tasa de filtración durante el retrolavado de uno de los filtros será:

$$v_{FTR(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_D}{A_{CTR(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.7.}$$

Donde:

$$v_{FTR(2,3,\dots,n)} = \text{Tasa de filtración durante el retrolavado de un filtro (m}^3\text{/m}^2\text{ h).}$$

De la misma manera se calculan las tasas de filtración para todas las configuraciones y se seleccionan aquellas que cumplan con lo siguiente (ver Tabla 1.2):

$$\begin{aligned} v_{FTMIN} &\leq v_{FD} < v_{FTMAX} \\ v_{FTR} &\leq v_{FTRMAX} \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned} v_{FTMIN} &= \text{Tasa de filtración mínima (m}^3\text{/m}^2\text{ h).} \\ v_{FTMAX} &= \text{Tasa de filtración máxima (m}^3\text{/m}^2\text{ h).} \\ v_{FTRMAX} &= \text{Tasa de filtración máxima durante el retrolavado de un filtro (m}^3\text{/m}^2\text{ h).} \end{aligned}$$

2.5. Tamaño de los filtros

El siguiente paso es estimar el costo de los recipientes a presión para los filtros, esto implica calcular el peso del acero requerido para su fabricación, por lo tanto, se necesita calcular la altura y el espesor del cuerpo de los filtros, este último en función de la presión de diseño.

2.5.1. Altura del cuerpo del filtro

La altura del cuerpo del filtro se determina en función de los espesores de lecho de medios filtrantes y de soporte (ver Tabla 1.4), así como de la expansión máxima de los mismos durante el retrolavado, con el objetivo de evitar la pérdida de material filtrante. Esta altura permanecerá constante sin importar el número de filtros, por lo que no es necesario calcularla para cada configuración analizada. De este modo, se tiene:

$$h_{CF} = L_1 + L_2 + L_S + exp + 0.2$$

Ecuación 2.8.

Donde:

- h_{CF} = Altura del cuerpo del filtro (m).
- L_1 = Espesor del medio filtrante 1 (m).
- L_2 = Espesor del medio filtrante 2 (m).
- L_S = Espesor del medio soporte (m).
- exp = Expansión máxima de los medios filtrantes (m).
- 0.2 = Margen mínimo entre la placa perforada soporte de los medios filtrantes y el punto de unión de la tapa inferior del filtro, con fines de soldadura y colocación de refuerzos de solera para la placa (m).

2.5.2. Presión de diseño

La presión de diseño será el resultado de la presión máxima de operación, más la presión estática provocada por el agua dentro del recipiente; siendo esta independiente del número de filtros, no es necesario calcularla para cada configuración.

El valor de la presión de diseño está dado por la que resulte mayor de las siguientes expresiones (CONAGUA, Diseño estructural de recipientes. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007):

$$P_{DC} = (P_T + P_H) 1.1$$

Ecuación 2.9.

$$P_{DC} = P_T + P_H + 2.1$$

Ecuación 2.10.

Donde:

- P_{DC} = Presión de diseño del cuerpo del filtro (kg/cm^2).
- P_T = Presión de trabajo del filtro (kg/cm^2).
- P_H = Presión dentro del recipiente debida al peso del agua, de los medios filtrantes y de soporte (kg/cm^2).

La presión estática dentro del recipiente se define como (CONAGUA, Diseño estructural de recipientes. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007):

$$P_H = (\rho_{AGUA} h_{CF}) + (\rho_{R1} L_1) + (\rho_{R2} L_2) + (\rho_S L_S)$$

Ecuación 2.11.

Donde:

- h_{CF} = Altura del cuerpo del filtro (cm).
- ρ_{AGUA} = Densidad del agua (kg/cm^3).
- ρ_{R1} = Densidad real del medio filtrante 1 (kg/cm^3).
- ρ_{R2} = Densidad real del medio filtrante 2 (kg/cm^3).
- ρ_S = Densidad real del medio soporte (kg/cm^3).
- L_1 = Espesor del medio filtrante 1 (cm).
- L_2 = Espesor del medio filtrante 2 (cm).
- L_S = Espesor del medio soporte (cm).

La densidad real de los materiales filtrantes y de soporte puede variar dependiendo de la calidad de estos, por lo que se recomienda obtener estas densidades directamente de proveedores de materiales. En la Tabla 1.4, se presentan algunos valores de referencia para zeolita, antracita y arena sílica.

En el caso del diseño de las tapas se debe sustituir el valor de la presión de diseño de acuerdo con las siguientes expresiones (CONAGUA, Diseño estructural de recipientes. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007):

Si $P_T > 21.2 \text{ kg}/\text{cm}^2$

$$P_{DT} = 1.1 P_T$$

Ecuación 2.12.

Si $P_T \leq 21.1 \text{ kg/cm}^2$

$$P_{DT} = P_T + 2.1$$

Ecuación 2.13.

Donde:

P_{DT} = Presión de diseño de las tapas toriesféricas (kg/cm²).

2.5.3. Espesor del cuerpo del filtro

Para efectuar el cálculo del espesor requerido en las paredes de un recipiente cilíndrico, cuando PDC no excede $0.385 S_F E_C$, se aplica la siguiente fórmula (ASME, 2015a):

$$e_{CF S/C(2,3,\dots,n)} = \frac{P_{DC} R_{IF(2,3,\dots,n)}}{S_F E_C - 0.6 P_{DC}}$$

Ecuación 2.14.

Donde:

$e_{CF S/C(2,3,\dots,n)}$ = Espesor mínimo del cuerpo del filtro sin corrosión (m).

P_{DC} = Presión de diseño del cuerpo del filtro (kg/cm²).

$R_{IF(2,3,\dots,n)}$ = Radio interior del filtro (m).

S_F = Esfuerzo máximo de tensión del material de construcción del filtro (kg/cm²), Ver Anexo 8.6.

E_C = Eficiencia de soldadura a tope para el cuerpo del filtro cuando la junta está radiografiada (adimensional), Ver Anexo 8.7.

El radio interior del filtro será igual a:

$$R_{IF(2,3,\dots,n)} = \frac{D_{CF(2,3,\dots,n)}}{2}$$

Ecuación 2.15.

Donde:

$D_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).

El espesor del cuerpo será el espesor mínimo calculado, más el espesor por corrosión, de acuerdo con la siguiente expresión (CONAGUA, Diseño estructural de recipientes. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007):

$$e_{CF C/C(2,3,\dots,n)} = e_{CF S/C(2,3,\dots,n)} + e_c$$

Ecuación 2.16.

Donde:

$e_{CF C/C(2,3,\dots,n)}$ = Espesor del cuerpo del filtro con corrosión (m).

e_c = Espesor por corrosión (m). Se recomienda un espesor mínimo equivalente a 1/16" (ASME, 2015a).

El espesor calculado con la fórmula anterior debe ajustarse al espesor comercial de placa más cercano, siendo $e_{CF(2,3,\dots,n)}$ el espesor final del cuerpo del filtro.

2.5.4. Espesor de las tapas toriesféricas

Las tapas toriesféricas (Figura 2.2) se diseñan bajo el estándar DIN 28011 (Deutsches Institut Fur Normung, 2012), el cual establece que el radio de bombeo de la tapa será igual al diámetro del filtro, y el radio de rebordo será igual al 10% del radio de bombeo. Bajo estas condiciones el código ASME (2015a) establece que:

$$e_{TF S/C(2,3,\dots,n)} = \frac{P_{DT} D_{CF(2,3,\dots,n)} M}{2 S_F E_T - 0.2 P_{DT}}$$

Ecuación 2.17.

Donde:

$e_{TF S/C(2,3,\dots,n)}$ = Espesor mínimo de las tapas sin corrosión (m).

M = Factor adimensional que depende de la relación R/r . Ver sección 3.2.

En el Anexo 8.8 se muestran valores numéricos para el factor M para distintas proporciones R/r ; sin embargo, como ya se ha mencionado, el estándar DIN 28011 establece una relación fija de R/r para tapas toriesféricas igual a 10, por lo que el valor del factor M será siempre igual a 1.54.

El espesor de las tapas considerando la corrosión, será:

$$e_{TF C/C(2,3,\dots,n)} = e_{TF S/C(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.18.

Donde:

$e_{TF C/C(2,3,\dots,n)}$ = Espesor de las tapas con corrosión (m).

El espesor calculado con la formula anterior debe ajustarse al espesor comercial de placa más cercano, siendo este el espesor final de las tapas del filtro ($e_{TF(2,3,\dots,n)}$).

Para calcular el peso de las tapas toriesféricas se utiliza la siguiente ecuación (Molina Gallego *et al.*, 2013):

$$W_{TF(2,3,\dots,n)} = [(0.08089 D_{ETF(2,3,\dots,n)}^2 - (0.08089 D_{CF(2,3,\dots,n)}^2)] \rho_{AF} \quad \text{Ecuación 2.19.}$$

Donde:

- $W_{TF(2,3,\dots,n)}$ = Peso de la tapa toriesférica del filtro (kg).
- $D_{ETF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro exterior de la tapa toriesférica (m).
- $D_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).
- ρ_{AF} = Densidad del acero de construcción de los filtros (kg/m³).

El diámetro exterior de la tapa toriesférica se calcula como:

$$D_{ETF(2,3,\dots,n)} = D_{CF(2,3,\dots,n)} + (2 e_{TF(2,3,\dots,n)}) \quad \text{Ecuación 2.20.}$$

Donde:

- $e_{TF(2,3,\dots,n)}$ = Espesor comercial de la tapa toriesférica (m).

2.5.5. Altura de las tapas toriesféricas

La altura de las tapas se calcula según las especificaciones de diseño del estándar DIN 28011 (Deutsches Institut Fur Normung, 2012):

$$h_{TF(2,3,\dots,n)} = 0.1935 D_{ETF(2,3,\dots,n)} + 4.045 e_{TF(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.21.}$$

Donde:

- $h_{TF(2,3,\dots,n)}$ = Altura de la tapa toriesférica del filtro (m).

2.5.6. Peso del filtro

El peso del cuerpo cilíndrico del filtro se calcula teniendo en cuenta el espesor comercial calculado y la densidad del material de construcción elegido (Molina Gallego *et al.*, 2013).

$$W_{CF(2,3,\dots,n)} = \pi h_{CF} \left[\left(\frac{D_{ECF(2,3,\dots,n)}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{CF(2,3,\dots,n)}}{2} \right)^2 \right] \rho_{AF} \quad \text{Ecuación 2.22.}$$

Donde:

$W_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Peso del cuerpo del filtro (kg).

$D_{ECF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro exterior del cuerpo del filtro comercial (m).

El diámetro exterior del cuerpo del filtro comercial será:

$$D_{ECF(2,3,\dots,n)} = D_{CF(2,3,\dots,n)} + (2 e_{CF(2,3,\dots,n)}) \quad \text{Ecuación 2.23.}$$

Donde:

$e_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Espesor comercial final del cuerpo del filtro (m).

$D_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).

El peso total de cada recipiente (con fines comparativos) será entonces:

$$W_{F(2,3,\dots,n)} = W_{CF(2,3,\dots,n)} + 2 W_{TF(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.24.}$$

Donde:

$W_{F(2,3,\dots,n)}$ = Peso total del recipiente a presión (kg).

$W_{TF(2,3,\dots,n)}$ = Peso de la tapa torisférica del filtro (kg).

2.6. Número de toberas

En los filtros a presión, la salida del agua tratada y la entrada del agua para el retrolavado pueden realizarse mediante un múltiple de tuberías perforadas o mediante una placa perforada que actúe como falso fondo. En ambos casos, en las perforaciones se colocan espreas o toberas ranuradas que impiden que el material filtrante se salga durante la operación, y además ayudan a distribuir de forma homogénea el flujo en toda el área del filtro durante la filtración y el retrolavado.

En esta sección se desarrolla el procedimiento de cálculo cuando se utiliza placa perforada con toberas de acero inoxidable; para este caso se recomienda que la placa

perforada también sea en acero inoxidable para evitar la corrosión por par galvánico, o poner un material aislante entre el cuerpo de la tobera y la placa. El IMTA recomienda este tipo de material, debido a que las toberas de plástico son menos resistentes a la ruptura, según observaciones del IMTA durante algunos procesos constructivos y de puesta en marcha de filtros a presión.

Para maximizar el área tributaria de las toberas y así evitar en lo posible la generación de zonas muertas y cortos circuitos en el interior del filtro, se considera un arreglo hexagonal concéntrico. En la Figura 2.3 se muestra un detalle del arreglo propuesto por el IMTA (2017b).

Para calcular el número de toberas por filtro, se parte de la estimación de un número mínimo de toberas necesarias y para esto se relaciona el caudal de agua de retrolavado, con el caudal máximo de diseño recomendado por tobera durante el retrolavado:

$$N_{TOBMIN(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{RET(2,3,\dots,n)}}{Q_{RTOBMAX}} \quad \text{Ecuación 2.25.}$$

Donde:

- N_{TOBMIN} = Número mínimo de toberas necesarias por filtro.
- $Q_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Caudal de agua de retrolavado (m^3/s).
- $Q_{RTOBMAX}$ = Caudal máximo de retrolavado por tobera (m^3/s); especificación técnica proporcionada por el fabricante de las toberas.

El caudal de agua de retrolavado se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{RET(2,3,\dots,n)} = A_{CF(2,3,\dots,n)} v_{RET} \quad \text{Ecuación 2.26.}$$

Donde:

- $A_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Área comercial de filtro (m^2).
- v_{RET} = Tasa de retrolavado recomendada ($m^3/m^2 s$). Ver Tabla 1.3 y convertir unidades de horas a segundos.

Una vez obtenido el número mínimo de toberas por filtro, lo siguiente es calcular cuantas capas concéntricas se pueden formar con ellas para seguir el patrón de arreglo propuesto.

Tomando como referencia la Figura 2.3, se puede deducir el número de toberas que se requieren en función del número de capas. Se debe tener en cuenta que la distancia entre centros de toberas (L_{TOB}) es siempre la misma (dato proporcionado por el fabricante) independientemente del número de capas. Entonces, el número de toberas será:

$$N_{TOB} = [3k(k + 1)] + 1 \quad \text{Ecuación 2.27.}$$

Donde:

N_{TOB} = Número de toberas por filtro en arreglo hexagonal.

k = Número de capas concéntricas en el arreglo.

Reacomodando la Ecuación 2.27:

$$3k^2 + 3k - N_{TOB} + 1 = 0 \quad \text{Ecuación 2.28.}$$

Resolviendo la ecuación cuadrática mediante el método de la fórmula general, considerando solo la solución positiva y utilizando el número mínimo de toberas calculado con la Ecuación 2.25, se obtiene el número de capas concéntricas que tendrá el filtro:

$$k_{(2, 3, \dots, n)} = \frac{-3 + \sqrt{9 - 12(1 - N_{TOBMIN(2, 3, \dots, n)})}}{6} \quad \text{Ecuación 2.29.}$$

Donde:

$k_{(2, 3, \dots, n)}$ = Número de capas concéntricas en el arreglo de toberas por filtro.

$N_{TOBMIN(2, 3, \dots, n)}$ = Número mínimo de toberas necesarias por filtro.

El número de capas debe ser entero, por lo que se recomienda redondearlo al entero inmediato superior y así obtener un número final de toberas superior al mínimo necesario. Esto quiere decir que se requiere recalcular el número de toberas una vez obtenido el número de capas concéntricas.

A partir de la Ecuación 2.27, en términos del número de filtros, se tiene:

$$N_{TOB(2, 3, \dots, n)} = 3k_{(2, 3, \dots, n)}(k_{(2, 3, \dots, n)} + 1) + 1 \quad \text{Ecuación 2.30.}$$

Donde:

$N_{TOB(2, 3, \dots, n)}$ = Número final de toberas por filtro.

Para determinar la distancia entre centros de toberas se utiliza la siguiente ecuación:

$$L_{TOB(2, 3, \dots, n)} = \frac{D_{CF(2, 3, \dots, n)}}{2k(2, 3, \dots, n)}$$

Ecuación 2.31.

Donde:

$L_{TOB(2, 3, \dots, n)}$ = Distancia entre centros de toberas (m).

$D_{CF(2, 3, \dots, n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).

Esta distancia debe estar entre los rangos proporcionados por el fabricante de las toberas para una operación óptima, de lo contrario se debe recalculer el número de toberas (aumentándolas) y nuevamente el número de capas hexagonales y la distancia entre centros.

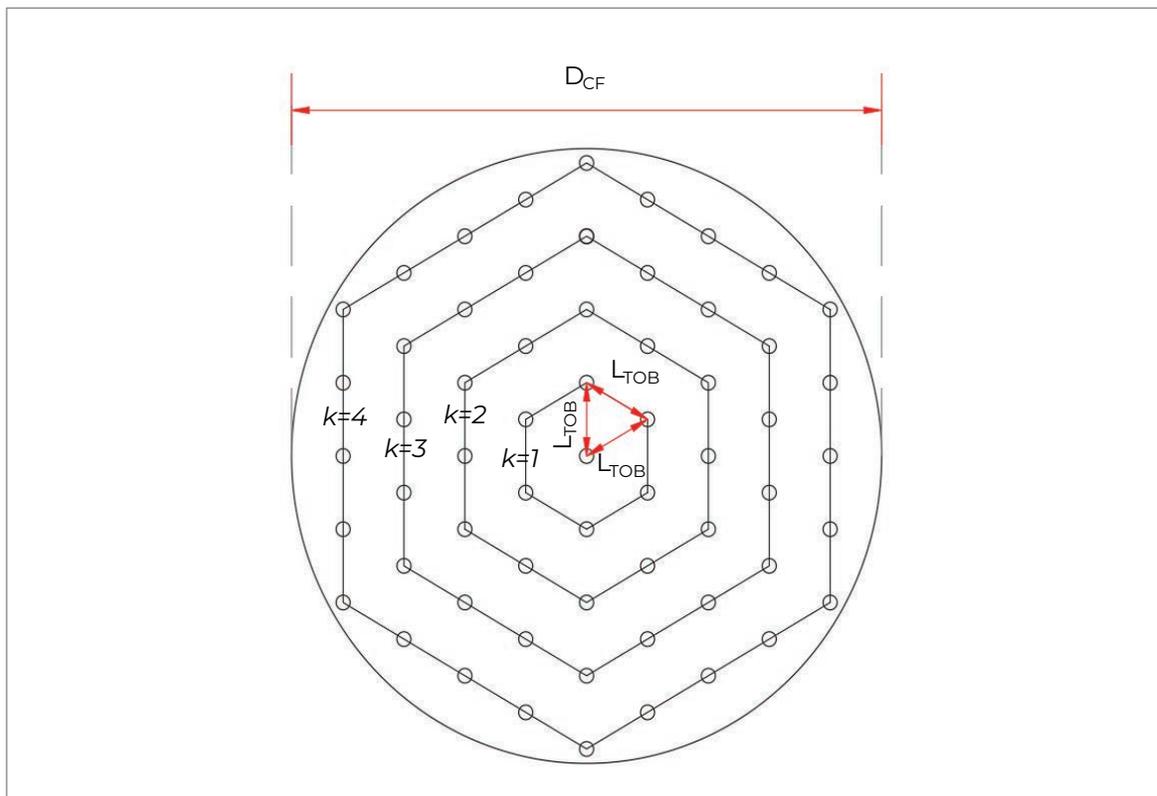


Figura 2.3. Distribución de toberas en la placa perforada del falso fondo.

2.7. Tuberías

Un componente indispensable para la planta es la tubería que conforma las diferentes líneas del proceso de potabilización. Estas líneas, si bien están presentes en cualquier configuración, sus longitudes y diámetros variarán dependiendo del número de filtros y de su diámetro comercial; por tal motivo es importante tomarlas en cuenta en el criterio de selección.

Con el fin de ilustrar el procedimiento descrito en esta sección y secciones posteriores, se tomará como referencia el arreglo propuesto por el IMTA (2017b) para filtros a presión. De la Figura 2.4 a la Figura 2.6 se muestran las vistas en planta y perfil para una batería compuesta por cuatro filtros (en los mismos, AT significa agua tratada y AC agua cruda).

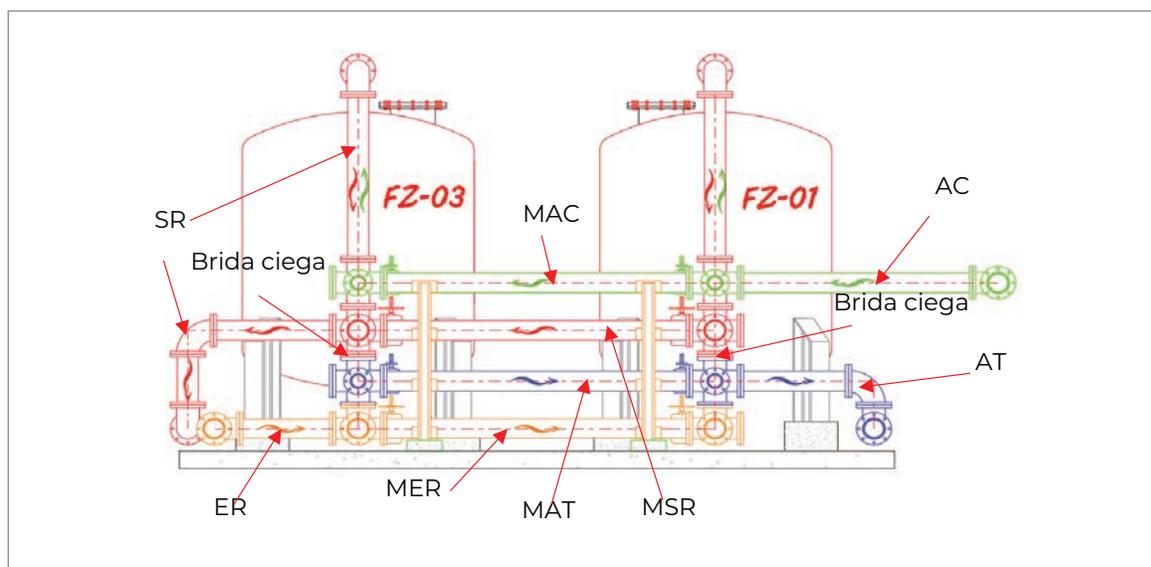


Figura 2.4. Arreglo de cuatro filtros a presión. Vista en corte, tuberías y múltiples.

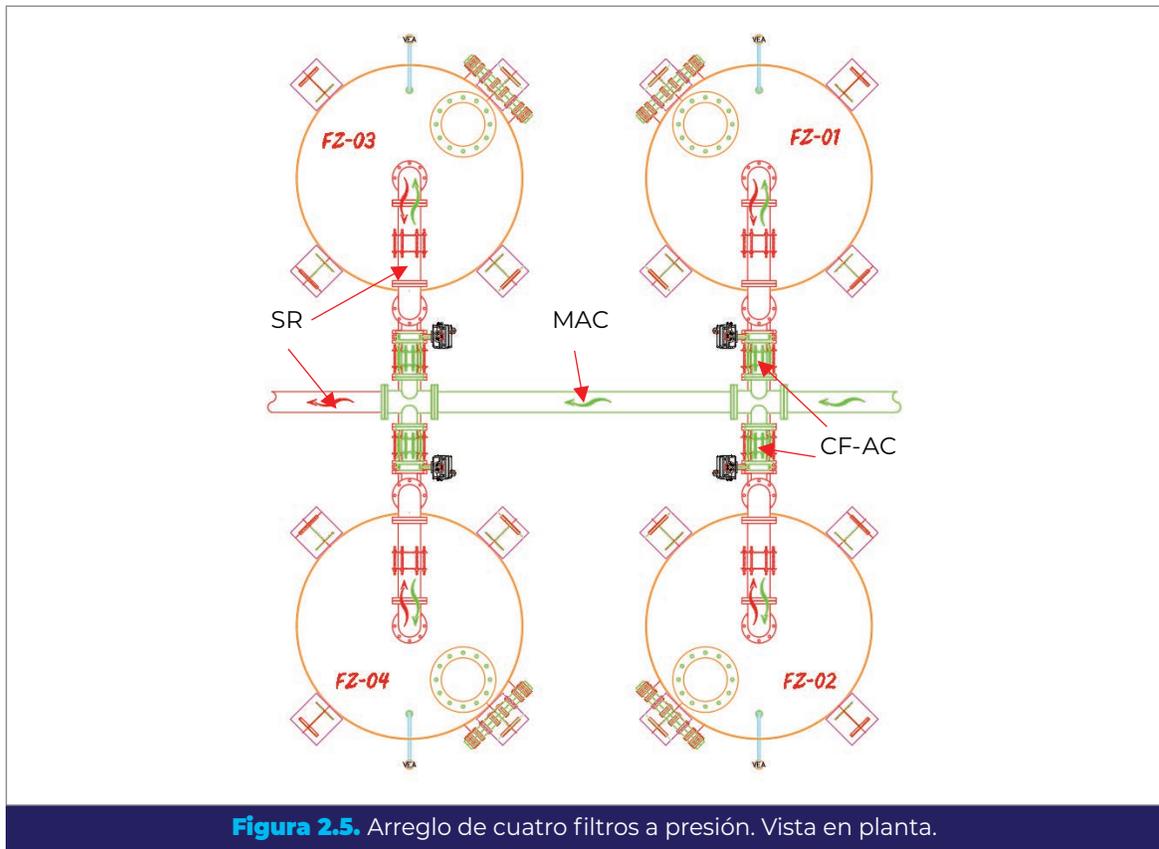


Figura 2.5. Arreglo de cuatro filtros a presión. Vista en planta.

Para un mayor número de filtros se propone un crecimiento modular con números pares, manteniendo la misma configuración de los múltiples de tuberías; esto asegura una buena distribución del flujo. La excepción es para tres filtros, donde se sugiere un arreglo lineal.

Como ya se mencionó anteriormente, el número mínimo de filtros recomendados es de dos, para evitar detener el sistema cuando se tenga que retrolavar uno de ellos. En este caso se tiene que asegurar que la tasa de filtración de diseño sea lo suficientemente baja, para que cuando opere sólo un filtro se mantenga una tasa adecuada de trabajo en el filtro que queda operando.

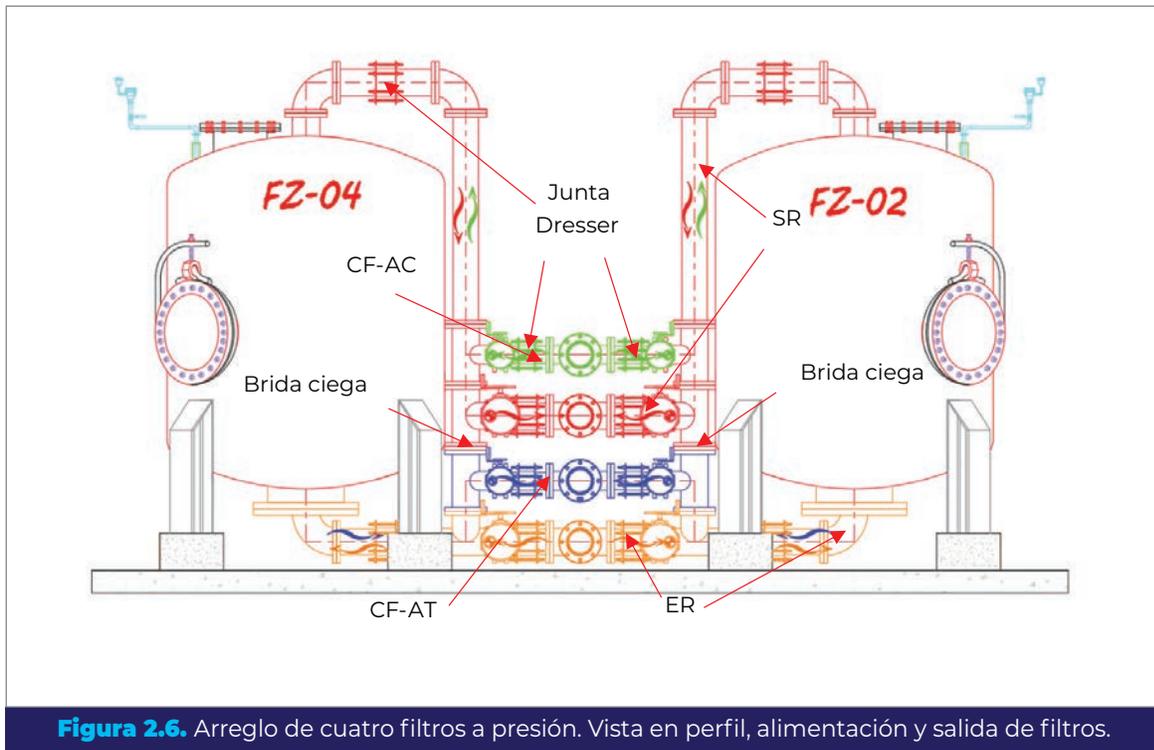


Figura 2.6. Arreglo de cuatro filtros a presión. Vista en perfil, alimentación y salida de filtros.

Las tuberías consideradas para la comparación de configuraciones son las siguientes (ver Figura 3.4 a Figura 3.7):

- MAC = Tubería del múltiple de agua cruda.
- AC = Tubería de agua cruda, que va desde el pozo o tanque hasta el MAC.
- CF-AC = Tubería de conexión a filtros (agua cruda), desde el MAC hasta la tubería de entrada de agua al filtro, que también es la tubería de salida de retrolavado.
- MAT = Tubería del múltiple de agua tratada.
- CF-AT = Tubería de conexión a filtros (agua tratada), desde la tubería de salida de agua tratada hasta el MAT.
- AT = Tubería de agua tratada, que va desde el MAT hasta el tanque de agua tratada.
- MER = Tubería del múltiple de entrada de retrolavado.
- ER = Tubería de entrada de retrolavado, que va desde el tanque de agua cruda o tratada hasta el MER, más la tubería desde el MER a los filtros.
- MSR = Tubería del múltiple de salida de retrolavado.
- SR = Tubería de salida de retrolavado, que va desde los filtros hasta el MSR, más la tubería desde el MSR al sedimentador.
- REC = Tubería de recirculación, desde el sedimentador hasta la tubería de agua cruda o al tanque de agua cruda.
- EL = Tubería de extracción de lodos, desde el sedimentador hasta el tanque de lodos o al desagüe de la planta.

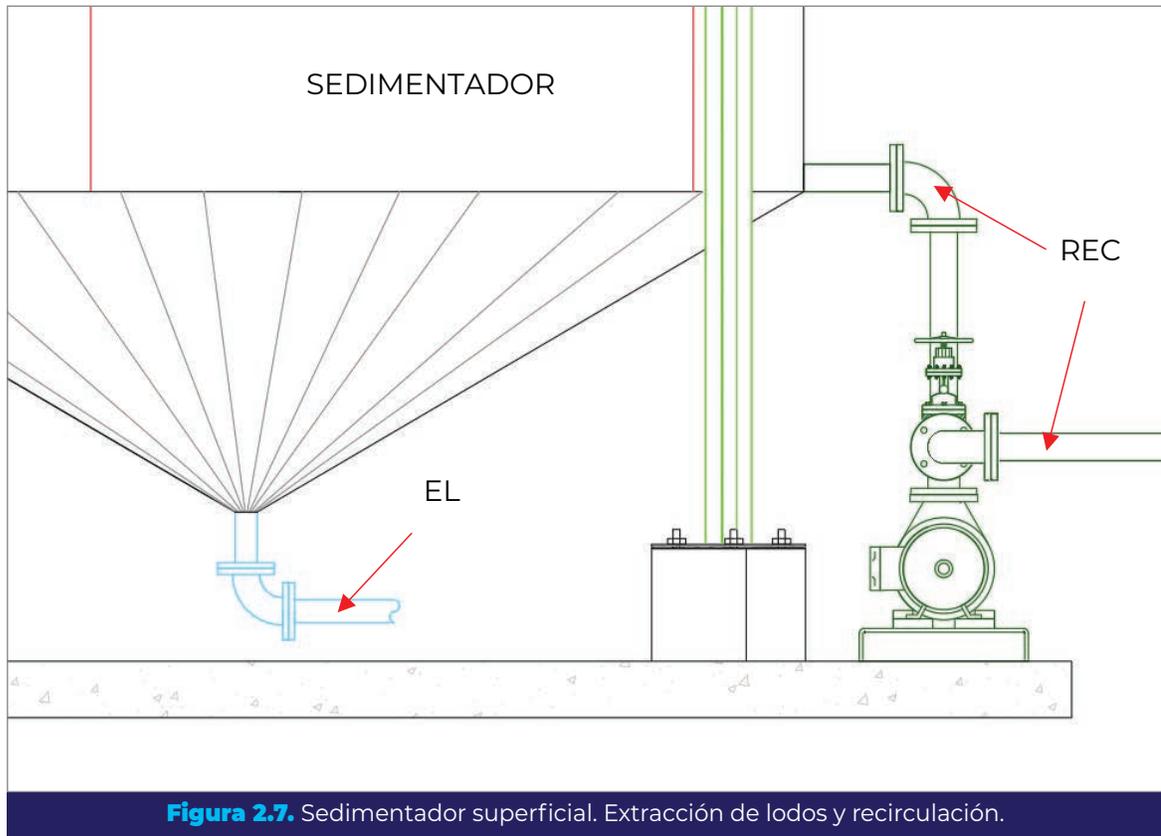


Figura 2.7. Sedimentador superficial. Extracción de lodos y recirculación.

2.7.1. Diámetros de tuberías

Para el cálculo de los diámetros correspondientes, una vez que se ha propuesto la velocidad máxima del agua en cada tubería (sección 2.4), se hace uso de la ecuación de conservación de masa (CONAGUA, 2015a):

$$A_T = \frac{Q_T}{v_{TMAX}}$$

Ecuación 2.32.

Donde:

A_T = Área de sección de la tubería (m²).

Q_T = Caudal conducido por la tubería (m³/s).

v_{TMAX} = Velocidad máxima en tuberías (m/s). Ver Anexo 8.1.

Utilizando la fórmula del área del círculo, se despeja el diámetro de tubería correspondiente:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 A_T}{\pi}}$$

Ecuación 2.33.

Donde:

D_T = Diámetro de la tubería (m).

El diámetro calculado debe igualarse al diámetro comercial más cercano. Con el diámetro comercial de tubería seleccionado, se comprueba que la velocidad del agua se mantendrá bajo el límite máximo propuesto, por lo que el siguiente paso es calcular el área correspondiente a la tubería comercial:

$$A_{rc} = \frac{\pi (D_{TC})^2}{4}$$

Ecuación 2.34.

Donde:

A_{rc} = Área de sección de la tubería comercial (m²).

D_{TC} = Diámetro de la tubería comercial (m).

Tomando como referencia la Ecuación 2.32, se despeja la velocidad del agua en la tubería comercial:

$$v_{TC} = \frac{Q_T}{A_{TC}}$$

Ecuación 2.35.

Donde:

v_{TC} = Velocidad del agua en la tubería comercial (m/s).

Si $v_{TC} \geq v_{TMAX}$ se selecciona un diámetro comercial mayor.

De la Ecuación 2.32 a la Ecuación 2.35 se utilizan para el cálculo de los diámetros de las diferentes tuberías del proceso. A continuación, se describen los cálculos para cada tipo de tubería.

2.7.1.1. Tuberías de agua cruda y agua tratada

Los diámetros de las tuberías de agua cruda (AC), múltiple de agua cruda (MAC), tubería de agua tratada (AT) y el múltiple de agua tratada (MAT), se calculan con el caudal total de diseño (Q_D).

Escribiendo la Ecuación 2.32 en términos de la tubería de agua cruda, tendremos:

$$A_{TAC} = \frac{Q_D}{v_{TMAX}} \quad \text{Ecuación 2.36.}$$

Donde:

- A_{TAC} = Área de sección de la tubería de agua cruda (m²).
- Q_D = Caudal de diseño (m³/s).
- v_{TMAX} = Velocidad máxima en tuberías (m/s). Ver Anexo 8.1.

El diámetro de tubería requerido se calcula mediante la Ecuación 2.33 en términos de la tubería de agua cruda:

$$D_{TAC} = \sqrt{\frac{4 A_{TAC}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 2.37.}$$

Donde:

- D_{TAC} = Diámetro de la tubería de agua cruda (m).

Como se indicó anteriormente, este diámetro debe igualarse al diámetro comercial más cercano (D_{TCAC}) y comprobar que la velocidad del agua se mantendrá bajo el límite máximo propuesto.

Rescribiendo la Ecuación 2.34 se tiene que:

$$A_{TCAC} = \frac{\pi (D_{TCAC})^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.38.}$$

Donde:

- A_{TCAC} = Área de sección de la tubería comercial de agua cruda (m²).
- D_{TCAC} = Diámetro de la tubería comercial de agua cruda (m).

La velocidad se comprueba mediante la Ecuación 2.35 en términos de la tubería de agua cruda:

$$v_{TCAC} = \frac{Q_D}{A_{TCAC}} \quad \text{Ecuación 2.39.}$$

Donde:

v_{TCAC} = Velocidad del agua en la tubería comercial de agua cruda (m/s).

Si $v_{TCAC} \geq v_{TMAX}$ se selecciona un diámetro de tubería comercial mayor.

La tubería de agua tratada conduce el mismo caudal que la tubería de agua cruda por lo que tendrá el mismo diámetro, por lo tanto:

$$D_{TCAT} = D_{TCAC} \quad \text{Ecuación 2.40.}$$

Donde:

D_{TCAC} = Diámetro de la tubería comercial de agua tratada (m).

2.7.1.2. Tuberías de conexión a filtros AC y AT

Para el caso de las tuberías de conexión a filtros del agua cruda (CF-AC) y de conexión a filtros del agua tratada (CF-AT), el diámetro se calcula con el caudal por filtro durante el retrolavado de uno de ellos; es decir, cuando el caudal por filtro es máximo.

$$Q_{FR(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_D}{N_{F(2,3,\dots,n)} - 1} \quad \text{Ecuación 2.41.}$$

Donde:

$Q_{FR(2,3,\dots,n)}$ = Caudal por filtro durante el retrolavado (m³/s).

Q_D = Caudal de diseño de la batería de filtros (m³/s).

$N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).

Con la Ecuación 2.32 en términos de la tubería de conexión a filtros AC, tendremos:

$$A_{TCFAC(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{FR(2,3,\dots,n)}}{v_{TMAX}} \quad \text{Ecuación 2.42.}$$

Donde:

$A_{TCFAC(2,3,\dots,n)}$ = Área de sección de la tubería de conexión a filtros AC (m²).

v_{TMAX} = Velocidad máxima en tuberías (m/s). Ver Anexo 8.1.

El diámetro de tubería se calcula mediante la Ecuación 2.33 en términos de la tubería de conexión a filtros AC:

$$D_{TCFAC(2,3,\dots,n)} = \sqrt{\frac{4 A_{TCFAC(2,3,\dots,n)}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 2.43.}$$

Donde:

$D_{TCFAC(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería de conexión a filtros AC (m).

El diámetro calculado debe igualarse al diámetro comercial más cercano (D_{TCFAC}) y comprobar que la velocidad del agua se mantendrá bajo el límite máximo propuesto.

Rescribiendo la Ecuación 2.34 se tiene que:

$$A_{TCFAC(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi (D_{TCFAC(2,3,\dots,n)})^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.44.}$$

Donde:

$A_{TCFAC(2,3,\dots,n)}$ = Área de sección de la tubería comercial de conexión a filtros AC (m²).

$D_{TCFAC(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería comercial de conexión a filtros AC (m).

Se comprueba mediante la Ecuación 3.35 en términos de la tubería de conexión a filtros AC:

$$v_{TCFAC(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{FR(2,3,\dots,n)}}{A_{TCFAC(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.45.}$$

Donde:

$v_{TCFAC(2,3,\dots,n)}$ = Velocidad del agua en la tubería comercial de conexión a filtros AC (m/s).

Si $v_{TCFAC(2,3,\dots,n)} \geq v_{TMAX}$ se selecciona un diámetro de tubería comercial mayor.

La tubería de conexión a filtros AT conduce el mismo caudal que la tubería de conexión a filtros AC por lo que tendrá el mismo diámetro, por lo tanto:

$$D_{TC\ CF\ AT(2,3,\dots,n)} = D_{TC\ CF\ AC(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.46.

Donde:

$D_{TC\ CF\ AT(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería comercial de agua tratada (m).

2.7.1.3. Tuberías de agua de retrolavado

Las tuberías de entrada de agua de retrolavado (ER), el múltiple de entrada de retrolavado (MER), la tubería de salida de agua de retrolavado (SR) y el múltiple de salida de retrolavado (MSR), tendrán el mismo diámetro; el cual se calcula a partir del caudal de agua de retrolavado (Q_{RET}) obtenido mediante la Ecuación 2.26.

Escribiendo la Ecuación 2.32 en términos de la tubería de retrolavado, tendremos:

$$A_{T\ RET(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{RET(2,3,\dots,n)}}{v_{TMAX}}$$

Ecuación 2.47.

Donde:

$A_{T\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Área de sección de la tubería de retrolavado (m²).

$Q_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Caudal de agua de retrolavado (m³/s).

v_{TMAX} = Velocidad máxima en tuberías (m/s). Ver Anexo 8.1.

El diámetro de tubería requerido se calcula mediante la Ecuación 2.33 en términos de la tubería de retrolavado:

$$D_{T\ RET(2,3,\dots,n)} = \sqrt{\frac{4 A_{T\ RET(2,3,\dots,n)}}{\pi}}$$

Ecuación 2.48.

Donde:

$D_{T\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería de retrolavado (m).

Como se indicó anteriormente, este diámetro debe igualarse al diámetro comercial más cercano ($D_{TC\ RET}$) y comprobar que la velocidad del agua se mantendrá bajo el límite máximo propuesto.

Rescribiendo la Ecuación 2.34 se tiene que:

$$A_{TC\ RET(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi (D_{TC\ RET(2,3,\dots,n)})^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.49.}$$

Donde:

$A_{TC\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Área de sección de la tubería comercial de retrolavado (m²).

$D_{TC\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería comercial de retrolavado (m).

La velocidad se comprueba mediante la Ecuación 2.35 en términos de la tubería de retrolavado:

$$v_{TC\ RET(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{RET(2,3,\dots,n)}}{A_{TC\ RET(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.50.}$$

Donde:

$v_{TC\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Velocidad del agua en la tubería comercial de retrolavado (m/s).

Si $v_{TC\ RET(2,3,\dots,n)} \geq v_{TMAX}$ se selecciona un diámetro de tubería comercial mayor.

2.7.1.4. Tubería de recirculación de agua clarificada

Para obtener el diámetro de la tubería de recirculación del agua clarificada, primero se debe calcular el volumen de agua a recircular de la siguiente manera:

$$V_{REC(2,3,\dots,n)} = V_{RET(2,3,\dots,n)} - V_{L(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.51.}$$

Donde:

$V_{REC(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua de recirculación (m³).

$V_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua de retrolavado por filtro (m³).

$V_{L(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de lodo líquido por retrolavado (m³).

La experiencia con sistemas similares indica que los lodos espesados en el sedimentador representan aproximadamente el 1% del volumen de agua de retrolavado (IMTA, 2013b), es decir:

$$V_{L(2,3,\dots,n)} = 0.01V_{RET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.52.}$$

El caudal de recirculación de agua clarificada será:

$$Q_{REC(2,3,\dots,n)} = \frac{V_{REC(2,3,\dots,n)}}{t_{REC}} \quad \text{Ecuación 2.53.}$$

Donde:

$Q_{REC(2,3,\dots,n)}$ = Caudal de recirculación (m^3/s).

t_{REC} = Duración de la recirculación (s).

En la Tabla 1.1 se presentan tiempos de recirculación de retrolavado (t_{RET}) y de sedimentación (t_{SED}), recomendados por el IMTA, los cuales permiten el retrolavado de 4 filtros por día. En caso de necesitar lavar una cantidad mayor de filtros se puede determinar el tiempo de recirculación de la siguiente manera:

$$t_{REC} = \frac{24 - F_{RET}(t_{RET} + t_{SED} + t_{EL})}{F_{RET}} \quad \text{Ecuación 2.54.}$$

Donde:

24 = Número de horas en un día (h).

F_{RET} = Número de filtros retrolavados por día (adimensional).

t_{RET} = Tiempo de retrolavado (h).

t_{SED} = Tiempo de sedimentación (h).

t_{EL} = Tiempo de extracción de lodos del sedimentador (h).

El tiempo de recirculación debe cumplir la condición de que el caudal de recirculación (Q_{REC}) sea menor al 10% del caudal de diseño (Q_D).

La recirculación del agua clarificada puede ser a gravedad si se descarga en un tanque subterráneo, o por bombeo si se recircula a la tubería de agua cruda.

Entonces, escribiendo la Ecuación 2.32 en términos de la tubería de recirculación, tendremos:

$$A_{TREC(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{REC(2,3,\dots,n)}}{v_{TMAX}} \quad \text{Ecuación 2.55.}$$

Donde:

$$A_{TREC(2,3,\dots,n)} = \text{Área de sección de la tubería de recirculación (m}^2\text{).}$$

$$v_{TMAX} = \text{Velocidad máxima en tuberías (m/s). Ver Anexo 8.1.}$$

El diámetro de tubería requerido se calcula mediante la Ecuación 2.33 en términos de la tubería de recirculación:

$$D_{TREC(2,3,\dots,n)} = \sqrt{\frac{4 A_{TREC(2,3,\dots,n)}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 2.56.}$$

Donde:

$$D_{TREC(2,3,\dots,n)} = \text{Diámetro de la tubería de recirculación (m).}$$

Como se indicó anteriormente, este diámetro debe igualarse al diámetro comercial más cercano (D_{TREC}) y comprobar que la velocidad del agua se mantendrá bajo el límite máximo propuesto.

Rescribiendo la Ecuación 2.34 se tiene que:

$$A_{TCREC(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi (D_{TCREC(2,3,\dots,n)})^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.57.}$$

Donde:

$$A_{TCREC(2,3,\dots,n)} = \text{Área de sección de la tubería comercial de recirculación (m}^2\text{).}$$

$$D_{TCREC(2,3,\dots,n)} = \text{Diámetro de la tubería comercial de recirculación (m).}$$

La velocidad se comprueba mediante la Ecuación 2.35 en términos de la tubería de recirculación:

$$v_{TCREC(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{REC(2,3,\dots,n)}}{A_{TCREC(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.58.}$$

Donde:

$$v_{TCREC(2,3,\dots,n)} = \text{Velocidad del agua en la tubería comercial de recirculación (m/s).}$$

$$Q_{REC(2,3,\dots,n)} = \text{Caudal de recirculación (m}^3\text{/s).}$$

Si $v_{TC\ REC(2,3,\dots,n)} \geq v_{TMAX}$ se selecciona un diámetro de tubería comercial mayor.

2.7.1.5. Tubería de extracción de lodos

En cuanto a la tubería de extracción de lodos, primero es necesario calcular el volumen de agua de retrolavado, que será el que contenga los lodos. Este volumen será igual a:

$$V_{RET(2,3,\dots,n)} = Q_{RET(2,3,\dots,n)} t_{RET} \quad \text{Ecuación 2.59.}$$

Donde:

- $V_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua de retrolavado (m³).
- $Q_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Caudal agua de retrolavado (m³/s).
- t_{RET} = Duración del retrolavado (s). Ver Tabla 1.1 y convertir de horas a segundos.

El volumen de lodos que se producirá por día se puede calcular de la siguiente manera:

$$V_{LPD(2,3,\dots,n)} = F_{RET}(0.01 V_{RET(2,3,\dots,n)}) \quad \text{Ecuación 2.60.}$$

Donde:

- $V_{LPD(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de lodos por día (m³).
- F_{RET} = Número de filtros retrolavados por día (adimensional).

Entonces, el caudal de extracción de lodos será igual a:

$$Q_{EL(2,3,\dots,n)} = \frac{V_{LPD(2,3,\dots,n)}}{t_{EL}} \quad \text{Ecuación 2.61.}$$

Donde:

- $Q_{EL(2,3,\dots,n)}$ = Caudal de extracción de lodos del sedimentador (m³/s)
- t_{EL} = Tiempo de extracción de lodos del sedimentador (s). Ver Tabla 1 y convertir de horas a segundos.

La Ecuación 2.32 en términos de la tubería de extracción de lodos, resulta en:

$$A_{TEL(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{EL(2,3,\dots,n)}}{v_{TMAX}} \quad \text{Ecuación 2.62.}$$

Donde:

$A_{TEL(2,3,\dots,n)}$ = Área de sección de la tubería de extracción de lodos (m²).

v_{TMAX} = Velocidad máxima en tuberías (m/s). Ver Anexo 8.1.

El diámetro de tubería requerido se calcula mediante la Ecuación 2.33 en términos de la tubería de extracción de lodos:

$$D_{TEL(2,3,\dots,n)} = \sqrt{\frac{4 A_{TEL(2,3,\dots,n)}}{\pi}} \quad \text{Ecuación 2.63.}$$

Donde:

$D_{TEL(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería de extracción de lodos (m).

Este diámetro debe igualarse al diámetro comercial más cercano ($D_{TC EL}$) y comprobar que la velocidad del agua se mantendrá bajo el límite máximo propuesto.

A partir de la Ecuación 2.34 se tiene que:

$$A_{TC EL(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi (D_{TC EL(2,3,\dots,n)})^2}{4} \quad \text{Ecuación 2.64.}$$

Donde:

$A_{TC EL(2,3,\dots,n)}$ = Área de sección de la tubería comercial de extracción de lodos (m²).

$D_{TC EL(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro de la tubería comercial de extracción de lodos (m).

