

Textos Básicos

TEXTO F

PROCESOS Y ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS

Edición 2.024

Autor: Carlos Alberto Páez Martínez

Tabla de Contenido

<i>F-1. TRATAMIENTOS PRELIMINARES</i>	3
<i>F-2. LECHOS DE SECADO DE LODOS</i>	10
F-2.1. Características y Manejo de Lodos Producidos en Sistemas de Tratamiento. 10	
F-2.2. Tecnologías para Secado de Lodos	14
F-2.3. Diseño de Lechos de Secado	17
<i>F-3. ASPERSOR DE HÉLICE PARA EL RIEGO DEL COMPOSTAJE</i>	29
<i>F-4. FORMALETAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES Y ESTANQUES</i>	33
<i>F-5. EQUIPOS PARA SISTEMAS CONDUCCIÓN</i>	37
F-5.1. Tuberías	37
F-5.2. Dispositivos para el Control de Caudales	40
F-5.3. Rejillas Triangulares para Entradas a Tuberías	43
F-5.4. Válvulas de Cheque	48
F-5.5. Sistemas de Bombeo	60
F-5.5.1. Estaciones de Bombeo	60
F-5.5.2. Control de Caudales de Bombeo	64
F-5.5.3. Cubiertas para Bombas	67
F-5.5.4. Sistemas de Bombeo Flotantes	69
F-5.6. Cámaras de Aire para el Control del Golpe de Ariete en Tuberías	76
F-5.6.1 Cálculo del Golpe de Ariete.....	76
F-5.6.2 Amortiguación del Golpe de Ariete en Tuberías de