La velocidad se comprueba mediante la ecuación (3.35) en términos de la tubería de extracción de lodos:

$$v_{TC EL(2,3,\dots,n)} = \frac{Q_{EL(2,3,\dots,n)}}{A_{TC EL(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.65.}$$

Donde:

$v_{TC EL(2,3,\dots,n)}$ = Velocidad del agua en la tubería comercial de extracción de lodos (m/s).

Si $v_{TC EL(2,3,\dots,n)} \geq v_{TMAX}$ se selecciona un diámetro de tubería comercial mayor.

Los lodos se extraen por acción de la gravedad en sedimentadores superficiales (es decir edificados sobre el suelo) y por bombeo en sedimentadores enterrados, esto debe hacerse una vez que se haya llevado a cabo la recirculación de agua clarificada.

2.7.2. Longitudes de tuberías

La longitud total de los múltiples de agua cruda, agua tratada, entrada de retrolavado y salida de retrolavado, dependerá del número de filtros de la configuración. Para determinarla, se hacen las siguientes consideraciones:

- Para la configuración de dos filtros no se necesita un múltiple; si se considere un crecimiento futuro de la planta, se deberá dejar una preparación.
- El arreglo de la batería es cuadrado/rectangular, es decir, dos hileras paralelas en módulos de dos filtros. Con la única excepción del arreglo para tres filtros, que será en una sola hilera.
- A partir de cuatro filtros en adelante no se consideran números de filtros impares, es decir, la batería solo estará formada por 4, 6, 8, 10, ..., filtros.
- Los múltiples y conexiones a filtros tendrán un arreglo vertical, es decir, se colocan uno sobre otro.
- El número total de segmentos de tubería en los múltiples de agua cruda (N_{SMAC}), agua tratada (N_{SMAT}), entrada de retrolavado (N_{SMER}) y salida de retrolavado (N_{SMSR}) dependerá del número de filtros (Se denomina segmento a la tubería que une dos filtros consecutivos):

$$= 0, \text{ para dos filtros}$$

$$= 2, \text{ para tres filtros}$$

$$= \frac{N_F(4, \dots, n)}{2} - 1, \text{ para cuatro filtros en adelante.}$$

2.7.2.1. Tuberías de agua cruda

La tubería de agua cruda consta de dos partes: 1) la línea de alimentación a la batería de filtros y 2) el múltiple de distribución.

1) La primera parte dependerá del terreno disponible y el arreglo de la planta, por lo que, para fines de selección del tamaño y número de filtros, la longitud de la tubería puede estimarse mediante un arreglo preliminar de localización de las estructuras de la planta, que sea igual para todas las configuraciones.

2) La segunda parte depende del número de filtros correspondiente a cada configuración; como ejemplo se calculó la longitud tomando como referencia la Figura 2.8. Para el libre acceso a las válvulas, en todas las configuraciones se propone una separación de un metro entre filtros contiguos.

De la Figura 2.8 se puede deducir que:

$$L_{MAC(2,3,\dots,n)} + A_{CZAC} = D_{CF(2,3,\dots,n)} + 1$$

Despejando :

$$L_{MAC(2,3,\dots,n)} = (D_{CF(2,3,\dots,n)} + 1) - A_{CZAC} \quad \text{Ecuación 2.66.}$$

Donde:

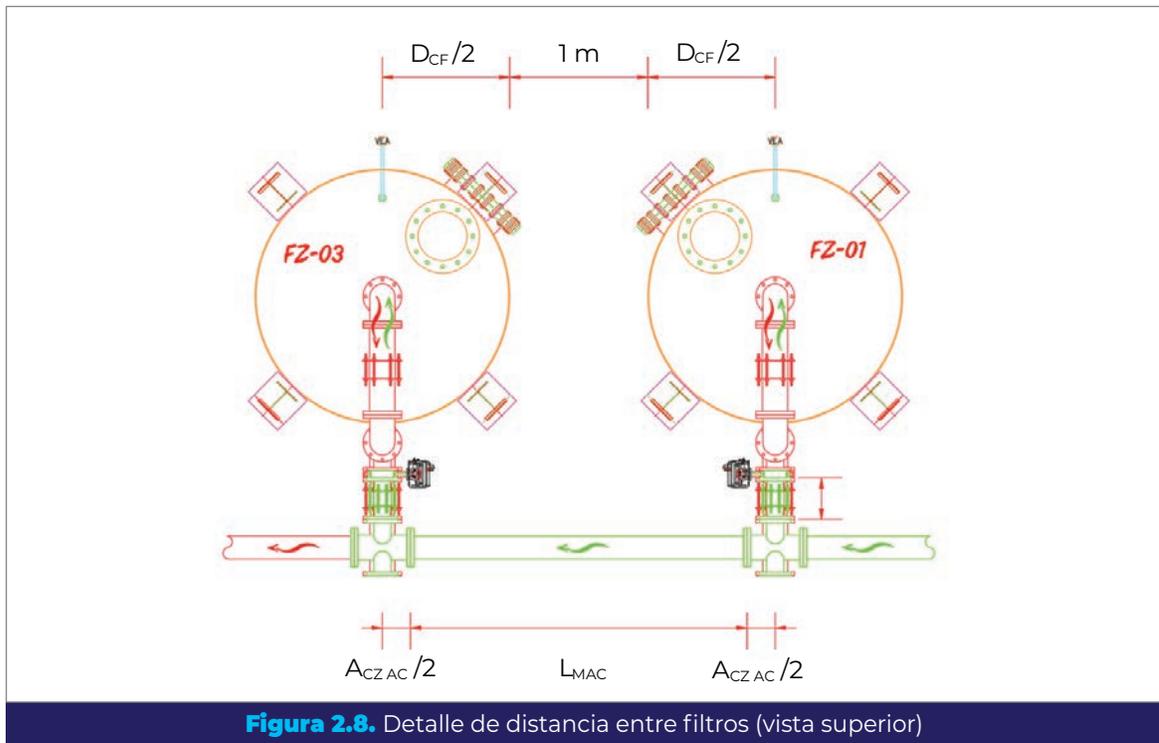
$L_{MAC(2,3,\dots,n)}$ = Longitud de un segmento de tubería del múltiple de agua cruda (m).

$D_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).

A_{CZAC} = Distancia A de la cruz, correspondiente al diámetro del múltiple de agua cruda (m). Ver Anexo 8.3.

Entonces, la longitud total del múltiple será:

$$L_{TMAC(2,3,\dots,n)} = N_{SMAC(2,3,\dots,n)} L_{MAC(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.67.}$$



Donde:

- $L_{TMAC}(2,3,\dots,n)$ = Longitud total de la tubería del múltiple de agua cruda (m).
 $N_{SMAC}(2,3,\dots,n)$ = Número de segmentos en el múltiple de agua cruda. Ver sección 2.7.1.5.

La longitud total de la tubería de agua cruda se calcula con la siguiente expresión:

$$L_{TAC}(2,3,\dots,n) = L_{TMAC}(2,3,\dots,n) + L_{AC}(2,3,\dots,n) \quad \text{Ecuación 2.68.}$$

Donde:

- $L_{TAC}(2,3,\dots,n)$ = Longitud total de tubería de agua cruda (m).
 $L_{AC}(2,3,\dots,n)$ = Longitud de tubería estimada, del pozo o del tanque de agua cruda a la batería de filtros (m).

2.7.2.2. Tuberías de agua tratada

La tubería del múltiple de agua tratada tiene la misma longitud que la del múltiple de agua cruda (Figura 2.9) y la longitud de la tubería de salida depende del sitio de almacenamiento o conexión a red, por lo tanto:

$$L_{TMAT}(2,3,\dots,n) = L_{TMAC}(2,3,\dots,n) \quad \text{Ecuación 2.69.}$$

Donde:

- $L_{TMAT}(2,3,\dots,n)$ = Longitud total de la tubería del múltiple de agua tratada (m).

La longitud total de la tubería de agua tratada se calcula como:

$$L_{TAT}(2,3,\dots,n) = L_{TMAT}(2,3,\dots,n) + L_{AT}(2,3,\dots,n) \quad \text{Ecuación 2.70.}$$

Donde:

- $L_{TAT}(2,3,\dots,n)$ = Longitud total de tubería de agua tratada (m).
 $L_{AT}(2,3,\dots,n)$ = Longitud de tubería estimada, de la batería de filtros al tanque de agua tratada o a la salida de la planta (m).

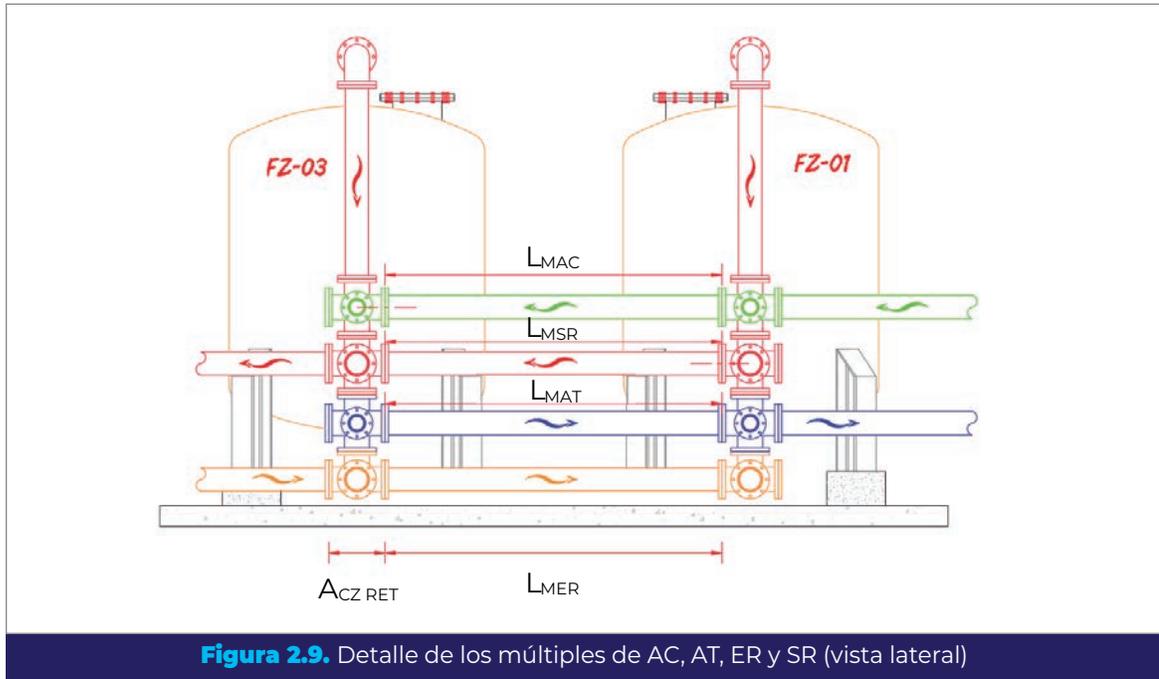


Figura 2.9. Detalle de los múltiples de AC, AT, ER y SR (vista lateral)

2.7.2.3. Tubería de conexión a filtro desde el múltiple de agua cruda

Esta tubería permite la conexión del múltiple de agua cruda con la de entrada al filtro. Para fines prácticos, en el arreglo propuesto por el IMTA se fija esta longitud con la de un carrito largo (50 cm) (Figura 2.10); de esta manera se establece la separación máxima entre los filtros y los múltiples, para permitir la colocación de una junta Dresser que facilite la instalación y desinstalación.

Tomando en cuenta lo anterior, la longitud de tubería es igual a:

$$L_{TCF AC (2,3,\dots,n)} = L_{CCF AC} N_F(2,3,\dots,n) \quad \text{Ecuación 2.71.}$$

Donde:

- $L_{TCF AC (2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de tubería de conexión a filtros desde múltiple de AC (m).
- $L_{CCF AC}$ = Longitud de un carrito de diámetro correspondiente a la tubería de conexión a cada filtro, que permita la instalación de una junta Dresser (m).
- $N_F(2,3,\dots,n)$ = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).

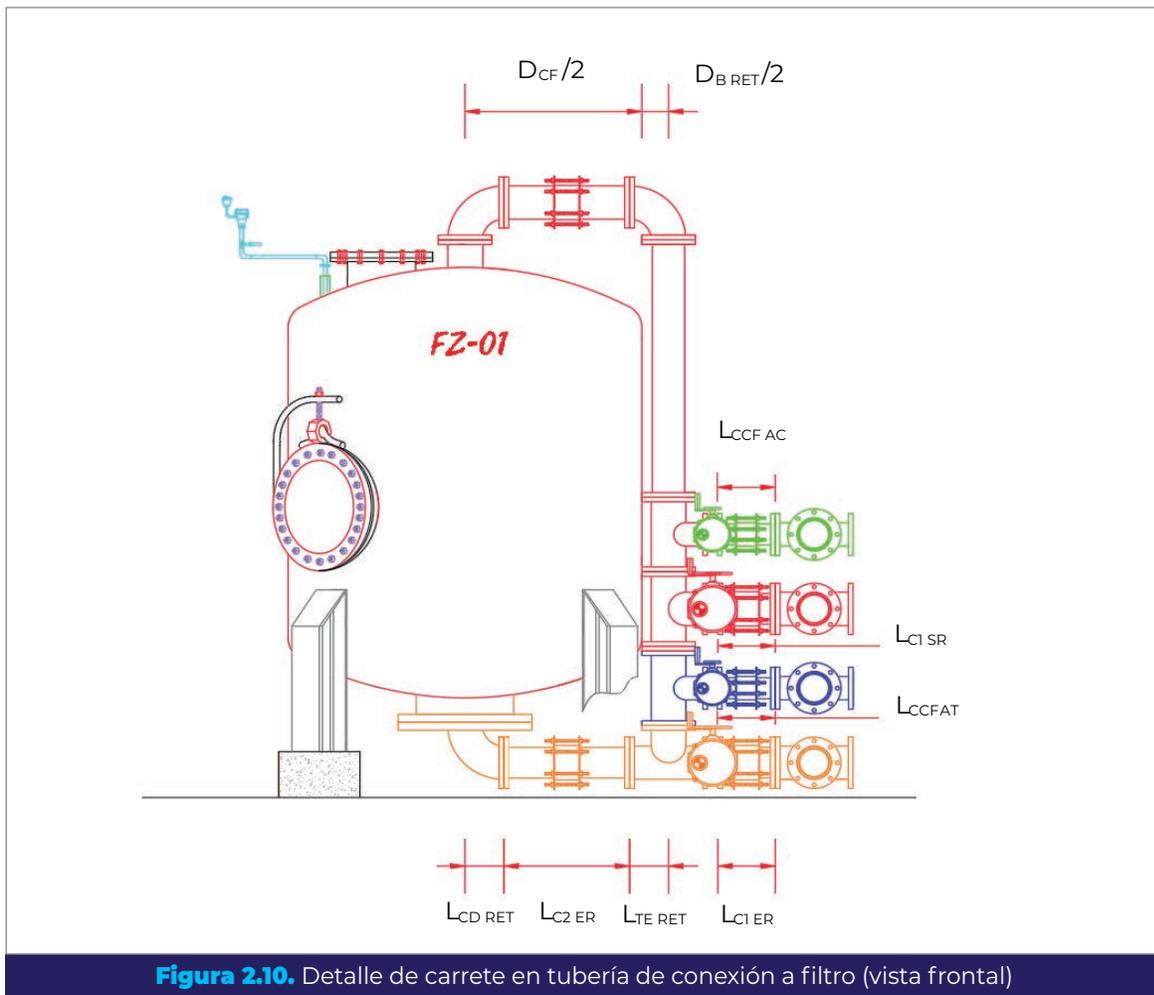
2.7.2.4. Tubería de conexión de filtros a múltiple de agua tratada

En los filtros, el caudal que entra será el mismo que salga, por lo tanto, la tubería de conexión de salida del agua tratada de cada filtro al múltiple tendrá el mismo diámetro que la tubería de conexión de entrada, y su longitud será la misma en todos los filtros (Figura 2.10). Así, poniendo la Ecuación 2.71 en términos de la tubería de salida de filtros:

$$L_{TCF AT(2,3,\dots,n)} = L_{CCF AT} N_{F(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.72.}$$

Donde:

- $L_{TCF AT(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de tubería de conexión a filtros a múltiple de AT (m).
- $L_{CCF AT}$ = Longitud de un carrete de diámetro correspondiente a la tubería de salida de filtros, que permita la instalación de una junta Dresser (m). Ver Figura 2.10.
- $N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).



2.7.2.5. Tubería de entrada de agua para el retrolavado de filtros

La tubería de entrada del agua para el retrolavado consta de tres partes: 1) la línea desde el tanque de agua cruda o tratada, según sea el caso, hasta el múltiple de entrada de agua para retrolavado; 2) el múltiple de entrada del agua para retrolavado y 3) el carrete de conexión entre el múltiple y el filtro. Como referencia para el cálculo se utilizan la Figura 2.9 y la Figura 2.10.

1) La longitud de la línea del tanque al múltiple se estima, para fines de selección, de la misma manera que en las tuberías de agua cruda y tratada, con base en un primer arreglo de referencia de la planta.

2) El múltiple de retrolavado se calcula con las mismas consideraciones hechas para los múltiples de agua cruda y tratada, partiendo de la Ecuación 2.66 y Ecuación 2.67 en términos de la tubería de entrada de retrolavado:

$$L_{MER(2,3,\dots,n)} = (D_{CF(2,3,\dots,n)} + 1) - A_{CZ\ RET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.73.}$$

$$L_{TMER(2,3,\dots,n)} = N_{SMER(2,3,\dots,n)} L_{MER(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.74.}$$

Donde:

$L_{MER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud de tubería de un segmento del múltiple de entrada de retrolavado (m).

$D_{CF(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial del filtro (m).

$A_{CZ\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Distancia A de la cruz, correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.

$L_{TMER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de la tubería del múltiple de entrada de retrolavado (m).

$N_{SMER(2,3,\dots,n)}$ = Número de segmentos en el múltiple de entrada de retrolavado. Ver sección 2.7.1.5.

3) El primer carrete de conexión entre el múltiple y el filtro (ver L_{C1ER} en la Figura 2.10), tendrá aproximadamente la misma longitud que los carretes de las tuberías de alimentación y salida de filtros (recomendado 50 cm), por lo tanto:

$$L_{TC1ER(2,3,\dots,n)} = L_{C1ER} N_{F(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.75.}$$

Donde:

- $L_{TC1ER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total correspondiente a todos los carretes "1" en la tubería de entrada de retrolavado (m).
- L_{C1ER} = Longitud del carrete "1" en cada filtro, de diámetro correspondiente a la tubería de retrolavado, que permita la instalación de una junta Dresser (m).
- = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).

Para el segundo carrete, tomando como referencia la Figura 2.10 se puede deducir que:

$$L_{CD\ RET(2,3,\dots,n)} + L_{C2\ ER(2,3,\dots,n)} + L_{TE\ RET(2,3,\dots,n)} = \frac{D_{CF(2,3,\dots,n)}}{2} + \frac{D_{B\ RET(2,3,\dots,n)}}{2}$$

Despejando $L_{C2\ ER}$:

$$L_{C2\ ER(2,3,\dots,n)} = \left(\frac{D_{CF(2,3,\dots,n)}}{2} + \frac{D_{B\ RET(2,3,\dots,n)}}{2} \right) - (L_{CD\ RET(2,3,\dots,n)} + L_{TE\ RET(2,3,\dots,n)})$$

Ecuación 2.76.

Donde:

- $L_{C2\ ER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud del carrete "2" de diámetro correspondiente a la tubería de retrolavado (m).
- $D_{B\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro exterior de la brida de diámetro nominal correspondiente a la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.
- $L_{CD\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Distancia L del codo de 45°, correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.
- $L_{TE\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Distancia L de la tee, correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.

Para obtener la longitud total de tubería, correspondiente a todos los carretes "2" de la batería de filtros, se multiplica su longitud individual por el número de filtros:

$$L_{TC2\ ER(2,3,\dots,n)} = L_{C2\ ER(2,3,\dots,n)} N_F(2,3,\dots,n) \quad \text{Ecuación 2.77.}$$

La longitud total de la tubería de entrada de retrolavado será igual a:

$$L_{TER(2,3,\dots,n)} = L_{TMER(2,3,\dots,n)} + L_{TC1ER(2,3,\dots,n)} + L_{TC2\ ER(2,3,\dots,n)} + L_{ER(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.78.

Donde:

- $L_{TER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de tubería de entrada de retrolavado (m).
- $L_{TMER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de la tubería del múltiple de entrada de retrolavado (m).
- $L_{TC2ER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total correspondiente a todos los carretes "2" en la tubería de entrada de retrolavado, de la batería de filtros (m).
- $L_{ER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud de tubería estimada desde el tanque de agua cruda o tratada hasta la batería de filtros (m).

2.7.2.6. Tubería de salida del agua de retrolavado de los filtros

La tubería de salida del retrolavado tendrá el mismo diámetro que la tubería de entrada y constará igualmente de tres partes: 1) la línea del múltiple al tanque sedimentador, 2) el múltiple de salida de agua de retrolavado, y 3) la tubería de conexión entre el filtro y el múltiple de salida de agua de retrolavado.

1) La longitud de la línea de la batería de filtros al tanque sedimentador se estima utilizando un esquema de distribución de estructuras de la planta de referencia, como se ha mencionado para otras tuberías.

2) El múltiple de salida de retrolavado tendrá la misma longitud y diámetro que para la tubería de entrada (ver Figura 2.9) por lo tanto:

$$L_{TMSR(2,3,\dots,n)} = L_{TMER(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.79.}$$

Donde:

$$L_{TMSR(2,3,\dots,n)} = \text{Longitud total de la tubería del múltiple de salida de retrolavado (m).}$$

3) La tubería de conexión entre el filtro y el múltiple se compone de tres carretes de tubería; los carretes L_{C1SR} y L_{C2SR} tendrán la misma longitud que los carretes L_{C1SR} y L_{C2SR} de la tubería de entrada de retrolavado (ver Figura 2.10 y Figura 2.11), en el caso de los carretes "1":

$$L_{TC1SR(2,3,\dots,n)} = L_{TC1ER(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.80.}$$

Donde:

$L_{TC1SR(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total correspondiente a todos los carretes "1" en la tubería de salida de retrolavado (m).

$L_{TC1ER(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total correspondiente a todos los carretes "1" en la tubería de entrada de retrolavado (m).

Para los carretes "2":

$$L_{TC2SR(2,3,\dots,n)} = L_{TC2ER(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.81.}$$

Donde:

$L_{TC2SR(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total correspondiente a todos los carretes "2" en la tubería de salida de retrolavado (m).

Los carretes L_{C3SR} se calculan tomando como referencia la Figura 2.10, de donde se puede deducir que:

$$L_{C3SR(2,3,\dots,n)} + 3A_{TE\ RET(2,3,\dots,n)} = h_{F(2,3,\dots,n)} + 2L_{BQF}$$

Despejando, se tiene que:

$$L_{C3SR(2,3,\dots,n)} = (h_{F(2,3,\dots,n)} + 2L_{BQF}) - 3A_{TE\ RET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.82.}$$

Donde:

$L_{C3SR(2,3,\dots,n)}$ = Longitud del carrete "3" de diámetro correspondiente a la tubería de retrolavado (m).

$h_{F(2,3,\dots,n)}$ = Altura del filtro con tapas (m).

L_{BQF} = Longitud de las boquillas del filtro (m). Se recomienda una longitud mínima de 15 cm.

$A_{TE\ RET(2,3,\dots,n)}$ = Distancia A de la tee, correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.

La altura del filtro (h_f), es la altura correspondiente al cuerpo cilíndrico del filtro más las dos tapas toriesféricas (ver sección 2.5.1 y 2.5.5):

$$h_{F(2,3,\dots,n)} = h_{CF} + 2h_{TF(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.83.}$$

Donde:

h_{CF} = Altura del cuerpo del filtro (m).

$h_{TF(2,3,\dots,n)}$ = Altura de la tapa torisférica del filtro (m).

La longitud total de los carretes "3" será:

$$L_{TC3\ SR(2,3,\dots,n)} = L_{C3\ SR(2,3,\dots,n)} N_{F(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.84.}$$

Donde:

$L_{TC3\ SR(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de los carretes "3" en la tubería de salida de retrolavado (m).

$N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada (adimensional).

La longitud total de la tubería de salida de retrolavado será entonces igual a:

$$L_{T\ SR(2,3,\dots,n)} = L_{TMSR(2,3,\dots,n)} + L_{TC1\ SR(2,3,\dots,n)} + L_{TC2\ SR(2,3,\dots,n)} + L_{TC3\ SR(2,3,\dots,n)} + L_{SR}$$

Ecuación 2.85.

Donde:

$L_{T\ SR(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de tubería de salida de retrolavado (m).

$L_{TMSR(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de la tubería del múltiple de salida de retrolavado (m).

L_{SR} = Longitud de tubería estimada, de la batería de filtros al tanque sedimentador (m).

2.7.2.7. Tubería de recirculación

Para determinar la longitud de la tubería de recirculación de agua clarificada, se estima la longitud mediante la utilización del esquema de referencia de ubicación de las estructuras de la planta, que dependerá del área de terreno disponible.

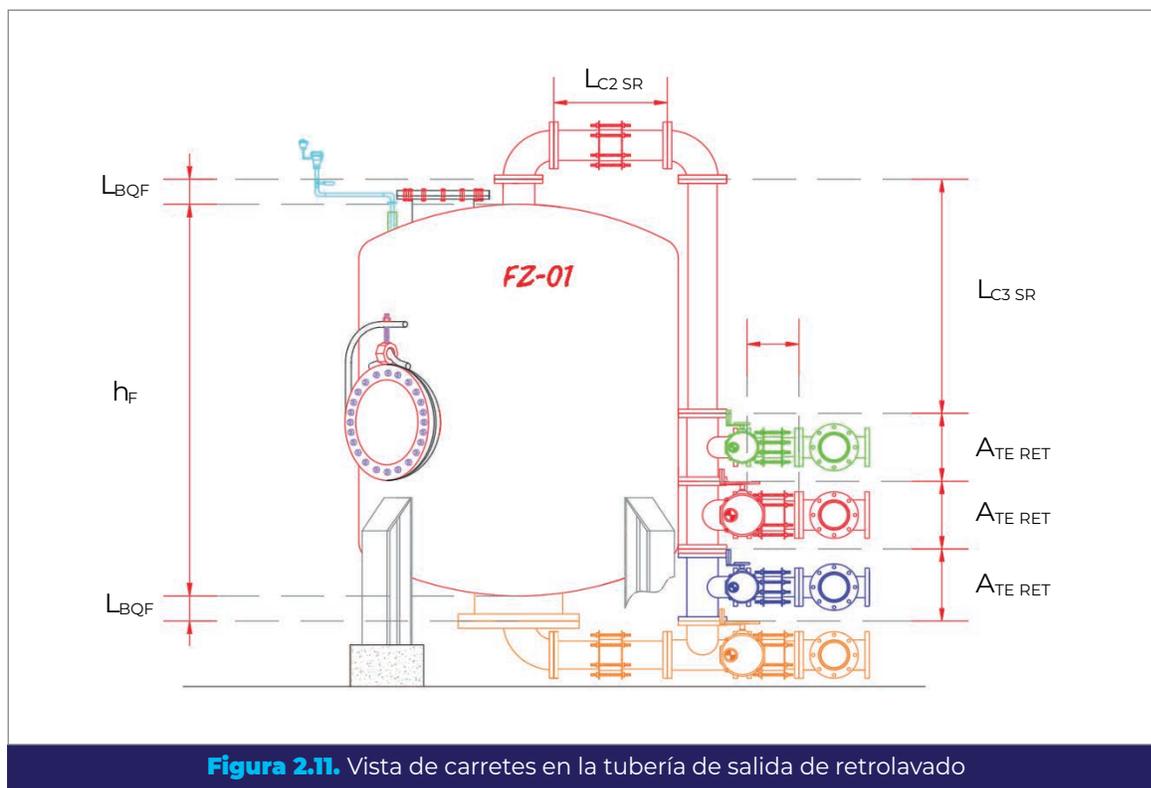
Entonces, la longitud total se expresa como:

$$L_{T\ REC(2,3,\dots,n)} = L_{REC} \quad \text{Ecuación 2.86.}$$

Donde:

$L_{T\ REC(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de tubería de recirculación (m).

L_{REC} = Longitud de tubería estimada, del tanque sedimentador al tanque de agua cruda o a la batería de filtros según sea el caso (m).



2.7.2.8. Tubería de extracción de lodos

Al igual que la tubería de recirculación, la longitud de esta tubería se estima mediante el arreglo de referencia de la planta, siendo:

$$L_{T\ EL(2,3,\dots,n)} = L_{EL} \quad \text{Ecuación 2.87.}$$

Donde:

$L_{T\ EL(2,3,\dots,n)}$ = Longitud total de tubería de extracción de lodos (m).

L_{EL} = Longitud de tubería estimada, del tanque sedimentador al tanque de lodos o al desagüe según sea el caso (m).

2.8. Sedimentador

El dimensionamiento del tanque sedimentador se explica a continuación, su costo puede estimarse con base en el costo del acero requerido para su construcción.

2.8.1. Diámetro del tanque sedimentador

Este tanque, que por cuestiones constructivas es más sencillo hacerlo de forma cilíndrica, deberá tener la capacidad suficiente para recibir el volumen de agua generada durante el retrolavado de un filtro, es decir:

$$V_{TSMIN (2,3,\dots,n)} = V_{RET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.88.}$$

Donde:

$V_{TSMIN (2,3,\dots,n)}$ = Volumen mínimo requerido en el tanque sedimentador (m^3).

$V_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua de retrolavado (m^3). Ver Ecuación 2.59.

A partir de la fórmula del volumen de un cilindro, se puede despejar el diámetro del tanque:

$$D_{TS(2,3,\dots,n)} = \sqrt{\frac{4 V_{TSMIN (2,3,\dots,n)}}{\pi h_{TS}}} \quad \text{Ecuación 2.89.}$$

Donde:

$D_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro del tanque sedimentador (m).

h_{TS} = Altura propuesta para el cuerpo del tanque sedimentador (m).

La altura h_{TS} se manipula para obtener un diámetro de tanque constructivamente conveniente, es decir, que se adapte al espacio existente.

2.8.2. Diseño de la tolva

Al tratarse de un sedimentador circular, la forma de la tolva será de un cono invertido truncado, donde el diámetro mayor será el diámetro del sedimentador y el diámetro menor será el diámetro de la tubería de extracción de lodos del sedimentador al tanque de lodos o al drenaje municipal, según sea el caso.

Es importante que la tolva cuente con un ángulo de fondo mayor que el ángulo de reposo de los lodos y que garantice el libre descenso de estos durante la extracción, por lo que para el diseño se propone uno y se calcula la altura de la tolva. En la Figura 2.12 se presenta un esquema de la tolva, se observa que la altura (h_{TOL}) se puede obtener mediante la relación trigonométrica del triángulo rectángulo de base $(D_{TS} - D_{TC EL})/2$, dicha relación es la siguiente:

$$\tan \alpha = \frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}}$$

En términos de la tolva tendremos:

$$\tan \theta_{TS} = \frac{h_{TOL}}{(D_{TS} - D_{TC\ EL})/2}$$

Despejando :

$$h_{TOL(2,3,\dots,n)} = \tan \theta_{TS} \frac{(D_{TS(2,3,\dots,n)} - D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)})}{2}$$

Ecuación 2.90.

Donde:

$h_{TOL(2,3,\dots,n)}$ = Altura de la tolva (m).

θ_{TS} = Angulo de la tolva del sedimentador (grados).

$D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial de la tubería de extracción de lodos (m).

Con la información anterior, y utilizando la fórmula para calcular el volumen de un cono truncado (Gieck y Gieck, 2003), el volumen de la tolva se calcula como:

$$V_{TOL(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi}{12} h_{TOL(2,3,\dots,n)} (D_{TS(2,3,\dots,n)}^2 + D_{TS(2,3,\dots,n)} D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)} + D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)}^2)$$

Ecuación 2.91.

Donde:

$V_{TOL(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de la tolva del sedimentador (m³).

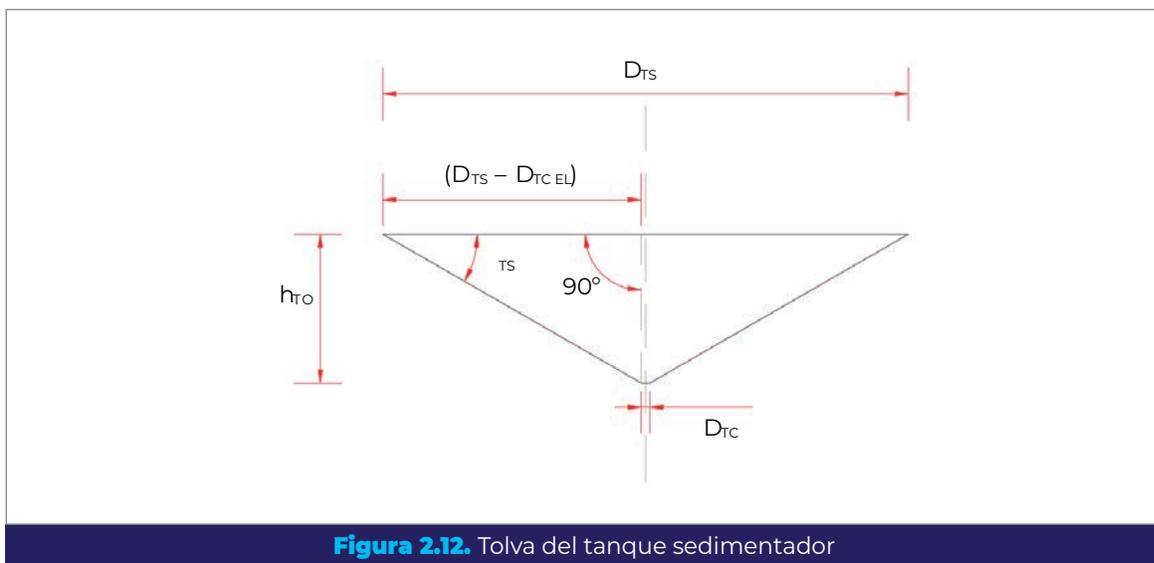


Figura 2.12. Tolva del tanque sedimentador

2.8.3. Diseño del cilindro del sedimentador

Debe considerarse que una parte del volumen de la tolva está destinado al almacenamiento de los lodos, por lo tanto, el volumen disponible para el agua de retrolavado será:

$$V_{DTOL(2,3,\dots,n)} = V_{TOL(2,3,\dots,n)} - V_{LPD(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.92.}$$

Donde:

$V_{DTOL(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua disponible en la tolva (m³).

$V_{LPD(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de lodos por día (m³). Ver Ecuación 2.60.

Entonces, el volumen requerido en el cilindro del sedimentador será igual a:

$$V_{RCS(2,3,\dots,n)} = V_{TSMIN(2,3,\dots,n)} - V_{DTOL(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.93.}$$

Donde:

$V_{RCS(2,3,\dots,n)}$ = Volumen requerido en el cilindro del sedimentador (m³).

$V_{TSMIN(2,3,\dots,n)}$ = Volumen mínimo requerido en el tanque sedimentador (m³).

Una vez determinado el volumen requerido se obtiene la altura final que deberá tener el cilindro del sedimentador, a partir de la fórmula del volumen del cilindro:

$$h_{CS(2,3,\dots,n)} = \frac{4 V_{RCS(2,3,\dots,n)}}{\pi D_{TS(2,3,\dots,n)}^2} \quad \text{Ecuación 2.94.}$$

Donde:

$h_{CS(2,3,\dots,n)}$ = Altura del cilindro del sedimentador (m).

$D_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro del tanque sedimentador (m).

2.8.4. Espesor del cuerpo del sedimentador

Para calcular el espesor del cuerpo del sedimentador se recomienda utilizar el método de *un pie* propuesto por el American Petroleum Institute (2007). En unidades del SI y en términos del sedimentador, el espesor será:

$$e_{CS\ C/C(2,3,\dots,n)} = \frac{4.9 D_{TS(2,3,\dots,n)}(h_{CS(2,3,\dots,n)} - 0.3) G_{AGUA}}{S_S} + e_C \quad \text{Ecuación 2.95.}$$

Donde:

- $e_{CS\ C/C(2,3,\dots,n)}$ = Espesor del cuerpo del sedimentador con corrosión (mm).
 G_{AGUA} = Gravedad específica del agua (adimensional).
 S_S = Esfuerzo máximo de tensión del material de construcción del sedimentador (MPa).
 e_C = Espesor por corrosión (mm). Se recomienda un espesor mínimo equivalente a 1/16" (ASME, 2015a).

El espesor calculado debe ajustarse al espesor de placa comercial más cercano, siempre tomando el espesor superior.

2.8.5. Peso de la tolva

Tomando como referencia la fórmula para calcular el área lateral (ver Figura 2.13) de un cono truncado (Gieck y Gieck, 2003), en términos de la tolva, se tiene que:

$$A_{LTOL(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi}{2} g_{L(2,3,\dots,n)}(D_{TS(2,3,\dots,n)} + D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)}) \quad \text{Ecuación 2.96.}$$

Donde:

- $A_{LTOL(2,3,\dots,n)}$ = Área lateral de la tolva del sedimentador (m²).
 $g_{L(2,3,\dots,n)}$ = Generatriz de la lateral de la tolva (m).

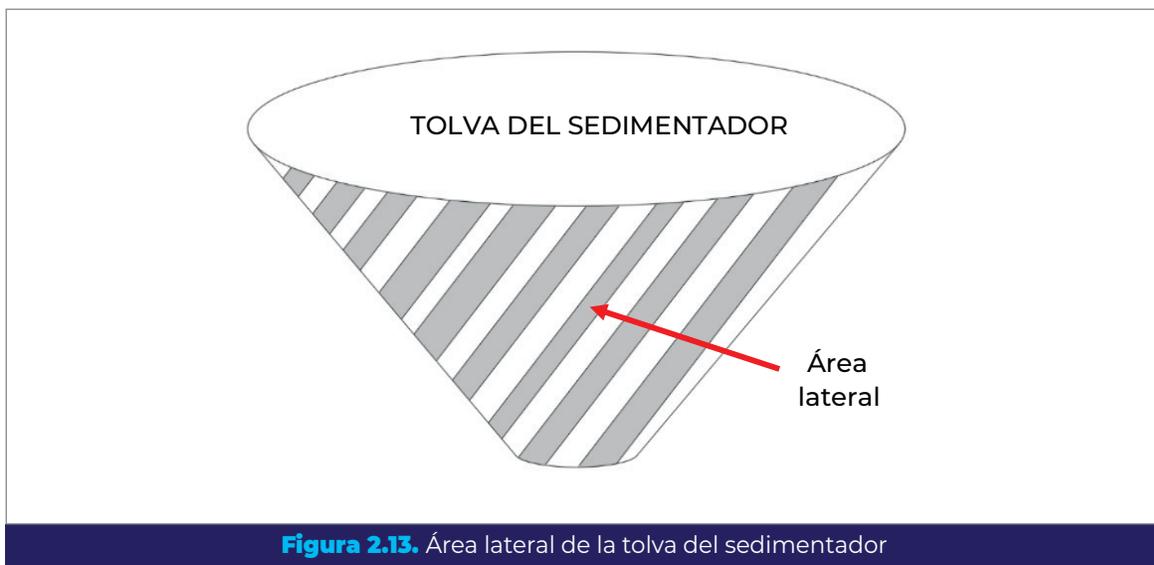


Figura 2.13. Área lateral de la tolva del sedimentador

$D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro comercial de la tubería de extracción de lodos (m).

La generatriz se calcula de la siguiente manera:

$$g_{L(2,3,\dots,n)} = \sqrt{[(D_{TS(2,3,\dots,n)} - D_{TC\ EL(2,3,\dots,n)})/2]^2 + h_{TOL(2,3,\dots,n)}^2} \quad \text{Ecuación 2.97.}$$

El peso la tolva será entonces:

$$W_{TOL(2,3,\dots,n)} = A_{LTOL(2,3,\dots,n)} e_{CS(2,3,\dots,n)} \rho_{AS} \quad \text{Ecuación 2.98.}$$

Donde:

$W_{TOL(2,3,\dots,n)}$ = Peso de la tolva del sedimentador (kg).

$e_{CS(2,3,\dots,n)}$ = Espesor comercial del cuerpo del sedimentador (m).

ρ_{AS} = Densidad del acero de construcción del sedimentador (kg/m³).

2.8.6. Peso del cilindro del sedimentador

El volumen de material necesario para construir el cilindro se calcula con la fórmula del cilindro hueco (Gieck y Gieck, 2003), escribiendola en terminos del sedimentador:

$$V_{MCS(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi}{4} h_{CS(2,3,\dots,n)} (D_{ES(2,3,\dots,n)}^2 - D_{TS(2,3,\dots,n)}^2) \quad \text{Ecuación 2.99.}$$

Donde:

$V_{MCS(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de material del cilindro del sedimentador (m³).

$h_{CS(2,3,\dots,n)}$ = Altura del cilindro del sedimentador (m).

$D_{ES(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro exterior del tanque sedimentador (m).

$D_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro interior del tanque sedimentador (m). Ver sección 2.8.1.

El diámetro exterior es igual a:

$$D_{ES(2,3,\dots,n)} = D_{TS(2,3,\dots,n)} + 2 e_{CS(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.100.}$$

Por lo tanto, el peso del cilindro será:

$$W_{CS(2,3,\dots,n)} = V_{MCS(2,3,\dots,n)} \rho_{AS} \quad \text{Ecuación 2.101.}$$

Donde:

$W_{CS(2,3,\dots,n)}$ = Peso del cilindro del sedimentador (kg).

2.8.7. Peso de la tapa del sedimentador

Para fines de selección, se considera únicamente una tapa plana circular sencilla, sin soportes o elementos adicionales. Por lo que el peso de dicha tapa se calcula como:

$$W_{TS(2,3,\dots,n)} = \frac{\pi D_{ES(2,3,\dots,n)}^2}{4} e_{CS(2,3,\dots,n)} \rho_{AS} \quad \text{Ecuación 2.102.}$$

Donde:

$W_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Peso de la tapa del sedimentador (kg).

2.8.8. Tanque de lodos

Cuando en el diseño del proceso se considere la deshidratación de los lodos producidos durante el retrolavado de los filtros, será necesario incluir en el área total de terreno para la planta la correspondiente al tanque donde se almacenarán los lodos extraídos del sedimentador. Para definir el volumen del tanque se toma en cuenta la experiencia con sistemas similares y se considera que aproximadamente el 1% del volumen de agua de retrolavado contiene a los lodos espesados (IMTA, 2013b).

Por lo tanto, para iniciar el cálculo del tanque, se utiliza el volumen de lodos por día, mediante la Ecuación 2.60.

Generalmente el volumen de lodos producidos por día es muy bajo, por lo que el tanque se puede diseñar para almacenar los lodos de dos o tres días, pero esto implica también que el filtro prensa se deberá seleccionar de un tamaño tal, que permita tratar todo el volumen de lodos antes de volver a llenar el tanque. Bajo esta consideración, el volumen de este se calcula de la siguiente manera:

$$V_{TL(2,3,\dots,n)} = V_{LPD(2,3,\dots,n)} N_{AL} \quad \text{Ecuación 2.103.}$$

Donde:

$V_{TL(2,3,\dots,n)}$ = Volumen del tanque de lodos (m³).

- $V_{LPD(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de lodos por día (m^3).
- N_{AL} = Número de días de almacenamiento del lodo en el tanque de lodos.

Es necesario proponer una profundidad para el tanque de lodos, se recomienda una profundidad máxima de 1.5 m, ya que el volumen de lodos almacenados es bajo. Se calcula el área del tanque requerida para esta unidad, tomando como base la fórmula del volumen del prisma rectangular:

$$A_{TL(2,3,\dots,n)} = \frac{V_{TL(2,3,\dots,n)}}{h_{TL}} \quad \text{Ecuación 2.104.}$$

Donde:

- $A_{TL(2,3,\dots,n)}$ = Área del tanque de lodos (m^2).
- h_{TL} = Profundidad propuesta del tanque de lodos (m).

Finalmente, considerando una geometría cuadrada:

$$a_{TL(2,3,\dots,n)} = \sqrt{A_{TL(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.105.}$$

Donde:

- $a_{TL(2,3,\dots,n)}$ = Longitud interior de los lados del tanque de lodos (m).

2.9. Tanque de agua cruda o agua tratada

Dependiendo de la calidad del agua y de la configuración del sistema, el agua para retrolavado de filtros puede tomarse, ya sea del tanque de agua cruda o del tanque de agua tratada. El tanque de interés para la comparación de las diferentes configuraciones será del que se tome el agua para retrolavado, ya que su volumen variará con el diámetro y el número de filtros.

La geometría final del tanque dependerá, entre otras cosas, del área de terreno disponible para su ubicación; la cual en primera instancia puede no estar definida. Por lo tanto, para facilitar el trabajo de cálculo, se considera una geometría cuadrada en el tanque para todas las configuraciones. Igualmente, para fines de selección, se considera el mismo espesor en muros (ES_{MT}), losa de cimentación y losa superior del tanque en todos los casos.

Para calcular el costo de construcción del tanque, se tomarán en cuenta tres componentes principales:

- Volumen de concreto.
- Cantidad de acero de refuerzo.
- Superficie de cimbra.

Las ecuaciones desarrolladas en esta sección se basan en la deducción y toman como referencia los esquemas presentados en la Figura 2.14 y en la Figura 2.15.

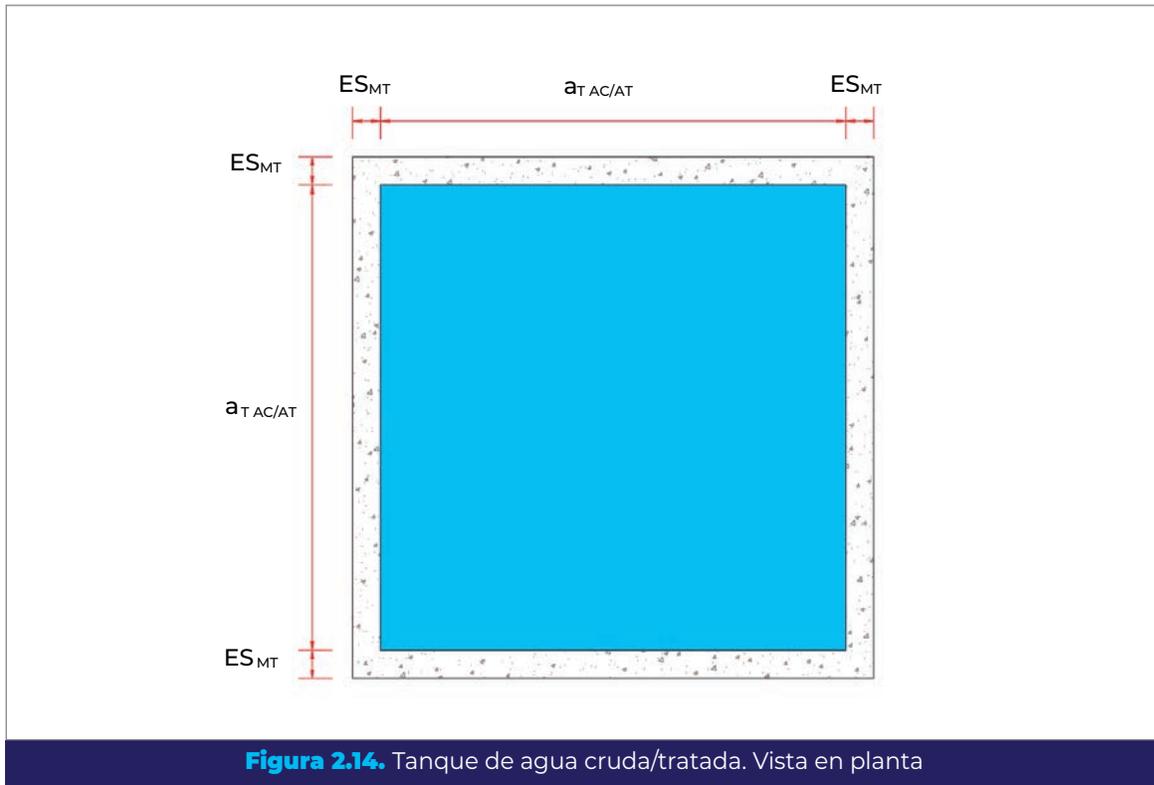


Figura 2.14. Tanque de agua cruda/tratada. Vista en planta

2.9.1. Volumen de concreto

Tanto para el cálculo del volumen del tanque, como para el del volumen de concreto necesario para su construcción, primero se debe calcular el volumen de agua cruda o tratada que se va a almacenar:

$$V_{AC/AT(2,3,\dots,n)} = Q_D t_{T AC/AT}$$

Ecuación 2.106.

Donde:

- $V_{AC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua cruda o agua tratada que se va a almacenar (m^3).
 Q_D = Caudal de diseño de la batería de filtros (m^3/s).
 $t_{TAC/AT}$ = Tiempo de almacenamiento en el tanque de agua cruda o agua tratada (s). Ver Tabla 1 y convertir de horas a segundos.

El tiempo de almacenamiento en cualquiera de los tanques, es el tiempo de autonomía establecido por diseño en caso de paro de la planta. Así, el volumen total de almacenamiento requerido en el tanque seleccionado para tomar de este el agua para la limpieza de los filtros, será la suma del volumen de agua correspondiente al tiempo de autonomía, más el volumen requerido para el retrolavado:

$$V_{TAC/AT(2,3,\dots,n)} = V_{AC/AT(2,3,\dots,n)} + V_{RET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.107.}$$

Donde:

- $V_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Volumen total del tanque de agua cruda o agua tratada (m^3).
 $V_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de agua de retrolavado (m^3). Ver).Ecuación 2.59

Para obtener el área que ocupará el tanque es necesario proponer una profundidad para el mismo. La profundidad puede establecerse con base en el espacio existente, en la dificultad de perforación por el tipo de terreno, o en la experiencia del proyectista.

Una vez propuesta la profundidad, el área del tanque se calcula mediante la ecuación del volumen de un prisma rectangular:

$$A_{TAC/AT(2,3,\dots,n)} = \frac{V_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}}{h_{TAC/AT}} \quad \text{Ecuación 2.108.}$$

Donde:

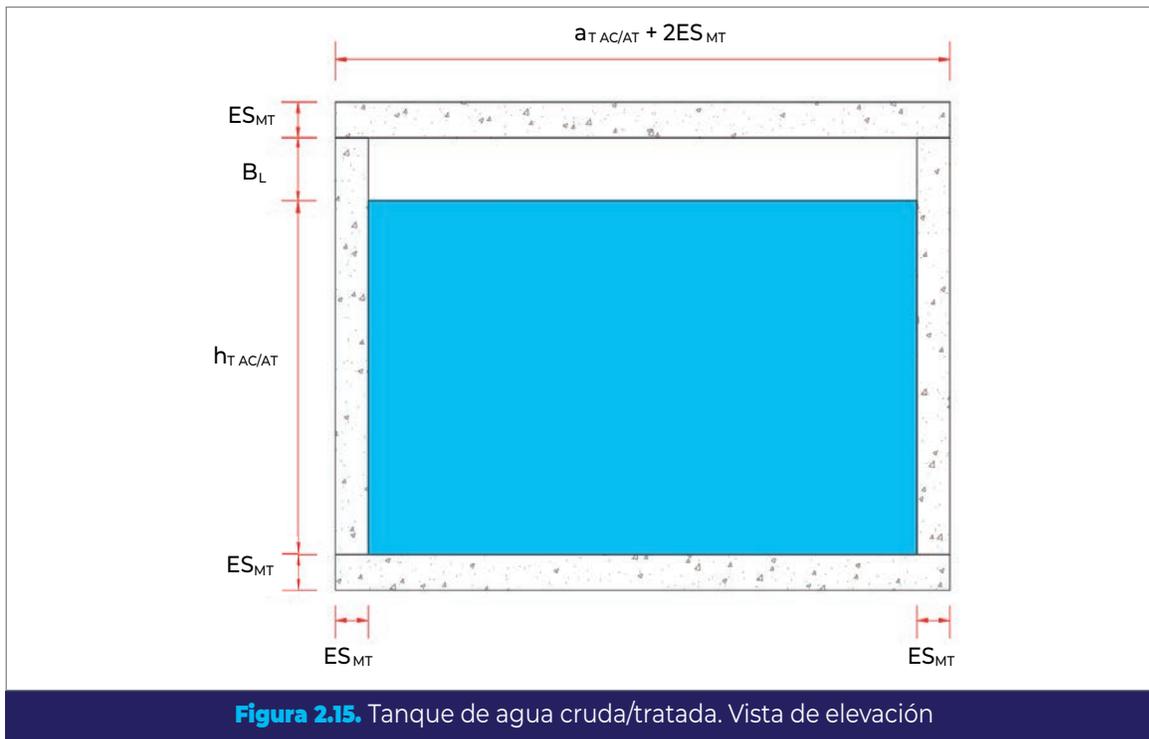
- $A_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Área del tanque de agua cruda o tratada (m^2).
 $h_{TAC/AT}$ = Profundidad propuesta para el tanque de agua cruda o tratada (m).

Para una geometría cuadrada (Ver Figura 2.14):

$$a_{TAC/AT(2,3,\dots,n)} = \sqrt{A_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}} \quad \text{Ecuación 2.109.}$$

Donde:

$a_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Longitud interior de los lados del tanque de agua cruda o tratada (m).



Como se observa en la Figura 2.15, la profundidad total del tanque será:

$$h_{TTAC/AT} = h_{TAC/AT} + B_L \quad \text{Ecuación 2.110.}$$

Donde:

$h_{TTAC/AT}$ = Profundidad total del tanque de agua cruda o tratada (m).

B_L = Bordo libre en el tanque (m).

La profundidad propuesta para los tanques deberá estar entre 3 y 4 metros, por cuestiones constructivas y por los valores de la carga neta de succión positiva disponible (NPSH por sus siglas en inglés) de las bombas usuales. Los tanques pueden ser superficiales o estar semi-enterrados, el bordo libre es una altura de tolerancia para amortizar acumulaciones de agua y para la tubería de demasías que dirijan posibles derramamientos hacia el drenaje pluvial o sanitario. Las dimensiones del NPSH y del bordo libre son independientes del número de filtros, ya que para todas las configuraciones se busca la

profundidad máxima y así, la menor área de superficie. Por lo tanto, la profundidad total ($h_{TTAC/AT}$) será la misma en todos los casos.

Para calcular el volumen total de concreto necesario para el tanque, se propone obtener por separado el volumen de las cuatro paredes, la losa inferior y la losa superior.

En el caso de los muros se considera: $a_{TAC/AT} + 2ES_{MT}$ el largo, el espesor ES_{MT} y la altura $h_{TTAC/AT}$ (ver Figura 2.14 y Figura 2.15):

$$V_{CM(2,3,\dots,n)} = [2(a_{TAC/AT(2,3,\dots,n)} + 2ES_{MT}) + 2a_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}]ES_{MT} h_{TTAC/AT}$$

Ecuación 2.111.

Donde:

- $V_{CM(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de concreto en muros (m^3).
 $a_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Longitud de lado interior del tanque de agua cruda o tratada (m).
 ES_{MT} = Espesor de los muros del tanque (m).

Como se mencionó anteriormente, para fines de selección se considera el mismo espesor tanto en muros como en losa de cimentación y losa superior. Por lo tanto, el volumen de concreto de las losas se puede calcular junto:

$$V_{CL(2,3,\dots,n)} = 2 [(a_{TAC/AT(2,3,\dots,n)} + 2ES_{MT})^2 ES_{MT}] \quad \text{Ecuación 2.112.}$$

Donde:

- $V_{CL(2,3,\dots,n)}$ = Volumen de concreto en losa de cimentación y losa superior (m^3).

El volumen total de concreto para el tanque será entonces:

$$V_{TCAC/AT(2,3,\dots,n)} = V_{CM(2,3,\dots,n)} + V_{CL(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.113.}$$

Donde:

- $V_{TCAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Volumen total de concreto requerido para el tanque de agua cruda o tratada (m^3).

2.9.2. Cantidad de acero de refuerzo

La cantidad de acero de refuerzo dependerá del diseño estructural del tanque, sin embargo, para fines de selección puede tomarse un valor de referencia con base en proyectos similares y en la experiencia del proyectista.

De esta forma, la cantidad de acero puede calcularse como:

$$W_{TA\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)} = V_{TT\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)} R_{AR} \quad \text{Ecuación 2.114.}$$

Donde:

- $W_{TA\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)}$ = Cantidad total de acero de refuerzo para el tanque de agua cruda o tratada (kg).
- R_{AR} = Relación cantidad de acero de refuerzo por unidad de volumen de concreto (kg/m³).

2.9.3. Superficie de cimbra

Para el cálculo de la cantidad de cimbra necesaria para construir el tanque, se tomará en cuenta el área exterior e interior de las paredes y el área correspondiente a la parte interior de la losa superior.

Tomando nuevamente la Figura 2.14 y la Figura 2.15 como referencia, para las paredes exteriores, el área será igual a:

$$A_{CME\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)} = 4(a_{TAC\ /AT\ (2,3,\dots,n)} + 2ES_{MT})h_{TTAC\ /AT} \quad \text{Ecuación 2.115.}$$

Donde:

- $A_{CME\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)}$ = Cantidad de cimbra para los muros exteriores del tanque de agua cruda o tratada (m²).
- $h_{TTAC\ /AT}$ = Profundidad total del tanque de agua cruda o tratada (m).

Para los muros interiores se tiene que:

$$A_{CMI\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)} = 4a_{TAC\ /AT\ (2,3,\dots,n)}h_{TTAC\ /AT} \quad \text{Ecuación 2.116.}$$

Donde:

- $A_{CMI\ AC\ /AT\ (2,3,\dots,n)}$ = Cantidad de cimbra para los muros interiores del tanque de agua cruda o tratada (m²).

La superficie de cimbra requerida para la parte interior de la losa superior será:

$$A_{CLS\ AC/AT(2,3,\dots,n)} = (a_{T\ AC/AT(2,3,\dots,n)})^2 \quad \text{Ecuación 2.117.}$$

Donde:

$A_{CLS\ AC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Cantidad de cimbra para la losa del tanque de agua cruda o tratada (m²).

$a_{T\ AC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Longitud de lado interior del tanque de agua cruda o tratada (m).

Finalmente, la cantidad total de cimbra requerida para la construcción del tanque será:

$$A_{TCAC/A(2,3,\dots,n)} = A_{CME\ AC/AT(2,3,\dots,n)} + A_{CMI\ AC/AT(2,3,\dots,n)} + A_{CLS\ AC/AT(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.118.

Donde:

$A_{TCAC/A(2,3,\dots,n)}$ = Cantidad total de cimbra para el tanque de agua cruda o tratada (m²).

2.10. Capacidad del equipo de bombeo

2.10.1. Carga de bombeo de retrolavado

Para calcular la carga necesaria para el retrolavado, es necesario aplicar la ecuación de la energía a una línea de conducción (CONAGUA, 2015a):

$$\left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}\right) = h_F \quad \text{Ecuación 2.119.}$$

Donde (ver Figura 2.16):

z_1, z_2 = Elevación de la conducción en las secciones 1 y 2 (m).
 z (Carga de posición o energía potencial de posición) representa la elevación de la sección (1 o 2 en este caso) con respecto a la referencia 0-0 en la Figura 2.16. La posición de este plano de referencia es completamente arbitraria, en ocasiones se adopta el nivel del mar, pero no necesariamente.

- P_1, P_2 = Presión interna en las secciones 1 y 2 (N/m²).
 P/γ (carga de presión o energía potencial de presión) indica la presión en cada sección dividida por el peso específico del líquido.
- h_F = Pérdida de carga por fricción en el tramo de tubería entre 1 y 2 (m).
- $v^2/2g$ = Carga de velocidad o energía cinética. Es la energía cinética en cada sección.

Se aplican algunas consideraciones (CONAGUA, 2015a):

- Fluido incompresible.
- Flujo permanente.
- Volumen de control rígido y fijo.
- Volumen de control con una sola entrada y salida, normales al flujo.

Para nuestro caso de estudio, z_1 será el nivel mínimo en el tanque de agua cruda o tratada, según de dónde se tome el agua para el retrolavado y z_2 será el nivel máximo en el tanque sedimentador.

Para adicionar energía hidráulica a una conducción, se debe agregar a la ecuación de conservación de energía la carga del equipo de bombeo (H_B) y la pérdida de carga total en el sistema (H_F), (CONAGUA, 2015a).

$$\left(z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g}\right) - \left(z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}\right) = H_F - H_B$$

Ecuación 2.120.

Reagrupando la ecuación (3.120):

$$(z_1 - z_2) + \left(\frac{P_3 - P_2}{\gamma}\right) + \left(\frac{v_1^2 - v_2^2}{2g}\right) = H_F - H_B$$

Ecuación 2.121.

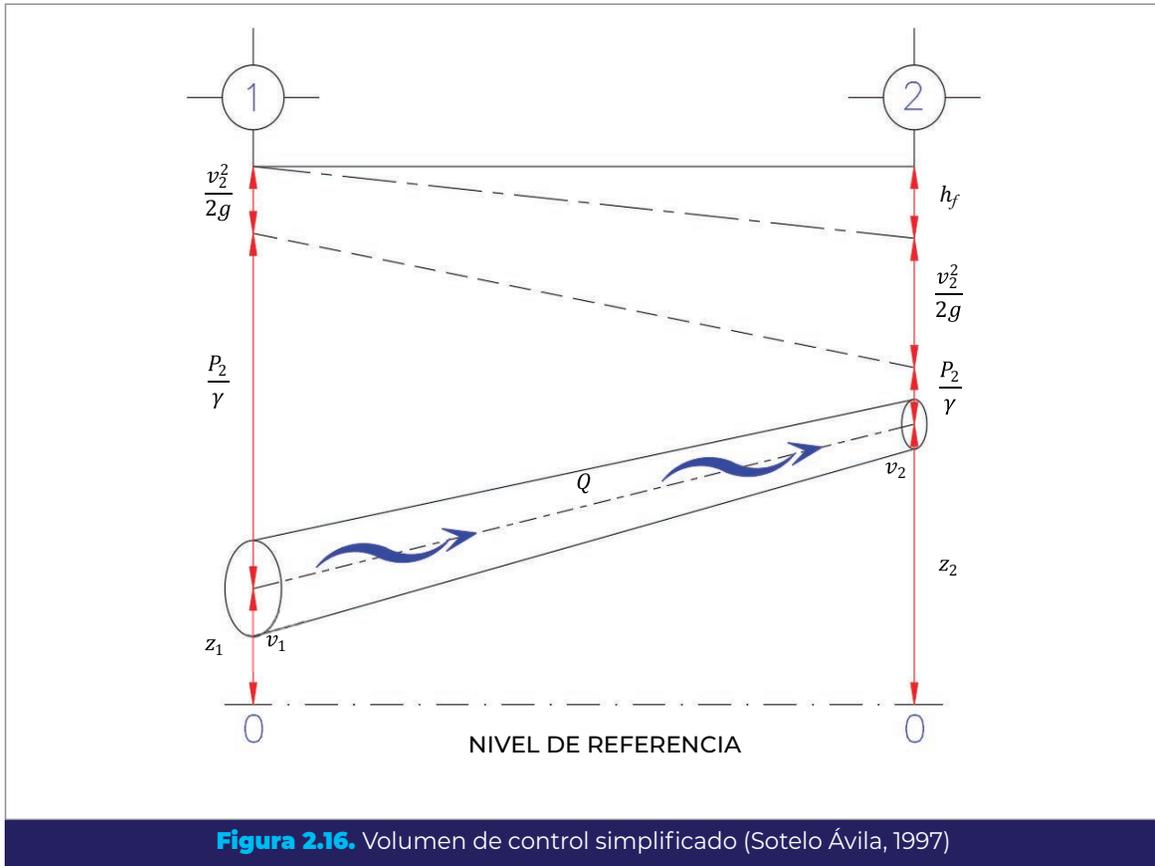


Figura 2.16. Volumen de control simplificado (Sotelo Ávila, 1997)

Considerando que la velocidad es la misma a lo largo de la tubería (lo cual significa que no hay cambio de diámetro), es decir, $v_1 = v_2$, y que tanto el tanque de agua cruda o tratada, como el tanque sedimentador, se encuentran a presión atmosférica, es decir, $P_1 = P_2 = P_{ATM}$, la carga que la bomba de retrolavado debe suministrar al sistema resulta:

$$H_{BRET(2,3,\dots,n)} = (z_2 - z_1) + H_{FRET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.122.}$$

Donde:

$$H_{BRET(2,3,\dots,n)} = \text{Carga de bombeo de retrolavado (m).}$$

$$H_{FRET(2,3,\dots,n)} = \text{Pérdida de carga total durante el retrolavado (m).}$$

Por otra parte, las pérdidas de carga están compuestas por dos partes, pérdidas por fricción y pérdidas locales:

$$H_{FRET(2,3,\dots,n)} = h_{fRET(2,3,\dots,n)} + h_{LRET(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.123.}$$

Donde:

$h_{jRET(2,3,\dots,n)}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de retrolavado (m).

$h_{LRET(2,3,\dots,n)}$ = Pérdida de carga local durante el retrolavado (m).

2.10.1.1. Pérdida de carga por fricción en la tubería de retrolavado

Las pérdidas de carga por fricción se calculan a través de la ecuación de Darcy-Weisbach (1856):

$$h_{jRET(2,3,\dots,n)} = f_{RET(2,3,\dots,n)} \frac{L_{RET(2,3,\dots,n)} v_{TCRET(2,3,\dots,n)}^2}{D_{TCRET(2,3,\dots,n)} 2g} \quad \text{Ecuación 2.124.}$$

Donde:

$f_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Coeficiente de pérdidas durante el retrolavado (adimensional).

$L_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Longitud de la tubería de retrolavado (m).

$D_{TCRET(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro interior de la tubería comercial para retrolavado (m). Ver sección 3.7.1.3.

$v_{TCRET(2,3,\dots,n)}$ = Velocidad media del flujo en la tubería comercial de retrolavado (m/s).

g = Aceleración gravitacional (m/s²).

La longitud de la tubería de retrolavado L_{RET} , considera la tubería desde la descarga de la bomba de retrolavado hasta la entrada al sedimentador, por lo tanto:

$$L_{RET(2,3,\dots,n)} = L_{TER(2,3,\dots,n)} + L_{TSR(2,3,\dots,n)} \quad \text{Ecuación 2.125.}$$

Donde:

$L_{RET(2,3,\dots,n)}$ – Longitud total de tubería de entrada de retrolavado (m).

$L_{TSR(2,3,\dots,n)}$ – Longitud total de tubería de salida de retrolavado (m).

“El coeficiente de pérdidas está en función de la rugosidad de las paredes de la tubería, sin embargo, como ésta no es homogénea a lo largo de la conducción, para fines de diseño se establece un valor medio equivalente. Conviene aclarar que en dicho valor intervienen otros factores, como el número de juntas y su alineación en cada tramo de tubería, o bien el tipo de costura o remachado en tuberías de acero, así como el efecto de las incrustaciones o ataques al material por la acción del agua (Sotelo Ávila,

2002)" (CONAGUA, 2015b); estos deben considerarse cuando se cuente con datos de los mismos.

A través de estudios experimentales (CONAGUA, 2015a) se determinó el coeficiente , el cual se asoció al diámetro, a la rugosidad del material de la tubería y al número de Reynolds; este último calculado como:

$$Re_{RET(2,3,\dots,n)} = \frac{v_{TC\ RET(2,3,\dots,n)} D_{TC\ RET(2,3,\dots,n)}}{\nu_{AGUA}} \quad \text{Ecuación 2.126.}$$

Donde:

$Re_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Número de Reynolds en la tubería de retrolavado (adimensional).

ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).

Es posible determinar el coeficiente de pérdidas mediante un método iterativo utilizando la ecuación empírica propuesta por Colebrook y White (1939) o de forma gráfica haciendo uso del diagrama de Moody (1944); sin embargo, la aplicación de estos métodos no resulta práctica cuando se requiere calcular un coeficiente para cada una de las diferentes configuraciones analizadas; por lo que resulta más conveniente aproximarlos de forma directa a través de la ecuación de Swamee – Jain (1976):

$$f_{RET(2,3,\dots,n)} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_T / D_{TC\ RET(2,3,\dots,n)}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{RET(2,3,\dots,n)}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 2.127.}$$

Válida para $5,000 < Re < 10^6$ y $10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}$.

Donde:

ε_T = Rugosidad absoluta del material de las tuberías (m).

En el Anexo 8.4 se presentan algunos valores de referencia de rugosidad absoluta para tubos lisos recopilados por Sotelo Ávila (1997), pero lo más recomendable es consultar las especificaciones de cada proveedor, las cuales deberán estar fundamentadas en la normatividad correspondiente.

2.10.1.2. Pérdidas de carga locales en la tubería de retrolavado

La ecuación para el cálculo de las pérdidas locales tiene la forma siguiente (Sotelo Ávila, 1997):

$$h_{LRET(2,3,\dots,n)} = k \frac{v_{TCRET(2,3,\dots,n)}^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2.128.}$$

Donde:

- $h_{LRET(2,3,\dots,n)}$ = Pérdida de carga local durante el retrolavado (m).
- k = Coeficiente para el cálculo de pérdidas locales (adimensional).
- $v_{TCRET(2,3,\dots,n)}$ = Velocidad del fluido en la tubería comercial de retrolavado, aguas abajo de la conexión o accesorio (m/s).

Las pérdidas locales se deben calcular para cada accesorio presente en la tubería de retrolavado. En el Anexo 8.5 se presentan valores del coeficiente k para algunos accesorios, calculados con las ecuaciones y tablas desarrolladas por Crane Co (1982).

En la medida de lo posible, se recomienda que las pérdidas locales sean definidas o estimadas con base en los valores proporcionados por los fabricantes, principalmente para válvulas y medidores (CONAGUA, 2015a).

2.10.2. Potencia del equipo de bombeo de retrolavado

2.10.2.1. Potencia de la bomba

Una vez que se ha determinado la carga de bombeo de retrolavado requerida, se procede a calcular la potencia de la bomba (CONAGUA, 2015a):

$$P_{BRET(2,3,\dots,n)} = \frac{\gamma_{AGUA} Q_{RET(2,3,\dots,n)} H_{BRET(2,3,\dots,n)}}{\eta} \quad \text{Ecuación 2.129.}$$

Donde:

- $P_{BRET(2,3,\dots,n)}$ = Potencia de la bomba de retrolavado (W).
- γ_{AGUA} = Peso específico del agua (N/m³).
- $Q_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Caudal agua de retrolavado (m³/s).
- $H_{BRET(2,3,\dots,n)}$ = Carga de bombeo de retrolavado (m).
- η = Eficiencia de la bomba (decimal, adimensional).

2.10.2.2. Potencia del motor

De acuerdo con Amador Vilariño (2013), los criterios de selección de la potencia requerida del motor que acompaña a la bomba establecen que hay que multiplicar por un factor a la potencia requerida por la bomba. Este factor se escoge en función de su magnitud a partir de la Tabla 2.1.

Por lo tanto, la potencia del motor eléctrico se calcula como:

$$P_{MRET (2,3,...,n)} = P_{BRET (2,3,...,n)} F \quad \text{Ecuación 2.130.}$$

Donde:

$P_{MRET (2,3,...,n)}$ = Potencia del motor eléctrico del equipo de retrolavado (W).

F = Factor de multiplicación (adimensional).

Tabla 2.1. Factores de multiplicación para calcular la potencia nominal del motor acompañante (Amador Vilariño, 2013)

Potencia de la bomba	Factor (F)
Menor de 1.5 kW	1.50
De 1.5 kW a 4 kW	1.25
De 4 kW a 7.5 kW	1.20
De 7.5 kW a 40 kW	1.15
Mayor de 40 kW	1.10

La potencia del motor eléctrico es la que se tomará para el cálculo del costo de energía de retrolavado.

2.11. Menor costo de operación

Para fines de comparación entre las diferentes configuraciones, los únicos costos de operación que varían dependiendo del número y tamaño de los filtros son los debidos a: 1) retrolavado, 2) recirculación de agua sedimentada, y 3) deshidratado de lodos; sin embargo, estos dos últimos son despreciables en comparación con el primero.

Debido a esto, el costo de energía por retrolavado es el único considerado para hacer el análisis de selección y depende directamente de la potencia de la bomba de retrolavado, que a su vez depende de: a) desnivel existente entre la succión del equipo de retrolavado y la entrada al tanque sedimentador; b) caudal de agua de retrolavado; c) diámetro y longitud de las tuberías; d) número de accesorios y dispositivos en la tubería;

e) volumen de medios filtrantes; f) diámetro de los filtros; y g) tipo de toberas utilizadas para retener los medios filtrantes. Todo lo anterior se refleja en la carga de bombeo.

Es necesario considerar la pérdida de carga que se producirá en el filtro debido a los medios filtrantes, pero para fines de selección de la configuración más adecuada, puede utilizarse un valor de referencia tomado de proyectos similares, esto queda a criterio del proyectista. Más adelante se profundizará en el cálculo de la pérdida de carga en los medios filtrantes durante el retrolavado, para el diseño completo de la configuración seleccionada.

2.11.1. Costo de energía

Para calcular el costo de energía eléctrica durante el retrolavado, el primer paso es consultar las tarifas vigentes de la CFE en la zona donde se instalará la planta y para el tipo de instalación correspondiente. Como ejemplo de cálculo se muestran en la Tabla 3.2 las tarifas GDMTH (Gran demanda en media tensión horaria) al mes de julio de 2020 para la región tarifaria Valle de México Centro (CFE, 2020).

Tabla 2.2. Tarifa GDMTH para la división Valle de México Centro (CFE, 2020)

Tarifa	Intervalo Horario	Cargo	Unidades	Valor
GDMTH (Jul-20)	-	Fijo	\$/mes	926.62
	Base	Variable (Energía)	\$/kWh	0.5926
	Intermedia	Variable (Energía)	\$/kWh	0.8842
	Punta	Variable (Energía)	\$/kWh	1.0243
	-	Distribución	\$/kW	68.83
	-	Capacidad	\$/kW	195.84

En la Tabla 2.3 y la Tabla 2.4 se muestran los horarios de los periodos de punta, intermedio y base para los días de la semana, en distintas temporadas del año, para las regiones Central, Noreste, Noroeste, Norte, Península y Sur.

A partir de la forma en que se aplican las tarifas por parte de la CFE se puede calcular el costo energético obteniendo un promedio ponderado de las tarifas aplicables en cada rango para toda la semana (CONAGUA, 2015a).

En el caso del retrolavado, este no se lleva a cabo las 24 horas del día, ni se tiene la certeza de qué tipo de demanda será aplicable al momento de realizarse. Por lo tanto, se sugiere calcular un costo por kilowatt-hora promedio anual para obtener el costo de energía para retrolavado.

De la Tabla 2.3 y la Tabla 2.4 se puede obtener el número de horas por día correspondientes a las demandas base, intermedia y punta, para los diferentes días de la semana; y del calendario del año vigente se obtiene el número de días de lunes a viernes, sábados, domingos y días festivos.

Tabla 2.3. Periodo del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre (CFE, 2020)

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 20:00 22:00 - 24:00	20:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 7:00	7:00 - 24:00	
Domingo y festivo	0:00 - 19:00	19:00 - 24:00	

Tabla 2.4. Periodo del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril (CFE, 2020)

Día de la semana	Base	Intermedio	Punta
Lunes a viernes	0:00 - 6:00	6:00 - 18:00 22:00 - 24:00	18:00 - 22:00
Sábado	0:00 - 8:00	8:00 - 19:00 21:00 - 24:00	19:00 - 21:00
Domingo y festivo	0:00 - 18:00	18:00 - 24:00	

Así, para cada periodo tendremos que:

$$Nh_B = (Nh_{B_{L-V}} Nd_{L-V}) + (Nh_{B_S} Nd_S) + (Nh_{B_{D-F}} Nd_{D-F}) \quad \text{Ecuación 2.131.}$$

$$Nh_I = (Nh_{I_{L-V}} Nd_{L-V}) + (Nh_{I_S} Nd_S) + (Nh_{I_{D-F}} Nd_{D-F}) \quad \text{Ecuación 2.132.}$$

$$Nh_P = (Nh_{P_{L-V}} Nd_{L-V}) + (Nh_{P_S} Nd_S) + (Nh_{P_{D-F}} Nd_{D-F}) \quad \text{Ecuación 2.133.}$$

Donde:

- Nh_B = Número de horas de demanda base en el periodo.
 $Nh_{B\ L-V}$ = Número de horas de demanda base en un día, de lunes a viernes.
 Nd_{L-V} = Número de días lunes, martes, miércoles, jueves y viernes en el periodo.
 $Nh_{B\ S}$ = Número de horas de demanda base en un sábado.
 Nd_S = Número de días sábado en el periodo.
 $Nh_{B\ D-F}$ = Número de horas de demanda base en un domingo o día festivo.
 Nd_{D-F} = Número de días domingo y festivos en el periodo.
 Nh_I = Número de horas de demanda intermedia en el periodo.
 $Nh_{I\ L-V}$ = Número de horas de demanda intermedia en un día, de lunes a viernes.
 $Nh_{I\ S}$ = Número de horas de demanda intermedia en un sábado.
 $Nh_{I\ D-F}$ = Número de horas de demanda intermedia en un domingo o día festivo.
 Nh_P = Número de horas de demanda punta en el periodo.
 $Nh_{P\ L-V}$ = Número de horas de demanda punta en un día, de lunes a viernes.
 $Nh_{P\ S}$ = Número de horas de demanda punta en un sábado.
 $Nh_{P\ D-F}$ = Número de horas de demanda punta en un domingo o día festivo.

El cargo promedio por kilowatt-hora para cada periodo, se obtiene con un promedio ponderado con base en el número de horas por tipo de demanda.

2.11.1.1. Para el periodo de abril a octubre

$$C_{PP\ A-O} = \frac{(C_{EB} Nh_{B\ A-O}) + (C_{EI} Nh_{I\ A-O}) + (C_{EP} Nh_{P\ A-O})}{Nh_{B\ A-O} + Nh_{I\ A-O} + Nh_{P\ A-O}} \quad \text{Ecuación 2.134.}$$

Donde:

- $C_{PP\ A-O}$ = Cargo promedio para el periodo del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre (\$/kW-h).
 C_{EB} = Cargo por energía base (\$/kW-h).
 $Nh_{B\ A-O}$ = Número de horas de demanda base en el periodo del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre.
 C_{EI} = Cargo por energía intermedia (\$/kW-h).
 $Nh_{I\ A-O}$ = Número de horas de demanda intermedia en el periodo del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre.
 C_{EP} = Cargo por energía de punta (\$/kW-h).
 $Nh_{P\ A-O}$ = Número de horas de demanda punta en el periodo del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre.

2.11.1.2. Para el periodo de octubre a abril

$$C_{PP\ O-A} = \frac{(C_{EB} Nh_{B\ O-A}) + (C_{EI} Nh_{I\ O-A}) + (C_{EP} Nh_{P\ O-A})}{Nh_{B\ O-A} + Nh_{I\ O-A} + Nh_{P\ O-A}} \quad \text{Ecuación 2.135.}$$

Donde:

- $C_{PP\ O-A}$ = Cargo promedio del periodo del último domingo de octubre, al sábado anterior al primer domingo de abril (\$/kW-h).
- $Nh_{B\ O-A}$ = Número de horas de demanda base en el periodo del último domingo de octubre, al sábado anterior al primer domingo de abril.
- $Nh_{I\ O-A}$ = Número de horas de demanda intermedia en el periodo del último domingo de octubre, al sábado anterior al primer domingo de abril.
- $Nh_{P\ O-A}$ = Número de horas de demanda punta en el periodo del último domingo de octubre, al sábado anterior al primer domingo de abril.

2.11.1.3. Cargo promedio anual

Para obtener el cargo promedio anual por kilowatt-hora, se calcula un promedio ponderado con base en el número de días de cada periodo.

$$C_{PA} = \frac{(C_{PP\ A-O} Nd_{A-O}) + (C_{PP\ O-A} Nd_{O-A})}{Nd_{A-O} + Nd_{O-A}} \quad \text{Ecuación 2.136.}$$

Donde:

- C_{PA} = Cargo promedio anual de energía (\$/kW-h).
- Nd_{A-O} = Número de días en el periodo del primer domingo de abril, al sábado anterior al último domingo de octubre.
- Nd_{O-A} = Número de días en el periodo del último domingo de octubre, al sábado anterior al primer domingo de abril.

2.11.2. Costo por retrolavado

El costo de energía de retrolavado será entonces igual a:

$$C_{ERET(2,3,\dots,n)} = P_{MRET(2,3,\dots,n)} t_{RET} F_{RET} C_{PA} d_{OA} \quad \text{Ecuación 2.137.}$$

Donde:

- $C_{RET(2,3,\dots,n)}$ = Costo de energía de retrolavado (\$/año).
 $P_{MRET(2,3,\dots,n)}$ = Potencia del motor eléctrico del equipo de retrolavado (kW).
 t_{RET} = Tiempo de duración del retrolavado (h).
 F_{RET} = Número de filtros retrolavados por día.
 d_{OA} = Número de días de operación de la planta al año.

Para fines de selección se deben considerar las mismas condiciones de operación para todas las configuraciones analizadas: número de filtros retrolavados por día, tiempo de duración del retrolavado por filtro, tiempo de sedimentación, tiempo de recirculación de agua clarificada y número de días de operación por año (Ver Tabla 1.1).

La configuración con el menor costo de energía por año será la elegida, si este es el criterio de selección.

2.12. Menor costo total

La selección por menor costo total implica estimar para cada configuración analizada el costo de inversión debido a los principales componentes del sistema de potabilización y sumarlo al de operación calculado para el retrolavado. Para esto se deben utilizar las cantidades, pesos o volúmenes, correspondientes a cada componente principal y multiplicarlo por su respectivo precio, el cual se recomienda que sea actualizado mediante cotizaciones recientes a la fecha de cálculo, o en su defecto, ser afectado por un factor que considere la inflación acumulada desde el año en que se obtuvo el último precio hasta la fecha de cálculo.

2.12.1. Costo de material de los filtros

El costo total de material de los recipientes a presión para los filtros está dado por la siguiente ecuación:

$$C_{TF(2,3,\dots,n)} = N_{F(2,3,\dots,n)} W_{F(2,3,\dots,n)} C_F \quad \text{Ecuación 2.138.}$$

Donde:

- $C_{TF(2,3,\dots,n)}$ = Costo total de material de los recipientes a presión para los filtros (\$).

- $N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada.
 $W_{F(2,3,\dots,n)}$ = Peso total del recipiente a presión (kg).
 C_F = Precio unitario del material de fabricación de los recipientes (\$/kg).

2.12.2. Costo de los medios filtrantes y de soporte

Para el cálculo del costo, tanto de los medios filtrantes como del medio soporte (gravas de varios tamaños), se requiere primeramente el volumen correspondiente a cada medio; para ello se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$V_{MF1(2,3,\dots,n)} = N_{F(2,3,\dots,n)} A_{FC(2,3,\dots,n)} L_1 \quad \text{Ecuación 2.139.}$$

$$V_{MF2(2,3,\dots,n)} = N_{F(2,3,\dots,n)} A_{FC(2,3,\dots,n)} L_2 \quad \text{Ecuación 2.140.}$$

$$V_{MS(2,3,\dots,n)} = N_{F(2,3,\dots,n)} A_{FC(2,3,\dots,n)} L_S \quad \text{Ecuación 2.141.}$$

Donde:

- $V_{MF1(2,3,\dots,n)}$ = Volumen total del medio filtrante 1 (m³).
 $V_{MF2(2,3,\dots,n)}$ = Volumen total del medio filtrante 2 (m³).
 $V_{MS(2,3,\dots,n)}$ = Volumen total del medio soporte (m³).
 $A_{FC(2,3,\dots,n)}$ = Área comercial por filtro (m²).
 L_1 = Espesor del medio filtrante 1 (m).
 L_2 = Espesor del medio filtrante 2 (m).
 L_S = Espesor del medio soporte (m).

El costo total de los medios filtrantes y de soporte será:

$$C_{TMF(2,3,\dots,n)} = (V_{MF1(2,3,\dots,n)} C_{MF1}) + (V_{MF2(2,3,\dots,n)} C_{MF2}) \quad \text{Ecuación 2.142.}$$

$$C_{TMS(2,3,\dots,n)} = V_{MS(2,3,\dots,n)} C_{MS} \quad \text{Ecuación 2.143.}$$

Donde:

- $C_{TMF(2,3,\dots,n)}$ = Costo total de los medios filtrantes (\$).
 C_{MF1}, C_{MF2} = Costo de los medios filtrantes 1 y 2 (\$/m³).

$$C_{TMS(2,3,\dots,n)} = \text{Costo total del medio soporte (\$).}$$

$$C_{MS} = \text{Costo del medio soporte (\$/m}^3\text{).}$$

Nota: si el proveedor cotiza en peso (\$/kg), solicitar la densidad aparente del material y hacer la conversión de volumen a peso. En la Tabla 1.4 se presentan algunas densidades de referencia.

2.12.3. Costo de toberas

El costo total de las toberas se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{TOB(2,3,\dots,n)} = N_{F(2,3,\dots,n)} N_{TOB(2,3,\dots,n)} C_{TOB} \quad \text{Ecuación 2.144.}$$

Donde:

$$C_{TOB(2,3,\dots,n)} = \text{Costo total de las toberas para los filtros (\$).}$$

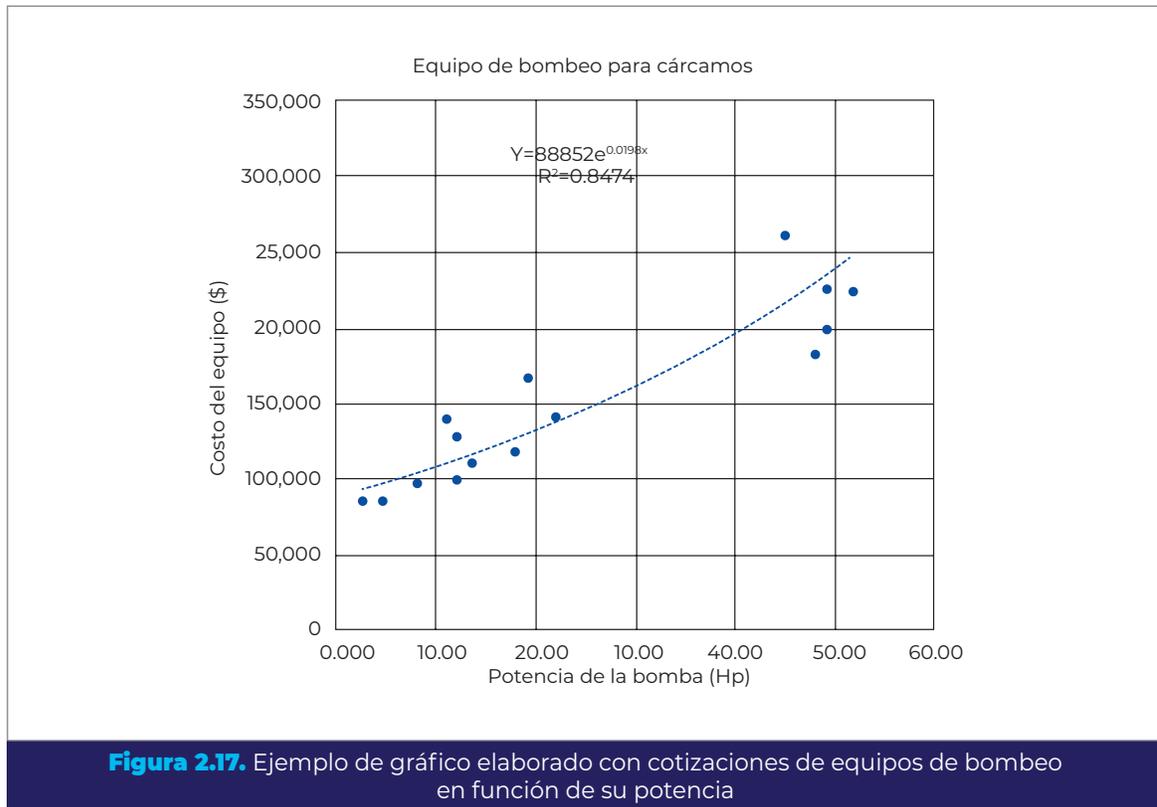
$$N_{TOB(2,3,\dots,n)} = \text{Número final de toberas por filtro.}$$

$$C_{TOB} = \text{Precio unitario por tobera (\$).}$$

$$N_{F(2,3,\dots,n)} = \text{Número de filtros de la configuración analizada.}$$

2.12.4. Costo del equipo de bombeo para retrolavado

En la sección 2.10.2 se calculó la potencia necesaria del equipo de bombeo para retrolavado, así como el caudal y la carga que debe suministrar la bomba. Con estos datos es posible solicitar cotizaciones con proveedores y obtener el costo de los equipos correspondientes a cada configuración analizada. Esto es lo más recomendable, sin embargo, realizar cotizaciones para todos los equipos considerados para cada escenario y para cada vez que se modifiquen los datos iniciales del proyecto, no es muy práctico; sobre todo al tratarse de un costo únicamente para fines de selección de la mejor opción de configuración de filtros.



Una forma más sencilla es reunir una base de datos con costos de equipos de diferentes capacidades (caudal-carga) y potencia nominal, para obtener, mediante un análisis de regresión, una ecuación que correlacione el costo del equipo con la potencia requerida de la forma: $\$ = f(Hp)$. Estos costos se pueden afectar cada año con la inflación para tener datos más reales.

En la Figura 2.17 se ilustra, a modo de ejemplo, la obtención de esta ecuación, la cual se puede expresar como:

$$C_{BRET(2,3,..,n)} = f(Hp) \quad \text{Ecuación 2.145.}$$

Donde:

- $C_{BRET(2,3,..,n)}$ = Costo del equipo de bombeo para retrolavado (\$).
- $f(Hp)$ = Ecuación obtenida mediante el análisis de regresión de los costos obtenidos para diferentes capacidades de equipo.

2.12.5. Costo de tuberías

Finalmente, el costo total de tuberías se calcula sumando los costos de cada tubería considerada:

$$\begin{aligned}
C_{TT(2,3,\dots,n)} = & (L_{TAC(2,3,\dots,n)}C_{TAC}) + (L_{TCFAC(2,3,\dots,n)}C_{TCFAC}) + (L_{TCFAT(2,3,\dots,n)}C_{TCFAT}) \\
& + (L_{TAT(2,3,\dots,n)}C_{TAT}) + (L_{TER(2,3,\dots,n)}C_{TER}) + (L_{TSR(2,3,\dots,n)}C_{TSR}) \\
& + (L_{TREC(2,3,\dots,n)}C_{TREC}) + (L_{TEL(2,3,\dots,n)}C_{TEL})
\end{aligned}$$

Ecuación 2.146.

Donde:

$C_{TT(2,3,\dots,n)}$	=	Costo total de tuberías (\$).
$L_{TAC(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de agua cruda (m).
C_{TAC}	=	Precio unitario de la tubería de agua cruda, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TCFAC(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de conexión a filtros AC (m).
C_{TCFAC}	=	Precio unitario de la tubería de conexión a filtros AC, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TCFAT(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de conexión a filtros AT (m).
C_{TCFAT}	=	Precio unitario de la tubería de conexión a filtros AT, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TAT(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de agua tratada (m).
C_{TAT}	=	Precio unitario de la tubería de agua tratada, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TER(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de entrada de retrolavado (m).
C_{TER}	=	Precio unitario de la tubería de entrada de retrolavado, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TSR(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de salida de retrolavado (m).
C_{TSR}	=	Precio unitario de la tubería de salida de retrolavado, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TREC(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de recirculación (m).
C_{TREC}	=	Precio unitario de la tubería de salida de recirculación, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).
$L_{TEL(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud total de tubería de extracción de lodos (m).
C_{TEL}	=	Precio unitario de la tubería de salida de extracción de lodos, de acuerdo con el diámetro correspondiente (\$/m).

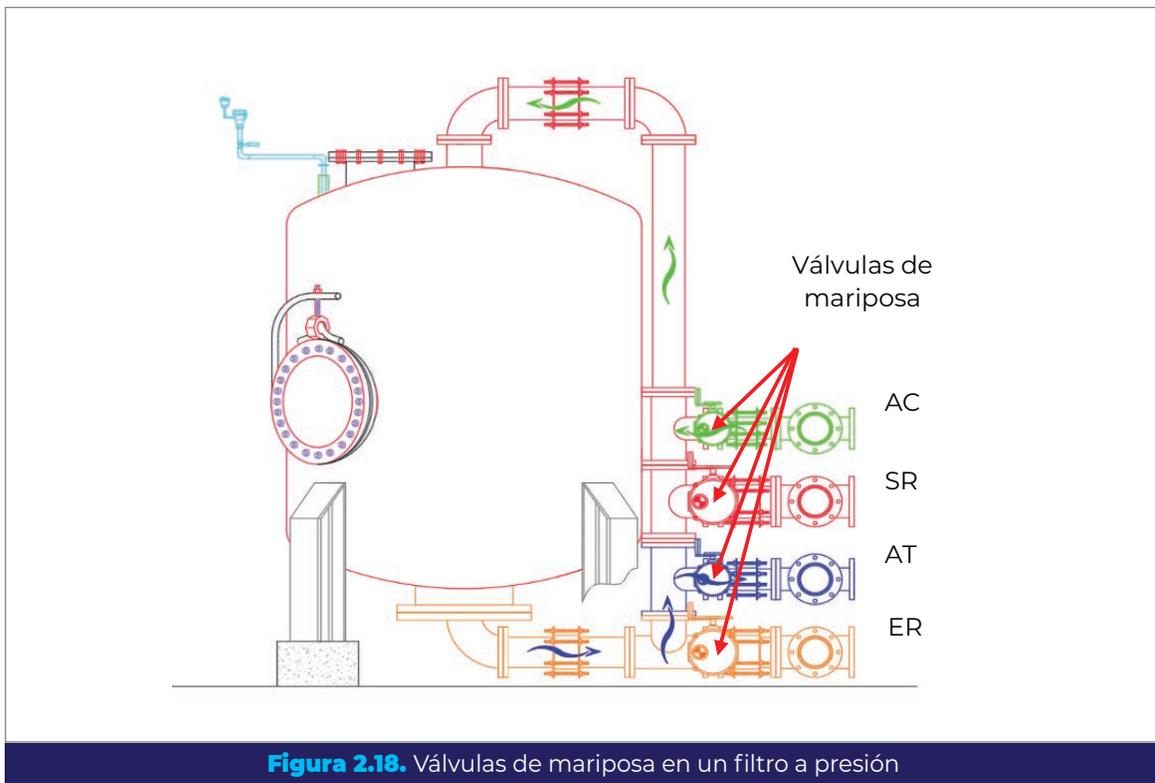
2.12.6. Costo de válvulas de mariposa

La cantidad de válvulas de mariposa instaladas para el control de los procesos de filtración y retrolavado, dependerá del número filtros y de la configuración de las tuberías con respecto a los filtros.

En la Figura 2.18 se puede observar que se necesita una válvula para cada una de las cuatro líneas conectadas a cada filtro; una para la tubería de entrada de retrolavado, una para la salida de retrolavado, una para la tubería de alimentación de agua cruda al filtro y otra para la tubería de salida de agua tratada del filtro.

En la sección 2.7.1 se presentó el procedimiento de cálculo de los diámetros de estas tuberías. Las válvulas tendrán el mismo diámetro que las tuberías por lo que se procede directamente al cálculo de los costos.

Al igual que con los equipos de bombeo, lo recomendable es obtener cotizaciones para las válvulas que se calculen o hacer uso del mismo método descrito en el cálculo del costo de equipo de retrolavado. En la Figura 2.19 se muestra un ejemplo de obtención de una ecuación para relacionar el diámetro de la válvula con su costo (válvulas de hierro fundido con actuador eléctrico).



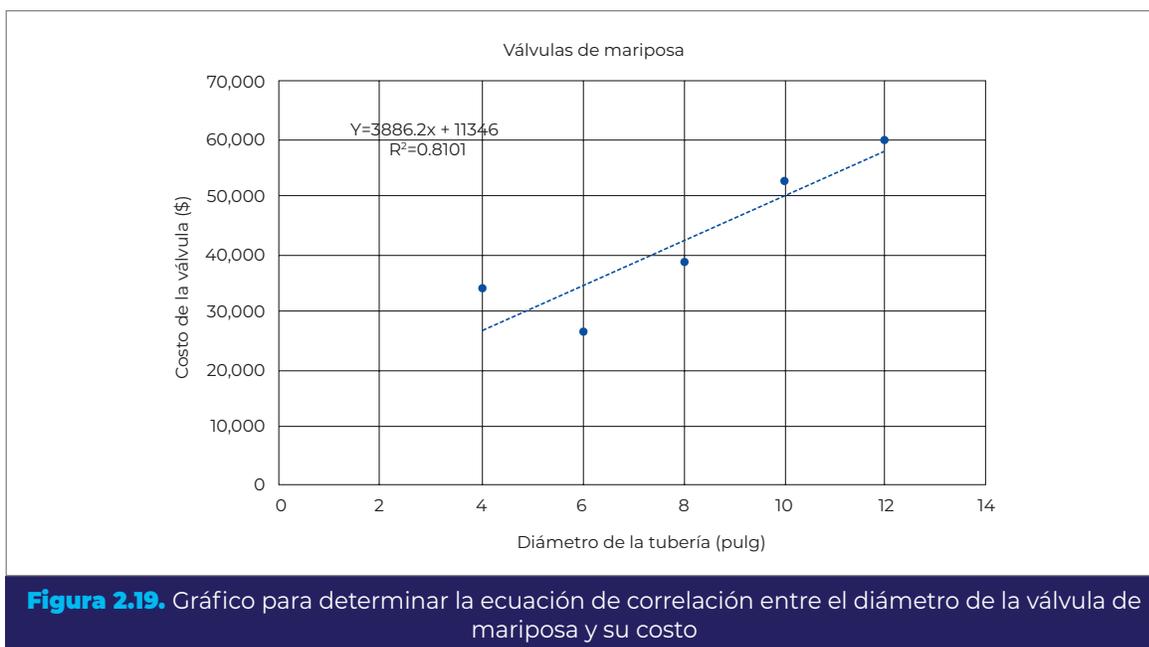
Ya que se ha determinado el costo de cada válvula, el costo total de las válvulas de la batería de filtros será:

$$C_{TV(2,3,\dots,n)} = N_{F(2,3,\dots,n)} \sum C_{V(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.147.

Donde:

- $C_{TV(2,3,\dots,n)}$ = Costo total de las válvulas de agua cruda, agua tratada, entrada y salida de retrolavado (\$).
- $N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada.
- $C_{V(2,3,\dots,n)}$ = Precio por válvula en función del diámetro de las tuberías, dependiendo del número de filtros, determinado mediante la ecuación obtenida del análisis de regresión de los costos de válvulas (\$).
- Σ = Suma del precio de las cuatro válvulas que requiere un filtro: agua cruda, agua tratada, entrada y salida de retrolavado.



2.12.7. Costo del sedimentador

Ya que se ha calculado el peso de las partes principales del sedimentador (ver sección 2.8), se procede al cálculo del costo total que tendrán. Para ello, se utiliza la ecuación siguiente:

$$C_{TS(2,3,\dots,n)} = (W_{TOL(2,3,\dots,n)} + W_{CS(2,3,\dots,n)} + W_{TS(2,3,\dots,n)}) C_{MS} \quad \text{Ecuación 2.148.}$$

Donde:

- $C_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Costo total del sedimentador (\$).
- $W_{TOL(2,3,\dots,n)}$ = Peso de la tolva del sedimentador (kg).
- $W_{CS(2,3,\dots,n)}$ = Peso del cilindro del sedimentador (kg).

$W_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Peso de las tapas del sedimentador (kg).

C_{MS} = Precio unitario del material de fabricación del sedimentador (\$/kg).

2.12.8. Costo del tanque de agua cruda o tratada

Después de calcular las cantidades requeridas de los principales componentes de construcción del tanque en la sección 2.9, solo resta calcular el costo total que tendrán:

$$C_{TTAC/AT(2,3,\dots,n)} = (V_{TCAC/AT(2,3,\dots,n)} C_{CON}) + (W_{TAAC/AT(2,3,\dots,n)} C_{AR}) + (A_{TCAC/AT(2,3,\dots,n)} C_{CIM}) \quad \text{Ecuación 2.149.}$$

Donde:

$C_{TTAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Costo total del tanque de agua cruda o tratada (\$).

$V_{TCAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Volumen total de concreto requerido para el tanque de agua cruda o tratada (m³).

C_{CON} = Precio unitario del concreto (\$/m³).

$W_{TAAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Cantidad total de acero de refuerzo para el tanque de agua cruda o tratada (kg).

C_{AR} = Precio unitario del acero de refuerzo (\$/kg).

$A_{TCAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Cantidad total de cimbra para el tanque de agua cruda o tratada (m²).

C_{CIM} = Precio unitario de la cimbra (\$/m²).

2.12.9. Costo total

Ya que se han calculado los costos de los componentes de la planta que varían en función del diámetro y número de filtros, se procede a sumarlos (incluyendo el costo de operación) y realizar la comparación entre el costo total de las estructuras para cada configuración.

$$C_{T(2,3,\dots,n)} = C_{TF(2,3,\dots,n)} + C_{TMF(2,3,\dots,n)} + C_{TTOB(2,3,\dots,n)} + C_{BRET(2,3,\dots,n)} + C_{TT(2,3,\dots,n)} + C_{TV(2,3,\dots,n)} + C_{TS(2,3,\dots,n)} + C_{TTAC/AT(2,3,\dots,n)} + C_{ERET(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.150.

Donde:

$C_{T(2,3,\dots,n)}$ – Costo total de las estructuras básicas de la planta (\$).

$C_{TF(2,3,\dots,n)}$	– Costo total de los recipientes a presión para los filtros (\$).
$C_{TMF(2,3,\dots,n)}$	– Costo total de los medios filtrantes (\$).
$C_{TTOB(2,3,\dots,n)}$	– Costo total de las toberas para los filtros (\$).
$C_{BRET(2,3,\dots,n)}$	– Costo del equipo de bombeo para retrolavado (\$).
$C_{TT(2,3,\dots,n)}$	– Costo total de tuberías (\$).
$C_{TV(2,3,\dots,n)}$	– Costo total de las válvulas de agua cruda, agua tratada, entrada y salida de retrolavado (\$).
$C_{TS(2,3,\dots,n)}$	– Costo total del sedimentador (\$).
$C_{TTAC/AT(2,3,\dots,n)}$	– Costo total del tanque de agua cruda o tratada (\$).
$C_{ERET(2,3,\dots,n)}$	– Costo de energía de retrolavado (\$). Calculado para un año de operación.

La configuración seleccionada mediante este criterio será la que presente el menor costo total C_T .

2.13. Menor área de terreno

Cuando el criterio de selección se base en el área de terreno disponible para el acomodo de las estructuras, los principales puntos para tener en cuenta son los siguientes:

- Área total de la batería de filtros.
- Área para el tanque sedimentador.
- Área necesaria para el tanque de agua cruda o tratada.
- Área para el tanque de lodos.

Estas son las únicas áreas que se consideran para la comparación de las diferentes configuraciones, porque son las que cambian dependiendo del número y tamaño de los filtros.

2.13.1. Área de la batería de filtros

Para el cálculo del área mínima que ocupa la batería de filtros se debe considerar que, para fines de soporte, cada filtro estará asentado sobre una plancha de concreto que sobresalga por lo menos 50 cm del perímetro de este.

Como ya se describió anteriormente, el arreglo de tuberías en la batería de filtros consta de cuatro líneas:

- Tubería de agua cruda (AC). Es la línea que alimenta a la batería de filtros, procedente de un pozo o un tanque de agua cruda.

- Tubería de agua tratada (AT). Es la línea de salida de los filtros que lleva el agua filtrada al tanque de agua tratada o directamente a la distribución.
- Tubería de entrada de retrolavado (ER). Es la línea que conduce el agua para el lavado de filtros, desde el tanque a la entrada inferior del filtro.
- Tubería de salida de retrolavado (SR). Es la línea que conduce el agua de lavado de filtros, desde la tapa superior del filtro hasta el tanque sedimentador.

En la Figura 2.20 se observa el detalle (vista superior) de un filtro y en la Figura 2.21 la distancia entre el filtro y el múltiple de alimentación de agua cruda. Para longitudes y diámetros de piezas especiales ver Anexo 8.3; para otros materiales distintos al del Anexo 8.3 se pueden obtener directamente con los proveedores.

Como se puede observar, es necesario conocer los diámetros de las tuberías para determinar la distancia entre los filtros separados por los múltiples.

Para el cálculo del área que ocupa toda la batería de filtros, lo más práctico es calcular la correspondiente a un solo filtro y posteriormente multiplicarla por el número de filtros para obtener el total. De la Figura 2.20 y la Figura 2.21 se deduce que la superficie total necesaria para instalar o asentar un filtro será:

$$A_{FILTRO(2,3,\dots,n)} = (0.5 + D_{CF(2,3,\dots,n)} + 0.5) \left(0.5 + D_{CF(2,3,\dots,n)} + \frac{D_{B\ RET(2,3,\dots,n)}}{2} + L_{TE\ RET(2,3,\dots,n)} + D_{VCFAC(2,3,\dots,n)} + L_{CCF\ AC} + L_{CZ\ AC(2,3,\dots,n)} \right)$$

Ecuación 2.151.

Donde:

$A_{FILTRO(2,3,\dots,n)}$	=	Área ocupada por cada filtro (m ²).
$D_{CF(2,3,\dots,n)}$	=	Diámetro comercial del filtro (m).
$D_{B\ RET(2,3,\dots,n)}$	=	Diámetro exterior de la brida correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m).
$L_{TE\ RET(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud L de la tee de diámetro correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.
$D_{VCFAC(2,3,\dots,n)}$	=	Ancho D de la válvula de diámetro correspondiente al diámetro de la tubería de conexión a filtros AC (m). Ver Anexo 8.3.
$L_{CCF\ AC}$	=	Longitud del carrete de tubería de conexión a filtros AC (m).
$L_{CZ\ AC(2,3,\dots,n)}$	=	Longitud L de la cruz de diámetro correspondiente al diámetro de la tubería de agua cruda (m). Ver Anexo 8.3.

Finalmente:

$$A_{BF(2,3,\dots,n)} = A_{FILTRO(2,3,\dots,n)} N_{F(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.152.

Donde:

$A_{BF(2,3,\dots,n)}$ = Área total de la batería de filtros (m^2).

$N_{F(2,3,\dots,n)}$ = Número de filtros de la configuración analizada.

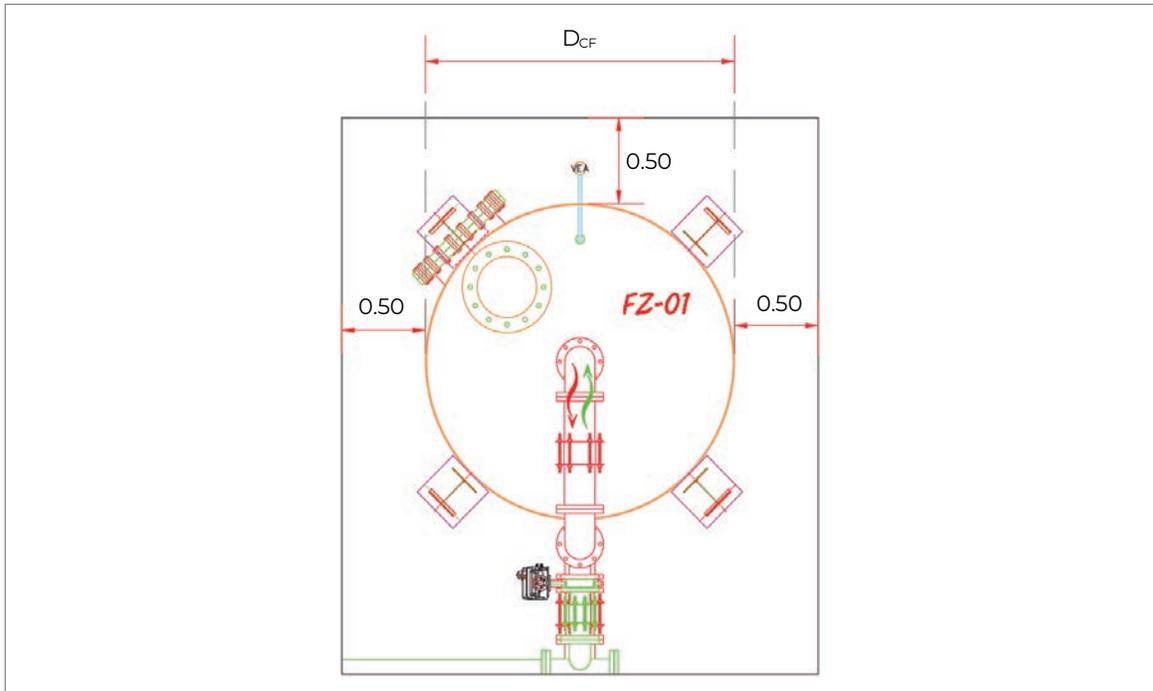


Figura 2.20. Área correspondiente a un filtro.

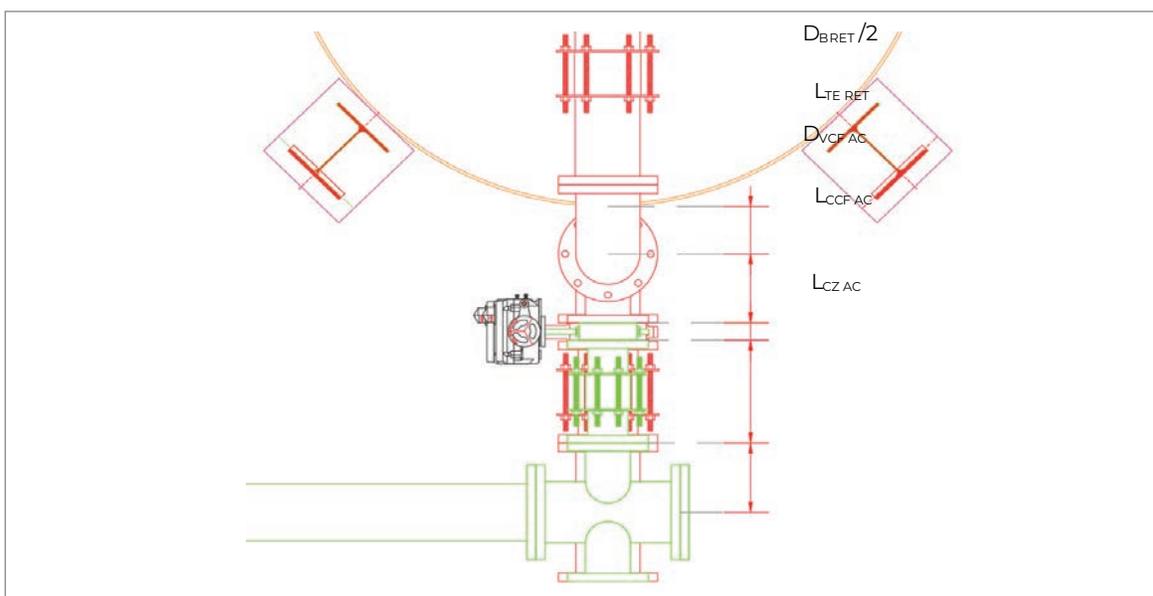


Figura 2.21. Detalle de la distancia entre el filtro y el múltiple de tuberías (vista superior).

2.13.2. Área del tanque sedimentador

En el caso de potabilizadoras con filtros a presión, es recomendable utilizar sedimentadores elevados construidos en acero para el proceso de sedimentación del agua del retrolavado de los filtros. Al igual que la batería de filtros, el tanque sedimentador deberá ubicarse sobre una plancha de concreto que sobresalga aproximadamente 50 cm del perímetro del tanque.

Una vez obtenido el diámetro del sedimentador como se indica en la sección 2.8.1 y tomando como referencia la Figura 2.22, el área requerida para el tanque será:

$$A_{TS(2,3,\dots,n)} = (D_{TS(2,3,\dots,n)} + 1)^2 \quad \text{Ecuación 2.153.}$$

Donde:

$A_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Área de terreno del tanque sedimentador (m²).

$D_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Diámetro del tanque sedimentador (m).

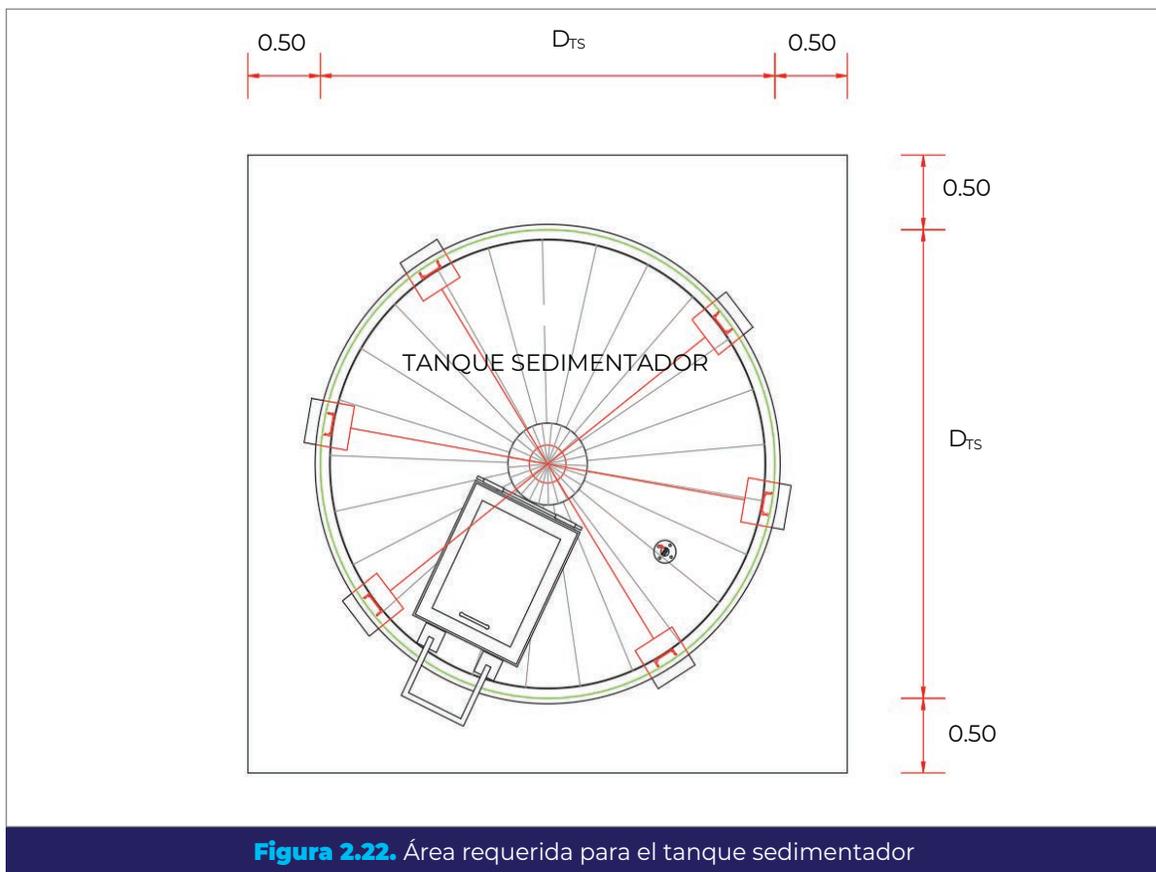


Figura 2.22. Área requerida para el tanque sedimentador

2.13.3. Área necesaria para el tanque de agua cruda o tratada y tanque de lodos

En la sección 2.9.1 se realizó el cálculo del área de superficie requerida para el tanque de agua cruda o tratada, mediante la Ecuación 2.106 a la Ecuación 2.108 y en la sección 2.8.8 el del tanque de lodos mediante la Ecuación 2.104.

2.13.4. Área total para las estructuras básicas

Una vez que se han calculado las áreas requeridas para las estructuras que dependen del tamaño y número de filtros, el paso final para este criterio de selección es sumarlas y realizar la comparación entre las áreas totales de cada configuración analizada.

$$A_{TT(2,3,\dots,n)} = A_{BF(2,3,\dots,n)} + A_{TS(2,3,\dots,n)} + A_{TL(2,3,\dots,n)} + A_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}$$

Ecuación 2.154.

Donde:

- $A_{TT(2,3,\dots,n)}$ = Área total de terreno requerida, dependiendo del número de filtros (m^2).
- $A_{BF(2,3,\dots,n)}$ = Área total de la batería de filtros (m^2).
- $A_{TS(2,3,\dots,n)}$ = Área de terreno del tanque sedimentador (m^2).
- $A_{TL(2,3,\dots,n)}$ = Área del tanque de lodos (m^2).
- $A_{TAC/AT(2,3,\dots,n)}$ = Área del tanque de agua cruda o tratada (m^2).

La configuración seleccionada con este criterio será la que presente el menor valor de A_{TT} .



Diseño de filtración y recuperación de agua de retrolavado



Una vez que se ha seleccionado la mejor configuración de diámetro y número de filtros mediante cualquiera de los criterios expuestos anteriormente, lo siguiente es realizar el diseño funcional completo de las estructuras básicas de la planta.

3.1. Tasas de filtración durante la operación

Durante la operación de la planta se podrán presentar tres diferentes tasas de filtración, dependiendo del proceso secundario que se esté llevando a cabo en el momento, como retrolavado o recirculación de agua clarificada. Es necesario calcular estas tasas para verificar que se encuentren dentro de los límites permisibles establecidos como parte del diseño.

3.1.1. Tasa de filtración de diseño (v_{FD})

Es la tasa de operación normal obtenida con el caudal de diseño de la planta y se presenta cuando no se están realizando procesos secundarios a la filtración. Se calcula mediante la Ecuación 2.5 con el diámetro y número de filtros elegido finalmente en el proceso de selección.

3.1.2. Tasa de filtración de trabajo (v_{FT})

Esta tasa de filtración se presenta cuando se lleva a cabo la recirculación de agua clarificada, siempre y cuando ésta se haga mediante inyección en la tubería de agua cruda, de lo contrario (es decir cuando la recirculación se haga al tanque de agua cruda) $v_{FT} = v_{FD}$.

Para el primer caso, el caudal de trabajo será:

$$Q_T = Q_D + Q_{REC} \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

Donde:

- Q_T = Caudal de trabajo (m^3/s).
- Q_D = Caudal de diseño de la batería de filtros (m^3/s).
- Q_{REC} = Caudal de recirculación (m^3/s). Ver Ecuación 2.53).

La tasa de filtración de trabajo se calcula entonces como:

$$v_{FT} = \frac{Q_T}{A_{CT}} \quad \text{Ecuación 3.2.}$$

Donde:

- v_{FT} = Tasa de filtración de trabajo ($\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$).
- Q_T = Caudal de trabajo (m^3/h).
- A_{CT} = Área comercial total (m^2). Ver Ecuación 2.4.

3.1.3. Tasa de filtración de trabajo durante el retrolavado (v_{FTR})

Anteriormente ya se ha mencionado esta tasa, la cual se presenta durante el retrolavado de uno de los filtros, siendo en este momento cuando se tiene el mayor caudal de alimentación a cada filtro. La tasa se calcula mediante la Ecuación 2.7 para el diámetro y número de filtros seleccionado.

Una vez calculadas las tasas de filtración que se tendrán con el número de filtros seleccionado, debe comprobarse que cumplan con lo siguiente (ver Tabla 1.2):

$$v_{FTMIN} \leq v_{FD} < v_{FTMAX}$$

$$v_{FTMIN} \leq v_{FT} \leq v_{FTMAX}$$

$$v_{FTR} \leq v_{FTRMAX}$$

3.2. Dimensionamiento de filtros

En secciones anteriores se han presentado las ecuaciones de cálculo de la altura de los filtros (h_F), para ello se utiliza la Ecuación 2.8, Ecuación 2.21 y Ecuación 2.83.

Conocida la altura del filtro, es necesario calcular la altura libre que debe haber bajo este para la instalación de la tubería de entrada de retrolavado y así calcular la altura final del filtro con apoyos.

En la Figura 3.1 se presenta un detalle de la altura libre bajo el filtro, de donde se puede deducir que:

$$h_{LIBF} = L_{BQF} + L_{CD\ RET} + \frac{D_{TC\ RET}}{2} + 0.1 \quad \text{Ecuación 3.3.}$$

Donde:

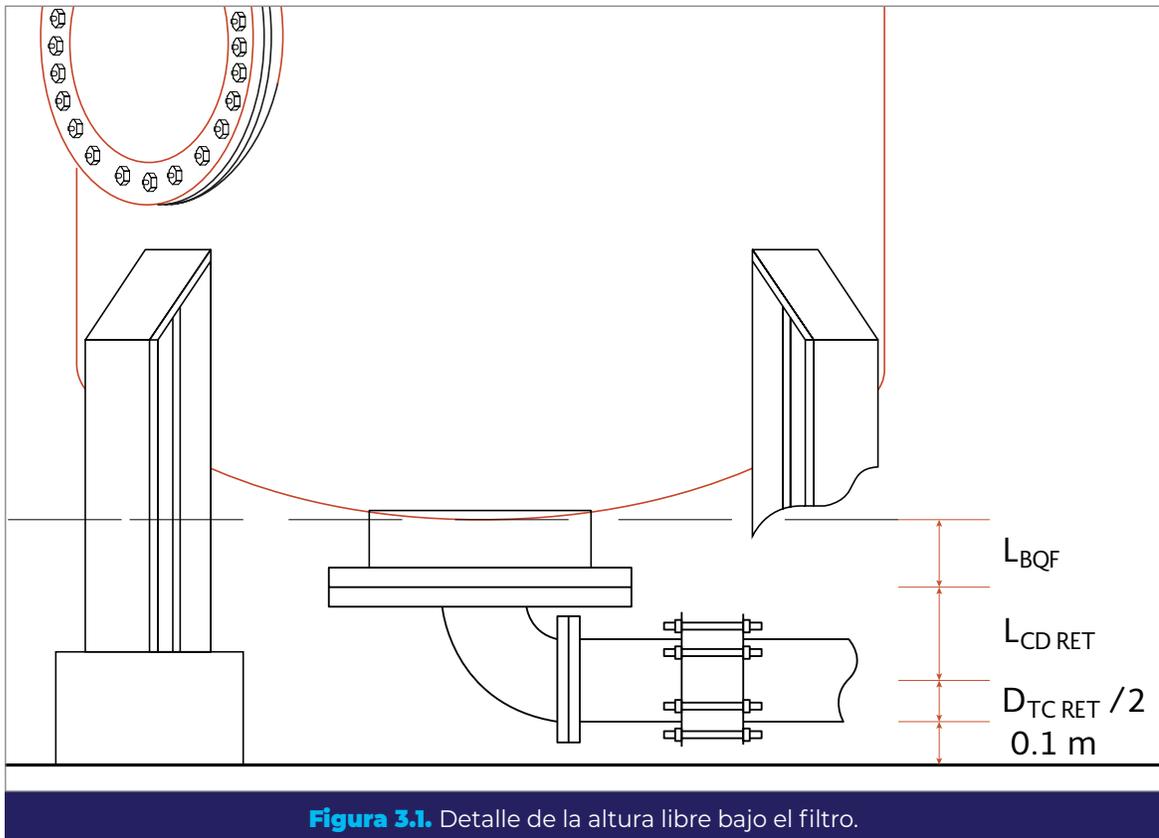
- h_{LIBF} = Altura libre bajo el filtro (m).
- L_{BQF} = Longitud de las boquillas del filtro (m). Se recomienda una longitud mínima de 15 cm.
- $L_{CD\ RET}$ = Distancia L del codo de 90°, correspondiente al diámetro de la tubería de retrolavado (m). Ver Anexo 8.3.
- $D_{TC\ RET}$ = Diámetro comercial de la tubería de retrolavado (m).
- 0.1 = Distancia propuesta de la tubería a la losa del piso (m). Queda a criterio del proyectista aumentarla o disminuirla, pero debe ser suficiente para poder colocar soportes para la tubería.

La altura total del filtro incluyendo los soportes, será igual a:

$$h_{FTOTAL} = h_F + h_{LIBF} \quad \text{Ecuación 3.4.}$$

Donde:

- h_{FTOTAL} = Altura total del filtro con apoyos (m).
- h_F = Altura del filtro (incluye las tapas) (m).



3.3. Retrolavado y lodos

Un punto para tener en cuenta en el proceso de filtración es la duración y número de ciclos de retrolavado que se pueden realizar por día, y que servirán de referencia para el cálculo de costos de operación de la planta.

El ciclo de retrolavado de un filtro, es la duración total de las etapas que deben sucederse antes de poder iniciar el retrolavado del siguiente. Este tiempo se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{RET} = t_{RET} + t_{SED} + t_{REC} + t_{EL}$$

Ecuación 3.5.

Donde:

- C_{RET} – Duración del ciclo completo de retrolavado de un filtro (h).
- t_{RET} – Duración del retrolavado (h).
- t_{SED} – Tiempo de sedimentación del agua de retrolavado (h).
- t_{REC} – Duración de la recirculación de agua clarificada (h).
- t_{EL} – Tiempo de extracción de lodos del sedimentador (h).

La carrera de filtración de un filtro varía en función de la concentración y tipo de contaminante contenido en el agua, y puede llegar a ser de 12 a 48 horas (ver Tabla 1.3). El número de filtros que se lavan en un día se determina por el número total de filtros, la carrera de filtración, el tiempo de sedimentación, el tiempo de extracción de lodos y el tiempo de recirculación. Los valores sugeridos por el IMTA y los cuales se deben ajustar a cada caso en particular durante la operación, se muestran en la Tabla 1.1.

La cantidad máxima de filtros que podrán retrolavarse por día dependerá del ciclo completo de retrolavado:

$$F_{RETMAX} = \frac{t_{OP}}{C_{RET}} \quad \text{Ecuación 3.6.}$$

Donde:

F_{RETMAX} = Número máximo de filtros retrolavados por día.

t_{OP} = Horas de operación de la planta por día.

3.3.1. Volumen de agua de retrolavado, de lodos y de recirculación

El volumen de agua de retrolavado se calcula a partir de la Ecuación 2.26 y la Ecuación 2.59, con el diámetro comercial de filtro seleccionado. Para conocer el volumen de agua que se empleará para retrolavado por día, se tiene que:

$$V_{TRET} = V_{RET} F_{RETMAX} \quad \text{Ecuación 3.7.}$$

Donde:

V_{TRET} = Volumen total de agua de retrolavado por día (m^3).

V_{RET} = Volumen de agua de retrolavado (m^3). Ver Ecuación 2.59.

El volumen de lodos por día (V_{LPD}) se calcula con la Ecuación 2.60, pero utilizando el número máximo de filtros (F_{RETMAX}) que se pueden lavar en un día.

Mientras que el volumen de recirculación (V_{REC}) se calcula con la Ecuación 2.51.

Para este caso, el volumen de agua recirculada por día se calcula como:

$$V_{RECD} = V_{REC} F_{RETMAX} \quad \text{Ecuación 3.8.}$$

Donde:

V_{RECD} = Volumen de agua recirculada por día (m^3).

3.3.2. Tanque sedimentador

Mediante la Ecuación 2.89, Ecuación 2.90 y Ecuación 2.94 se calcula el diámetro, altura de la tolva y altura del cilindro del sedimentador respectivamente, faltando únicamente calcular la altura libre bajo el tanque para acomodar la tubería de extracción de lodos. En la Figura 3.2 se presenta el detalle de la altura libre bajo el sedimentador, para una tolva de forma cónica invertida.

De esta figura se deduce que:

$$h_{LIBS} = L_{BQS} + L_{CD\ EL} + \frac{D_{TC\ EL}}{2} + 0.1 \quad \text{Ecuación 3.9.}$$

Donde:

- h_{LIBS} = Altura libre bajo el sedimentador (m).
- L_{BQS} = Longitud de la boquilla de la tolva (m). Se recomienda una longitud mínima de 15 cm.
- $L_{CD\ EL}$ = Distancia L del codo de 90° , correspondiente al diámetro de la tubería de extracción de lodos (m). Ver Anexo 8.3.
- $D_{TC\ EL}$ = Diámetro comercial de la tubería de extracción de lodos (m). Ver Ecuación 2.63.
- 0.1** = Distancia propuesta de la tubería a la losa del piso (m). Queda a criterio del proyectista aumentarla o disminuirla, pero debe ser suficiente para poder colocar soportes para la tubería.

La altura total del sedimentador será:

$$h_{TTS} = h_{CS} + h_{TOL} + h_{LIBS} + B_L \quad \text{Ecuación 3.10.}$$

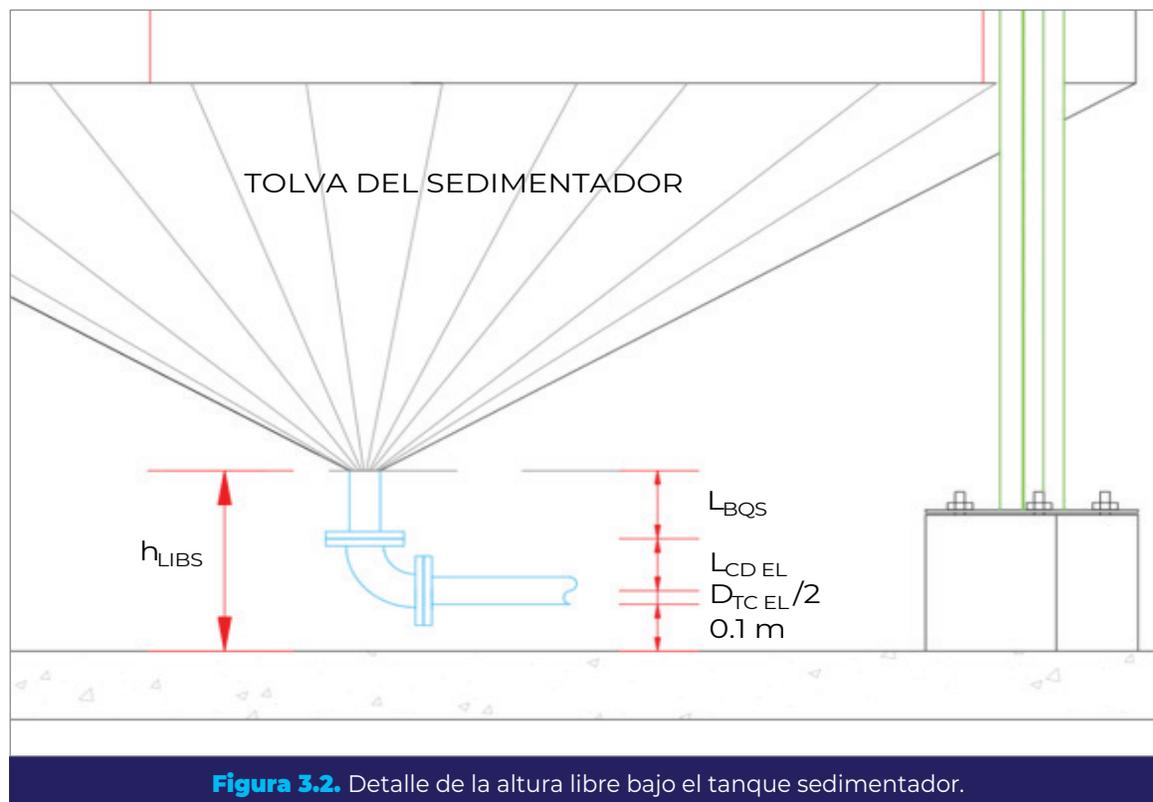
Donde:

- h_{TTS} = Altura total del tanque sedimentador incluyendo soportes (m).
- h_{CS} = Altura del cilindro del sedimentador (m).
- h_{TOL} = Altura de la tolva (m).
- B_L = Bordo libre (m)

Queda a criterio del proyectista si el tanque contará con tapa o no, en el diseño de referencia propuesto por el IMTA se incluye una tapa cónica con un respirador en el centro y un paso hombre para inspección. También es recomendable poner por fuera del sedimentador, un piezómetro para observar el nivel de agua en el tanque, el cual debe de ser un tubo o manguera transparente y resistente a los rayos solares, así como una escalera marina para facilitar la supervisión y el mantenimiento.

3.3.3. Tanque de lodos

El volumen, área y lados interiores del tanque de lodos, se calculan con la Ecuación 2.103, Ecuación 2.104 y Ecuación 2.105 respectivamente, según las consideraciones indicadas en la sección 2.8.8.



3.4. Diámetro de tuberías

En la sección 2.7.1 se describe detalladamente el procedimiento de cálculo de las tuberías que componen el proceso, por lo que únicamente se hará referencia a las ecuaciones que se necesiten en cada tipo de tubería. Los cálculos deben realizarse con los datos de la configuración seleccionada mediante cualquiera de los criterios expuestos en las secciones 2.11, 2.12 y 2.13.

3.4.1. Tubería de agua cruda y agua tratada

El diámetro será el mismo para la línea desde el pozo o desde el tanque de agua cruda a la batería de filtros, el múltiple de agua cruda, el múltiple de agua tratada y la línea de la batería de filtros al tanque de agua tratada y/o a la salida de la planta.

Se calcula con la Ecuación 2.36 a la Ecuación 2.40 con las mismas consideraciones descritas en la sección 2.7.1.1.

3.4.2. Tubería de conexión a filtros AC y de conexión a filtros AT

Las tuberías de conexión entre los filtros y los múltiples de agua cruda y tratada tendrán el mismo diámetro, calculado para el caudal por filtro durante el retrolavado Q_{FR} (ver Ecuación 2.41).

El diámetro de estas tuberías se calcula con la Ecuación 2.42 a la Ecuación 2.46, tomando en cuenta las consideraciones de la sección 2.7.1.2.

3.4.3. Tubería de retrolavado

Anteriormente se ha hecho la distinción entre tubería de entrada y salida de retrolavado, sin embargo, debido a que estas tuberías mantienen el mismo diámetro porque el caudal de agua es el mismo, se calcula un único diámetro de retrolavado. Considerando el caudal de agua de retrolavado Q_{RET} calculado con la Ecuación 2.26.

Para el cálculo del diámetro se utiliza de la Ecuación 2.47 a la Ecuación 2.50 y las consideraciones hechas en la sección 2.7.1.3.

3.4.4. Tubería de recirculación de agua clarificada

La tubería de recirculación se calcula considerando el caudal de recirculación Q_{REC} obtenido a partir de la ecuación Ecuación 2.53.

Para esta tubería se utilizan de la Ecuación 2.55 a la Ecuación 2.58 además de las consideraciones que se describen en la sección 2.7.1.4.

3.4.5. Tubería de extracción de lodos del sedimentador

El caudal de extracción de lodos Q_{EL} mediante el cual se calcula esta tubería se obtiene con la Ecuación 2.61.

El diámetro de la tubería se calcula de la Ecuación 2.59 a la Ecuación 2.65, teniendo en cuenta las consideraciones y recomendaciones dadas en la sección 2.7.1.5.

3.5. Espesores

El procedimiento de cálculo de los espesores de los filtros y del tanque sedimentador, se describe en las secciones 2.5 y 2.8 respectivamente. A continuación, se mencionarán de manera breve las ecuaciones utilizadas en su forma particular para el diámetro y número de filtros elegido.

3.5.1. Presiones de diseño de los filtros

La presión de diseño del cuerpo de los filtros P_{DC} será la que resulte mayor entre las presiones calculadas con la Ecuación 2.9 y Ecuación 2.10.

La presión de diseño de las tapas toriesféricas de los filtros P_{DT} se calcula en función de la presión de trabajo del filtro P_T , según las consideraciones de la Ecuación 2.12 y la Ecuación 2.13.

3.5.2. Cuerpo del filtro

El espesor del cuerpo de los filtros se determina mediante la Ecuación 2.14, Ecuación 2.15 y la Ecuación 2.16, según lo establecido por el código ASME (2015a) para recipientes sometidos a presión.

3.5.3. Tapas toriesféricas

Para calcular el espesor de las tapas, se toma en consideración los parámetros de diseño establecidos por el estándar DIN 28011 y lo establecido por el código ASME, representado en la Ecuación 2.17 y la Ecuación 2.18.

3.5.4. Sedimentador

El sedimentador es un tanque atmosférico, por lo tanto, sus paredes estarán sujetas únicamente a la presión hidrostática del agua contenida en él y a la presión atmosférica. Para calcular el espesor que deberá tener se utiliza el método *de un pie*, según lo establece la norma API 650 (2007).

La Ecuación 2.95 representa el método en unidades del SI.

3.6. Pérdidas de carga

3.6.1. Por toberas

Las pérdidas de carga generadas por las toberas en el falso fondo del filtro constituyen uno de los componentes tanto de la pérdida total de carga durante la filtración como durante el retrolavado. Estas pérdidas serán las que se utilicen para calcular las capacidades de los equipos de bombeo del proceso.

3.6.1.1. Número de toberas

En la sección 2.6 se describe el procedimiento de cálculo del número de toberas requeridas por filtro, así como la distancia de colocación entre ellas. Las ecuaciones utilizadas son la Ecuación 2.25, Ecuación 2.29, Ecuación 2.30 y Ecuación 2.31, para los datos de la configuración de diámetro y número de filtros seleccionado. Para definición de variables deberá referirse a la sección mencionada anteriormente.

3.6.1.2. Durante la filtración

En la Figura 3.3 se puede observar un detalle de la colocación de las toberas en una placa perforada que funciona como falso fondo en filtros a presión. Debido a que las toberas se distribuyen de manera perpendicular al sentido del flujo, la pérdida de carga será la misma en cualquier tobera que se analice, mas no acumulable.

Por lo tanto, solo se necesita calcular la pérdida de carga a través de una tobera para conocer la pérdida de carga en el falso fondo durante la filtración.

En la Figura 3.3 se indican las principales partes de la tobera tomadas como ejemplo para describir los cálculos (tobera tipo Johnson de acero inoxidable con conexión de 1" y 13.5 cm de longitud total).

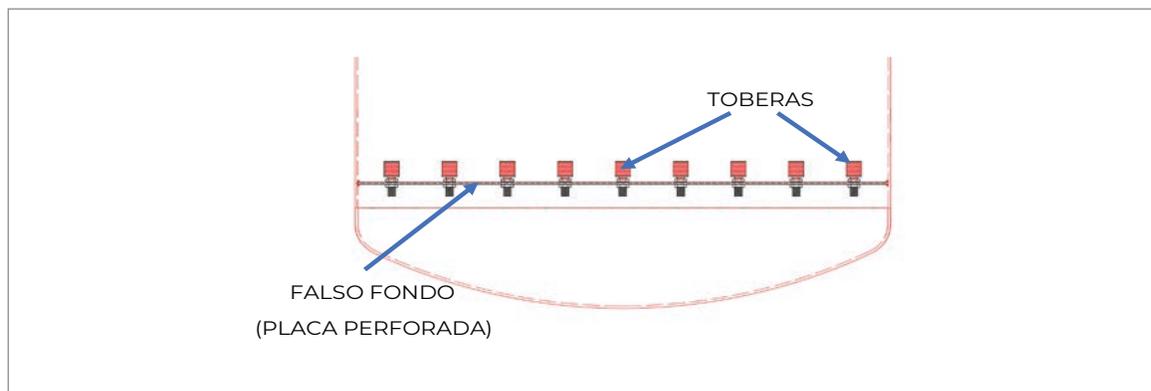


Figura 3.3. Detalle de las toberas instaladas en el falso fondo del filtro.

3.6.1.2.1. Pérdida por entrada al elemento micro ranurado

Debido a que la transición del agua del filtro a la tobera no está encausada y el área de sección del filtro es mucho mayor que el área del micro ranurado, el primer componente de la pérdida total en la tobera se considera pérdida por entrada.

La pérdida por entrada es una pérdida local que se calcula mediante la Ecuación 2.128 en términos del elemento micro ranurado:

$$h_{EMRF} = k_E \frac{v_{MRF}^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.11.}$$

Donde:

h_{EMRF} = Pérdida por entrada al elemento micro ranurado durante la filtración (m).

v_{MRF} = Velocidad en el elemento micro ranurado durante la filtración (m/s).

k_E = Coeficiente de pérdida por entrada (adimensional).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Para el coeficiente k_E se adopta un valor de 0.5 según la literatura (Sotelo Ávila, 1997).

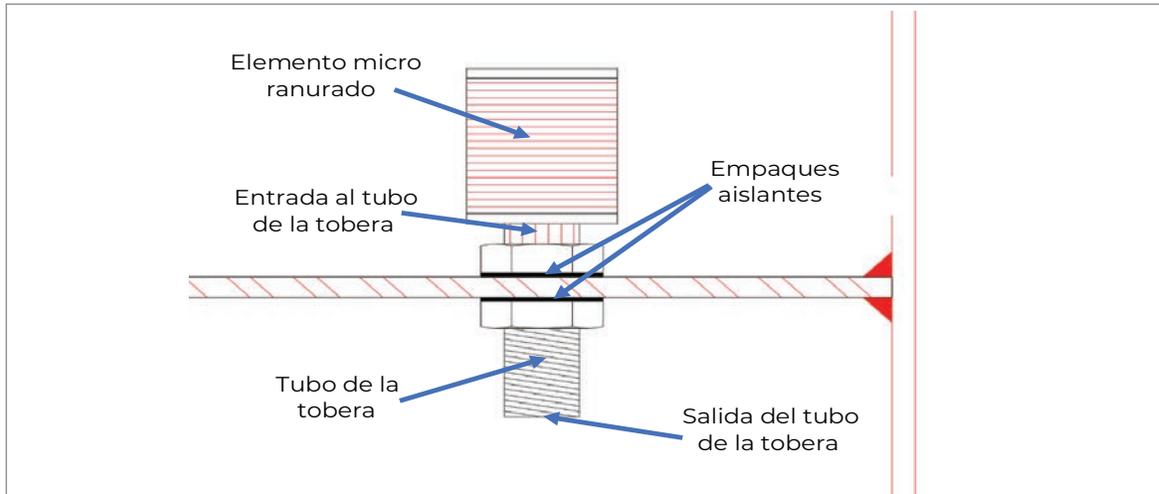


Figura 3.4. Partes de una tobera tipo Johnson.

La velocidad en el elemento micro ranurado v_{MRF} se calcula para el caudal por tobera:

$$Q_{TOBF} = \frac{Q_{FR}}{N_{TOB}} \quad \text{Ecuación 3.12.}$$

Donde:

- Q_{TOBF} = Caudal por tobera durante la filtración (m^3/s).
- Q_{FR} = Caudal por filtro durante el retrolavado de uno de ellos (m^3/s). Ver Ecuación 2.41.
- N_{TOB} = Número final de toberas por filtro. Ver Ecuación 2.30.

Por lo tanto:

$$v_{MRF} = \frac{Q_{TOBF}}{A_{TFMR}} \quad \text{Ecuación 3.13.}$$

Donde:

- A_{TFMR} = Área total para el flujo en el elemento micro ranurado (m^2). Obtenida de los datos proporcionados por el fabricante.
- v_{MRF} = Velocidad del agua en el elemento micro ranurado (m/s).

3.6.1.2.2. Pérdida por contracción en el tubo de tobera

Como se puede observar en la Figura 3.4, el área del elemento micro ranurado es mayor al área transversal del tubo de la tobera y en este caso el flujo se encuentra encausado dentro de la misma. Por lo tanto, la pérdida de carga por el paso del caudal del micro ranurado al tubo de la tobera se considera pérdida por contracción.

A partir de la Ecuación 2.128, en términos del tubo de la tobera:

$$h_{CTTOBF} = k_C \frac{v_{TTOBF}^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.14.}$$

Donde:

h_{CTTOBF} = Pérdida por contracción en el tubo de la tobera durante la filtración (m).

k_C = Coeficiente de pérdida por contracción (adimensional).

v_{TTOBF} = Velocidad en el tubo de la tobera durante la filtración (m/s).

La velocidad en el tubo de la tobera se calcula partiendo del área transversal del tubo de la tobera:

$$A_{TTOB} = \frac{\pi D_{TTOB}^2}{4} \quad \text{Ecuación 3.15.}$$

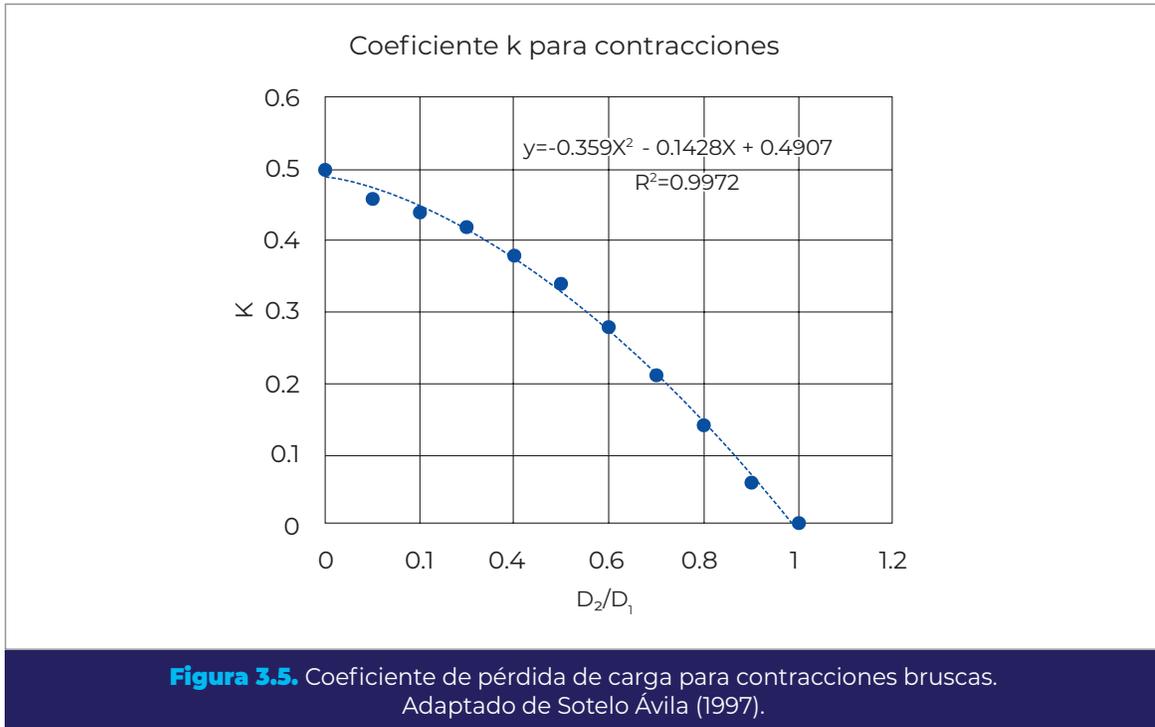
$$v_{TTOBF} = \frac{Q_{TOBF}}{A_{TTOB}} \quad \text{Ecuación 3.16.}$$

Donde:

A_{TTOB} = Área del tubo de la tobera (m²).

D_{TTOB} = Diámetro del tubo de la tobera (m).

El valor del coeficiente de pérdida por contracción (k_C) se puede estimar utilizando la Figura 3.5 donde la relación D_2/D_1 es equivalente a la relación $\sqrt{A_2}/\sqrt{A_1}$. Siendo D_1 el diámetro mayor y D_2 el diámetro menor.



En este caso, la relación a utilizar será $\sqrt{A_{TTOB}} / \sqrt{A_{TFMR}}$ ya que el micro ranurado es una superficie compuesta y no un conducto circular.

3.6.1.2.3. Pérdida por fricción en el tubo de la tobera durante la filtración

Las pérdidas por fricción en el tubo de la tobera se calculan de la misma manera que en una tubería, haciendo uso de la Ecuación 2.124 a la Ecuación 2.127 en términos del tubo de la tobera:

$$Re_{TTOBF} = \frac{v_{TTOBF} D_{TTOB}}{v_{AGUA}} \quad \text{Ecuación 3.17.}$$

$$f_{TTOBF} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TOB} / D_{TTOB}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{TTOBF}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 3.18.}$$

$$h_{fTTOBF} = f_{TTOBF} \frac{L_{TTOB} v_{TTOBF}^2}{D_{TTOB} 2g} \quad \text{Ecuación 3.19.}$$

Donde:

- Re_{TTOBF} = Número de Reynolds en el tubo de la tobera durante la filtración (adimensional).
- ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- f_{TTOBF} = Coeficiente de pérdida en la tobera durante la filtración (adimensional).
- ϵ_{TOB} = Rugosidad absoluta del material de las toberas (m).
- L_{TTOB} = Longitud del tubo de la tobera (m).
- h_{fTTOBF} = Pérdida de carga por fricción en el tubo de la tobera durante la filtración (m).
- v_{TTOBF} = Velocidad en el tubo de la tobera durante la filtración (m/s).

3.6.1.2.4. Pérdida por salida del tubo de la tobera

El último componente de pérdida de carga en la tobera es la pérdida por salida del tubo de la tobera. Esta pérdida será igual a (Sotelo Ávila, 1997):

$$h_{STTOB} = k_S \frac{(v_{TTOBF} - v_{FTR})^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.20.}$$

Donde:

- h_{STTOB} = Pérdida de carga por salida del tubo de la tobera (m).
- k_S = Coeficiente de pérdida por salida (adimensional).
- v_{FTR} = Velocidad (tasa) de filtración de trabajo durante el retrolavado (m/s).

De acuerdo con la literatura (Sotelo Ávila, 1997), cuando el área de la sección de salida (salida del tubo de la tobera) es igual al área transversal del conducto (tubo de la tobera), k_S es igual a 1.

3.6.1.2.5. Pérdida de carga total en la tobera durante la filtración

La pérdida de carga total será la suma de las pérdidas en cada sección de la tobera:

$$h_{TOBF} = h_{EMRF} + h_{CTTOBF} + h_{fTTOBF} + h_{STTOB} \quad \text{Ecuación 3.21.}$$

Donde:

- h_{TOBF} = Pérdida de carga total por toberas durante la filtración (m).

h_{EMRF} = Pérdida por entrada al elemento micro ranurado durante la filtración (m).

h_{CTTOBF} = Pérdida por contracción en el tubo de la tobera durante la filtración (m).

3.6.1.3. Durante el retrolavado

Para el retrolavado se calculan las pérdidas de carga en las mismas secciones de la tobera, pero en sentido contrario, ya que el caudal de agua de retrolavado se mueve en dirección ascendente.

3.6.1.3.1. Pérdida por entrada al tubo de la tobera

Al igual que durante la filtración, la pérdida por entrada se calcula a partir de la Ecuación 2.128:

$$h_{ETTOBR} = k_E \frac{v_{TTOBR}^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.22.}$$

Donde:

h_{ETTOBR} = Pérdida por entrada al tubo de la tobera durante el retrolavado (m).

v_{TTOBR} = Velocidad en el tubo de la tobera durante el retrolavado (m/s).

k_E = Coeficiente de pérdida por entrada (adimensional).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

La velocidad en el tubo de la tobera se calcula para el caudal de agua de retrolavado con las ecuaciones siguientes:

$$Q_{TOBR} = \frac{Q_{RET}}{N_{TOB}} \quad \text{Ecuación 3.23.}$$

$$v_{TTOBR} = \frac{Q_{TOBR}}{A_{TTOB}} \quad \text{Ecuación 3.24.}$$

Donde:

Q_{TOBR} = Caudal por tobera durante el retrolavado (m³/s).

Q_{RET} = Caudal de agua de retrolavado (m³/s).

N_{TOB} = Número final de toberas por filtro.

A_{TTOB} = Área del tubo de la tobera (m²).

3.6.1.3.2. Pérdida por fricción en el tubo de la tobera durante el retrolavado

Las pérdidas por fricción en el tubo de la tobera durante el retrolavado se calculan de la misma manera que durante la filtración, haciendo uso de la Ecuación 2.124 a la Ecuación 2.127:

$$Re_{TTOBR} = \frac{v_{TTOBR} D_{TTOB}}{\nu_{AGUA}} \quad \text{Ecuación 3.25.}$$

$$f_{TTOBR} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TOB} / D_{TTOB}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{TTOBR}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 3.26.}$$

$$h_{fTTOBR} = f_{TTOBR} \frac{L_{TTOB} v_{TTOBR}^2}{D_{TTOB} 2g} \quad \text{Ecuación 3.27.}$$

Donde:

Re_{TTOBR} = Número de Reynolds en el tubo de la tobera durante el retrolavado (adimensional).

D_{TTOB} = Diámetro del tubo de la tobera (m).

ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).

f_{TTOBR} = Coeficiente de pérdida en la tobera durante el retrolavado (adimensional).

ε_{TOB} = Rugosidad absoluta del material de las toberas (m).

L_{TTOB} = Longitud del tubo de la tobera (m).

h_{fTTOBR} = Pérdida de carga por fricción en el tubo de la tobera durante el retrolavado (m).

v_{TTOBR} = Velocidad en el tubo de la tobera durante el retrolavado (m/s).

3.6.1.3.3. Pérdida por expansión en el elemento micro ranurado

La pérdida por expansión igualmente se calcula mediante la ecuación general de pérdidas locales Ecuación 2.128, en términos de la sección analizada:

$$h_{EMRR} = k_{EX} \frac{v_{MRR}^2}{2g}$$

Ecuación 3.28.

Donde:

- h_{EMRR} = Pérdida por expansión en el elemento micro ranurado durante el retrolavado (m).
 k_{EX} = Coeficiente de pérdida por expansión (adimensional).
 v_{MRR} = Velocidad en el elemento micro ranurado durante el retrolavado (m/s).

La velocidad se calcula utilizando el caudal por tobera durante el retrolavado, mediante la siguiente ecuación:

$$v_{MRR} = \frac{Q_{TOBR}}{A_{TFMR}}$$

Ecuación 3.29.

Donde:

- A_{TFMR} = Área total para el flujo en el elemento micro ranurado (m²), obtenida de los datos proporcionados por el fabricante.

El coeficiente k_{EX} depende de la brusquedad de la ampliación y para encontrarlo se usa la fórmula de Borda-Carnot (Sotelo Ávila, 1997) escrita en términos de la tobera:

$$k_{EX} = C_A \left(\frac{A_{TFMR}}{A_{TOB}} - 1 \right)^2$$

Ecuación 3.30.

Donde $C_A = 1$ para ampliaciones bruscas.

3.6.1.3.4. Pérdida por salida del elemento micro ranurado

La pérdida se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$h_{SMR} = k_S \frac{(v_{MRR} - v_{RET})^2}{2g}$$

Ecuación 3.31.

Donde:

h_{SMR} = Pérdida de carga por salida del elemento micro ranurado (m).

v_{RET} = Velocidad (tasa) de retrolavado (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

Para el coeficiente k_s , se tiene la misma consideración hecha para la salida del tubo de la tobera. Ver 3.6.1.2.4.

3.6.1.3.5. Pérdida de carga total en la tobera durante el retrolavado

La pérdida de carga total será la suma de las pérdidas en cada sección de la tobera:

$$h_{TOBR} = h_{ETTOBR} + h_{fTTOBR} + h_{EMRR} + h_{SMR} \quad \text{Ecuación 3.32.}$$

Donde:

h_{TOBR} = Pérdida de carga total por toberas durante el retrolavado (m).

h_{ETTOBR} = Pérdida por entrada al tubo de la tobera durante el retrolavado (m).

h_{fTTOBR} = Pérdida de carga por fricción en el tubo de la tobera durante el retrolavado (m).

3.6.2. Por tuberías y filtros durante la filtración

Durante la filtración las pérdidas de carga serán por fricción, locales y en los medios filtrantes y de soporte. Para el cálculo de la pérdida total, se considera que la distribución de caudal es equitativa entre los filtros y por lo tanto se tendrá la misma pérdida de carga en cada uno de ellos.

Por otra parte, al estar conectados en paralelo entre sí, no importa cual filtro se elija para el cálculo siempre y cuando se siga la misma línea de flujo, es decir, si se tiene una batería de 6 filtros y se elige el filtro 4, el cálculo de las pérdidas por fricción y locales en la tubería de agua cruda se hará desde el pozo o el tanque de agua cruda hasta la entrada del filtro 4, y las pérdidas por fricción y locales en la tubería de agua tratada se calcularán de la salida del filtro 4 al tanque de agua tratada.

Para facilitar el cálculo, se recomienda elegir el filtro más alejado de la fuente de alimentación de la batería de filtros.

3.6.2.1. Pérdidas por fricción en tuberías

El cálculo de las pérdidas por fricción se realiza para cada sección de tubería mediante la Ecuación 2.124, Ecuación 2.126 y Ecuación 2.127 en términos de cada sección. En la Figura 3.6 y Figura 3.7 se observan las secciones que componen la línea de flujo del cálculo para el arreglo propuesto.

La primera sección corresponde a la tubería de agua cruda, para la cual la pérdida será:

$$Re_{TAC} = \frac{v_{TCAC} D_{TCAC}}{\nu_{AGUA}}$$

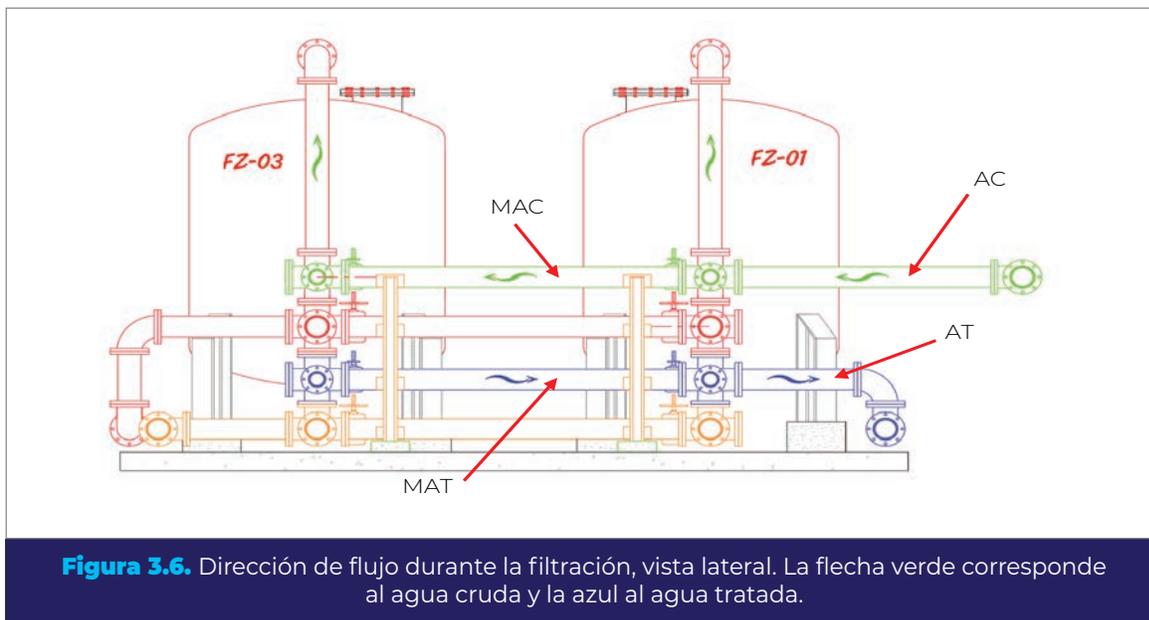
$$f_{TAC} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\epsilon_{TCAC}/D_{TCAC}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{TAC}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{fTAC} = f_{TAC} \frac{L_{AC} v_{TCAC}^2}{D_{TCAC} 2g}$$

Donde:

- Re_{TAC} = Número de Reynolds en la tubería de agua cruda (adimensional).
- v_{TCAC} = Velocidad del agua en la tubería comercial de agua cruda (m/s).
- D_{TCAC} = Diámetro de la tubería comercial de agua cruda (m).
- ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- f_{TAC} = Coeficiente de pérdida en la tubería de agua cruda (adimensional).
- ϵ_{TCAC} = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de agua cruda (m).
- h_{fTAC} = Pérdida de carga por fricción en la tubería de agua cruda (m).
- L_{AC} = Longitud de tubería estimada del pozo o del tanque de agua cruda, a la batería de filtros (m).

Estos cálculos se hacen para el caudal total de diseño (Q_D) y la longitud desde el pozo o el tanque de agua cruda hasta la batería de filtros (L_{AC}).



La siguiente sección de tubería corresponde al múltiple de agua cruda; en este caso, cuando el número de filtros de la planta sea superior a cuatro, el múltiple tendrá más de un segmento de tubería y el caudal conducido disminuirá en cada segmento debido a que el caudal es derivado a los filtros a lo largo del múltiple. Por lo tanto, la pérdida de carga debe calcularse para cada segmento del múltiple con el caudal conducido por este, dicho caudal se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{S(1,2,\dots,x)} = Q_D - (2 N_{SEG})Q_{FR} \quad \text{Ecuación 3.33.}$$

Donde:

$Q_{S(1,2,\dots,x)}$ = Caudal conducido por el segmento 1, 2, 3, ..., x (m^3/s).

Q_D = Caudal de diseño (m^3/s).

N_{SEG} = Número del segmento analizado (1, 2, 3, ..., x).

Q_{FR} = Caudal por filtro durante el retrolavado (m^3/s).

Entonces, las ecuaciones para calcular la pérdida de carga por fricción en cada segmento del múltiple de agua cruda son las siguientes:

$$Re_{MAC(1,2,\dots,x)} = \frac{v_{MAC(1,2,\dots,x)} D_{TCAC}}{v_{AGUA}}$$

$$f_{MAC(1,2,\dots,x)} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TCAC}/D_{TCAC}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{MAC(1,2,\dots,x)}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{f\ MAC(1,2,\dots,x)} = f_{MAC(1,2,\dots,x)} \frac{L_{MAC} v_{MAC(1,2,\dots,x)}^2}{D_{TCAC} 2g}$$

Donde:

$Re_{MAC(1,2,\dots,x)}$ = Número de Reynolds en cada segmento de tubería del múltiple de agua cruda (adimensional).

$v_{MAC(1,2,\dots,x)}$ = Velocidad del agua en cada segmento de tubería comercial del múltiple de agua cruda (m/s), para el caudal $Q_{S(1,2,\dots,x)}$ correspondiente.

D_{TCAC} = Diámetro de la tubería comercial de agua cruda (m).

v_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).

$f_{MAC(1,2,\dots,x)}$ = Coeficiente de pérdida en cada segmento de tubería del múltiple de agua cruda (adimensional).

ε_{TCAC} = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de agua cruda (m).

$h_{f\ MAC(1,2,\dots,x)}$ = Pérdida de carga por fricción en cada segmento de tubería del múltiple de agua cruda (m).

L_{MAC} = Longitud de cada segmento de tubería del múltiple de agua cruda (m). Ver Ecuación 2.66.

La pérdida de carga por fricción total en el múltiple de agua cruda será igual a la suma de las pérdidas en cada segmento:

$$h_{f\ TMAC} = \sum h_{f\ MAC(1,2,\dots,x)}$$

Ecuación 3.34.

Donde:

$h_{f\ TMAC}$ = Pérdida de carga total en el múltiple de agua cruda (m).

En la sección de la tubería de conexión a filtros AC, la pérdida de carga se calcula para el caudal por filtro durante el retrolavado (Q_{FR}) ya que será cuando esta sea mayor. Las ecuaciones son las siguientes:

$$Re_{CFAC} = \frac{v_{TCFAC} D_{TCFAC}}{v_{AGUA}}$$

$$f_{CFAC} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TCFAC} / D_{TCFAC}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{CFAC}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{fTCFAC} = f_{CFAC} \frac{L_{CCFAC} v_{TCFAC}^2}{D_{TCFAC} 2g}$$

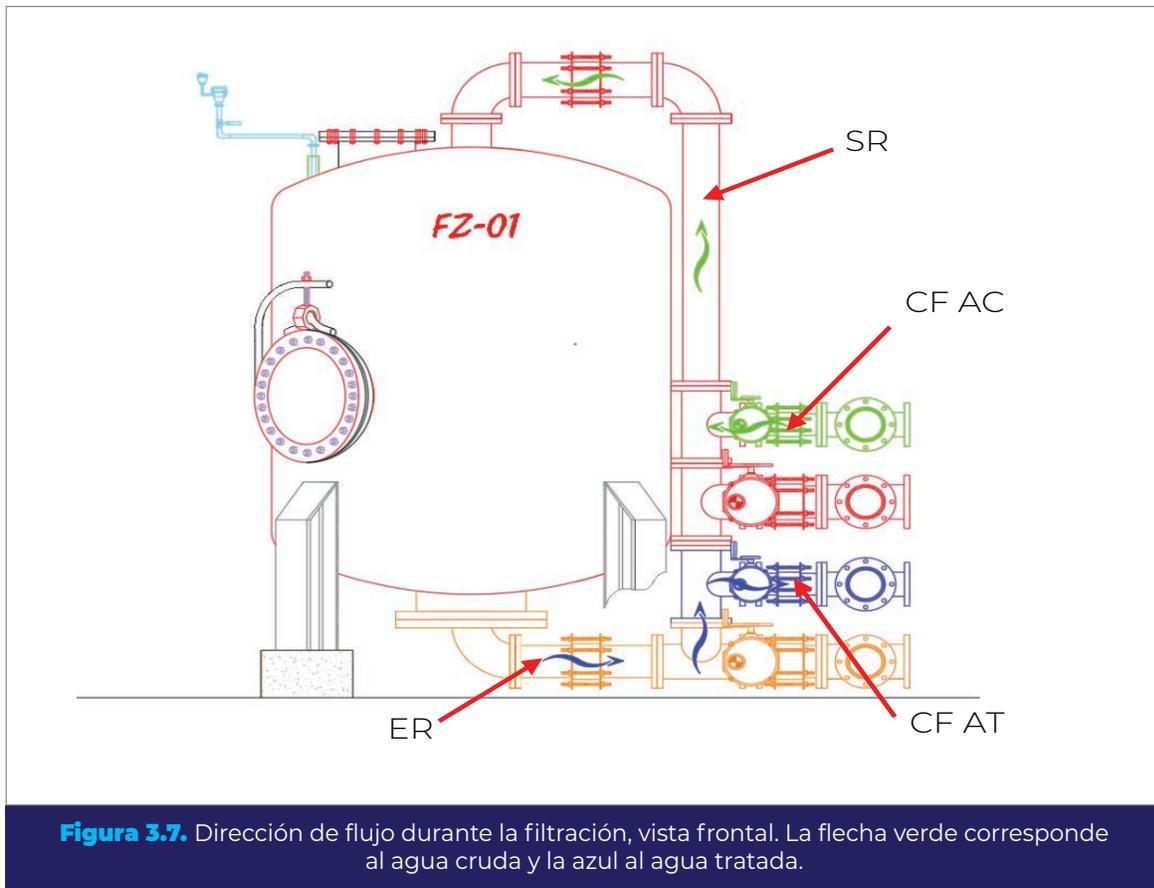


Figura 3.7. Dirección de flujo durante la filtración, vista frontal. La flecha verde corresponde al agua cruda y la azul al agua tratada.

Donde:

- Re_{CFAC} = Número de Reynolds en la tubería de conexión a filtros AC (adimensional).
- v_{TCFAC} = Velocidad del agua en la tubería comercial de conexión a filtros AC (m/s). Para el caudal Q_{FR} .
- D_{TCFAC} = Diámetro de la tubería comercial de conexión a filtros AC (m).

- v_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
 f_{CFAC} = Coeficiente de pérdida en la tubería de conexión a filtros AC (adimensional).
 $\varepsilon_{TC\ CF\ AC}$ = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de conexión a filtros AC (m).
 $h_{f\ TC\ CF\ AC}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de conexión a filtros AC (m).
 $L_{CCF\ AC}$ = Longitud de un carrete de diámetro correspondiente a la tubería de conexión a cada filtro, que permita la instalación de una junta Dresser (m).

Para la sección de tubería de salida de retrolavado que conecta el filtro con la tubería de conexión a filtros AC (ver Figura 3.6), la pérdida de carga debe calcularse con el caudal que pasa por cada filtro cuando uno de ellos está fuera de servicio por retrolavado (Q_{FR}). Las ecuaciones son las siguientes:

$$Re_{SR} = \frac{v_{TC\ SR} D_{TC\ SR}}{v_{AGUA}}$$

$$f_{SR} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TC\ SR} / D_{TC\ SR}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{SR}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{f\ TSR} = f_{SR} \frac{L_{C2-3\ SR} v_{TC\ SR}^2}{D_{TC\ SR} 2g}$$

Donde:

- Re_{SR} = Número de Reynolds en la tubería de salida de retrolavado (adimensional).
 $v_{TC\ SR}$ = Velocidad del agua en la tubería comercial de salida de retrolavado (m/s). Para el caudal Q_{FR} .
 $D_{TC\ SR}$ = Diámetro de la tubería comercial de salida de retrolavado (m).
 f_{SR} = Coeficiente de pérdida en la tubería de salida de retrolavado (adimensional).
 $\varepsilon_{TC\ SR}$ = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de salida de retrolavado (m).
 $h_{f\ TSR}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de salida de retrolavado (m).
 $L_{C2-3\ SR}$ = Suma de las longitudes de los carretes $L_{C2\ SR}$ y $L_{C3\ SR}$ (m). Ver la sección 2.7.2.6.

La siguiente sección del recorrido del agua durante la filtración es la correspondiente a la tubería de entrada de retrolavado (ver Figura 3.7), para la cual:

$$Re_{ER} = \frac{v_{TCER} D_{TCER}}{v_{AGUA}}$$

$$f_{ER} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TCER} / D_{TCER}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{ER}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{f_{TER}} = f_{ER} \frac{L_{C2ER} v_{TCER}^2}{D_{TCER} 2g}$$

Donde:

- Re_{ER} = Número de Reynolds en la tubería de entrada de retrolavado (adimensional).
- v_{TCER} = Velocidad del agua en la tubería comercial de entrada de retrolavado (m/s). Para el caudal Q_{FR} .
- D_{TCER} = Diámetro de la tubería comercial de entrada de retrolavado (m).
- v_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- f_{ER} = Coeficiente de pérdida en la tubería de entrada de retrolavado (adimensional).
- ε_{TCER} = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de entrada de retrolavado (m).
- $h_{f_{TER}}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de entrada de retrolavado (m).
- L_{C2ER} = Longitud del carrete "2" de diámetro correspondiente a la tubería de entrada de retrolavado (m). Ver Ecuación 2.76.

En la sección de la tubería de conexión a filtros AT (conexión entre la tubería de entrada de retrolavado y el múltiple de agua tratada), el diámetro y longitud de la tubería, así como el caudal conducido por esta es igual al de la tubería de conexión a filtros AC, por lo tanto, la pérdida de carga será la misma en ambas secciones:

$$h_{f_{TCFAT}} = h_{f_{TCFAC}} \quad \text{Ecuación 3.35.}$$

Donde:

- $h_{f_{TCFAT}}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de conexión a filtros AT (m).
- $h_{f_{TCFAC}}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de conexión a filtros AC (m).

En cuanto a la sección correspondiente al múltiple de agua tratada, pueden presentarse dos configuraciones con respecto al lado por el cual se conecta la tubería de agua tratada:

1. Las tuberías de agua cruda y de agua tratada se conectan a sus respectivos múltiples del mismo lado de la batería de filtros. Ver Figura 3.8.
2. Las tuberías de agua cruda y de agua tratada se conectan a los múltiples en lados opuestos de la batería de filtros.

En el primer caso, al igual que en el múltiple de agua cruda, la pérdida de carga será diferente en cada segmento de tubería del múltiple de agua tratada, debido a la incorporación del caudal que proviene de los filtros a lo largo del múltiple, por lo que es necesario calcular las pérdidas para el caudal de cada segmento. Dichos caudales se calculan con la siguiente ecuación:

$$Q_{S(1,2,\dots,x)} = (2 N_{SEG}) Q_{FR} \quad \text{Ecuación 3.36.}$$

Donde:

- $Q_{S(1,2,\dots,x)}$ = Caudal conducido por el segmento 1, 2, 3, ..., x (m³/s).
 N_{SEG} = Número de segmento analizado (1, 2, 3, ..., x).
 Q_{FR} = Caudal por filtro durante el retrolavado (m³/s).

De esta manera, las pérdidas en cada segmento se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$Re_{MAT(1,2,\dots,x)} = \frac{v_{MAT(1,2,\dots,x)} D_{TCAT}}{v_{AGUA}}$$

$$f_{MAT(1,2,\dots,x)} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TCAT}/D_{TCAT}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{MAT(1,2,\dots,x)}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{f_{MAT(1,2,\dots,x)}} = f_{MAT(1,2,\dots,x)} \frac{L_{MAT} v_{MAT(1,2,\dots,x)}^2}{D_{TCAT} 2g}$$

Donde:

- $Re_{MAT(1,2,\dots,x)}$ = Número de Reynolds en cada segmento de tubería del múltiple de agua tratada (adimensional).
- $v_{MAT(1,2,\dots,x)}$ = Velocidad del agua en cada segmento de tubería comercial del múltiple de agua tratada (m/s). Para el caudal $Q_S(1,2,\dots,x)$ correspondiente.
- D_{TCAT} = Diámetro de la tubería comercial de agua tratada (m).
- ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- $f_{MAT(1,2,\dots,x)}$ = Coeficiente de pérdida en cada segmento de tubería del múltiple de agua tratada (adimensional).
- ε_{TCAT} = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de agua tratada (m).
- $h_{f\ MAT(1,2,\dots,x)}$ = Pérdida de carga por fricción en cada segmento de tubería del múltiple de agua tratada (m).
- L_{MAT} = Longitud de cada segmento de tubería del múltiple de agua tratada (m). Igual a L_{MAT} , ver Ecuación 2.66.

La pérdida de carga por fricción total en el múltiple de agua tratada será igual a la suma de las pérdidas en cada segmento:

$$h_{f\ TMAT} = \sum h_{f\ MAT(1,2,\dots,x)} \quad \text{Ecuación 3.37.}$$

Donde:

- $h_{f\ TMAT}$ = Pérdida de carga total en el múltiple de agua tratada (m).

En el segundo caso, no se considera la pérdida por fricción en el múltiple ya que el flujo pasaría directamente a la tubería de agua tratada en la salida de la batería de filtros.

La última sección por considerar es la tubería de agua tratada, para la cual las pérdidas se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$Re_{TAT} = \frac{v_{TCAT} D_{TCAT}}{\nu_{AGUA}}$$

$$f_{TAT} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TCAT}/D_{TCAT}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{TAT}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{f\ TAT} = f_{TAT} \frac{L_{TAT} v_{TCAT}^2}{D_{TCAT} 2g}$$

Donde:

- Re_{TAT} = Número de Reynolds en la tubería de agua tratada (adimensional).
- v_{TCAT} = Velocidad del agua en la tubería comercial de agua tratada (m/s). Para el caudal de diseño (Q_d).
- D_{TCAT} = Diámetro de la tubería comercial de agua tratada (m).
- ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- f_{TAT} = Coeficiente de pérdida en la tubería de agua tratada (adimensional).
- ε_{TCAT} = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de agua tratada (m).
- $h_{f TAT}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de agua tratada (m).
- L_{AT} = Longitud de tubería estimada desde la batería de filtros al tanque de agua tratada o a la salida de la planta (m).

La pérdida total por fricción durante la filtración será:

$$h_{f TF} = h_{f TAC} + h_{f TMAC} + h_{f TCFAC} + h_{f TSR} + h_{f TER} + h_{f TCFAT} + h_{f TMAT} + h_{f TAT}$$

Ecuación 3.38.

Donde:

- $h_{f TF}$ = Pérdida de carga total por fricción durante la filtración (m).
- $h_{f TAC}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de agua cruda (m).
- $h_{f TMAC}$ = Pérdida de carga total en el múltiple de agua cruda (m).
- $h_{f TCFAC}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de conexión a filtros AC (m).
- $h_{f TSR}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de salida de retrolavado (m).
- $h_{f TER}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de entrada de retrolavado (m).
- $h_{f TCFAT}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de conexión a filtros AT (m).

3.6.2.2. Pérdidas locales en tuberías

Al igual que las pérdidas por fricción, las pérdidas locales se calculan para la misma línea de flujo considerada anteriormente. Debe calcularse la pérdida para todas las piezas especiales mediante la Ecuación 2.128:

$$h_{LF(1,2,\dots,x)} = k_{PE(1,2,\dots,x)} \frac{v_{PE(1,2,\dots,x)}^2}{2g}$$

Donde:

$h_{LF(1,2,\dots,x)}$ = Pérdida de carga local durante la filtración para la pieza especial 1, 2, 3, ..., x (m).

$k_{PE(1,2,\dots,x)}$ = Coeficiente de pérdida de carga para la pieza especial 1, 2, 3, ..., x (adimensional). Ver Anexo 8.5.

$v_{PE(1,2,\dots,x)}$ = Velocidad del agua en la pieza especial 1, 2, 3, ..., x (m/s).

El tipo y la cantidad de piezas especiales dependerá del arreglo particular de cada planta y los requerimientos de esta, sin embargo, para la batería de filtros se recomienda considerar las mismas piezas mostradas en Figura 3.8 y Figura 3.9.

El total de las pérdidas locales será entonces:

$$h_{LTF} = \sum h_{LF(1,2,\dots,x)}$$

Donde:

h_{LTF} = Pérdida de carga total por piezas especiales durante la filtración (m).

\sum = Suma de las pérdidas de carga locales en cada pieza especial en la línea de flujo considerada (m).

3.6.2.3. Pérdidas de carga en el filtro

Como ya se ha mencionado, al estar los filtros conectados en paralelo a las líneas de agua cruda y tratada, la pérdida de carga será la misma en todos los filtros por lo que solo es necesario hacer el cálculo en uno de ellos.

3.6.2.3.1. Pérdida de carga por expansión en la entrada al filtro durante la filtración

Primeramente, se presenta una pérdida de carga por expansión en la entrada al filtro, calculada como expansión brusca mediante las Ecuación 2.128 y Ecuación 3.30 en términos del filtro y la tubería de salida de retrolavado:

$$h_{EFF} = k_{EX} \frac{v_{FTR}^2}{2g}$$

$$k_{EX} = C_A \left(\frac{A_{CF}}{A_{TCRET}} - 1 \right)^2$$

Donde:

- h_{EFF} = Pérdida de carga por expansión en la entrada del filtro durante la filtración (m).
 k_{EX} = Coeficiente de pérdida por expansión (adimensional).
 v_{FTR} = Velocidad (tasa) de filtración de trabajo durante el retrolavado (m/s).
 g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).
 C_A = Igual a 1 para expansiones bruscas.
 A_{CF} = Área comercial por filtro (m^2).
 A_{TCRET} = Área de sección de la tubería comercial de retrolavado (m^2).

3.6.2.3.2. Pérdida de carga en los medios filtrantes durante la filtración

Suponiendo que el proceso de filtración es similar al flujo de un fluido a través de innumerables tubos verticales pequeños, la caída de presión debido a la fricción en el medio filtrante puede calcularse a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach, Ecuación 2.124, en su forma general (Desjardins, 1997):

$$h_f = f \frac{Lv^2}{D 2g}$$

Dado que es imposible determinar el diámetro D , se reemplaza por una expresión en la cual es función del radio hidráulico. Por definición, el radio hidráulico R_H , es:

$$R_H = \frac{A}{PM} \quad \text{Ecuación 3.39.}$$

Donde:

- A = Área de la sección de flujo (m^2).
 PM = Perímetro mojado (m).

Para un tubo, $A = \pi D^2/4$ y $PM = \pi D$.

Entonces:

$$R_H = \frac{D}{4} \quad \text{Ecuación 3.40.}$$

Despejando:

$$D = 4R_H \quad \text{Ecuación 3.41.}$$

Sustituyendo la Ecuación 3.41 en la ecuación de Darcy-Weisbach, se obtiene:

$$h_f = f \frac{L}{4R_H} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3.42.}$$

Donde L es el espesor del lecho filtrante. Además, al multiplicarse R_H por L/L , se tiene que:

$$R_H = \frac{A}{PM} \frac{L}{L} = \frac{\text{Volumen del líquido}}{\text{Superficie mojada}} \quad \text{Ecuación 3.43.}$$

Ahora, dado que el volumen del líquido es igual al volumen de los vacíos, se puede escribir:

$$\text{Volumen del líquido} = \text{Volumen total del material} \cdot \text{Porosidad}$$

Así:

$$\text{Volumen del líquido} = B_T e = \frac{bN}{1-e} e \quad \text{Ecuación 3.44.}$$

Donde:

- B_T = Volumen total del material (m^3).
- e = Porosidad (adimensional).
- b = Volumen de una partícula (m^3).
- N = Número de partículas.

También, se tiene que:

$$\text{Superficie mojada} = A_S = aN \quad \text{Ecuación 3.45.}$$

Donde:

- A_S = Superficie de todas las partículas (m^2).
- a = Superficie de una partícula (m^2).

Reemplazando los valores de la Ecuación 3.44 y Ecuación 3.45 en la Ecuación 3.43, se obtiene:

$$R_H = \frac{b}{a} \cdot \frac{e}{1-e} \quad \text{Ecuación 3.46.}$$

Cuando el medio filtrante está compuesto de partículas esféricas del mismo diámetro d , es posible escribir (Desjardins, 1997):

$$b = \frac{\pi d^3}{6} \quad \text{Ecuación 3.47.}$$

y

$$a = \pi d^2 \quad \text{Ecuación 3.48.}$$

Por lo tanto:

$$\frac{b}{a} = \frac{d}{6} \quad \text{Ecuación 3.49.}$$

Por otro lado, cuando el medio filtrante está compuesto de partículas no esféricas, es necesario introducir un factor de forma; entonces se tiene:

$$\frac{b}{a} = \phi \frac{d}{6} \quad \text{Ecuación 3.50.}$$

Donde:

ϕ = Factor de forma (adimensional).

Remplazando el valor de la Ecuación 3.50 en la Ecuación 3.46, se obtiene:

$$R_H = \frac{e}{1-e} \phi \frac{d}{6} \quad \text{Ecuación 3.51.}$$

Cuando el líquido ingresa al medio filtrante, su superficie de flujo se reduce debido a la presencia de las partículas. Se deduce entonces que la velocidad de flujo del líquido en el filtro aumenta, y se convierte en:

$$v = \frac{v_{FTR}}{e} \quad \text{Ecuación 3.52.}$$

Remplazando la Ecuación 3.51 y la Ecuación 3.52 en la Ecuación 3.42, se obtiene la ecuación de Carman-Kozeny:

$$h_f = f \frac{L}{\phi d} \cdot \frac{1-e}{e^3} \cdot \frac{v_{FTR}^2}{g} \quad \text{Ecuación 3.53.}$$

En la cual el factor adimensional f , se obtiene utilizando la siguiente fórmula empírica (Desjardins, 1997):

$$f = 150 \frac{1 - e}{R_E} + 1.75 \quad \text{Ecuación 3.54.}$$

Donde:

$$R_E = \frac{\phi v_{FTR} d}{v_{AGUA}} \quad \text{Ecuación 3.55.}$$

En la que R_E , es un pseudo-número de Reynolds.

Después de muchos lavados, el medio filtrante puede estratificarse, con las partículas finas acumulándose en la parte superior y las partículas grandes concentrándose en el fondo del filtro (todas las partículas tienen la misma densidad).

Suponiendo que la porosidad es constante en el medio y que el factor de forma es el mismo para todas las partículas, derivando la Ecuación 3.53, se obtiene:

$$\frac{dh_f}{dL} = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{1 - e}{e^3} \cdot \frac{v_{FTR}^2}{g} \cdot \frac{f}{d} \quad \text{Ecuación 3.56.}$$

Solo los valores de f y d son variables. Por lo tanto, la siguiente ecuación puede utilizarse para calcular la pérdida de carga para todo el espesor del medio filtrante:

$$h_f = \int_0^L dh_f = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{1 - e}{e^3} \cdot \frac{v_{FTR}^2}{g} \int_0^L \frac{f}{d} dL \quad \text{Ecuación 3.57.}$$

Ya que $dL = Ldx$, donde dx es la fracción de partículas de diámetro d . La Ecuación 3.57 se vuelve:

$$h_f = KL \int_{x=0}^{x=1} f \frac{dx}{d} \quad \text{Ecuación 3.58.}$$

A partir de las características granulométricas del medio filtrante, obtenidas por tamizado, se puede escribir:

$$h_f = KL \sum f \frac{x}{d^*} \quad \text{Ecuación 3.59.}$$

y,

$$K = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{1 - e}{e^3} \cdot \frac{v_{FTR}^2}{g} \quad \text{Ecuación 3.60.}$$

Donde:

- x = Fracción (en masa) de las partículas retenidas entre dos tamices consecutivos (adimensional).
 d^* = Diámetro geométrico promedio de las mallas de estos dos tamices (m).

El diámetro geométrico para dos tamices consecutivos se calcula como:

$$d^* = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \quad \text{Ecuación 3.61.}$$

Donde:

- d_1 = Diámetro correspondiente a la apertura de malla del tamiz superior (m).
 d_2 = Diámetro correspondiente a la apertura de malla del tamiz inferior (m).

Finalmente, tomando la Ecuación 3.54, Ecuación 3.55, Ecuación 3.59 y Ecuación 3.60, y escribiéndolas en términos de los medios filtrantes, se tiene que:

$$R_{E\ i(1,2)} = \frac{\phi_{(1,2)} v_{FTR} d_{i(1,2)}^*}{\nu_{AGUA}} \quad \text{Ecuación 3.62.}$$

Donde:

- $R_{E\ i(1,2)}$ = Pseudo-número de Reynolds para cada diámetro geométrico $d_{i(1,2)}^*$, para el medio filtrante 1 o 2 (adimensional).
 $\phi_{(1,2)}$ = Factor de forma para el medio filtrante 1 o 2 (adimensional).
 $d_{i(1,2)}$ = Diámetro geométrico para cada par de tamices consecutivos, de acuerdo con la granulometría del medio filtrante 1 o 2 (m).
 v_{FTR} = Tasa de filtración de trabajo durante el retrolavado (m/s).
 ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).

$$f_{i(1,2)} = 150 \frac{1 - e_{(1,2)}}{R_{E\ i(1,2)}} + 1.75 \quad \text{Ecuación 3.63.}$$

Donde:

- $f_{i(1,2)}$ = Factor de fricción en el medio filtrante 1 o 2, para cada diámetro geométrico (adimensional).
 $e_{(1,2)}$ = Porosidad del medio filtrante 1 o 2 (adimensional).

$$K_{(1,2)} = \frac{1}{\phi_{(1,2)}} \cdot \frac{1 - e_{(1,2)}}{e_{(1,2)}^3} \cdot \frac{v_{FTR}^2}{g}$$

Ecuación 3.64.

Donde:

- $K_{(1,2)}$ = Coeficiente de pérdida de carga en el medio filtrante 1 o 2 (m).

$$h_{MFF(1,2)} = K_{(1,2)} L_{(1,2)} \sum_{i=1}^n f_{i(1,2)} \frac{x_{i(1,2)}}{d_{i(1,2)}^*}$$

Ecuación 3.65.

Donde:

- $h_{MFF(1,2)}$ = Pérdida de carga en el medio filtrante 1 o 2, durante la filtración (m).
 $L_{(1,2)}$ = Espesor del medio filtrante 1 o 2 (m).
 $x_{i(1,2)}$ = Fracción (en masa) de las partículas retenidas entre dos tamices consecutivos, de acuerdo con la granulometría del medio filtrante 1 o 2 (adimensional).

3.6.2.3.3. Pérdida de carga por contracción a la salida del filtro durante la filtración

La pérdida de carga por contracción se calcula a partir de la Ecuación 2.128, tomando las mismas consideraciones hechas en la sección 2.6.1.2.2.

$$h_{CFF} = k_C \frac{v_{SF}^2}{2g}$$

Donde:

- h_{CFF} = Pérdida de carga por contracción a la salida del filtro durante la filtración (m)
 k_C = Coeficiente de pérdida por contracción (adimensional).
 v_{SF} = Velocidad de salida del filtro durante la filtración (m/s).
 g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

La velocidad en la salida del filtro se calcula para el diámetro de la tubería de entrada de retrolavado y el caudal por filtro durante el retrolavado:

$$v_{SF} = \frac{Q_{FR}}{A_{TC\ RET}}$$

Donde:

Q_{FR} = Caudal por filtro durante el retrolavado (m³/s).

$A_{TC\ RET}$ = Área de sección de la tubería comercial de retrolavado (m²).

Para el cálculo del coeficiente de pérdida por contracción k_C , referirse a la sección indicada anteriormente.

3.6.2.3.4. Pérdida de carga total en el filtro durante la filtración

La pérdida de carga total en el filtro resulta de la suma de las pérdidas por expansión a la entrada del filtro, las pérdidas en los medios filtrantes, la pérdida por contracción a la salida del filtro y se considera la pérdida de carga por toberas durante la filtración, calculada en la sección 3.6.1.2:

$$h_{TFF} = h_{EFF} + h_{MFF\ (1,2)} + h_{TOBF} + h_{CFE}$$

Ecuación 3.66.

Donde:

h_{TFF} = Pérdida de carga total en el filtro durante la filtración (m).

h_{EFF} = Pérdida de carga por expansión en la entrada del filtro durante la filtración (m).

$h_{MFF\ (1,2)}$ = Pérdida de carga en el medio filtrante 1 o 2, durante la filtración (m).

h_{TOBF} = Pérdida de carga total por toberas durante la filtración (m).

3.6.2.4. Pérdida de carga total durante la filtración

Finalmente, la pérdida de carga total durante la filtración será la que se obtenga del cálculo de las pérdidas por fricción, locales y en el filtro, a través de la línea de flujo seleccionada. Esta pérdida será la que se utilice para calcular la potencia del equipo de bombeo para filtración y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$H_{TF} = h_{f_{TF}} + h_{L_{TF}} + h_{TF}$$

Ecuación 3.67.

Donde:

- H_{TF} = Pérdida de carga total durante la filtración (m).
 $h_{f_{TF}}$ = Pérdida de carga total por fricción durante la filtración (m).
 $h_{L_{TF}}$ = Pérdida de carga total por piezas especiales durante la filtración (m).

3.6.3. Por tuberías y filtros durante el retrolavado

A diferencia del cálculo durante la filtración, durante el retrolavado el caudal pasa a través de un solo filtro y el diámetro tanto de la tubería de entrada de retrolavado, como de salida de retrolavado, son iguales y se mantienen constantes a lo largo de la línea de flujo elegida para el cálculo, la cual se recomienda que sea a través del filtro más alejado para considerar la mayor pérdida que se pueda presentar.

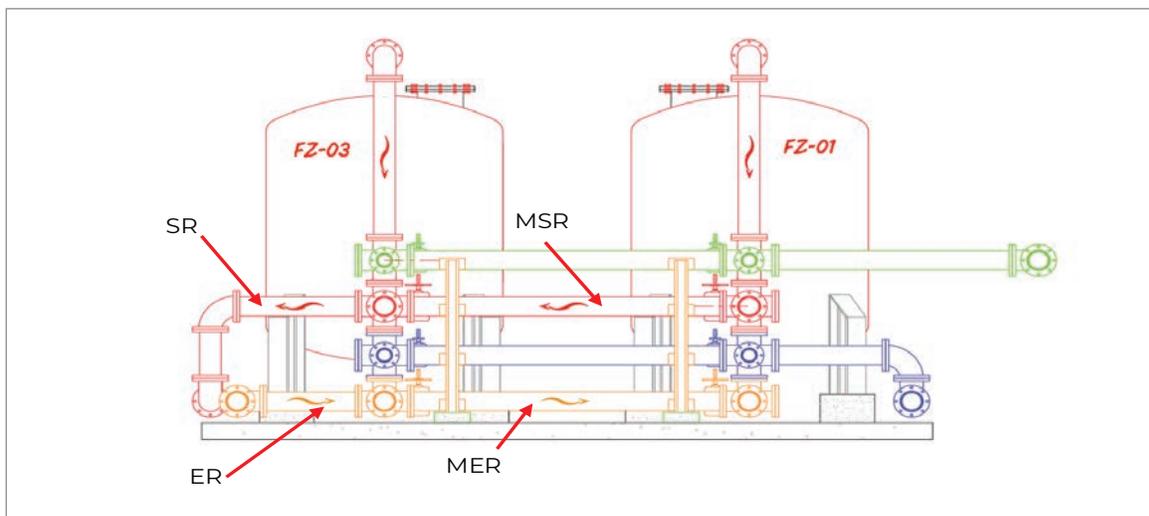


Figura 3.8. Dirección de flujo durante el retrolavado, vista lateral. La flecha naranja corresponde al agua de entrada de retrolavado y la roja al agua de salida de retrolavado.

3.6.3.1. Pérdidas por fricción en tuberías

Como ya se mencionó, el diámetro de la tubería de retrolavado (entrada y salida) es igual a lo largo de toda la línea de flujo considerada y el caudal de agua de retrolavado solo pasa a través de un filtro; por lo tanto, la velocidad en la tubería de retrolavado de mantendrá constante. En la Figura 3.8 y Figura 3.9 se observa la línea de flujo del cálculo para el arreglo propuesto por el IMTA.

Entonces, el cálculo de la pérdida total por fricción durante el retrolavado se realiza mediante la Ecuación 2.124, Ecuación 2.126 y Ecuación 2.127 para la longitud total de tubería de retrolavado:

$$Re_{TRET} = \frac{v_{TC\ RET} D_{TC\ RET}}{\nu_{AGUA}}$$

$$f_{TRET} = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_{TC\ RET} / D_{TC\ RET}}{3.71} + \frac{5.74}{Re_{TRET}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$h_{f\ TRET} = f_{TRET} \frac{L_{RET} v_{TC\ RET}^2}{D_{TC\ RET} 2g}$$

Donde:

- Re_{TRET} = Número de Reynolds en la tubería de retrolavado (adimensional).
- $v_{TC\ RET}$ = Velocidad del agua en la tubería comercial de retrolavado (m/s). Para el caudal de agua de retrolavado Q_{RET} .
- $D_{TC\ RET}$ = Diámetro de la tubería comercial de retrolavado (m).
- ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).
- f_{TRET} = Coeficiente de pérdida en la tubería de retrolavado (adimensional).
- $\varepsilon_{TC\ RET}$ = Rugosidad absoluta del material de la tubería comercial de retrolavado (m).
- $h_{f\ TRET}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de retrolavado (m).
- L_{RET} = Longitud de la tubería de retrolavado (m). Ver Ecuación 2.125.
- g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

3.6.3.2. Pérdidas locales en tuberías

Las pérdidas locales se calculan para la línea de flujo considerada para el retrolavado. Para ello se emplea la Ecuación 2.128 en términos de las piezas especiales:

$$h_{L\ RET\ (1,2,\dots,x)} = k_{PE\ (1,2,\dots,x)} \frac{v_{TC\ RET}^2}{2g}$$

Donde:

$h_{L\ RET\ (1,2,\dots,x)}$ = Pérdida de carga local durante el retrolavado para la pieza especial 1, 2, 3, ..., x (m).

$k_{PE\ (1,2,\dots,x)}$ = Coeficiente de pérdida de carga para la pieza especial 1, 2, 3, ..., x (adimensional). Ver Anexo 8.5.

El tipo y la cantidad de piezas especiales dependerá del arreglo particular de cada planta y los requerimientos de esta, sin embargo, para la batería de filtros se recomienda considerar las mismas piezas mostradas en la Figura 3.8 y Figura 3.9.

El total de las pérdidas locales será entonces:

$$h_{L\ TRET} = \sum h_{L\ RET\ (1,2,\dots,n)}$$

Donde:

$h_{L\ TRET}$ = Pérdida de carga total por piezas especiales durante el retrolavado (m).

\sum = Suma de las pérdidas de carga locales en cada pieza especial en la línea de flujo considerada (m).

3.6.3.3. Pérdidas de carga en el filtro

Como ya se ha indicado antes, el retrolavado se realiza para un solo filtro y con el mismo caudal (Q_{RET}), por lo que las pérdidas de carga dentro del filtro serán las mismas sin importar cual filtro se elija para el cálculo.

3.6.3.3.1. Pérdida por expansión en la entrada al filtro durante el retrolavado

En la entrada al filtro se presenta una pérdida de carga por expansión brusca, la cual se calcula mediante la Ecuación 2.128 y Ecuación 3.30 en términos del filtro y la tubería de retrolavado:

$$h_{EFR} = k_{EX} \frac{v_{RET}^2}{2g}$$

$$k_{EX} = C_A \left(\frac{A_{CF}}{A_{TC\ RET}} - 1 \right)^2$$

Donde:

h_{EFR} = Pérdida de carga por expansión en la entrada del filtro durante el retrolavado (m).

k_{EX} = Coeficiente de pérdida por expansión (adimensional).

v_{RET} = Velocidad (tasa) de retrolavado (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

C_A = Igual a 1 para expansiones bruscas.

A_{CF} = Área comercial por filtro (m²).

$A_{TC\ RET}$ = Área de sección de la tubería comercial de retrolavado (m²).

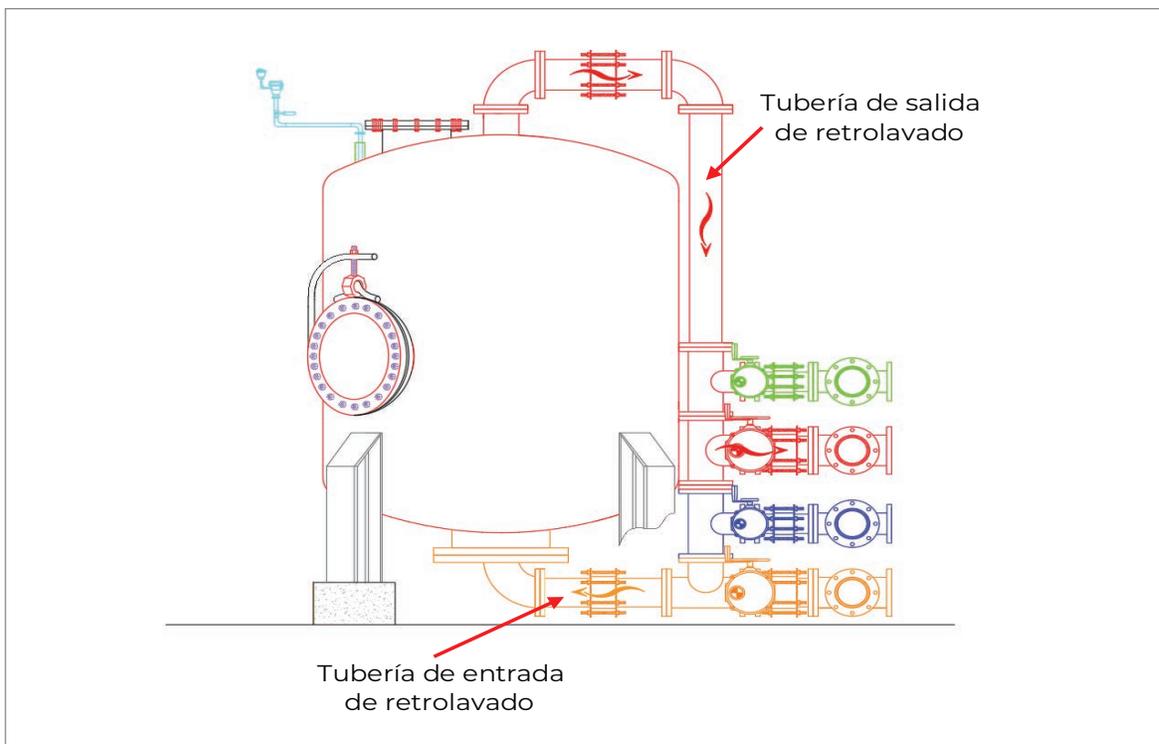


Figura 3.9. Dirección de flujo durante el retrolavado, vista frontal. La flecha naranja corresponde al agua de entrada de retrolavado y la roja al agua de salida de retrolavado.

3.6.3.3.2. Pérdidas de carga en el medio soporte durante el retrolavado

La pérdida de carga en cada subcapa de grava del medio soporte, puede ser calculada utilizándose la ecuación de Ergun (OPS/CEPIS, 2006), que es válida para el régimen laminar, de transición y turbulento.

$$h_{MS\ i} = \frac{150 v_{AGUA}}{g} \cdot \frac{(1 - n_{S\ i})^2}{n_{S\ i}^3} \cdot \left[\frac{Sv_i}{6} \right]^2 \cdot v_{RET} + 1.75 \cdot \frac{(1 - n_{S\ i})}{n_{S\ i}^3} \cdot \frac{Sv_i}{6} \cdot \frac{v_{RET}^2}{g} \cdot L_{S\ i}$$

Ecuación 3.68.

Donde:

$h_{MS\ i}$ = Pérdida de carga en la subcapa i (m).

ν_{AGUA} = Viscosidad cinemática del agua (m²/s).

$n_{S\ i}$ = Porosidad del medio soporte en la subcapa i (adimensional).

Sv_i = $\frac{6}{CE_{MS\ i} DE_{S\ i}}$: Superficie específica de la subcapa i (m²/m³).

$CE_{MS\ i}$ = Coeficiente de esfericidad del medio soporte en la subcapa i (adimensional).

$DE_{MS\ i}$ = $\sqrt{D_A D_B}$: Tamaño geométrico del medio soporte en la subcapa i (m).

D_A = Tamaño de la grava más grande de la subcapa i (m).

D_B = Tamaño de la grava más pequeña de la subcapa i (m).

$L_{S\ i}$ = Espesor de la subcapa i (m).

La pérdida de carga total será la suma de las pérdidas en cada subcapa del medio soporte:

$$h_{TMS} = \sum_{i=1}^n h_{MS\ i}$$

Ecuación 3.69.

Donde:

h_{TMS} = Pérdida de carga total en el medio soporte (m).

3.6.3.3.3. Pérdidas de carga en los medios filtrantes durante el retrolavado

Para lavar un filtro, la dirección del flujo se invierte. Cuando la velocidad ascendente alcanza un valor crítico, las partículas se elevan; ya no están en contacto entre sí y adoptan una posición de equilibrio para la cual su masa en el líquido es igual a la fuerza de arrastre que la contiene. Se dice que el medio está fluidificado. El flujo generalmente se vuelve turbulento, la posición de las partículas ya no es estable y la fuerte agitación causa choques entre ellas, lo que promueve la separación de la suciedad retenida en las partículas durante la filtración.

La pérdida de carga en el medio filtrante expandido resulta igual al peso de los granos de cada material que compone el medio filtrante (OPS/CEPIS, 2004). Se determina mediante la siguiente ecuación para cada uno de los medios filtrantes:

$$h_{MFR (1,2)} = \frac{(1 - n_{(1,2)}) (\rho_{MF (1,2)} - \rho_{AGUA})}{\rho_{AGUA}} \cdot L_{(1,2)}$$

Ecuación 3.70.

Donde:

- $h_{MFR (1,2)}$ = Pérdida de carga en el medio filtrante 1 o 2, durante el retrolavado (m).
 $n_{(1,2)}$ = Porosidad del medio filtrante 1 o 2 (adimensional).
 $\rho_{MF (1,2)}$ = Densidad real (es decir, no incluye el volumen de poros) del medio filtrante 1 o 2 (kg/m³).
 ρ_{AGUA} = Densidad del agua (kg/m³).
 $L_{(1,2)}$ = Espesor del medio filtrante 1 o 2 (m).

3.6.3.3.4. Pérdida de carga por contracción en la salida del filtro durante el retrolavado

La pérdida de carga por contracción se calcula a partir de la Ecuación 2.128, tomando las mismas consideraciones hechas en la sección 2.6.1.2.2.

$$h_{CFR} = k_C \frac{v_{TC RET}^2}{2g}$$

Donde:

- h_{CFR} = Pérdida de carga por contracción a la salida del filtro durante el retrolavado (m).
 k_C = Coeficiente de pérdida por contracción (adimensional).
 $v_{TC RET}$ = Velocidad del agua en la tubería comercial de retrolavado (m/s). Para el caudal de agua de retrolavado Q_{RET} .
 g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

Para el cálculo del coeficiente de pérdida por contracción k_C , referirse a la sección indicada anteriormente.

3.6.3.3.5. Pérdida de carga total en el filtro durante el retrolavado

Para calcular la pérdida total de carga en el filtro, se suman las diferentes pérdidas dentro del filtro mediante la siguiente ecuación:

$$h_{TFRET} = h_{EFR} + h_{TMS} + h_{MFR (1,2)} + h_{TOBR} + h_{CFR}$$

Ecuación 3.71.

Donde:

- h_{TFRET} = Pérdida de carga total en el filtro durante el retrolavado (m).
 h_{EFR} = Pérdida de carga por expansión en la entrada del filtro durante el retrolavado (m).
 h_{TMS} = Pérdida de carga total en el medio soporte (m).
 h_{TOBR} = Pérdida de carga total por toberas durante el retrolavado (m).

3.6.3.4. Pérdida de carga total durante el retrolavado

La pérdida de carga total durante el retrolavado se obtiene mediante la suma de las pérdidas locales, por fricción y dentro del filtro; calculadas en la línea de flujo desde el tanque de agua cruda o tratada hasta el tanque sedimentador. Para ello, se utiliza la ecuación siguiente:

$$H_{TR} = h_{f TRET} + h_{L TRET} + h_{TFRET}$$

Ecuación 3.72.

Donde:

- H_{TR} = Pérdida de carga total durante el retrolavado (m).
 $h_{f TRET}$ = Pérdida de carga por fricción en la tubería de retrolavado (m).
 $h_{L TRET}$ = Pérdida de carga total por piezas especiales durante el retrolavado (m).



Tanques de agua cruda y agua tratada

4

En secciones anteriores se abordó de manera general el dimensionamiento del tanque ya sea de agua cruda o tratada, dependiendo de cuál de ellos se tome el agua para el retrolavado, con el fin de tener una referencia de comparación entre las diferentes configuraciones de diámetro y número de filtros.

En esta sección se abarcan los conceptos básicos de diseño y recomendaciones para el cálculo de los tanques de agua cruda y agua tratada.

Primeramente, se dará por entendido que un tanque es un depósito del cual se extraerá agua por medio del tubo de succión de la bomba, en nuestro caso, para la alimentación de la batería de filtros y/o impulsión de agua tratada. Para dicho propósito el tanque de bombeo debe estar diseñado apropiadamente y reunir condiciones importantes para que tenga un funcionamiento apropiado.

Se han identificado fenómenos hidráulicos específicos que pueden afectar negativamente el desempeño de las bombas. Los fenómenos que no deben presentarse en un grado excesivo son (ANSI/HI, 2012):

- Vórtices sumergidos
- Vórtices en superficie libre
- Magnitud de pre-remolino y su fluctuación en el tiempo
- Distribución no uniforme de la velocidad en espacio y tiempo en el eje del impulsor
- Entrada de aire o burbujas de gas

Los remolinos en el tanque de bombeo pueden provocar un cambio significativo en las condiciones de operación de una bomba y pueden producir cambios en la capacidad de flujo, los requisitos de energía y eficiencia. También pueden resultar en vórtices locales que inducen reducciones de presión y núcleos de aire que se extienden en la bomba. Este y cualquier otro ingreso de aire tiene la capacidad de causar reducciones del caudal de bombeo y fluctuaciones en la carga de los impulsores causando ruido, vibraciones y cavitación, lo cual puede conducir a daños físicos (ANSI/HI, 2012).

La estructura del tanque debe ser diseñada para permitir que las bombas logren su óptimo funcionamiento hidráulico para todas las condiciones de operación.

4.1. Dimensiones de la cámara de bombeo

Los requerimientos básicos de diseño para el desempeño hidráulico satisfactorio de la estructura de un tanque incluyen los siguientes (ANSI/HI, 2012):

- Profundidad de flujo adecuada para limitar las velocidades en entrada de la bomba y reducir el potencial para la formación de vórtices superficiales.
- Ancho adecuado de la cámara de succión, en conjunción con la profundidad, para limitar las velocidades máximas de aproximación a la bomba a 0.5 m/s, pero suficientemente largo y angosto para canalizar flujo uniforme hacia las bombas.

4.1.1. Caudal por equipo de bombeo

Para poder determinar las dimensiones de la cámara de succión del tanque, es necesario determinar el número de equipos de bombeo que se instalarán. Para lo cual, se sugiere tomar las siguientes consideraciones:

- Caudal máximo por equipo de bombeo de 300 L/s (0.3 m³/s).
- Mismo caudal para equipos con el mismo propósito (filtración, retrolavado, distribución).

De esta forma, el número de equipos de bombeo para filtración será:

$$N_{EBF} = \frac{Q_D}{0.3} \quad \text{Ecuación 4.1.}$$

Donde:

N_{EBF} = Número de equipos de bombeo para filtración, redondeado al entero inmediato superior.

Q_D = Caudal de diseño de la planta (m³/s).

Para el caudal por equipo se tiene:

$$Q_{EF} = \frac{Q_D}{N_{EBF}} \quad \text{Ecuación 4.2.}$$

Donde:

Q_{EF} = Caudal por equipo de filtración (m^3/s).

Para el retrolavado:

$$N_{EBR} = \frac{Q_{RET}}{0.3} \quad \text{Ecuación 4.3.}$$

Donde:

N_{EBR} = Número de equipos de bombeo para retrolavado, redondeado al entero inmediato superior.

Q_{RET} = Caudal de agua de retrolavado (m^3/s).

$$Q_{ER} = \frac{Q_{RET}}{N_{EBR}} \quad \text{Ecuación 4.4.}$$

Donde:

Q_{ER} = Caudal por equipo de retrolavado (m^3/s).

Para distribución:

$$N_{EBD} = \frac{Q_D}{0.3} \quad \text{Ecuación 4.5.}$$

Donde:

N_{EBD} = Número de equipos de bombeo para distribución, redondeado al entero inmediato superior.

Q_D = Caudal de diseño de la planta (m^3/s).

$$Q_{ED} = \frac{Q_D}{N_{EBD}} \quad \text{Ecuación 4.6.}$$

Donde:

Q_{ED} = Caudal por equipo de distribución (m^3/s).

4.1.2. Diámetro de la campana de succión de la bomba

El propósito de esta sección es proveer criterios para la selección de un diámetro de diseño de la campana de succión de los equipos de bombeo, esté o no seleccionada la bomba que se usará en el tanque. El principal uso del diámetro de diseño de la campana de succión es para el dimensionamiento de la cámara de succión de la bomba. El diámetro de la campana de la bomba seleccionada para ser instalada debe proveer velocidades de entrada en la campana dentro del intervalo permitido.

La experiencia de la industria indica que la velocidad recomendada de entrada en la campana puede variar de la siguiente manera (ANSI/HI, 2012):

- Para caudales menores a 315 L/s, la velocidad de entrada debe ser de 0.6 a 2.7 m/s.
- Para caudales mayores o iguales a 315 L/s, pero menores de 1,260 L/s, la velocidad de entrada debe ser de 0.9 a 2.4 m/s.
- Para caudales mayores o iguales a 1,260 L/s, la velocidad de entrada debe estar entre 1.2 y 2.1 m/s

Para el diseño de la cámara de bombeo anterior a la selección de la bomba, se recomienda considerar una velocidad de entrada en la campana de 1.7 m/s (ANSI/HI, 2012).

Bajo estas consideraciones, el diámetro de la campana de succión para filtración se calcula como:

$$D_{SF} = \sqrt{\frac{4 Q_{EF}}{\pi v_{ECR}}}$$

Ecuación 4.7.

Donde:

D_{SF} = Diámetro de la campana de succión del equipo de filtración (m).

Q_{EF} = Caudal por equipo de filtración (m³/s).

v_{ECR} = Velocidad recomendada de entrada a la campana (m/s).

Para retrolavado:

$$D_{SR} = \sqrt{\frac{4 Q_{ER}}{\pi v_{ECR}}}$$

Ecuación 4.8.

Donde:

D_{SR} = Diámetro de la campana de succión del equipo de retrolavado (m).

Para distribución:

$$D_{SD} = \sqrt{\frac{4 Q_{ED}}{\pi v_{ECR}}} \quad \text{Ecuación 4.9.}$$

Donde:

D_{SD} = Diámetro de la campana de succión del equipo de distribución (m).

4.1.3. Sumergencia

La sumergencia mínima requerida para prevenir la formación de vórtices fuertes de aire se basa en parte en un parámetro de flujo adimensional, el número de Froude, que tiene importancia en flujos turbulentos a superficie libre, y se define como (ANSI/HI, 2012):

$$F_{DF} = \frac{v_{DF}}{(g D_{SF})^{0.5}} \quad \text{Ecuación 4.10.}$$

Donde:

F_{DF} = Número de Froude (adimensional), para el diámetro D_{SF} .

v_{DF} = Velocidad a la entrada en la succión (m/s), para el caudal Q_{EF} y diámetro D_{SF} .

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

Para el retrolavado:

$$F_{DR} = \frac{v_{DR}}{(g D_{SR})^{0.5}} \quad \text{Ecuación 4.11.}$$

Donde:

F_{DR} = Número de Froude (adimensional), para el diámetro D_{SR} .

v_{DR} = Velocidad a la entrada en la succión (m/s), para el caudal Q_{ER} y diámetro D_{SR} .

D_{SR} = Diámetro de la campana de succión del equipo de retrolavado (m).

Para distribución:

$$F_{DD} = \frac{v_{DD}}{(g D_{SD})^{0.5}} \quad \text{Ecuación 4.12.}$$

Donde:

- F_{DD} = Número de Froude (adimensional), para el diámetro D_{SD} .
 v_{DD} = Velocidad a la entrada en la succión (m/s), para el caudal Q_{ED} y diámetro D_{SD} .
 D_{SD} = Diámetro de la campana de succión del equipo de distribución (m).

La sumergencia mínima debe ser calculada de (Hecker, 1981):

$$S_{EF} = D_{SF} (1 + 2.3F_{DF}) \quad \text{Ecuación 4.13.}$$

Donde:

- S_{EF} = Sumergencia mínima para el equipo de filtración (m).

Para retrolavado:

$$S_{ER} = D_{SR} (1 + 2.3F_{DR}) \quad \text{Ecuación 4.14.}$$

Donde:

- S_{ER} = Sumergencia mínima para el equipo de retrolavado (m).

Para distribución:

$$S_{ED} = D_{SD} (1 + 2.3F_{DD}) \quad \text{Ecuación 4.15.}$$

Donde:

- S_{ED} = Sumergencia mínima para el equipo de distribución (m).

4.1.4. Nivel mínimo del agua en el tanque

En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se presenta el diseño básico recomendado para tanques rectangulares, dimensionados en unidades del diámetro de la campana de succión de la bomba (D). Este diseño aplica para cualquier número de bombas adyacentes (ANSI/ HI, 2012).

De la Figura 4.1 se puede observar que el nivel mínimo de agua requerido para el equipo de filtración será:

$$H_{EF} = S_{EF} + C_{EF}$$

Ecuación 4.16.

Donde:

H_{EF} = Nivel mínimo del agua para el equipo de filtración (m).

S_{EF} = Sumergencia mínima para el equipo de filtración (m).

C_{EF} = Distancia entre la entrada de la campana del equipo para filtración y la plantilla de la cámara de succión (m), $0.3D_{SF} \leq C_{EF} \leq 0.5D_{SF}$.

Para la bomba de retrolavado:

$$H_{ER} = S_{ER} + C_{ER}$$

Ecuación 4.17.

Donde:

H_{ER} = Nivel mínimo del agua para el equipo de retrolavado (m).

S_{ER} = Sumergencia mínima para el equipo de retrolavado (m).

C_{ER} = Distancia entre la entrada de la campana del equipo para retrolavado y la plantilla de la cámara de succión (m), $0.3D_{SR} \leq C_{ER} \leq 0.5D_{SR}$.

Para la bomba de distribución:

$$H_{ED} = S_{ED} + C_{ED}$$

Ecuación 4.18.

Donde:

H_{ED} = Nivel mínimo del agua para el equipo de distribución (m).

C_{ED} = Distancia entre la entrada de la campana del equipo para distribución y la plantilla de la cámara de succión (m), $0.3D_{SD} \leq C_{ED} \leq 0.5D_{SD}$.

El nivel mínimo de agua en el tanque quedará determinado por los equipos de bombeo instalados, es decir, en el tanque de agua cruda puede estar instalado únicamente el equipo para filtración, o el equipo de filtración y el de retrolavado, cuando éste se lleva a cabo con agua cruda. Entonces, el nivel mínimo del agua en el tanque de agua cruda será:

$$H_{MIN AC} = H_{EF}$$

Ecuación 4.19.

ó

$$H_{MIN AC} = Mayor(H_{EF} : H_{ER})$$

Ecuación 4.20.

Donde:

$H_{MIN AC}$ = Nivel mínimo de agua en el tanque de agua cruda (m).

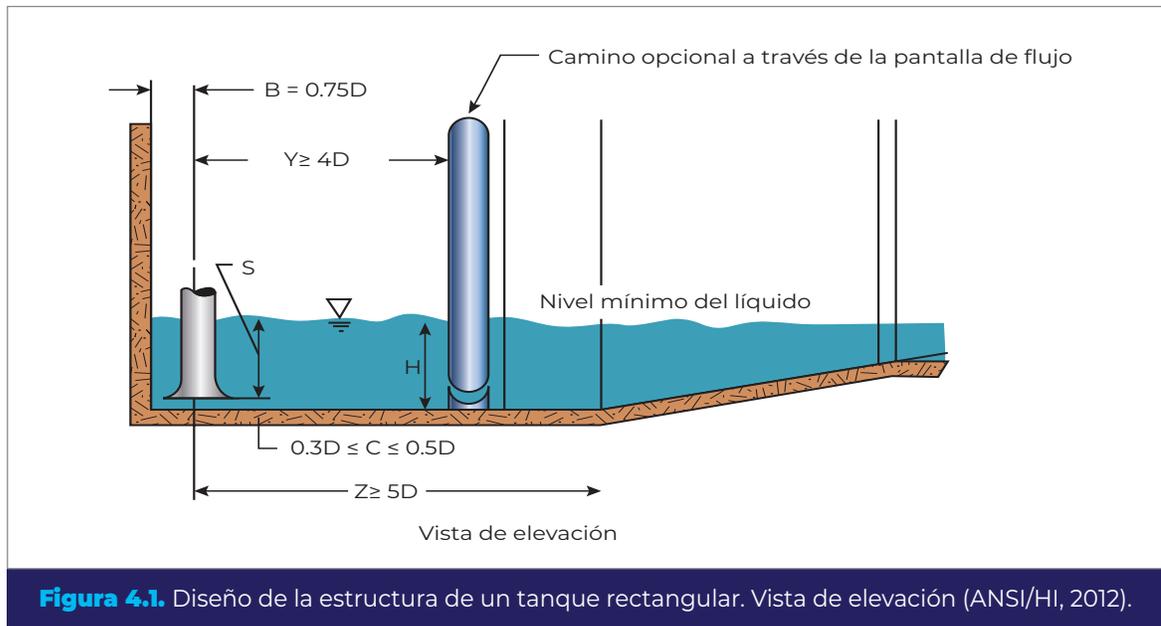


Figura 4.1. Diseño de la estructura de un tanque rectangular. Vista de elevación (ANSI/HI, 2012).

En el caso del tanque de agua tratada, puede estar instalado únicamente el equipo de distribución, o el equipo de distribución y el equipo de retrolavado, cuando éste se lleve a cabo con agua tratada. El nivel mínimo será:

$$H_{MIN AT} = H_{ED}$$

$$H_{MIN AT} = Mayor(H_{ED} : H_{ER})$$

Ecuación 4.21.

Donde:

$H_{MIN AT}$ = Nivel mínimo de agua en el tanque de agua tratada (m).

4.1.5. Ancho mínimo de la cámara de bombeo del tanque

De la Figura 4.2 se puede deducir que el ancho mínimo necesario de la cámara de bombeo está relacionado directamente con el número de equipos de bombeo que se instalarán. Por lo tanto, para el tanque de agua cruda se tiene que:

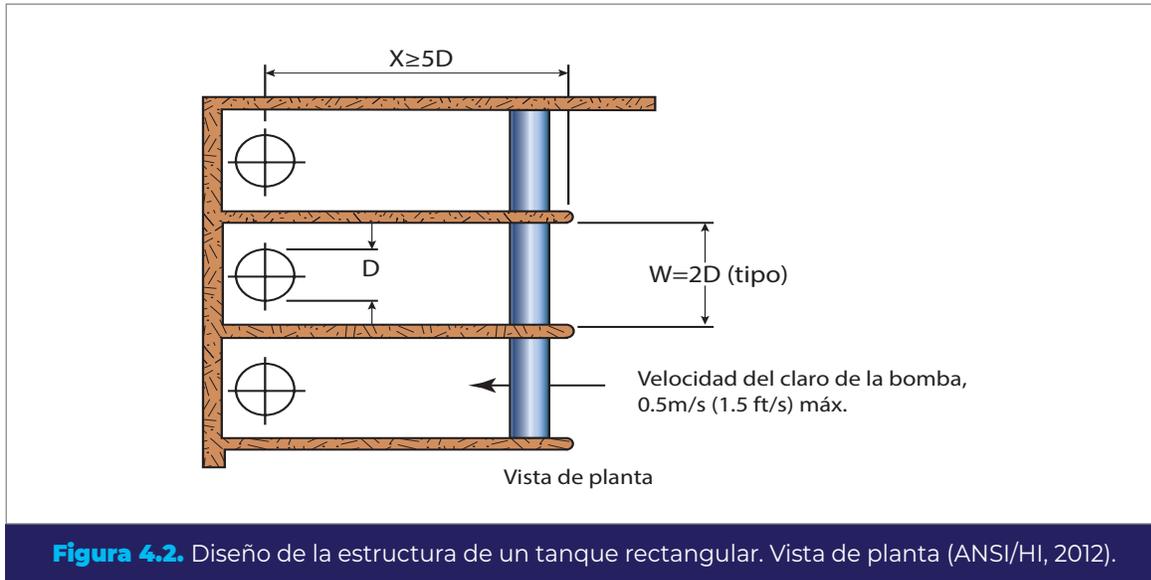


Figura 4.2. Diseño de la estructura de un tanque rectangular. Vista de planta (ANSI/HI, 2012).

$$a_{CB\ AC} = \left(\sum 2 D_{S\ (F/R)} \right) + \left(\sum E_{S_{MCB}} \right) \quad \text{Ecuación 4.22.}$$

Donde:

- $a_{CB\ AC}$ = Ancho mínimo de la cámara de bombeo del tanque de agua cruda (m).
- $D_{S\ (F/R)}$ = Diámetro de la campana de succión de cada uno de los equipos instalados en el tanque, filtración o filtración y retrolavado, según sea el caso (m).
- $E_{S_{MCB}}$ = Espesor aproximado de las mamparas que separan cada equipo de bombeo (m).

Para el tanque de agua tratada, el ancho mínimo de la cámara de bombeo será:

$$a_{CB\ AT} = \left(\sum 2 D_{S\ (D/R)} \right) + \left(\sum E_{S_{MCB}} \right) \quad \text{Ecuación 4.23.}$$

Donde:

- $a_{CB\ AT}$ = Ancho mínimo de la cámara de bombeo del tanque de agua tratada (m).
- $D_{S\ (D/R)}$ = Diámetro de la campana de succión de cada uno de los equipos instalados en el tanque, distribución o distribución y retrolavado, según sea el caso (m)

4.1.6. Largo mínimo de la cámara de bombeo del tanque

Tomando como referencia la Figura 4.1 y la Figura 4.2, se puede determinar el largo mínimo de la cámara de bombeo del tanque de agua cruda como:

$$b_{CB\ AC} = 5.75 D_{S\ MAX\ (F/R)} \quad \text{Ecuación 4.24.}$$

Donde:

- $b_{CB\ AC}$ = Largo mínimo de la cámara de bombeo del tanque de agua cruda (m).
 $D_{S\ MAX\ (F/R)}$ = Diámetro de campana de succión mayor de los equipos instalados en el tanque, filtración o retrolavado según sea el caso (m).

De igual manera, el largo mínimo de la cámara de bombeo para el tanque de agua tratada será:

$$b_{CB\ AT} = 5.75 D_{S\ MAX\ (D/R)} \quad \text{Ecuación 4.25.}$$

Donde:

- $b_{CB\ AT}$ = Largo mínimo de la cámara de bombeo del tanque de agua tratada (m).
 $D_{S\ MAX\ (D/R)}$ = Diámetro de campana de succión mayor de los equipos instalados en el tanque, distribución o retrolavado según sea el caso (m).

4.2. Tanque de agua cruda

Dependiendo de las condiciones iniciales de diseño de la planta puede o no haber tanque de agua cruda, en caso de ser necesario, el volumen de este puede ser el de autonomía para filtración o el volumen de autonomía más el volumen de retrolavado, para cuando pare el bombeo del pozo. Por lo tanto, a partir de la Ecuación 2.106 y Ecuación 2.107 se tiene que:

$$V_{T\ AC} = Q_D t_{AC}$$

$$V_{T\ AC} = (Q_D t_{AC}) + V_{RET}$$

Donde:

- $V_{T\ AC}$ = Volumen requerido en el tanque de agua cruda (m³).
 Q_D = Caudal de diseño (m³/s).
 t_{AC} = Tiempo de almacenamiento en el tanque de agua cruda (s).
 V_{RET} = Volumen de retrolavado (m³).

Como se mencionó anteriormente, el tanque debe tener un nivel mínimo de agua por debajo del cual los equipos de bombeo no podrán operar de forma adecuada y debe detenerse su funcionamiento para evitar daños en los mismos, esto quiere decir que el volumen correspondiente a este nivel mínimo se considera muerto ya que no podrá utilizarse para filtración o retrolavado de filtros.

Entonces, el volumen requerido en el tanque debe considerarse dentro de la profundidad útil de este. Dicha profundidad será igual a:

$$h_{UT\ AC} = h_{T\ AC} - H_{MIN\ AC} \quad \text{Ecuación 4.26.}$$

Donde:

- $h_{UT\ AC}$ = Profundidad útil del tanque de agua cruda (m).
- $h_{T\ AC}$ = Profundidad propuesta del tanque de agua cruda (m).
- $H_{MIN\ AC}$ = Nivel mínimo de agua en el tanque de agua cruda (m).

A partir de la Ecuación 2.108, se calcula el área superficial del tanque:

$$A_{T\ AC} = \frac{V_{T\ AC}}{h_{UT\ AC}}$$

Donde:

- $A_{T\ AC}$ = Área superficial del tanque de agua cruda (m²).

El largo y el ancho del tanque en el diseño final, será determinado por el área de terreno disponible para su colocación. Sin embargo, como base de partida, para el diseño funcional se puede considerar una geometría cuadrada o rectangular, en las cuales el ancho se calcula de la siguiente manera:

Cuadrado (Ecuación 2.109),

$$a_{T\ AC} = \sqrt{A_{T\ AC}}$$

Rectangular con proporción 1:1.5,

$$a_{T\ AC} = \sqrt{\frac{A_{T\ AC}}{1.5}} \quad \text{Ecuación 4.27.}$$

Donde:

- $a_{T\ AC}$ = Ancho del tanque de agua cruda (m).

El largo del tanque será igual a:

Cuadrado (Ecuación 2.109),

$$b_{T\ AC} = a_{T\ AC}$$

Rectangular con proporción 1:1.5,

$$b_{T\ AC} = 1.5 a_{T\ AC} \quad \text{Ecuación 4.28.}$$

Donde:

- $b_{T\ AC}$ = Largo del tanque de agua cruda (m).

Ya que se han calculado las dimensiones del tanque, se debe comprobar que sean adecuadas para los requerimientos de la instalación de los equipos de bombeo, es decir el largo y el ancho del tanque deben ser mayores al largo y al ancho mínimo de la cámara de bombeo.

$$a_{CB\ AC} < a_{T\ AC}$$

$$b_{CB\ AC} < b_{T\ AC}$$

De no cumplirse esta condición, deberá proponerse otra relación largo-ancho del tanque, pero siempre respetando el área superficial requerida.

4.3. Tanque de agua tratada

Al igual que el tanque de agua cruda, este tanque puede o no estar considerado dentro del diseño de la planta, según las condiciones particulares del proyecto que se esté desarrollando. El volumen del tanque también puede ser el volumen de autonomía para distribución o en caso de que el retrolavado se realice con agua tratada (que es lo recomendable), el volumen será el de autonomía más el de retrolavado.

De la Ecuación 2.106 y Ecuación 2.107, se puede escribir:

$$V_{T\ AT} = Q_D t_{AT}$$

o

$$V_{T\ AT} = (Q_D t_{AT}) + V_{RET}$$

Donde:

$V_{T\ AT}$ = Volumen requerido en el tanque de agua tratada (m³).

Q_D = Caudal de diseño (m³/s).

t_{AT} = Tiempo de almacenamiento en el tanque de agua tratada (s).

V_{RET} = Volumen de retrolavado (m³).

En cuanto al dimensionamiento, se hacen las mismas consideraciones que en el tanque de agua cruda.

Para la profundidad útil, se calcula tomando la Ecuación 4.26 de referencia:

$$h_{UT\ AT} = h_{T\ AT} - H_{MIN\ AT}$$

Donde:

- $h_{UT AT}$ = Profundidad útil del tanque de agua tratada (m).
 $h_{T AT}$ = Profundidad propuesta del tanque de agua tratada (m).
 $H_{MIN AT}$ = Nivel mínimo de agua en el tanque de agua tratada (m).

De la Ecuación 2.108 se obtiene el área superficial requerida:

$$A_{T AT} = \frac{V_{T AT}}{h_{UT AT}}$$

Donde:

$$A_{T AT} = \text{Área superficial del tanque de agua tratada (m}^2\text{)}.$$

En cuanto a la geometría del tanque, para el ancho, partiendo de la Ecuación 2.109 y Ecuación 4.27:

Cuadrado,

$$a_{T AT} = \sqrt{A_{T AT}}$$

Rectangular,

$$a_{T AT} = \sqrt{\frac{A_{T AT}}{1.5}}$$

Donde:

$$a_{T AT} = \text{Ancho del tanque de agua tratada (m)}.$$

Para el largo del tanque, tomando la Ecuación 2.109 y Ecuación 3.28 de referencia:

Cuadrado,

$$b_{T AT} = a_{T AT}$$

Rectangular,

$$b_{T AT} = 1.5 a_{T AT}$$

Donde:

$$b_{T AT} = \text{Largo del tanque de agua tratada (m)}.$$

Finalmente, las dimensiones del tanque deben cumplir la condición siguiente para asegurar que se tiene el espacio necesario para la cámara de bombeo:

$$a_{CB AT} < a_{T AT}$$

$$b_{CB AT} < b_{T AT}$$

De no cumplirse, deberá proponerse otra relación largo-ancho del tanque, respetando el área superficial requerida.



Equipos de bombeo

5

El número de equipos de bombeo necesarios para filtración, retrolavado y distribución se ha determinado anteriormente durante el dimensionamiento de los tanques de agua cruda y agua tratada, así como el caudal de diseño para cada equipo; de igual manera, en las secciones anteriores se calcularon las pérdidas de carga tanto en la filtración como en el retrolavado. Con estos datos y conociendo las elevaciones de las estructuras, se puede calcular la potencia necesaria de los equipos de bombeo.

5.1. Equipo de bombeo a filtros

La carga total de bombeo del equipo de filtración H_{BF} se determina mediante la Ecuación 2.122 sustituyendo la pérdida de carga total durante la filtración H_{TF} , considerando Z_1 como la elevación del espejo de agua en la succión de la bomba, que en el caso de alimentación desde el pozo será igual al nivel dinámico y para tanque será igual al nivel mínimo en el mismo; Z_2 será la elevación más alta en la línea de filtración.

La potencia de la bomba de filtración P_{BF} se determina entonces mediante la Ecuación 2.129, utilizando la carga total del equipo de filtración H_{BF} y el caudal por equipo de filtración Q_{EF} (ver sección 4.1.1).

Para convertir la potencia de la bomba a unidades HP, bastará dividir el resultado en W entre 745.7. La potencia calculada es la que debe suministrar cada bomba para filtración.

La potencia del motor que debe acompañar a la bomba de filtración P_{MF} se calcula mediante la Ecuación 2.130 para la potencia de la bomba de filtración P_{BF} .

5.2. Equipo de bombeo de retrolavado

La carga de bombeo para la bomba de retrolavado H_{BR} se calcula con la ecuación (3.122) para la pérdida de carga total durante el retrolavado H_{TR} , con Z_1 igual a la

elevación del espejo de agua en la succión de la bomba, correspondiente al nivel mínimo en el tanque de agua cruda o tratada y z_2 como la elevación más alta en la línea de retrolavado.

Entonces, la potencia de la bomba de retrolavado P_{BR} se calcula igualmente tomando la Ecuación 2.129 y sustituyendo la carga de bombeo de retrolavado H_{BR} y el caudal por equipo de retrolavado Q_{ER} (ver sección 4.1.1).

La potencia del motor de la bomba de retrolavado P_{MR} se calcula con la Ecuación 2.130 para la potencia de la bomba de retrolavado P_{BR} .

5.3. Equipo de bombeo de distribución

Para el caso de los equipos de distribución, cuando se contemple el cálculo de estos, la carga total de bombeo del equipo de distribución H_{BD} dependerá de las condiciones requeridas a la salida de la planta, es decir, si la distribución es a tanque de distribución o directamente a red, o si después de la filtración se requiere otro proceso de tratamiento. Puede calcularse mediante simulación hidráulica en caso de distribución a varios tanques o directamente a la red; en caso de tratarse de una línea de conducción a un solo tanque se puede calcular la carga de bombeo mediante el procedimiento utilizado para la filtración o el retrolavado, cuando se tenga otro tratamiento después de la filtración la carga será la requerida en dicho tratamiento.

Una vez determinada la carga de bombeo de distribución o a la salida de la planta, la potencia de la bomba de distribución P_{BD} se calcula igualmente partiendo de la Ecuación 2.129 y utilizando el caudal por equipo de distribución Q_{ED} . Ver sección 4.1.1.

La potencia del motor de la bomba de distribución P_{MD} se calcula con la Ecuación 2.130 para la potencia de la bomba de distribución P_{BD} .

5.4. Equipo de bombeo de recirculación

El equipo de bombeo para recirculación solo será necesario cuando la recirculación de agua clarificada sea directamente a la tubería de agua cruda que está presurizada. En caso de que la recirculación sea a un tanque de agua cruda enterrado, no será necesario el bombeo.

La carga de bombeo para recirculación deberá vencer la carga de bombeo para filtración más las pérdidas por fricción y locales en la tubería de recirculación, es decir:

$$H_{BREC} = H_{BF} + h_{fREC} + h_{LREC}$$

Ecuación 5.1.

Donde:

- H_{BREC} = Carga total de bombeo del equipo de recirculación (m)
- H_{BF} = Carga total de bombeo del equipo de filtración (m).
- h_{fREC} = Pérdida de carga por fricción en la tubería de recirculación (m).
- h_{LREC} = Pérdida de carga local en la tubería de recirculación (m).

Las pérdidas por fricción y locales se calculan de la misma manera que en las líneas de filtración o retrolavado. Ver de la Ecuación 2.124 a la Ecuación 2.128.

Con la carga de bombeo calculada, se obtiene la potencia de la bomba de recirculación P_{BREC} partiendo igualmente de la Ecuación 2.129 y utilizando el caudal de recirculación Q_{REC} (ver Ecuación 2.53).

Debe tenerse en cuenta que para recirculación se utilizan bombas centrífugas horizontales, las cuales tienen eficiencias muy bajas, del rango del 30 al 60% dependiendo del fabricante.

La potencia del motor de la bomba de recirculación P_{MREC} se calcula mediante la Ecuación 2.130 para la potencia de la bomba de recirculación P_{BREC} .

5.5. Carga neta de succión positiva disponible (NPSH)

Cuando el agua fluye a través de la bomba, la presión en la entrada y en la columna de succión tiende a disminuir debido a las altas velocidades del flujo. Si la reducción va más allá de la presión de vapor del agua, se producirá la vaporización y se formarán burbujas de vapor en el seno del líquido (OPS/CEPIS, 2005).

Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, aplastándose bruscamente las burbujas. Este fenómeno se llama cavitación.

La cavitación se produce principalmente en los álabes del impulsor de la bomba, donde las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar

a presiones localizadas muy altas, erosionando su superficie y causando esfuerzos que pueden originar su destrucción. El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de grava que golpea en las diferentes partes de la máquina.

La cavitación además de producir daños físicos y ruidos molestos puede llegar a reducir de manera considerable el caudal y rendimiento de la bomba.

La carga neta de succión positiva es la diferencia entre la presión existente a la entrada de la bomba y la presión del vapor del líquido que se bombea. Esta diferencia es la necesaria para evitar la cavitación. En el diseño de bombas destacan dos valores de NPSH, el disponible y el requerido.

El NPSH requerido es función del diseño de fábrica de la bomba, su valor, determinado experimentalmente, es proporcionado por el fabricante. El NPSH requerido corresponde a la carga mínima que necesita la bomba para mantener un funcionamiento estable. Se basa en una elevación de referencia, generalmente considerada como el eje del rodete.

El NPSH disponible es función del sistema de succión de la bomba, se calcula en metros de agua, mediante la siguiente ecuación:

$$NPSH_{DIS\ AC/AT} = H_{ATM} - (H_{VAP} + \Delta H_S) \pm h_S \quad \text{Ecuación 5.2.}$$

Donde:

- $NPSH_{DIS\ AC/AT}$ = Carga neta de succión positiva disponible en el tanque de agua cruda o tratada (m).
- H_{ATM} = Presión atmosférica (m).
- H_{VAP} = Presión de vapor (m).
- ΔH_S = Pérdida de carga en accesorios y tuberías en la columna de la bomba (m).
- h_S = Altura estática de succión (m).

La presión atmosférica varía en función de la altura sobre el nivel del mar, por lo que se debe obtener para la altura del sitio de construcción de la planta. En el Anexo 8.9 se presentan algunos valores de presión atmosférica para distintas elevaciones sobre el nivel del mar.

De forma similar, la presión de vapor del agua varía en función de la temperatura de esta. En el Anexo 8.10 se presentan valores de presión de vapor del agua para temperaturas de 0 a 100 °C.

La altura estática de succión h_s , puede ser positiva si el nivel del agua está por encima del eje del impulsor, o negativa si se encuentra por debajo de este. En el caso de bombas de turbina vertical, será positiva, ya que el impulsor se encuentra sumergido; por lo tanto, la altura estática de succión se puede considerar igual a la sumergencia de la bomba (S), ver de la Ecuación 4.13 a la Ecuación 4.15.

En cuanto a las pérdidas de carga en la columna de la bomba, algunos fabricantes cuentan con tablas que relacionan la pérdida de carga con el diámetro de la columna y la flecha de esta. Sin embargo, para el caso de bombas para tanques, estas pérdidas son muy bajas por lo que puede considerárseles despreciables.

Para evitar el riesgo de la cavitación por presión de succión, se debe cumplir que:

$$NPSH_{DISAC/AT} > NPSH_{REQ}$$

Donde:

$NPSH_{REQ}$ = Carga neta de succión positiva requerida

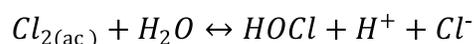


6.1. Química del cloro

El cloro se utiliza muy ampliamente en el tratamiento de agua para abastecimiento público y aguas residuales, como agente oxidante y desinfectante. Como agente oxidante se le emplea para la oxidación y posterior remoción de Fe(II) y Mn(II) en los suministros de aguas subterráneas. Como desinfectante se aplica en el tratamiento de aguas potables municipales (Jenkins y Snoeyink, 2009).

El cloro se aplica en varias formas, la más frecuente es como gas, $Cl_{2(g)}$, generado por vaporización de cloro líquido almacenado bajo presión. También se utilizan sales de ácido hipocloroso (HOCl), como el hipoclorito de sodio (NaOCl) e hipoclorito de calcio $Ca(OCl)_2$.

El $Cl_{2(ac)}$ reacciona con agua, y un átomo se oxida a Cl (+1), reduciéndose el otro a Cl (-1). Esto se conoce como desproporción o dismutación (Jenkins y Snoeyink, 2009).

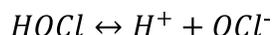


Ecuación 6.1.

En esta reacción se puede observar que, por cada mol de Cl_2 , se produce un mol de HOCl; teniéndose entonces la siguiente relación estequiométrica:

$$\frac{1 \text{ mol } Cl_2}{1 \text{ mol } HOCl} \times \frac{1 \text{ mol } HOCl}{52.45 \text{ g } HOCl} \times \frac{70.9 \text{ g } Cl_2}{1 \text{ mol } Cl_2} = 1.35 \frac{\text{g } Cl_2}{\text{g } HOCl} = 1.35 \frac{\text{mg } Cl_2}{\text{mg } HOCl}$$

El cloro se disocia completamente en soluciones acuosas diluidas. El ácido hipocloroso, por el contrario, es un ácido relativamente débil por lo que en el agua parte se encuentra como ácido hipocloroso y parte como ión hipoclorito.



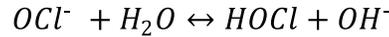
Ecuación 6.2.

En el caso del hipoclorito de sodio se tendrán las siguientes reacciones (Jenkins y Snoeyink, 2009):



Ecuación 6.3.

y



Ecuación 6.4.

De igual manera se observa que por cada mol de NaOCl, se produce un mol de HOCl, dando lugar a la siguiente relación estequiométrica:

$$\frac{1 \text{ mol NaOCl}}{1 \text{ mol HOCl}} \times \frac{1 \text{ mol HOCl}}{52.45 \text{ g HOCl}} \times \frac{74.45 \text{ g NaOCl}}{1 \text{ mol NaOCl}} = 1.42 \frac{\text{g NaOCl}}{\text{g HOCl}} = 1.42 \frac{\text{mg NaOCl}}{\text{mg HOCl}}$$

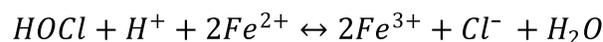
6.2. Química del hierro

En medio acuoso el hierro existe en dos estados de oxidación Fe(II) (ferroso) y Fe(III) (férrico).

En aguas naturales el hierro puede presentarse formando complejos con materia orgánica e inorgánica. Con sustancias orgánicas el hierro férrico establece complejos más fuertes que con el hierro ferroso y también forma complejos con fluoruros, cloruros, sulfatos y fosfatos. El hidróxido férrico coloidal se encuentra comúnmente en aguas superficiales. En partes profundas de lagos o ríos el agua puede contener pequeñas cantidades de oxígeno y alcanzar un potencial redox bajo, en tales aguas pueden presentarse concentraciones altas de hierro ferroso disuelto. El hierro ferroso es la forma más común de hierro disuelto en agua subterránea.

Ya que algunas veces es difícil oxidar el hierro mediante aireación, se ha investigado el uso de otros oxidantes para removerlo de manera efectiva. Estos incluyen el cloro, el permanganato de potasio, el dióxido de cloro, el ozono y el peróxido de hidrógeno.

Así pues, cuando se usa cloro para oxidar hierro ferroso y hierro férrico en el tratamiento de aguas subterráneas, se lleva a cabo la siguiente reacción (Jenkins y Snoeyink, 2009):



Ecuación 6.5.

Para esta reacción, se tiene la siguiente relación estequiométrica:

$$\frac{1 \text{ mol HOCl}}{2 \text{ mol Fe}} \times \frac{52.45 \text{ g HOCl}}{1 \text{ mol HOCl}} \times \frac{1 \text{ mol Fe}}{55.85 \text{ g Fe}} = 0.47 \frac{\text{g HOCl}}{\text{g Fe}} = 0.47 \frac{\text{mg HOCl}}{\text{mg Fe}}$$

6.3. Química del manganeso

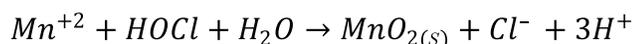
El manganeso tiene ocho estados de oxidación (0):Mn, (II):Mn²⁺, (2.67):Mn₃O_{4(s)}, (III):Mn₂O_{3(s)}, (IV):MnO_{2(s)}, (V):MnO₄³⁻, (VI):MnO₄²⁻, y (VII):MnO⁴⁺. El Mn(II) ocupa una gran porción del régimen Eh-pH asociado con aguas naturales.

La remoción de Mn(II) de soluciones que contienen O_{2(ac)} no sigue la estequiometría de las ecuaciones anteriores, indicando un modelo autocatalítico. En soluciones ligeramente alcalinas, cantidades significativas de Mn(II) son adsorbidas sobre óxidos más altos de manganeso. Los productos de la reacción entre Mn(II) y O₂ molecular son no estequiométricos, y varían en grado de oxidación desde MnO_{1.3(s)} a MnO_{2(s)} (30 a 90% MnO₂).

Las reacciones de manganeso con oxígeno son frecuentemente lentas y dependientes del pH por lo que se emplean otros compuestos para oxidarlo eficientemente. Estos compuestos son cloro, permanganato de potasio, dióxido de cloro y ozono.

El manganeso presenta mayor dificultad que el hierro para ser oxidado. Por muchos años ha sido una práctica común controlar el Mn(II) adicionando cloro bajo condiciones alcalinas, recientemente se ha comprobado que el cloro libre es relativamente no efectivo para la oxidación de Mn(II) a menos que el pH de la solución esté arriba de 8.0-8.5.

Cuando se oxida el manganeso mediante la aplicación cloro, se lleva a cabo la siguiente reacción:



Ecuación 6.6.

Donde se observa que se requiere un mol de HOCl para oxidar un mol Mn, lo que origina la siguiente relación estequiométrica:

$$\frac{1 \text{ mol } HOCl}{1 \text{ mol } Mn} \times \frac{52.45 \text{ g } HOCl}{1 \text{ mol } HOCl} \times \frac{1 \text{ mol } Mn}{54.93 \text{ g } Mn} = 0.95 \frac{\text{g } HOCl}{\text{g } Mn} = 0.95 \frac{\text{mg } HOCl}{\text{mg } Mn}$$

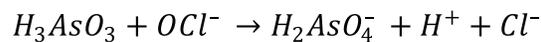
La reacción de oxidación del Mn(II) empleando cloro requiere valores de pH entre 8 y 9 para ser efectiva y lograr la oxidación e insolubilización del manganeso; sin embargo, la reacción autocatalítica de los óxidos de manganeso, MnO_x, para oxidar y adsorber Mn(II) a valores de pH del agua natural es inducida mediante la aplicación continua de cloro en el agua que se alimenta a los filtros.

6.4. Química del arsénico

El arsénico soluble aparece en agua natural solamente en los estados de oxidación trivalente, As(III) o As^{+3} y pentavalente As(V) o As^{+5} . En aguas oxigenadas, las formas dominantes son las de As(V) existiendo como aniones, $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ o AsO_4^{3-} , en el intervalo de pH común para el tratamiento de agua (pH 5 a 12). Mientras que, bajo condiciones anóxicas, el As(III) es estable con especies dominantes no iónicas (H_3AsO_3) y aniónicas ($H_2AsO_3^-$), abajo y arriba de $pH = 9.22$, respectivamente. Además del pH, las condiciones redox (Eh), también influyen sobre la distribución de estas especies; el As(V) predomina aproximadamente de 0 a 0.25 volts (V), dependiendo de las condiciones de pH y el As (III) predomina bajo condiciones reducidas.

La clave para remover el arsénico es convertir el As(III) a As(V), para ello se utiliza un oxidante, que puede ser: hipoclorito de sodio, gas cloro, permanganato de potasio, ozono, entre otros.

La reacción de oxidación entre el hipoclorito y el arsénico es la siguiente:



Ecuación 6.7.

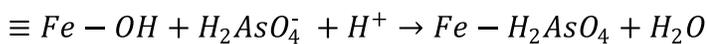
De las ecuaciones (7.1) y (7.7) se puede deducir que se requiere un mol de HOCl para oxidar un mol de As:

$$\frac{1 \text{ mol HOCl}}{1 \text{ mol As}} \times \frac{52.45 \text{ g HOCl}}{1 \text{ mol HOCl}} \times \frac{1 \text{ mol As}}{74.92 \text{ g As}} = 0.70 \frac{\text{g HOCl}}{\text{g As}} = 0.70 \frac{\text{mg HOCl}}{\text{mg As}}$$

Con base en un estudio de oxidación de arsénico en laboratorio (Ghurye y Clifford, 2001, citado en (U.S. EPA, 2003)), se recomienda la aplicación de cloro en dosis que excedan 3 veces la relación estequiométrica, para convertir el 95% de As(III) en As(V) en 42 segundos.

Una vez que se ha realizado la oxidación del arsénico, se puede tomar ventaja de la capacidad de adsorber arsénico de las partículas de hierro que se producen durante la oxidación del Fe(II) y utilizar la remoción del hierro para reducir el arsénico (Ohio EPA, 2010).

La adsorción de As(V) en la superficie del hidróxido de hierro a valores de pH entre 2 y 7, se representa por la siguiente reacción (Jeong, 2005):



Ecuación 6.8.

Sorg (2002) propuso una estrategia de tratamiento que se deriva de la predicción que en el procesamiento de una fuente de agua con una relación de hierro 20:1 con respecto al arsénico, se reduciría el arsénico por debajo del límite permisible (0.010 mg/L), mediante la remoción del hierro. Convirtiendo esta relación en una guía de dosificación, indica que 1 mg/L de hierro debería ser capaz de remover 0.05 mg/L de arsénico. Es decir, para que la adsorción del arsénico en hidróxido de hierro se lleve a cabo de manera eficiente, se debe tener una relación estequiométrica igual a:

$$\frac{20.0 \text{ mg Fe}}{1.0 \text{ mg As}} \times \frac{1 \text{ mmol Fe}}{55.85 \text{ mg Fe}} \times \frac{74.92 \text{ mg As}}{1 \text{ mmol As}} = 26.83 \frac{\text{mmol Fe}}{\text{mmol As}} = 26.83 \frac{\text{mol Fe}}{\text{mol As}}$$

Cuando el agua a tratar tiene una relación hierro: arsénico menor a la requerida, se hace necesario incluir una fuente de hierro adicional, en este caso, cloruro férrico (FeCl_3). El cloruro férrico en medio acuoso reacciona con el ion hidróxido para formar flóculos de $\text{FeO}(\text{OH})$:



Ecuación 6.9.

A partir de la relación estequiométrica entre el cloruro férrico y su contenido de hierro se tiene:

$$\frac{1 \text{ mol FeCl}_3}{1 \text{ mol Fe}} \times \frac{162.20 \text{ g FeCl}_3}{1 \text{ mol FeCl}_3} \times \frac{1 \text{ mol Fe}}{55.85 \text{ g Fe}} = 2.90 \frac{\text{g FeCl}_3}{\text{g Fe}} = 2.90 \frac{\text{mg FeCl}_3}{\text{mg Fe}}$$

Y también:

$$\frac{2.90 \text{ mg FeCl}_3}{1.0 \text{ mg Fe}} \times \frac{1.0 \text{ mg Fe}}{0.05 \text{ mg As}} = 58.0 \frac{\text{mg FeCl}_3}{\text{mg As}}$$

6.5. Dosis de reactivos

6.5.1. Ácido hipocloroso (HOCl)

Para poder determinar la dosis de cloro, ya sea como hipoclorito de sodio (NaOCl) o como gas cloro (Cl_2), primeramente se debe calcular la dosis de HOCl que será necesaria para oxidar el hierro, el manganeso o el arsénico presentes en el agua cruda; y al mismo tiempo asegurar cierta concentración de HOCl residual para desinfección.

Cuando los contaminantes a remover sean hierro y manganeso:

$$D_{HOCl} = \left(FE_{\alpha Mn} \frac{HOCl}{Mn} C_{Mn} \right) + \left(\frac{HOCl}{Fe} C_{Fe} \right) + HOCl_{RES} \quad \text{Ecuación 6.10.}$$

Donde:

- D_{HOCl} = Dosis de ácido hipocloroso (mg/L).
- $FE_{\alpha Mn}$ = Factor de eficiencia de oxidación del manganeso (sobre dosificación), igual a 2, con base en la experiencia del IMTA en evaluación y puesta en marcha de plantas potabilizadoras (adimensional).
- $\frac{HOCl}{Mn}$ = Relación estequiométrica para la oxidación del manganeso, igual a $0.95 \text{ mg HOCl/mg Mn}$.
- C_{Mn} = Concentración de manganeso en el agua cruda (mg/L).
- $\frac{HOCl}{Fe}$ = Relación estequiométrica para la oxidación del hierro, igual a $0.47 \text{ mg HOCl/mg Fe}$.
- C_{Fe} = Concentración de hierro en el agua cruda (mg/L).
- $HOCl_{RES}$ = Concentración de ácido hipocloroso residual (mg/L), con base en la normatividad vigente.

Para la remoción de arsénico:

$$D_{HOCl} = \left(FE_{\alpha As} \frac{HOCl}{As} C_{As} \right) + \left(\frac{HOCl}{Fe} C_{Fe} \right) + HOCl_{RES} \quad \text{Ecuación 6.11.}$$

Donde:

- $FE_{\alpha As}$ = Factor de eficiencia de oxidación del arsénico (sobre dosificación), igual a 3, con base en la experiencia del IMTA en evaluación y puesta en marcha de plantas potabilizadoras (adimensional).
- $\frac{HOCl}{As}$ = Relación estequiométrica para la oxidación del arsénico, igual a $0.70 \text{ mg HOCl/mg As}$.
- C_{As} = Concentración de arsénico en el agua cruda (mg/L).

6.5.2. Gas cloro (Cl_2)

Cuando se elija gas cloro como reactivo para la oxidación, la dosis que se debe suministrar se calcula con la siguiente ecuación:

$$D_{Cl_2} = \frac{Cl_2}{HOCl} \frac{D_{HOCl}}{\text{Pureza}_{Cl_2}} \times 100 \quad \text{Ecuación 6.12.}$$

Donde:

D_{Cl_2} = Dosis de gas cloro (mg/L).

$\frac{Cl_2}{HOCl}$ = Relación estequiométrica del gas cloro en medio acuoso, igual a $1.35 \text{ mg } Cl_2/\text{mg } HOCl$.

$Pureza_{Cl_2}$ = Pureza del gas cloro comercial (%).

6.5.3. Hipoclorito de sodio (NaOCl)

En el caso de utilizar hipoclorito de sodio, la dosis se calcula de la siguiente manera:

$$D_{NaOCl} = \frac{\frac{NaOCl}{HOCl} D_{DHOI}}{Pureza_{NaOCl}} \times 100 \quad \text{Ecuación 6.13.}$$

Donde:

D_{NaOCl} = Dosis de hipoclorito de sodio (mg/L).

$\frac{NaOCl}{HOCl}$ = Relación estequiométrica del hipoclorito de sodio, igual a $1.42 \text{ mg } NaOCl/\text{mg } HOCl$.

$Pureza_{NaOCl}$ = Pureza del hipoclorito de sodio comercial (%).

6.5.4. Cloruro férrico (FeCl₃)

La dosis de cloruro férrico necesaria para la remoción de arsénico se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$D_{FeCl_3} = \frac{C_{As} \cdot FE_{AdAs} \cdot \frac{Fe}{As} \cdot \frac{FeCl_3}{Fe} \cdot 100}{Pureza_{FeCl_3}} \quad \text{Ecuación 6.14.}$$

Donde:

D_{FeCl_3} = Dosis de cloruro férrico (mg/L).

FE_{AdAs} = Factor de eficiencia de adsorción del arsénico, igual a 2, con base en la experiencia del IMTA en evaluación y puesta en marcha de plantas potabilizadoras (adimensional).

$\frac{Fe}{As}$ = Relación estequiométrica de adsorción del arsénico en hidróxido de hierro, igual a $20.0 \text{ mg } Fe/\text{mg } As$.

$\frac{FeCl_3}{Fe}$ = Relación estequiométrica del cloruro férrico en medio acuoso, igual a $2.9 \text{ mg } FeCl_3/\text{mg } Fe$.

$Pureza_{FeCl_3}$ = Pureza del cloruro férrico comercial (%).

6.5.5. Polímero

Para hacer posible que el agua recuperada del retrolavado de los filtros sea recirculada al inicio del proceso sin provocar alteraciones importantes en la calidad del agua filtrada, así como en la duración de la carrera de filtración por ensuciamiento acelerado del lecho filtrante, es necesario lograr alta eficiencia en la separación de los sólidos particulados en el tanque sedimentador. Esta eficiencia se refiere a obtener agua clarificada con la menor cantidad de sólidos en el menor tiempo posible. Para ello es necesario el acondicionamiento del agua de retrolavado que se vierte al tanque sedimentador.

Este acondicionamiento es útil en el proceso de remoción de arsénico, así como en el proceso de remoción de hierro y manganeso cuando se tienen elevadas concentraciones de estos elementos (IMTA, 2002), otro objetivo de dicho acondicionamiento es promover que el lodo obtenido después del proceso de clarificación tenga un contenido mayor de sólidos (IMTA, 2019). El acondicionamiento puede ser por métodos químicos que incluyen la adición de (García Mendoza, 2017):

- Químicos inorgánicos como, sulfato de aluminio, cloruro férrico, cal o una combinación de ambos
- Polímeros
- Combinación de químicos inorgánicos y polielectrolitos

De acuerdo con pruebas de espesamiento preliminares realizadas por el IMTA, con lodos producto del retrolavado de filtros para remoción de hierro en planta piloto (IMTA, 2019), se obtuvo una dosis de 1 miligramo de polímero catiónico por litro de agua de retrolavado; la concentración del polímero recomendado fue de 0.5%. Sin embargo, son comunes dosis menores a 1 mg/L y concentraciones de polímero del 0.1%.

Otros estudios realizados en el IMTA concluyen que los lodos generados del tratamiento de agua con una concentración de 0.15 mg/L de arsénico (V), requieren una dosificación de polímero de 0.89 mg/L para tener una sedimentación adecuada (García Mendoza, 2017).

En la medida de lo posible, se recomienda que se realicen las pruebas necesarias en cada caso particular para determinar la cantidad de polímero a aplicar por volumen de agua de retrolavado, con base en la concentración de hierro, manganeso o arsénico en la fuente y las características del polímero utilizado. Una vez determinada esta relación, el volumen de disolución de polímero que se debe aplicar por retrolavado se calcula como:

$$V_{Pol} = \frac{D_{Pol} \cdot V_{RET}}{C_{SPol}}$$

Ecuación 6.15.

Donde:

V_{Pol} = Volumen de la disolución de polímero a inyectar (L).

D_{Pol} = Dosis de polímero requerido (mg/L).

V_{RET} = Volumen de retrolavado por filtro (L).

C_{SPol} = Concentración de la disolución de polímero (mg/L).

Para la determinación de la concentración del polímero se debe tomar en cuenta principalmente la recomendación del fabricante, pero también la capacidad de las bombas dosificadoras, ya que una disolución muy diluida puede llevar a capacidades de bombas que no haya disponibles en el mercado.

Considerando que este volumen de polímero se tiene que inyectar a la entrada del sedimentador, durante el tiempo que dura el retrolavado (t_{RET}), entonces el caudal de la disolución de polímero será:

$$q_{Sol} = \frac{V_{Pol}}{t_{RET}}$$

Ecuación 6.16.

Donde:

q_{Sol} – Caudal de disolución de polímero (L/min).

V_{Pol} – Volumen de la disolución de polímero a inyectar (L).

t_{RET} – Duración del retrolavado (min).

6.6. Flujo másico de reactivos

Con la finalidad de poder calcular la cantidad de reactivos que se necesitará en un determinado periodo de tiempo, primeramente se necesita determinar el flujo másico de los reactivos utilizados en el proceso por día.

Para el gas cloro, el flujo másico se calcula con la siguiente ecuación:

$$W_{Cl_2} = 3.6t_{OP} D_{Cl_2} Q_D$$

Ecuación 6.17.

Donde:

W_{Cl_2} = Flujo másico de gas cloro (kg/día).

- D_{Cl_2} = Dosis de gas cloro (mg/L).
 Q_D = Caudal de diseño (m³/s).
 t_{OP} = Horas de operación de la planta por día.
 3.6 = Factor de conversión de unidades.

Cuando se utiliza hipoclorito de sodio:

$$W_{NaOCl} = 3.6t_{OP} D_{NaOCl} Q_D \quad \text{Ecuación 6.18.}$$

Donde:

- W_{NaOCl} = Flujo másico de hipoclorito de sodio (kg/día).
 D_{NaOCl} = Dosis de hipoclorito de sodio (mg/L).

En el caso de que el contaminante a remover sea arsénico, el cálculo del flujo másico de cloruro férrico se realiza con la siguiente ecuación:

$$W_{FeCl_3} = 3.6t_{OP} D_{FeCl_3} Q_D \quad \text{Ecuación 6.19.}$$

Donde:

- W_{FeCl_3} = Flujo másico de cloruro férrico (kg/día).
 D_{FeCl_3} = Dosis de cloruro férrico (mg/L).

Cuando se presentan concentraciones elevadas de hierro y manganeso, o el contaminante a remover es arsénico, el flujo másico de polímero se calcula de la siguiente manera:

$$W_{Pol} = D_{Pol} V_{RETT} \quad \text{Ecuación 6.20.}$$

Donde:

- W_{Pol} = Flujo másico de polímero (kg/día).
 D_{Pol} = Dosis de polímero (kg/L).
 V_{RETT} = Volumen de retrolavado total por día (L/día).

6.7. Flujo volumétrico de reactivos

Para los reactivos cuya presentación comercial se cuantifica y dosifica en unidades de volumen, es necesario calcular el flujo volumétrico por día para posteriormente calcular la cantidad requerida para determinado tiempo de operación de la planta.

El flujo volumétrico de hipoclorito de sodio se calcula con la siguiente expresión:

$$q_{NaOCl} = \frac{W_{NaOCl}}{\rho_{NaOCl}} \quad \text{Ecuación 6.21.}$$

Donde:

- q_{NaOCl} = Flujo volumétrico de hipoclorito de sodio (L/día).
 ρ_{NaOCl} = Densidad del hipoclorito de sodio comercial (kg/L).

En cuanto al cloruro férrico, se calcula de igual manera:

$$q_{FeCl_3} = \frac{W_{FeCl_3}}{\rho_{FeCl_3}} \quad \text{Ecuación 6.22.}$$

Donde:

- q_{FeCl_3} = Flujo volumétrico de cloruro férrico (L/día).
 ρ_{FeCl_3} = Densidad del cloruro férrico comercial (kg/L).

Para el polímero, se utiliza la siguiente ecuación:

$$q_{Pol} = F_{RETMAX} V_{Pol} \quad \text{Ecuación 6.23.}$$

Donde:

- q_{Pol} = Flujo volumétrico de polímero (L/día).
 F_{RETMAX} = Número máximo de filtros retrolavados por día.
 V_{Pol} = Volumen de la solución de polímero a inyectar (L).

6.8. Cantidad de reactivos en almacenamiento

Dentro del procedimiento de operación de la planta, es importante establecer el periodo de tiempo, al cabo del cual se realizará la adquisición de nuevos reactivos y de esta manera determinar la cantidad total a almacenar, lo cual servirá de base para el dimensionamiento del almacén. En general se recomienda tener reactivos para 15 días mínimo, pero todo dependerá del espacio disponible, de las recomendaciones de los fabricantes en cuanto a las condiciones de almacenamiento, así como de la cercanía de la potabilizadora respecto al centro de producción de los reactivos.

El gas cloro se comercializa en forma líquida, sin embargo, la unidad de medida es en kilogramos. Por lo tanto, la cantidad almacenada será igual a:

$$CA_{Cl_2} = W_{Cl_2} t_{A Cl_2} \quad \text{Ecuación 6.24.}$$

Donde:

CA_{Cl_2} = Cantidad almacenada de gas cloro (kg)

W_{Cl_2} = Flujo másico de gas cloro (kg/día).

$t_{A Cl_2}$ = Tiempo de almacenamiento del gas cloro (días).

El hipoclorito de sodio, el cloruro férrico y el polímero se comercializan en unidades de volumen, por lo cual, la cantidad almacenada será:

$$CA_{NaOCl} = q_{NaOCl} t_{A NaOCl} \quad \text{Ecuación 6.25.}$$

Donde:

CA_{NaOCl} = Cantidad almacenada de hipoclorito de sodio (L).

$t_{A NaOCl}$ = Tiempo de almacenamiento del hipoclorito de sodio (días).

$$CA_{FeCl_3} = q_{FeCl_3} t_{A FeCl_3} \quad \text{Ecuación 6.26.}$$

Donde:

CA_{FeCl_3} = Cantidad almacenada de cloruro férrico (L).

$t_{A FeCl_3}$ = Tiempo de almacenamiento del cloruro férrico (días).

$$CA_{Pol} = q_{Pol} t_{A Pol}$$

Ecuación 6.27.

Donde:

CA_{Pol} = Cantidad almacenada de polímero (L).

$t_{A Pol}$ = Tiempo de almacenamiento del polímero (días).



Costos de operación



Derivado del proceso de potabilización del agua, se generan costos por: consumo de reactivos, energía eléctrica, mano de obra y mantenimiento; al relacionar los costos de operación con el caudal de diseño de la planta, se puede determinar el costo por metro cúbico de agua tratada.

El cálculo y análisis de estos costos es un factor importante al momento de determinar la factibilidad económica del proyecto que se pretende realizar, por lo cual, en esta sección, se desarrollará un procedimiento de cálculo de costos de operación por día, mes, año y por metro cúbico; para la planta diseñada en las secciones anteriores.

7.1. Costos por día

Los costos por polímero, energía eléctrica para retrolavado, recirculación y filtrado de lodos, solo se presentan durante los días que se realizan retrolavados. Dependiendo de la frecuencia de retrolavado de filtros seleccionada, podría darse el caso de días en los que no se presenten estos caudales, por lo tanto, se hará una estimación del número de días que se lavarán los filtros por año y se calculará un costo promedio por día para un año de operación.

El número de días que se lavarán los filtros al año se calcula con la siguiente ecuación:

$$N_{FRA} = \frac{365 \cdot N_{LF}}{FREC_{RET}}$$

Ecuación 7.1.

Donde:

- N_{FRA} = Número de días que se lavarán los filtros por año.
- N_{LF} = Número de días necesarios para lavar todos los filtros.
- $FREC_{RET}$ = Frecuencia de retrolavado de filtros (días). Ver Tabla 3.

El número de días necesarios para lavar todos los filtros se obtiene a partir del número de filtros y el máximo número de filtros que se puedan lavar por día:

$$N_{LF} = \frac{N_F}{F_{RETMAX}} \quad \text{Ecuación 7.2.}$$

Donde:

- N_F = Número de filtros.
 F_{RETMAX} = Número máximo de filtros retrolavados por día. Ver ecuación (4.6).

7.1.1. Costo de reactivos por día

7.1.1.1. Gas cloro (Cl_2)

En caso de que se utilice gas cloro para la oxidación del contaminante, el costo por día se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{Cl_2/día} = W_{Cl_2} \$_{Cl_2} \quad \text{Ecuación 7.3.}$$

Donde:

- $C_{Cl_2/día}$ = Costo de gas cloro (\$/día).
 W_{Cl_2} = Flujo másico de gas cloro (kg/día).
 $\$_{Cl_2}$ = Precio del gas cloro (\$/kg).

7.1.1.2. Hipoclorito de sodio ($NaOCl$)

Cuando se utilice $NaOCl$ para la oxidación, el costo de este reactivo será:

$$C_{NaOCl/día} = q_{NaOCl} \$_{NaOCl} \quad \text{Ecuación 7.4.}$$

Donde:

- $C_{NaOCl / día}$ = Costo de hipoclorito de sodio (\$/día).
 q_{NaOCl} = Flujo volumétrico de hipoclorito de sodio (L/día).
 $\$_{NaOCl}$ = Precio del hipoclorito de sodio (\$/L).

7.1.1.3. Cloruro férrico ($FeCl_3$)

En plantas para remoción de arsénico, el costo del cloruro férrico utilizado como coagulante será igual a:

$$C_{FeCl_3 / día} = q_{FeCl_3} \$_{FeCl_3} \quad \text{Ecuación 7.5.}$$

Donde:

- $C_{FeCl_3 / día}$ = Costo de cloruro férrico (\$/día).
 q_{FeCl_3} = Flujo volumétrico de cloruro férrico (L/día).
 $\$_{FeCl_3}$ = Precio del cloruro férrico (\$/L).

7.1.1.4. Polímero

El costo promedio por día del polímero para el acondicionamiento de lodos con contenido de arsénico o hierro y manganeso se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{Pol / día} = \frac{W_{Pol} \cdot \$_{Pol} \cdot N_{FRA}}{365} \quad \text{Ecuación 7.6.}$$

Donde:

- $C_{Pol / día}$ = Costo de polímero (\$/día).
 W_{Pol} = Flujo másico de polímero (kg/día).
 $\$_{Pol}$ = Precio del polímero (\$/kg).

7.1.1.5. Costo total de reactivos por día

El costo total de reactivos en forma general se calcula como:

$$C_{TR/día} = C_{Cl_2/día} \text{ o } C_{NaOCl/día} + C_{FeCl_3/día} + C_{Pol /día} \quad \text{Ecuación 7.7.}$$

Donde:

$$C_{TR/día} = \text{Costo total de reactivos por día (\$/día)}.$$

Se hace la aclaración de que se consideran cero los costos que no apliquen dependiendo del reactivo elegido como oxidante y del contaminante a remover.

7.1.2. Costo de energía eléctrica por día

Los costos de la energía eléctrica consumida por los equipos de bombeo necesarios para el proceso se calculan tomando como base la potencia de los motores acoplados a cada bomba.

7.1.2.1. Bombeo a filtros

Para el bombeo de agua a la batería de filtros el costo de energía se calcula de la siguiente manera:

$$C_{EF/día} = P_{MF} t_{OP} \$_{EE} N_{EBF} \quad \text{Ecuación 7.8.}$$

Donde:

$$C_{EF/día} = \text{Costo de energía eléctrica para filtración por día (\$/día)}.$$

$$P_{MF} = \text{Potencia del motor de la bomba de filtración (kW)}.$$

$$t_{OP} = \text{Tiempo de operación de la planta (h/día)}.$$

$$\$_{EE} = \text{Precio de energía eléctrica (\$/kW-h)}.$$

$$N_{EBF} = \text{Número de equipos de bombeo para filtración}.$$

7.1.2.2. Retrolavado

Para el retrolavado, el costo de energía promedio por día se calcula de la siguiente manera:

$$C_{ER/día} = \frac{P_{MR} t_{RET} \$_{EE} F_{RETMAX} N_{FRA} N_{EBR}}{365} \quad \text{Ecuación 7.9.}$$

Donde:

- $C_{ER/día}$ = Costo de energía eléctrica para retrolavado por día (\$/día).
- P_{MR} = Potencia del motor de la bomba de retrolavado (kW).
- t_{RET} = Duración del retrolavado (h/filtro).
- F_{RETMAX} = Número máximo de filtros retrolavados por día.
- N_{FRA} = Número de días que se lavarán los filtros por año.
- N_{EBR} = Número de equipos de bombeo para retrolavado.

7.1.2.3. Bombeo a distribución o a tanque de almacenamiento

Cuando se contemple dentro del proyecto el bombeo de agua tratada de la planta a la red de distribución o a un tanque de almacenamiento, el costo de energía se calcula con la ecuación siguiente:

$$C_{ED/día} = P_{MD} t_{OP} \$_{EE} N_{EBD} \quad \text{Ecuación 7.10.}$$

Donde:

- $C_{ED/día}$ = Costo de energía eléctrica para distribución por día (\$/día).
- P_{MD} = Potencia del motor de la bomba de distribución (kW).
- N_{EBD} = Número de equipos de bombeo para distribución.

7.1.2.4. Recirculación

Cuando se tiene la necesidad de recircular el agua clarificada directamente en la línea de agua cruda, se deberá contar con un equipo de bombeo para recirculación. Este equipo de bombeo estará en funcionamiento la misma cantidad de días y con la misma

frecuencia que el equipo de retrolavado. Por lo tanto, el cálculo del costo de energía para recirculación se realiza de la misma manera:

$$C_{EREC/día} = \frac{P_{MREC} \cdot t_{REC} \cdot \$_{EE} \cdot F_{RETMAX} \cdot N_{FRA}}{365} \quad \text{Ecuación 7.11.}$$

Donde:

- $C_{EREC/día}$ = Costo de energía eléctrica para recirculación por día (\$/día).
 P_{MREC} = Potencia del motor de la bomba de recirculación (kW).
 t_{REC} = Tiempo de recirculación (h/filtro).

7.1.2.5. Costo total de energía eléctrica por día

El costo total de energía eléctrica en forma general se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{TE/día} = C_{EF/día} + C_{ER/día} + C_{ED/día} + C_{EREC/día} \quad \text{Ecuación 7.12.}$$

Donde:

- $C_{TE/día}$ = Costo total de energía eléctrica por día (\$/día).

7.1.3. Costo de mano de obra y mantenimiento por día

7.1.3.1. Mano de obra

Para el correcto funcionamiento de una planta potabilizadora, se requiere de personal capacitado que realice las labores de operación y mantenimiento necesarias, lo cual implica un costo por concepto de salarios. Este costo está asociado con la cantidad de personal requerido, turnos laborados y su nivel de capacitación.

Ahora bien, el número de operadores y su salario dependerán de cada caso particular y será responsabilidad del proyectista definirlos con base en la capacidad de la planta, las horas de operación al día y la zona económica donde se realice el proyecto, así como del escalafón de puestos y salarios vigentes en la institución.

Una vez que se ha definido el número de operadores y su salario mensual, el costo de mano de obra por día se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{MO/día} = \frac{N_{OP} \$_{S0}}{30} \quad \text{Ecuación 7.13.}$$

Donde:

- $C_{MO/día}$ = Costo de mano de obra por día (\$/día).
 N_{OP} = Número de operadores.
 $\$_{S0}$ = Sueldo por operador (\$/mes).

7.1.3.2. Mantenimiento

El mantenimiento es el grupo de actividades realizadas en las instalaciones o equipos del sistema de tratamiento para evitar o prevenir daños, o en caso de que estos hayan ocurrido, realizar las reparaciones pertinentes, en otras palabras, existen dos tipos de mantenimiento (Aristizabal A. y Galvis C., 2001):

Preventivo. El cual involucra las acciones encaminadas a la planificación y ejecución de labores de mantenimiento, para anticipar los daños, con el fin de prevenir cortes en la prestación de servicio.

Correctivo. Consiste en la atención inmediata y oportuna de cualquier daño que se produzca en las instalaciones o equipos. El mantenimiento correctivo es difícil de presupuestar debido a la variada naturaleza de los daños.

La manera más sencilla de estimar los costos de mantenimiento es hacer un estimado simple de la inversión inicial (FAO, 2005). Sin embargo, en lo posible, se recomienda consultar con proveedores los costos asociados con los equipos que cumplan con las características requeridas por el proyecto. En general, un 5% del costo de inversión como mantenimiento anual, es un valor conservador que puede ser utilizado.

Una vez estimado el costo anual por mantenimiento, el costo por día se obtiene de la siguiente manera:

$$C_{MTO/día} = \frac{\$_{MTO}}{365} \quad \text{Ecuación 7.14.}$$

Donde:

$$C_{MTO/día} = \text{Costo de mantenimiento por día (\$/día).}$$

$$\$_{MTO} = \text{Costo de mantenimiento anual (\$/año).}$$

7.1.3.3. Costo total de mano de obra y mantenimiento por día

El total de este costo será igual a:

$$C_{TMM/día} = C_{MO/día} + C_{MTO/día} \quad \text{Ecuación 7.15.}$$

Donde:

$$C_{TMM/día} = \text{Costo total de mano de obra y mantenimiento por día (\$/día).}$$

7.2. Costos por metro cúbico de agua tratada

Este costo se calcula relacionando el costo por día con el caudal tratado por día. Dicho caudal será igual a:

$$Q_{TD} = Q_D t_{OP} \quad \text{Ecuación 7.16.}$$

Donde:

$$Q_{TD} = \text{Caudal tratado por día (m}^3\text{/día).}$$

$$Q_D = \text{Caudal de diseño (m}^3\text{/h).}$$

$$t_{OP} = \text{Tiempo de operación de la planta al día (h/día).}$$

En caso de que la planta cuente con tratamientos adicionales a la filtración, en los cuales se generen pérdidas de caudal por rechazos, como en el caso de ablandamiento con resinas de intercambio iónico o tratamiento con membranas, el costo por metro cúbico deberá calcularse a partir del caudal de salida de la planta, sumando los costos asociados a los procesos adicionales.

7.2.1. Costo de reactivos por metro cúbico tratado

7.2.1.1. Gas cloro (Cl_2)

El costo de gas cloro por metro cúbico de agua tratada se calcula como:

$$C_{\text{Cl}_2/\text{m}^3} = \frac{C_{\text{Cl}_2/\text{día}}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.17.}$$

Donde:

$C_{\text{Cl}_2/\text{m}^3}$ = Costo de gas cloro por metro cúbico tratado ($\$/\text{m}^3$).

$C_{\text{Cl}_2/\text{día}}$ = Costo de gas cloro ($\$/\text{día}$).

7.2.1.2. Hipoclorito de sodio (NaOCl)

Para el hipoclorito de sodio, el costo será igual a:

$$C_{\text{NaOCl}/\text{m}^3} = \frac{C_{\text{NaOCl}/\text{día}}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.18.}$$

Donde:

$C_{\text{NaOCl}/\text{m}^3}$ = Costo de hipoclorito de sodio por metro cúbico tratado ($\$/\text{m}^3$).

$C_{\text{NaOCl}/\text{día}}$ = Costo de hipoclorito de sodio ($\$/\text{día}$).

7.2.1.3. Cloruro férrico (FeCl_3)

El costo de cloruro férrico para la remoción de arsénico se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{\text{FeCl}_3/\text{m}^3} = \frac{C_{\text{FeCl}_3/\text{día}}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.19.}$$

Donde:

$C_{\text{FeCl}_3/\text{m}^3}$ = Costo de cloruro férrico por metro cúbico tratado ($\$/\text{m}^3$).

$C_{\text{FeCl}_3/\text{día}}$ = Costo de cloruro férrico ($\$/\text{día}$).

7.2.1.4. Polímero

De igual manera, el costo de polímero utilizado para el espesamiento de los lodos se calcula con la ecuación siguiente:

$$C_{POL/m^3} = \frac{C_{Pol/día}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.20.}$$

Donde:

C_{POL/m^3} = Costo de polímero por metro cúbico tratado (\$/m³).

$C_{Pol/día}$ = Costo de polímero (\$/día).

7.2.1.5. Costo total de reactivos por metro cúbico tratado

El costo total de los reactivos consumidos en relación con el volumen tratado se determina con la siguiente ecuación:

$$C_{TR/m^3} = C_{Cl_2/m^3} \text{ o } C_{NaOCl/m^3} + C_{FeCl_3/m^3} + C_{Pol/m^3} \quad \text{Ecuación 7.21.}$$

Donde:

C_{TR/m^3} = Costo total de reactivos por metro cúbico tratado (\$/m³).

Los costos que no apliquen dependiendo del oxidante elegido y del contaminante a remover, no deben tomarse en cuenta.

7.2.2. Costo de energía eléctrica por metro cúbico tratado

7.2.2.1. Bombeo a filtros

El costo de energía eléctrica para filtración por metro cúbico de agua tratada se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{EF/m^3} = \frac{C_{EF/día}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.22.}$$

Donde:

- C_{EF/m^3} = Costo de energía eléctrica para filtración por metro cúbico tratado (\$/m³).
- $C_{EF/día}$ = Costo de energía eléctrica para filtración por día (\$/día).
- Q_{TD} = Caudal tratado por día (m³/día).

7.2.2.2. Retrolavado

El costo de energía para el retrolavado se calcula como:

$$C_{ER/m^3} = \frac{C_{ER/día}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.23.}$$

Donde:

- C_{ER/m^3} = Costo de energía eléctrica para retrolavado por metro cúbico tratado (\$/m³).
- $C_{ER/día}$ = Costo de energía eléctrica para retrolavado por día (\$/día).

7.2.2.3. Bombeo a distribución o a tanque de almacenamiento

En caso de que se incluya el cálculo de este costo en el proyecto, será igual a:

$$C_{ED/m^3} = \frac{C_{ED/día}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.24.}$$

Donde:

- C_{ED/m^3} = Costo de energía eléctrica para distribución por metro cúbico tratado (\$/m³).
- $C_{ED/día}$ = Costo de energía eléctrica para distribución por día (\$/día).

7.2.2.4. Recirculación

Cuando sea necesario incluir un equipo de bombeo para la recirculación de agua clarificada, el costo de energía eléctrica derivado de este equipo se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{EREC/m^3} = \frac{C_{EREC/día}}{Q_{TD}}$$

Ecuación 7.25.

Donde:

C_{EREC/m^3} = Costo de energía eléctrica para recirculación por metro cúbico tratado (\$/m³).

$C_{EREC/día}$ = Costo de energía eléctrica para recirculación por día (\$/día).

7.2.2.5. Costo total de energía eléctrica por metro cúbico tratado

Este costo total se determina sumando los costos de energía eléctrica generados por los equipos de bombeo requeridos en la planta, utilizando la ecuación siguiente:

$$C_{TE/m^3} = C_{EF/m^3} + C_{ER/m^3} + C_{ED/m^3} + C_{EREC/m^3}$$

Ecuación 7.26.

Donde:

C_{TE/m^3} = Costo total de energía eléctrica por metro cúbico tratado (\$/m³).

7.2.3. Costo de mano de obra y mantenimiento por metro cúbico tratado

7.2.3.1. Mano de obra

El costo por metro cúbico de agua tratada asociado al personal encargado de la operación de la planta, se obtiene de la siguiente manera:

$$C_{MO/m^3} = \frac{C_{MO/día}}{Q_{TD}}$$

Ecuación 7.27.

Donde:

C_{MO/m^3} = Costo de mano de obra por metro cúbico tratado (\$/m³).

$C_{MO/día}$ = Costo de mano de obra por día (\$/día).

7.2.3.2. Mantenimiento

El costo derivado de las acciones de mantenimiento preventivo de los equipos de la planta se calcula con la ecuación siguiente:

$$C_{MTO/m^3} = \frac{C_{MTO/día}}{Q_{TD}} \quad \text{Ecuación 7.28.}$$

Donde:

- C_{MTO/m^3} = Costo de mantenimiento por metro cúbico tratado (\$/m³).
 $C_{MTO/día}$ = Costo de mantenimiento por día (\$/día).

7.2.3.3. Costo total de mano de obra y mantenimiento por metro cúbico tratado

El costo total de estos dos conceptos será igual a:

$$C_{TMM/m^3} = C_{MO/m^3} + C_{MTO/m^3} \quad \text{Ecuación 7.29.}$$

Donde:

- C_{TMM/m^3} = Costo total de mano de obra y mantenimiento por metro cúbico tratado (\$/m³).

7.3. Costo total de operación

El costo total de operación de la planta se obtiene como resultado de la suma de los costos asociados a: reactivos consumidos en el proceso, consumo de energía eléctrica de los equipos de bombeo requeridos, personal requerido para la operación y mantenimiento de la planta y labores de mantenimiento preventivo de los equipos.

A continuación, se calcula el costo total de operación por día, por mes, por año y por metro cúbico de agua tratada.

El costo total de operación diario es igual a:

$$C_{TO/día} = C_{TR/día} + C_{TE/día} + C_{TMM/día}$$

Ecuación 7.30.

Donde:

$C_{TO/día}$ = Costo total de operación por día (\$/día).

$C_{TR/día}$ = Costo total de reactivos por día (\$/día).

$C_{TE/día}$ = Costo total de energía eléctrica por día (\$/día).

$C_{TMM/día}$ = Costo total de mano de obra y mantenimiento por día (\$/día).

El costo total de operación mensual es igual a:

$$C_{TO/mes} = C_{TO/día} \cdot 30$$

Ecuación 7.31.

Donde:

$C_{TO/mes}$ = Costo total de operación por mes (\$/mes).

El costo de operación anual es igual a:

$$C_{TO/año} = C_{TO/día} \cdot 365$$

Ecuación 7.32.

Donde:

$C_{TO/año}$ = Costo total de operación por año (\$/año).

El costo de operación por metro cúbico de agua tratada es igual a:

$$C_{TO/m^3} = C_{TR/m^3} + C_{TE/m^3} + C_{TMM/m^3}$$

Ecuación 7.33.

Donde:

C_{TO/m^3} = Costo total de operación por metro cúbico tratado (\$/m³).

C_{TR/m^3} = Costo total de reactivos por metro cúbico tratado (\$/m³).

C_{TE}/m^3 = Costo total de energía eléctrica por metro cúbico tratado ($\$/m^3$).

C_{TMM}/m^3 = Costo total de mano de obra y mantenimiento por metro cúbico tratado ($\$/m^3$).



Anexo 8.1.

Velocidades de agua máximas y mínimas permisibles en tuberías (CONAGUA, 2015b)

Material de la tubería	Velocidad (m/s)	
	Máxima	Mínima
Concreto simple hasta 45 cm de diámetro	3.00	0.30
Concreto reforzado de 60 cm de diámetro o mayores	3.50	0.30
Concreto reforzado	3.50	0.30
Acero con revestimiento	5.00	0.30
Acero sin revestimiento	5.00	0.30
Acero galvanizado	5.00	0.30
Asbesto cemento	5.00	0.30
Fierro fundido	5.00	0.30
Hierro dúctil	5.00	0.30
Polietileno de alta densidad	5.00	0.30
PVC (Policloruro de vinilo)	5.00	0.30

Anexo 8.2.

Diámetros comerciales de tapas toriesféricas diseñadas bajo el estándar DIN 28011 (Talleres Villanón S.L., 2018)



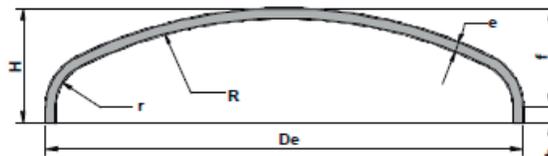
FONDOS KLOPPER

**MODELO
FV-3**

**DIN-28011
UNE-9201**

CÁLCULOS TÉCNICOS y DIMENSIONALES

DESARROLLO	RADIO BOMBEO	RADIO REBORDEO	PESTAÑA	FLECHA	ALTURA	VOLUMEN SIN PESTAÑA
$(D_e 1,13 + 2h) \times 0,98$	D_e	$0,1 D_e$	$\geq 3,5 e$	$0,1935 D_e - 0,455 e$	$f + h + e$	$0,1 (D_e - 2e)^3$



DATOS ORIENTATIVOS

D_e mm	e mm	D_d mm	f mm	V litros	Peso Kg/mm e
350	3-5	410	66	6	1,05
400	3-12	460	76	6,1	1,33
450	3-12	520	86	8,8	1,70
500	3-12	575	95	12	2,08
600	3-20	680	115	21	2,91
700	3-20	800	134	33	4,02
800	3-20	910	153	50	5,20
900	3-20	1020	173	71	6,54
1000	3-20	1130	192	98	8,02
1100	3-20	1240	211	131	9,66
1200	3-20	1350	231	170	11,45
1300	3-20	1460	250	217	13,39
1400	3-20	1570	270	271	15,49
1500	4-20	1680	289	333	17,73

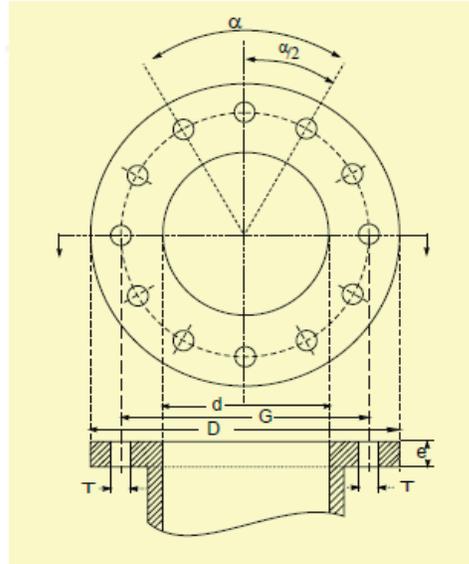
D_e mm	e mm	D_d mm	f mm	V litros	Peso Kg/mm e
1600	4-20	1800	308	403	20,36
1800	4-20	2020	346	575	25,64
1900	4-20	2130	366	677	28,51
2000	4-20	2240	385	790	31,53
2200	4-20	2470	424	1053	38,33
2400	4-20	2700	462	1365	45,80
2600	5-20	2920	501	1737	53,57
2800	6-20	3150	539	2167	62,34
3000	6-20	3370	578	2668	71,36
3200	6-20	3590	616	3240	80,98
3400	8-20	3820	654	3875	91,69
3600	8-20	4050	693	4604	103,06
3800	8-20	4270	732	5418	114,56
4000	8-20	4490	770	6324	126,67

DENTRO DE LAS MEDIDAS INDICADAS EN LA TABLA, SE PUEDE FABRICAR CUALQUIER DIÁMETRO INTERMEDIO DE MILIMETRO EN MILIMETRO

Anexo 8.3.

Conexiones y piezas especiales de fiero para agua potable y alcantarillado con los modelos originales MYMACO (Industrias BELG-W, 2005)

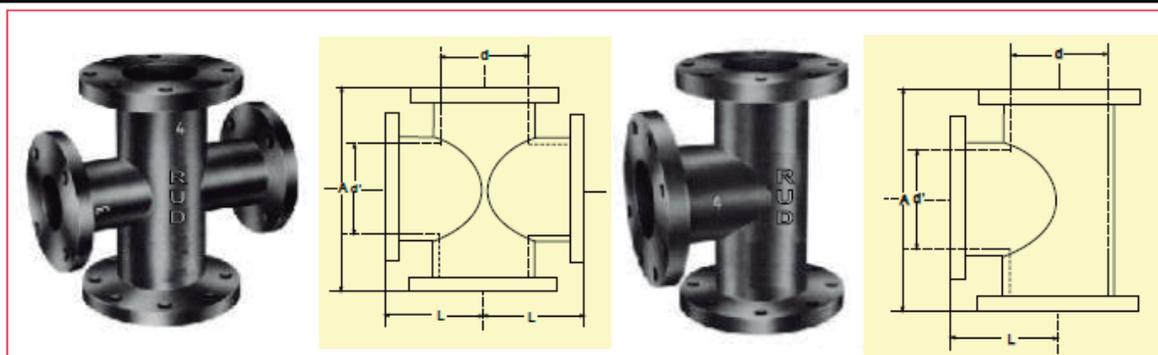
ESPECIFICACIONES DE BRIDAS NORMA ASME/ANSI B-16.1



ESPECIFICACIONES SEGÚN ASME ANSI B16.1

DIÁMETRO NOMINAL d		DIÁMETRO Exterior de BRIDAS D		ESPESOR MÍNIMO DE BRIDA e		DIÁMETRO LÍNEA GRAMIL G		PLANTILLA PARA CENTROS DE BARRENOS		DIÁMETRO BARRENOS T		DIÁMETRO DE LOS TORNILLOS		LONGITUD DE LOS TORNILLOS		No. TORNILLOS
mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	α	$\alpha/2$	mm	plg	mm	plg	mm	plg	Piezas
50.8	2	152.4	6	15.9	$\frac{5}{8}$	120.7	4 $\frac{3}{4}$	90°	45°	19.1	$\frac{3}{4}$	15.9	$\frac{5}{8}$	63.5	2 $\frac{1}{2}$	4
63.5	2 1/2	177.5	7	17.5	$\frac{11}{16}$	139.7	5 1/2	90.	45°	19.1	$\frac{3}{4}$	15.9	$\frac{5}{8}$	63.5	2 $\frac{1}{2}$	4
76.2	3	190.5	7 $\frac{1}{2}$	19.1	$\frac{3}{4}$	152.4	6	90.	45°	19.1	$\frac{3}{4}$	15.9	$\frac{5}{8}$	63.5	2 $\frac{1}{2}$	4
101.6	4	228.6	9	23.8	$\frac{15}{16}$	190.5	7 $\frac{1}{2}$	45°	22°30'	19.1	$\frac{3}{4}$	15.9	$\frac{5}{8}$	76.2	3	8
152.4	6	279.4	11	25.4	1	241.3	9 $\frac{1}{2}$	45°	22°30'	22.2	$\frac{7}{8}$	19.1	$\frac{3}{4}$	88.9	3 $\frac{1}{2}$	8
203.2	8	342.9	13 $\frac{1}{2}$	28.6	1 $\frac{1}{8}$	298.5	11 $\frac{1}{2}$	45°	22°30'	22.2	$\frac{7}{8}$	19.1	$\frac{3}{4}$	88.9	3 $\frac{1}{2}$	8
254.0	10	406.4	16	30.2	1 $\frac{3}{16}$	362.0	14 $\frac{1}{2}$	30°	15°	25.4	1	22.2	$\frac{7}{8}$	88.9	3 1/2	12
304.8	12	486.2	19	31.8	1 $\frac{1}{4}$	431.8	17	30°	15°	25.4	1	22.2	$\frac{7}{8}$	101.6	4	12
355.6	14	533.4	21	34.9	1 $\frac{3}{8}$	476.3	18 $\frac{1}{2}$	30°	15°	28.6	1 $\frac{1}{8}$	25.4	1	114.3	4 $\frac{1}{2}$	12
406.4	16	596.9	23 $\frac{1}{2}$	36.5	1 $\frac{7}{16}$	539.8	21 $\frac{1}{4}$	22°30'	11°15'	28.6	1 $\frac{1}{8}$	25.4	1	114.3	4 $\frac{1}{2}$	16
457.2	18	635.0	25	39.7	1 $\frac{9}{16}$	577.9	22 $\frac{1}{4}$	22°30'	11°15'	31.8	1 $\frac{1}{4}$	28.6	1 $\frac{1}{8}$	114.3	4 $\frac{1}{2}$	16
508.0	20	698.5	27 $\frac{1}{2}$	42.9	1 $\frac{11}{16}$	635.0	25	18°	9°	31.8	1 $\frac{1}{4}$	28.6	1 $\frac{1}{8}$	127.0	5	20
609.6	24	812.8	32	47.6	1 $\frac{7}{8}$	749.3	29 $\frac{1}{2}$	18°	9°	34.9	1 $\frac{3}{8}$	31.8	1 $\frac{1}{4}$	139.7	5 $\frac{1}{2}$	20
762.0	30	984.3	38 $\frac{3}{4}$	54.0	2 $\frac{1}{8}$	914.4	36	12°51'26"	6°25'43"	34.9	1 $\frac{3}{8}$	31.8	1 $\frac{1}{4}$	152.4	6 $\frac{1}{2}$	28
914.4	36	1168.4	46	60.3	2 $\frac{3}{8}$	1085.9	42 $\frac{1}{4}$	11°15'	5°37'30"	41.3	1 $\frac{5}{8}$	38.1	1 $\frac{1}{2}$	177.8	7	32
1066.8	42	1346.2	53	66.7	2 $\frac{5}{8}$	1257.3	49 $\frac{1}{2}$	10°	5°	41.3	1 $\frac{5}{8}$	38.1	1 $\frac{1}{2}$	190.5	7 $\frac{1}{2}$	36
1219.2	48	1511.3	59 $\frac{1}{2}$	69.9	2 $\frac{3}{4}$	1422.4	56	8°10'54.5"	4°5'27.25"	41.3	1 $\frac{5}{8}$	38.1	1 $\frac{1}{2}$	203.2	8	44

CRUCES Y TES



ESPECIFICACIONES SEGUN AWWA C-110

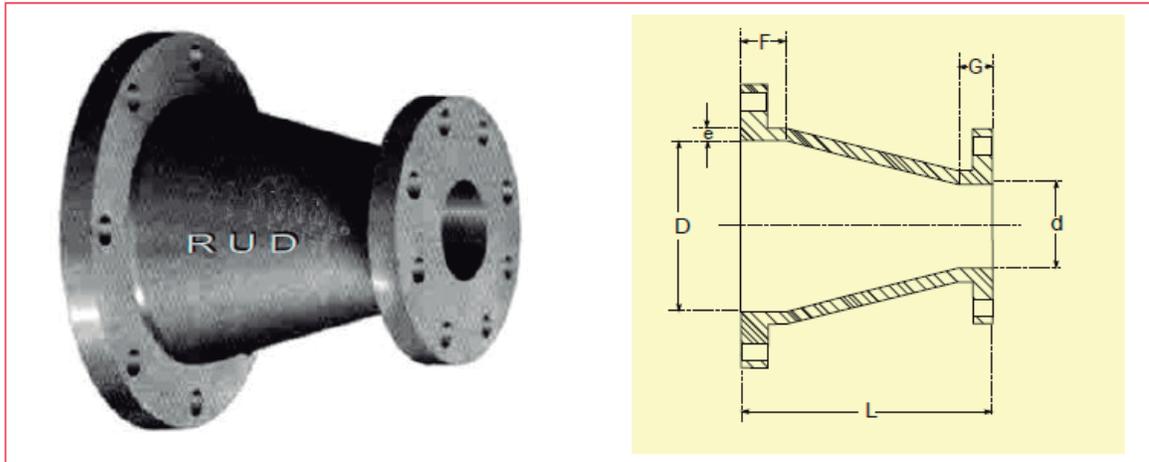
DIAMETRO NOMINAL			DISTANCIAS				ESPESOR DE LA PARED				PESO APROX.	
d	d'	d x d'	L		A		DIAM. MAYOR		DIAM. MENOR		TES	CRUZ
mm	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	kg	kg
50.8	50.8	2 x 2	114.3	4 1/2	228.6	9	11.1	7/16	11.1	7/16	10	12
63.5	50.8	2 1/2 x 2	127.0	5	254.0	10	11.1	7/16	11.1	7/16	12	15
63.5	63.5	2 1/2 x 2 1/2	127.0	5	254.0	10	11.1	7/16	11.1	7/16	13	17
76.2	50.8	3 x 2	139.7	5 1/2	279.4	11	11.1	7/16	11.1	7/16	15	18
76.2	63.5	3 x 2 1/2	139.7	5 1/2	279.4	11	11.1	7/16	11.1	7/16	16	19
76.2	76.2	3 x 3	139.7	5 1/2	279.4	11	11.1	7/16	11.1	7/16	17	21
101.6	50.8	4 x 2	165.1	6 1/2	330.2	13	12.7	1/2	11.1	7/16	23	26
101.6	63.5	4 x 2 1/2	165.1	6 1/2	330.2	13	12.7	1/2	11.1	7/16	24	28
101.6	76.2	4 x 3	165.1	6 1/2	330.2	13	12.7	1/2	11.1	7/16	25	29
101.6	101.6	4 x 4	165.1	6 1/2	330.2	13	12.7	1/2	12.7	1/2	28	35
152.4	50.8	6 x 2	203.2	8	406.4	16	14.3	9/16	11.1	7/16	37	40
152.4	63.5	6 x 2 1/2	203.2	8	406.4	16	14.3	9/16	11.1	7/16	38	42
152.4	76.2	6 x 3	203.2	8	406.4	16	14.3	9/16	11.1	7/16	39	43
152.4	101.6	6 x 4	203.2	8	406.4	16	14.3	9/16	12.7	1/2	42	49
152.4	152.4	6 x 6	203.2	8	406.4	16	14.3	9/16	14.3	9/16	45	57
203.2	63.5	8 x 2 1/2	228.6	9	457.2	18	15.9	5/8	11.1	7/16	59	64
203.2	76.2	8 x 3	228.6	9	457.2	18	15.9	5/8	11.1	7/16	60	65
203.2	101.6	8 x 4	228.6	9	457.2	18	15.9	5/8	12.7	1/2	63	71
203.2	152.4	8 x 6	228.6	9	457.2	18	15.9	5/8	14.3	9/16	66	77
203.2	203.2	8 x 8	228.6	9	457.2	18	15.9	5/8	15.9	5/8	72	88
254.0	63.5	10 x 2 1/2	279.4	11	558.8	22	19.1	3/4	11.1	7/16	95	100
254.0	76.2	10 x 3	279.4	11	558.8	22	19.1	3/4	11.1	7/16	96	101
254.0	101.6	10 x 4	279.4	11	558.8	22	19.1	3/4	12.7	1/2	99	108
254.0	152.4	10 x 6	279.4	11	558.8	22	19.1	3/4	14.3	9/16	103	115
254.0	203.2	10 x 8	279.4	11	558.8	22	19.1	3/4	15.9	5/8	108	127
254.0	254.0	10 x 10	279.4	11	558.8	22	19.1	3/4	19.1	3/4	115	140
304.8	76.2	12 x 3	304.8	12	609.6	24	20.6	13/16	11.1	7/16	138	141
304.8	101.6	12 x 4	304.8	12	609.6	24	20.6	13/16	12.7	1/2	142	148
304.8	152.4	12 x 6	304.8	12	609.6	24	20.6	13/16	14.3	9/16	148	155
304.8	203.2	12 x 8	304.8	12	609.6	24	20.6	13/16	15.9	5/8	155	167
304.8	254.0	12 x 10	304.8	12	609.6	24	20.6	13/16	19.1	3/4	164	180
304.8	304.8	12 x 12	304.8	12	609.6	24	20.6	13/16	20.6	13/16	174	198
355.6	76.2	14 x 3	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	11.1	7/16	193	199
355.6	101.6	14 x 4	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	12.7	1/2	197	203
355.6	152.4	14 x 6	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	14.3	9/16	204	211
355.6	203.2	14 x 8	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	15.9	5/8	212	224
355.6	254.0	14 x 10	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	19.1	3/4	223	239
355.6	304.8	14 x 12	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	20.6	13/16	235	259
355.6	355.6	14 x 14	355.6	14	711.2	28	22.2	7/8	22.2	7/8	245	274
406.4	101.6	16 x 4	381.0	15	762.0	30	25.4	1	12.7	1/2	253	261
406.4	152.4	16 x 6	381.0	15	762.0	30	25.4	1	14.3	9/16	256	268
406.4	203.2	16 x 8	381.0	15	762.0	30	25.4	1	15.9	5/8	262	279
406.4	254.0	16 x 10	381.0	15	762.0	30	25.4	1	19.1	3/4	268	292
406.4	304.8	16 x 12	381.0	15	762.0	30	25.4	1	20.6	13/16	278	312
406.4	355.6	16 x 14	381.0	15	762.0	30	25.4	1	22.2	7/8	285	326

CRUCES Y TES

ESPECIFICACIONES SEGUN AWWA C-110

DIÁMETRO NOMINAL			DISTANCIAS				ESPEJOR DE LA PARED				PESO APROX.	
d	d'	d x d'	L		A		DIAM MAYOR		DIAM MENOR		TES	CRUZ
mm	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	kg	kg
406.4	406.4	16 x 16	381.0	15	762.0	30	25.4	1	25.4	1	298	352
457.2	101.6	18 x 4	393.7	15 1/2	660.4	26	27.0	1 1/16	12.7	1/2	313	322
457.2	152.4	18 x 6	393.7	15 1/2	660.4	26	27.0	1 1/16	14.3	9/16	316	328
457.2	203.2	18 x 8	393.7	15 1/2	660.4	26	27.0	1 1/16	15.9	5/8	322	340
457.2	254.0	18 x 10	393.7	15 1/2	660.4	26	27.0	1 1/16	19.1	3/4	329	354
457.2	304.8	18 x 12	393.7	15 1/2	660.4	26	27.0	1 1/16	20.6	13/16	339	376
457.2	355.6	18 x 14	419.1	16 1/2	838.2	33	27.0	1 1/16	22.2	7/8	346	387
457.2	406.4	18 x 16	419.1	16 1/2	838.2	33	27.0	1 1/16	25.4	1	359	413
457.2	457.2	18 x 18	419.1	16 1/2	838.2	33	27.0	1 1/16	27.0	1 1/16	365	425
508.0	101.6	20 x 4	431.8	17	711.2	28	28.6	1 1/8	12.7	1/2	398	407
508.0	152.4	20 x 6	431.8	17	711.2	28	28.6	1 1/8	14.3	9/16	402	414
508.0	203.2	20 x 8	431.8	17	711.2	28	28.6	1 1/8	15.9	5/8	407	426
508.0	254.0	20 x 10	431.8	17	711.2	28	28.6	1 1/8	19.1	3/4	415	440
508.0	304.8	20 x 12	431.8	17	711.2	28	28.6	1 1/8	20.6	13/16	424	459
508.0	355.6	20 x 14	431.8	17	711.2	28	28.6	1 1/8	22.2	7/8	432	474
508.0	406.4	20 x 16	457.2	18	914.4	36	28.6	1 1/8	25.4	1	444	499
508.0	457.2	20 x 18	457.2	18	914.4	36	28.6	1 1/8	27.0	1 1/16	450	511
508.0	508.0	20 x 20	457.2	18	914.4	36	28.6	1 1/8	28.6	1 1/8	465	540
609.6	101.6	24 x 4	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	12.7	1/2	626	637
609.6	152.4	24 x 6	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	14.3	9/16	631	649
609.6	203.2	24 x 8	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	15.9	5/8	640	665
609.6	254.0	24 x 10	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	19.1	3/4	650	685
609.6	304.8	24 x 12	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	20.6	13/16	662	709
609.6	355.6	24 x 14	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	22.2	7/8	672	730
609.6	406.4	24 x 16	482.6	19	762.0	30	31.8	1 1/4	25.4	1	686	758
609.6	457.2	24 x 18	558.8	22	1117.6	44	31.8	1 1/4	27.0	1 1/16	693	773
609.6	508.0	24 x 20	558.8	22	1117.6	44	31.8	1 1/4	28.6	1 1/8	714	800
609.6	609.6	24 x 24	558.8	22	1117.6	44	31.8	1 1/4	31.8	1 1/4	731	848
762.0	101.6	30 x 4	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	12.7	1/2	994	1005
762.0	152.4	30 x 6	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	14.3	9/16	999	1016
762.0	203.2	30 x 8	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	15.9	5/8	1007	1032
762.0	254.0	30 x 10	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	19.1	3/4	1017	1052
762.0	304.8	30 x 12	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	20.6	13/16	1029	1076
762.0	355.6	30 x 14	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	22.2	7/8	1040	1097
762.0	406.4	30 x 16	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	25.4	1	1053	1124
762.0	457.2	30 x 18	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	27.0	1 1/16	1060	1138
762.0	508.0	30 x 20	584.2	23	914.4	36	36.5	1 7/16	28.6	1 1/8	1074	1165
762.0	609.6	30 x 24	635.0	25	1270.0	50	36.5	1 7/16	31.8	1 1/4	1098	1213
762.0	762.0	30 x 30	635.0	25	1270.0	50	36.5	1 7/16	36.5	1 7/16	1134	1287
914.4	152.4	36 x 6	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	14.3	9/16	1503	1519
914.4	203.2	36 x 8	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	15.9	5/8	1511	1535
914.4	254.0	36 x 10	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	19.1	3/4	1520	1555
914.4	304.8	36 x 12	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	20.6	13/16	1532	1579
914.4	355.6	36 x 14	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	22.2	7/8	1542	1599
914.4	406.4	36 x 16	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	25.4	1	1556	1625
914.4	457.2	36 x 18	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	27.0	1 1/16	1563	1639
914.4	508.0	36 x 20	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	28.6	1 1/8	1576	1665
914.4	609.6	36 x 24	660.4	26	1016.0	40	41.3	1 5/8	31.8	1 1/4	1600	1714
914.4	762.0	36 x 30	711.2	28	1422.4	56	41.3	1 5/8	36.5	1 7/16	1636	1787
914.4	914.4	36 x 36	711.2	28	1422.4	56	41.3	1 5/8	41.3	1 5/8	1678	1870

REDUCCIONES



ESPECIFICACIONES SEGUN AWWA C-110

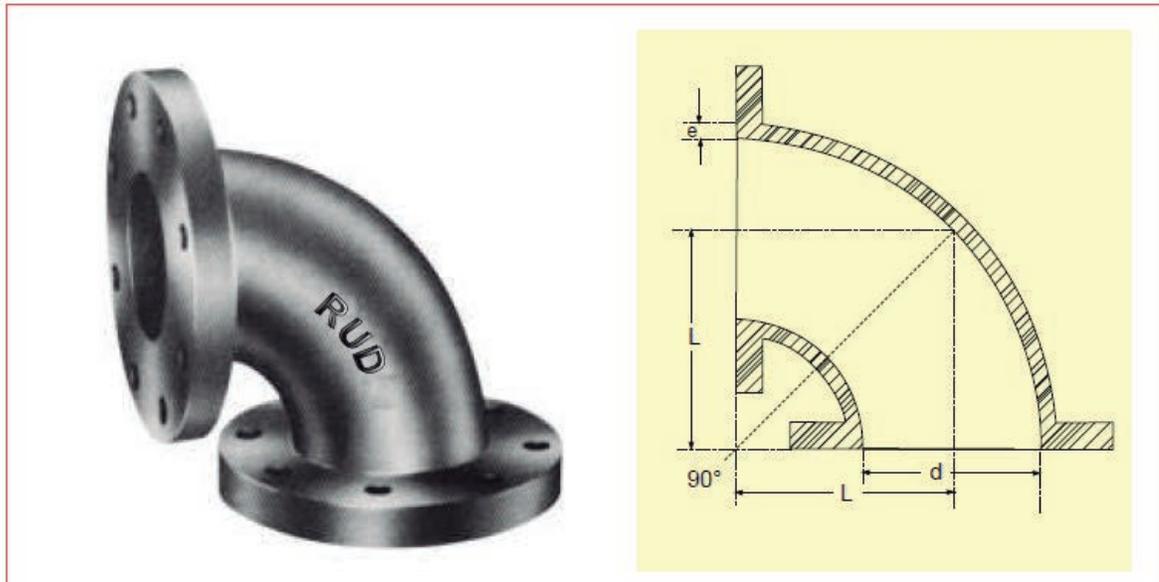
DIÁM NOMINAL		DISTANCIAS						ESPESSOR DE		PESO
D x d		L		F		G		LA PARED	e	APROX.
mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	Kg
63.5 x 50.8	2 1/2 x 2	139.7	5 1/2	31.8	1 1/4	31.8	1 1/4	11.1	7/16	6.7
76.2 x 50.8	3 x 2	152.4	6	38.1	1 1/2	38.1	1 1/2	11.1	7/16	7
76.2 x 53.5	3 x 2 1/2	152.4	6	38.1	1 1/2	38.1	1 1/2	11.1	7/16	8
101.6 x 50.8	4 x 2	177.8	7	38.1	1 1/2	38.1	1 1/2	12.7	1/2	11
101.6 x 63.5	4 x 2 1/2	177.8	7	38.1	1 1/2	38.1	1 1/2	12.7	1/2	12
101.6 x 76.2	4 x 3	177.8	7	38.1	1 1/2	38.1	1 1/2	12.7	1/2	13
152.4 x 50.8	6 x 2	228.6	9	50.8	2	38.1	1 1/2	14.3	9/16	17
152.4 x 63.5	6 x 2 1/2	228.6	9	50.8	2	38.1	1 1/2	14.3	9/16	18
152.4 x 76.2	6 x 3	228.6	9	50.8	2	38.1	1 1/2	14.3	9/16	19
152.4 x 101.6	6 x 4	228.6	9	50.8	2	38.1	1 1/2	14.3	9/16	22
203.2 x 50.8	8 x 2	279.4	11	50.8	2	38.1	1 1/2	15.9	5/8	26
203.2 x 63.5	8 x 2 1/2	279.4	11	50.8	2	38.1	1 1/2	15.9	5/8	28
203.2 x 76.2	8 x 3	279.4	11	50.8	2	38.1	1 1/2	15.9	5/8	29
203.2 x 101.6	8 x 4	279.4	11	50.8	2	38.1	1 1/2	15.9	5/8	32
203.2 x 152.4	8 x 6	279.4	11	50.8	2	50.8	2	15.9	5/8	36
254.0 x 76.2	10 x 3	304.8	12	50.8	2	38.1	1 1/2	19.1	3/4	40
254.0 x 101.6	10 x 4	304.8	12	50.8	2	38.1	1 1/2	19.1	3/4	43
254.0 x 152.4	10 x 6	304.8	12	50.8	2	50.8	2	19.1	3/4	47
254.0 x 203.2	10 x 8	304.8	12	50.8	2	50.8	2	19.1	3/4	54
304.8 x 76.2	12 x 3	355.6	14	50.8	2	38.1	1 1/2	20.6	13/16	57
304.8 x 101.6	12 x 4	355.6	14	50.8	2	38.1	1 1/2	20.6	13/16	61
304.8 x 152.4	12 x 6	356.6	14	50.8	2	50.8	2	20.6	13/16	66
304.8 x 203.2	12 x 8	356.6	14	50.8	2	50.8	2	20.6	13/16	73
304.8 x 254.0	12 x 10	356.6	14	50.8	2	50.8	2	20.6	13/16	81
356.8 x 101.6	14 x 4	406.4	16	50.8	2	38.1	1 1/2	22.2	7/8	79

REDUCCIONES

ESPECIFICACIONES SEGUN AWWA C-110

DIAM. NOMINAL		DISTANCIAS						ESPESOR DE		PESO
D x d		L		F		G		LA PARED e		APROX.
mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	Kg
355.6 x 152.4	14 x 6	406.4	16	50.8	2	50.8	2	22.2	7/8	84
355.6 x 203.2	14 x 8	406.4	16	50.8	2	50.8	2	22.2	7/8	93
355.6 x 254.0	14 x 10	406.4	16	50.8	2	50.8	2	22.2	7/8	101
355.6 x 304.8	14 x 12	406.4	16	50.8	2	50.8	2	22.2	7/8	113
406.4 x 101.6	16 x 4	457.2	18	50.8	2	38.1	1 1/2	25.4	1	106
406.4 x 152.4	16 x 6	457.2	18	50.8	2	50.8	2	25.4	1	113
406.4 x 203.2	16 x 8	457.2	18	50.8	2	50.8	2	25.4	1	123
406.4 x 254.0	16 x 10	457.2	18	50.8	2	50.8	2	25.4	1	132
406.4 x 304.8	16 x 12	457.2	18	50.8	2	50.8	2	25.4	1	146
406.4 x 355.6	16 x 14	457.2	18	50.8	2	50.8	2	25.4	1	156
457.2 x 101.6	18 x 4	482.6	19	50.8	2	38.1	1 1/2	27.0	1 1/16	124
457.2 x 152.4	18 x 6	482.6	19	50.8	2	50.8	2	27.0	1 1/16	131
457.2 x 203.2	18 x 8	482.6	19	50.8	2	50.8	2	27.0	1 1/16	141
457.2 x 254.0	18 x 10	482.6	19	50.8	2	50.8	2	27.0	1 1/16	152
457.2 x 304.8	18 x 12	482.6	19	50.8	2	50.8	2	27.0	1 1/16	166
457.2 x 355.6	18 x 14	482.6	19	50.8	2	50.8	2	27.0	1 1/16	177
457.2 x 406.4	18 x 16	482.6	19	50.8	2	50.8	2	27.0	1 1/16	191
508.0 x 152.4	20 x 6	508.0	20	76.2	3	50.8	2	27.0	1 1/16	161
508.0 x 203.2	20 x 8	508.0	20	76.2	3	50.8	2	28.6	1 1/8	172
508.0 x 254.0	20 x 10	508.0	20	76.2	3	50.8	2	28.6	1 1/8	183
508.0 x 304.8	20 x 12	508.0	20	76.2	3	50.8	2	28.6	1 1/8	198
508.0 x 355.6	20 x 14	508.0	20	76.2	3	50.8	2	28.6	1 1/8	209
508.0 x 406.4	20 x 16	508.0	20	76.2	3	50.8	2	28.6	1 1/8	223
508.0 x 457.2	20 x 18	508.0	20	76.2	3	50.8	2	28.6	1 1/8	232
609.6 x 203.2	24 x 8	609.6	24	76.2	3	50.8	2	31.8	1 1/4	252
609.6 x 254.0	24 x 10	609.6	24	76.2	3	50.8	2	31.8	1 1/4	266
609.6 x 304.8	24 x 12	609.6	24	76.2	3	50.8	2	31.8	1 1/4	283
609.6 x 355.6	24 x 14	609.6	24	76.2	3	50.8	2	31.8	1 1/4	297
609.6 x 406.4	24 x 16	609.6	24	76.2	3	50.8	2	31.8	1 1/4	313
609.6 x 457.2	24 x 18	609.6	24	76.2	3	50.8	2	31.8	1 1/4	325
609.6 x 508.0	24 x 20	609.6	24	76.2	3	76.2	3	31.8	1 1/4	343
762.0 x 304.8	30 x 12	762.0	30	76.2	3	50.8	2	36.5	1 7/16	450
762.0 x 355.6	30 x 14	762.0	30	76.2	3	50.8	2	36.5	1 7/16	469
762.0 x 406.4	30 x 16	762.0	30	76.2	3	50.8	2	36.5	1 7/16	490
762.0 x 457.2	30 x 18	762.0	30	76.2	3	50.8	2	36.5	1 7/16	506
762.0 x 508.0	30 x 20	762.0	30	76.2	3	76.2	3	36.5	1 7/16	527
762.0 x 609.6	30 x 24	762.0	30	76.2	3	76.2	3	36.5	1 7/16	573
914.4 x 457.2	36 x 18	914.4	36	76.2	3	50.8	2	41.3	1 5/8	756
914.4 x 508.0	36 x 20	914.4	36	76.2	3	76.2	3	41.3	1 5/8	779
914.4 x 609.6	36 x 24	914.4	36	76.2	3	76.2	3	41.3	1 5/8	836
914.4 x 762.0	36 x 30	914.4	36	76.2	3	76.2	3	41.3	1 5/8	927

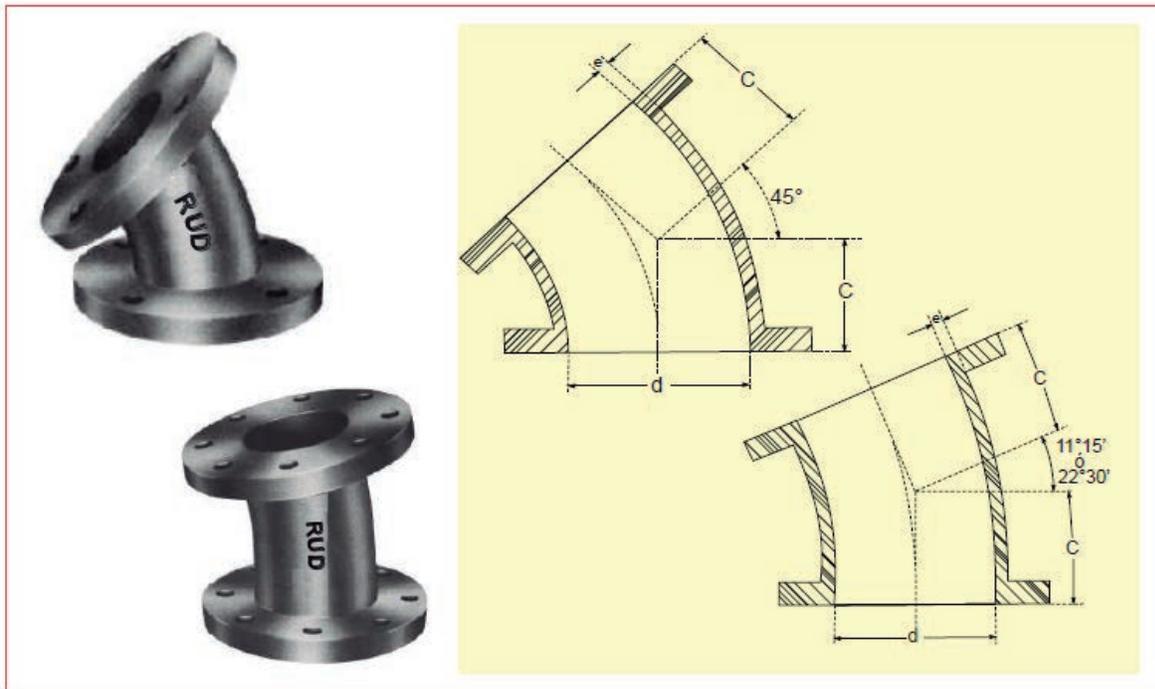
CODOS A 90°



ESPECIFICACIONES SEGUN AWWA C-110

DIÁMETRO NOMINAL		DISTANCIA		ESPESOR DE LA PIEZA		PESO APROXIMADO
d		L		e		
mm	plg	mm	plg	mm	plg	kg
50.8	2	114.3	4 1/2	11.1	7/16	6
63.5	2 1/2	127.0	5	11.1	7/16	9
76.2	3	139.7	5 1/2	11.1	7/16	11
101.6	4	165.1	6 1/2	12.7	1/2	18
152.4	6	203.2	8	14.3	9/16	30
203.2	8	228.6	9	15.9	5/8	48
254.0	10	279.4	11	19.1	3/4	78
304.8	12	304.8	12	20.6	13/16	113
355.6	14	355.6	14	22.2	7/8	154
406.4	16	381.0	15	25.4	1	208
457.2	18	419.1	16 1/2	27.0	1 1/16	256
508.0	20	457.2	18	28.6	1 1/8	328
609.6	24	558.8	22	31.8	1 1/4	513
762.0	30	635.0	25	36.5	1 7/16	818
914.4	36	711.2	28	41.3	1 5/8	1236

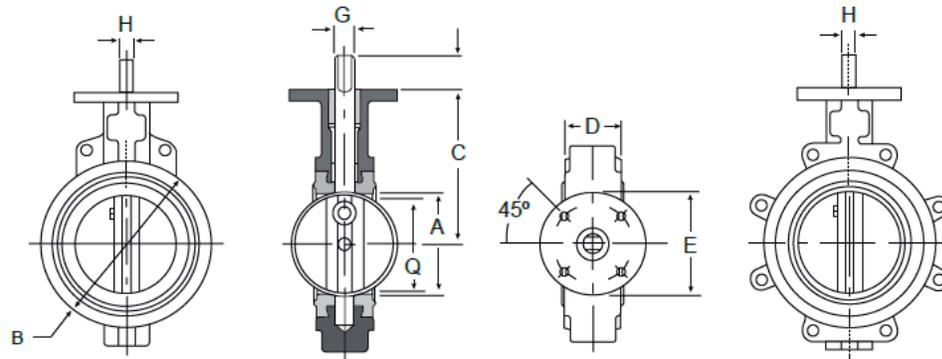
CODOS A 45°, 22°30' y 11°15'



ESPECIFICACIONES SEGUN AWWA C-110

DIÁMETRO NOMINAL		DISTANCIA		ESPESOR DE LA PIEZA		PESO APROXIMADO
d		c		e		
mm	plg	mm	plg	mm	plg	kg
50.8	2	63.5	2 1/2	11.1	7/16	5
63.5	2 1/2	76.2	3	11.1	7/16	8
76.2	3	76.2	3	11.1	7/16	9
101.6	4	101.6	4	12.7	1/2	16
152.4	6	127.0	5	14.3	9/16	26
203.2	8	139.7	5 1/2	15.9	5/8	42
254.0	10	165.1	6 1/2	19.1	3/4	65
304.8	12	190.5	7 1/2	20.6	13/16	98
355.6	14	190.5	7 1/2	22.2	7/8	121
406.4	16	203.2	8	25.4	1	161
457.2	18	215.9	8 1/2	27.0	1 1/16	190
508.0	20	241.3	9 1/2	28.6	1 1/8	247
609.6	24	279.4	11	31.8	1 1/4	367
762.0	30	381.0	15	36.5	1 7/16	669
914.4	36	457.2	18	41.3	1 5/8	1068

VALVULA DE MARIPOSA CON ASIENTO DE ELASTOMERO



Tamaño	A	B	C	D	E	F	G	H	Q	Cuña
2	2	4 1/8	5 1/2	1 5/8	4	1 1/4	9/16	3/8	1 3/8	N/A
2 1/2	2 1/2	4 5/8	6	1 3/4	4	1 1/4	9/16	3/8	2 1/16	N/A
3	3	5 1/8	6 1/4	1 3/4	4	1 1/4	9/16	3/8	2 9/16	N/A
4	4	6 3/8	7	2	4	1 1/4	5/8	7/16	3 5/8	N/A
5	5	7 3/8	7 1/2	2 1/8	4	1 1/4	3/4	1/2	4 3/4	N/A
6	5 3/4	8 1/2	8	2 1/8	4	1 1/4	3/4	1/2	5 1/2	N/A
8	7 3/4	10 11/16	9 1/2	2 1/2	6	1 1/4	7/8	5/8	7 1/2	N/A
10	9 3/4	13	10 3/4	2 1/2	6	2	1 1/8	N/A	9 19/32	1/4X1/4
12	11 3/4	14 13/16	12 1/4	3	6	2	1 3/8	N/A	11 9/16	1/4X1/4
14	13 1/4	16 7/8	12	3	6	3	1 5/8	N/A	13 1/8	5/16X5/16
16	15 1/4	19 1/4	12 61/64	4	6	3	1 7/8	N/A	15	3/8X3/8
18	17 1/4	21 1/2	14 1/2	4 1/4	8	4 1/4	1 7/8	N/A	16 7/8	1/2X3/8
20	19 1/4	23 3/4	15 7/8	5	8	4 1/4	1 7/8	N/A	18 3/4	1/2X3/8
24	23 1/4	28 1/4	19 1/2	5 15/16	8	4 1/4	1 7/8	N/A	22 5/8	1/2X3/8
30	29 1/4	34 5/8	23	6 9/16	8	4 1/4	2 1/4	N/A	28 11/16	1/2X3/8
36	35 1/4	41 1/4	27 3/4	7 7/8	8	5 1/2	2 7/8	N/A	34 1/2	3/4X1/2

Anexo 8.4.

Rugosidades absolutas para algunos materiales (Sotelo Ávila, 1997)

Material	ε (mm)
Tubos lisos	
Vidrio, cobre, acero nuevo soldado y con una mano interior de pintura, tubos de acero de precisión sin costura, serpentines industriales, plástico	0.0015
Fierro forjado	0.05
Fierro fundido, nuevo	0.25
Fierro fundido, con protección interior de asfalto	0.12
Fierro fundido, oxidado	1 a 1.5
Fierro fundido, con incrustaciones	1.5 a 3
Fierro fundido, centrifugado	0.05
Fierro fundido nuevo, con bridas o juntas de macho y campana	0.15 a 0.3
Fierro fundido usado, con bridas o juntas de macho y campana	2 a 3.5
Fierro fundido para agua potable con bastantes incrustaciones y diámetro de 50 a 125 mm.	1 a 4
Fierro galvanizado	0.15
Acero rolado, nuevo	0.04 a 0.1
Acero laminado, nuevo	0.05
Acero laminado con protección interior de asfalto	0.05

Anexo 8.5.

Valores del coeficiente k para algunos accesorios estándar (Crane Co., 1982)	
Accesorio	Coeficiente
Codo de 90° de 24"	0.36
Codo de 90° de 20"	0.36
Codo de 90° de 18"	0.36
Codo de 90° de 16"	0.39
Codo de 90° de 14"	0.39
Codo de 90° de 12"	0.39
Codo de 90° de 10"	0.42
Codo de 90° de 8"	0.42
Codo de 90° de 6"	0.45
Codo de 90° de 4"	0.51
Codo de 90° de 3"	0.54
Codo de 90° de 2.5"	0.54
Codo de 90° de 2"	0.60
Codo de 45° de 24"	0.19
Codo de 45° de 20"	0.19
Codo de 45° de 18"	0.19
Codo de 45° de 16"	0.21
Codo de 45° de 14"	0.21
Codo de 45° de 12"	0.21
Codo de 45° de 10"	0.22
Codo de 45° de 8"	0.22
Codo de 45° de 6"	0.24
Codo de 45° de 4"	0.27
Codo de 45° de 3"	0.29
Codo de 45° de 2.5"	0.29
Codo de 45° de 2"	0.30
Tee flujo directo de 24"	0.24
Tee flujo directo de 20"	0.24
Tee flujo directo de 18"	0.24
Tee flujo directo de 16"	0.26
Tee flujo directo de 14"	0.26

Valores del coeficiente k para algunos accesorios estándar (Crane Co., 1982)	
Accesorio	Coeficiente
Tee flujo directo de 12"	0.26
Tee flujo directo de 10"	0.28
Tee flujo directo de 8"	0.28
Tee flujo directo de 6"	0.30
Tee flujo directo de 4"	0.34
Tee flujo directo de 3"	0.36
Tee flujo directo de 2.5"	0.36
Tee flujo directo de 2"	0.36
Tee flujo desviado de 24"	0.72
Tee flujo desviado de 20"	0.72
Tee flujo desviado de 18"	0.72
Tee flujo desviado de 16"	0.78
Tee flujo desviado de 14"	0.78
Tee flujo desviado de 12"	0.78
Tee flujo desviado de 10"	0.84
Tee flujo desviado de 8"	0.84
Tee flujo desviado de 6"	0.90
Tee flujo desviado de 4"	1.02
Tee flujo desviado de 3"	1.08
Tee flujo desviado de 2.5"	1.08
Tee flujo desviado de 2"	1.15
Válvula de compuerta de 24"	0.10
Válvula de compuerta de 20"	0.10
Válvula de compuerta de 18"	0.10
Válvula de compuerta de 16"	0.10
Válvula de compuerta de 14"	0.10
Válvula de compuerta de 12"	0.10
Válvula de compuerta de 10"	0.11
Válvula de compuerta de 8"	0.11
Válvula de compuerta de 6"	0.12
Válvula de compuerta de 4"	0.14

Anexo 8.5 (Continuación)

Valores del coeficiente k para algunos accesorios estándar (Crane Co., 1982)	
Accesorio	Coeficiente
Válvula de compuerta de 3"	0.14
Válvula de compuerta de 2.5"	0.14
Válvula de compuerta de 2"	0.15
Válvula de mariposa de 24"	0.30
Válvula de mariposa de 20"	0.30
Válvula de mariposa de 18"	0.30
Válvula de mariposa de 16"	0.33
Válvula de mariposa de 14"	0.46
Válvula de mariposa de 12"	0.46
Válvula de mariposa de 10"	0.49
Válvula de mariposa de 8"	0.63
Válvula de mariposa de 6"	0.68
Válvula de mariposa de 4"	0.77
Válvula de mariposa de 3"	0.81
Válvula de mariposa de 2.5"	0.81
Válvula de mariposa de 2"	0.85
Reducción de 10" a 8"	0.31
Reducción de 10" a 6"	1.75
Reducción de 10" a 4"	11.60
Reducción de 8" a 6"	0.49
Reducción de 8" a 4"	4.24
Reducción de 8" a 3"	15.36
Reducción de 8" a 2"	0.45
Reducción de 6" a 4"	0.99
Reducción de 6" a 3"	4.24

Valores del coeficiente k para algunos accesorios estándar (Crane Co., 1982)	
Accesorio	Coeficiente
Reducción de 4" a 3"	0.49
Reducción de 3" a 2"	0.22
Ampliación de 8" a 10"	0.32
Ampliación de 6" a 10"	3.16
Ampliación de 6" a 8"	0.60
Ampliación de 4" a 10"	27.56
Ampliación de 4" a 8"	9.00
Ampliación de 4" a 6"	1.56
Ampliación de 3" a 8"	37.35
Ampliación de 3" a 6"	9.00
Ampliación de 3" a 4"	0.60
Ampliación de 2" a 3"	1.56
Válvula check de 24"	0.60
Válvula check de 20"	0.60
Válvula check de 18"	0.60
Válvula check de 16"	0.65
Válvula check de 14"	0.65
Válvula check de 12"	0.65
Válvula check de 10"	0.7
Válvula check de 8"	0.7
Válvula check de 6"	0.75
Válvula check de 4"	0.85
Válvula check de 3"	0.9
Válvula check de 2.5"	0.9
Válvula check de 2"	0.95

Anexo 8.6.

Esfuerzos permisibles a temperatura de -28.9°C a 37.8°C (ASME, 2015b)

Material	Esfuerzo permisible kg/cm ²	Esfuerzo permisible PSI
ASME SA-283 Gr C	1104.1	15,700.30
ASME SA-285 Gr C	1104.1	15,700.30
ASME SA-36	1167.4	16,600.43
ASME SA-515-70	1406.5	20,000.43
ASME SA-612	1624.5	23,100.39

Anexo 8.7.

Eficiencia de la soldadura en juntas a tope (ASME, 2015a)

Tipo de unión	Eficiencia de la unión cuando la junta está radiografiada		
	Al 100%	Por puntos	Sin
Soldadura a tope unida con soldadura por ambos lados, o bien por otro método con lo cual se obtenga la misma calidad del metal de aporte en ambos lados de la superficie soldada. Si se usa la solera de respaldo, deberá quitarse después de aplicar la soldadura y antes de radiografiar.	1.00	0.85	0.70

Anexo 8.8.

Valores del factor M (ASME, 2015a)

1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00
1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16 2/3
1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.65	1.69	1.72	1.77

Anexo 8.9.

Disminución de la presión atmosférica
(OPS/CEPIS, 2005)

Altura sobre el nivel del mar (m)	Presión atmosférica (m)
0	10.33
250	10.03
500	9.73
750	9.43
1000	9.13
1250	8.83
1500	8.53
1750	8.25
2000	8
2250	7.75
2500	7.57
2750	7.28
3000	7.05
3250	6.83
3500	6.62
3750	6.41
4000	6.2
4250	5.98
4500	5.78

Anexo 8.10.

Presión de vapor del agua (OPS/CEPIS, 2005)

Temperatura (°C)	Presión de vapor (m)
0	0.062
5	0.089
10	0.125
15	0.174
20	0.238
25	0.323
30	0.432
35	0.573
40	0.752
45	0.977
50	1.258
55	1.605
60	2.031
70	3.177
75	3.931
80	4.829
85	5.894
90	7.149
95	8.619
100	10.332



Referencias

- Amador Vilariño, J. (2013). Selección de potencias nominales y tensiones de motores eléctricos acompañantes de bombas. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, XXXIV(1), 60-61.
- American Petroleum Institute. (2007). *API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Washington, D.C.: API Publishing Services.
- ANSI/HI. (2012). *American National Standard for Rotodynamic Pumps for Pump Intake Design*. North Parsippany, NJ: Hydraulic Institute.
- Aristizabal A., H., & Galvis C., A. (2001). Análisis de costos en sistemas de potabilización de agua. *Seminario Internacional para el Mejoramiento de la Calidad en el Consumo Humano, AIDIS*, 1-18.
- ASME. (2015a). Section VIII. Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 1. En *Boiler and Pressure Vessel Code. An International Code* (págs. 18-19, 114-116). New York, NY.: The American Society of Mechanical Engineers.
- ASME. (2015b). Section II. Materials. Part D Properties (Customary). En *Boiler and Pressure Vessel Code. An International Code* (págs. 6-149). New York, NY.: The American Society of Mechanical Engineers.
- CFE. (2020). *Gran Demanda en Media Tensión Horaria*. Recuperado el 27 de Julio de 2020, de Sitio Web de la Comisión Federal de Electricidad: <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTH.aspx>
- Colebrook, C., & White, M. (1939). Turbulent Flow in Pipes, with particular reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws. *Institution Journal. SEC. INST. C.E.*, 133-156.
- CONAGUA. (2007). *Diseño estructural de recipientes. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2015a). *Conducciones. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA. (2015b). *Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- CONAGUA. (2019). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Crane Co. (1982). *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Metric Edition-SI Units*. New York, N.Y.: CRANE CO.
- Darcy, H. (1856). *Recherches Experimentales Relatives au Mouvement de l'Eau dans les Tuyaux (Experimental Research on the Movement of Water in Pipes)*. Mallet-Bachelier, París.
- Desjardins, R. (1997). *Le traitement des eaux*. Montreal, Canada: École Polytechnique de Montréal.
- Deutsches Institut Fur Normung. (2012). *DIN 28011 Torispherical heads*.
- Di Bernardo, L. (1987). *Proyecto de sistemas de filtración para tratamiento de aguas de abastecimiento*. Escuela de San Carlos. Universidad de Sao Paulo, Brasil.
- FAO. (2005). *RuralInvest*. Obtenido de Formulación y empleo de perfiles de proyecto: <http://www.fao.org/3/a0322s/a0322s05.htm>
- FONDEYUR, S.L. (2017). *Fondos conformados en frío*. Obtenido de Catálogo de productos: https://fondeyur.com/wp-content/uploads/fondeyur_dossier_ES-1.pdf
- García Mendoza, K. (2017). *Optimización de los procesos de acondicionamiento y deshidratación de los residuos generados en la coagulación-floculación de agua que contiene arsénico*. Ciudad de México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Maestría.
- Gieck, K., & Gieck, R. (2003). *Manual de fórmulas técnicas*. México, D.F.: Alfaomega.
- Hecker, G. (1981). Model-Prototype Comparison of Free Surface Vortices. *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, 107(HY10), 1243.
- IMTA. (2000). *Transferencia de tecnología para la remoción de hierro y manganeso a la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sinaloa (JAPAC). Informe técnico*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2001). *Evaluación de parámetros de diseño y operación de la planta para remoción de hierro y manganeso del ramal Peñón-Textcoco. Informe técnico*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2010a). *Evaluación técnico-económica de cinco tecnologías para remoción de arsénico. Informe final*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2010b). *Remoción de arsénico mediante filtración directa en Torreón, Coahuila*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2013a). *Estudio y asistencia técnica para la licitación e instalación de 7 plantas potabilizadoras para remoción de arsénico en Torreón, Coahuila*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2013b). *Lineamientos para la optimización del diseño, construcción y operación de la tecnología para remoción de hierro y manganeso en agua potable*. Jiutepec, Morelos.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

- IMTA. (2017a). *Estudio de factibilidad e ingeniería básica La Platosa*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2017b). *Proyecto de potabilización para la remoción de manganeso de los pozos de la cabecera municipal de Jaral del Progreso, Guanajuato*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- IMTA. (2019). *Proyectos funcionales para la rehabilitación integral de 16 plantas potabilizadoras en la Ciudad de México*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Industrias BELG-W. (2005). *MYMACO Bridas y conexiones*. Obtenido de Conexiones y piezas especiales de fiero para agua potable y alcantarillado con los modelos originales MYMACO: http://www.belg-w.com/catalogos/mymaco/10_MYMACO.pdf
- Jenkins, D., & Snoeyink, V. L. (2009). *Química del Agua*. México, D.F.: Editorial Limusa S.A. de C.V.
- Jeong, Y. (2005). *The adsorption of arsenic (V) by iron (Fe₂O₃) and aluminum (Al₂O₃) oxides*. Iowa State University: Retrospective Theses and Dissertations.
- Molina Gallego, L., Ribatallada Ruiz, P., Ruiz Massanet, L., Saez Fernández de Gaceo, M., & Valle Pérez, E. (2013). *Producción de caprolactama*. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Moody, L. (1944). Friction Factors for Pipe Flow. *Transaction of the ASME*, 671-684.
- Ohio EPA. (2010). *Guidelines for Arsenic Removal Treatment for Small Public Drinking Water Systems*. Columbus, Ohio: Environmental Protection Agency.
- OPS/CEPIS. (2004). Manual I: Teoría. En *Plantas de filtración rápida* (pág. 111). Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- OPS/CEPIS. (2005). *Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable*. Lima, Peru: Organización Panamericana de la Salud.
- OPS/CEPIS. (2006). Manual II: Diseño de plantas de tecnología apropiada. En *Plantas de filtración rápida* (pág. 189). Lima, Perú: Organización Panamericana de la Salud.
- Salvato, J., Nemerow, N., & Agardy, F. (2003). *Environmental Engineering*. Hoboken, New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Sorg, T. J. (2002). Iron Treatment for Arsenic Removal Neglected. *Opflow, AWWA*, 28(11), 15.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General. Volumen I Fundamentos*. México, D.F.: Limusa.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México, D.F.: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Swamee, P., & Jain, A. (1976). Explicit equations for pipe flow problems. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 102(5), 657-664.
- Talleres Villanón S.L. (2018). *Fondo Kloppe*. Recuperado el 5 de Marzo de 2018, de <http://fondosvillalon.com/FONDOS%20KLOPPER-VILLALON.pdf>
- U.S. EPA. (2003). Arsenic Treatment Technology Evaluation Handbook for Small Systems, Doc. EPA 816-R-03-014. *United States Environmental Protection Agency, US*, 43.
- U.S. EPA. (2006). *Drinking Water Treatability Database*. Recuperado el 8 de Febrero de 2018, de <https://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do>

Índice figuras

Figura Introducción 1. Etapas del proceso de formación y funcionamiento de la capa de óxidos de manganeso	vii
Figura Introducción 2. Esquema general de filtros a presión y a gravedad	x
Figura Introducción 3. Esquema general de proceso de una planta potabilizadora de filtración directa con filtros a presión	XI
Figura Introducción 4. Diagrama general de cálculo de sistemas de filtración directa a presión	XI
Figura 2.1. Esquema general de filtros a presión y a gravedad.....	6
Figura 2.2. Tapa toriesférica tipo Klopper bajo el estándar DIN 28011 (FONDEYUR, S.L., 2017).....	7
Figura 2.3. Distribución de toberas en la placa perforada del falso fondo. ...	18
Figura 2.4. Arreglo de cuatro filtros a presión. Vista en corte, tuberías y múltiples.....	19
Figura 2.5. Arreglo de cuatro filtros a presión. Vista en planta.....	20
Figura 2.6. Arreglo de cuatro filtros a presión. Vista en perfil, alimentación y salida de filtros.....	21
Figura 2.7. Sedimentador superficial. Extracción de lodos y recirculación.	22
Figura 2.8. Detalle de distancia entre filtros (vista superior)	34
Figura 2.9. Detalle de los múltiples de AC, AT, ER y SR (vista lateral)	36
Figura 2.10. Detalle de carrete en tubería de conexión a filtro (vista frontal)	37
Figura 2.11. Vista de carretes en la tubería de salida de retrolavado	43
Figura 2.12. Tolva del tanque sedimentador	45
Figura 2.13. Área lateral de la tolva del sedimentador.....	47
Figura 2.14. Tanque de agua cruda/tratada. Vista en planta	51
Figura 2.15. Tanque de agua cruda/tratada. Vista de elevación	53
Figura 2.16. Volumen de control simplificado (Sotelo Ávila, 1997)	58
Figura 2.17. Ejemplo de gráfico elaborado con cotizaciones de equipos de bombeo en función de su potencia.....	70
Figura 2.18. Válvulas de mariposa en un filtro a presión	72
Figura 2.19. Gráfico para determinar la ecuación de correlación entre el diámetro de la válvula de mariposa y su costo.....	73
Figura 2.20. Área correspondiente a un filtro.....	77
Figura 2.21. Detalle de la distancia entre el filtro y el múltiple de tuberías (vista superior).....	77
Figura 2.22. Área requerida para el tanque sedimentador	78

Figura 3.1.	Detalle de la altura libre bajo el filtro.....	84
Figura 3.2.	Detalle de la altura libre bajo el tanque sedimentador.	87
Figura 3.3.	Detalle de las toberas instaladas en el falso fondo del filtro.....	91
Figura 3.4.	Partes de una tobera tipo Johnson.	92
Figura 3.5.	Coefficiente de pérdida de carga para contracciones bruscas. Adaptado de Sotelo Ávila (1997).....	94
Figura 3.6.	Dirección de flujo durante la filtración, vista lateral. La flecha verde corresponde al agua cruda y la azul al agua tratada.....	101
Figura 3.7.	Dirección de flujo durante la filtración, vista frontal. La flecha verde corresponde al agua cruda y la azul al agua tratada.....	103
Figura 3.8.	Dirección de flujo durante el retrolavado, vista lateral. La flecha naranja corresponde al agua de entrada de retrolavado y la roja al agua de salida de retrolavado.....	117
Figura 3.9.	Dirección de flujo durante el retrolavado, vista frontal. La flecha naranja corresponde al agua de entrada de retrolavado y la roja al agua de salida de retrolavado.....	120
Figura 4.1.	Diseño de la estructura de un tanque rectangular. Vista de elevación (ANSI/HI, 2012).....	132
Figura 4.2.	Diseño de la estructura de un tanque rectangular. Vista de planta (ANSI/HI, 2012).....	133

Índice tablas

Tabla 1.1.	Variables de operación con valores sugeridos para iniciar el cálculo de la planta potabilizadora	1
Tabla 1.2.	Tasas de filtración recomendadas para Filtración Directa operando a flujo descendente	2
Tabla 1.3.	Tasa de retrolavado y carreras de filtración recomendadas para filtración directa operando a flujo descendente	2
Tabla 1.4.	Características del medio filtrante recomendadas para remoción de arsénico o hierro y manganeso por filtración directa.	3
Tabla 2.1.	Factores de multiplicación para calcular la potencia nominal del motor acompañante (Amador Vilariño, 2013)	62
Tabla 2.2.	Tarifa GDMTH para la división Valle de México Centro (CFE, 2020).	63
Tabla 2.3.	Periodo del primer domingo de abril al sábado anterior al último domingo de octubre (CFE, 2020)	64
Tabla 2.4.	Periodo del último domingo de octubre al sábado anterior al primer domingo de abril (CFE, 2020)	64

El objetivo de este libro es mostrar la secuencia de cálculo para los diseños hidráulico y de procesos de plantas potabilizadoras de filtración directa (FD) con filtros a presión. Está dirigido a profesionales del área de ingeniería que participen en proyectos funcionales y ejecutivos de plantas potabilizadoras y a los supervisores de los mismos.

La estructura se basa en la experiencia del IMTA, información especializada, normas y manuales técnicos vigentes referentes a metodología, criterios y recomendaciones para calcular: el número de filtros y sus dimensiones, diámetros de tuberías, capacidad de tanque de agua tratada, dimensión de espesador de lodos producto del retrolavado de filtros, cárcamos de lodos, volúmenes y tiempos de recirculación de agua clarificada del espesador para optimizar el proceso, así como el arreglo general de la planta potabilizadora.

El diseño de este tipo de sistemas, aunque se puede encontrar en diferentes libros especializados, no está sistematizado para cubrir todos los elementos que se requieren en la conceptualización de diseños funcionales completos, que sirvan a su vez para el diseño ejecutivo que lleve a la construcción de las potabilizadoras.

Este libro es una guía, paso a paso, de todos los cálculos necesarios para dimensionar los componentes requeridos para que una planta potabilizadora de FD, utilizada en la remoción de hierro y manganeso, o arsénico, funcione adecuadamente.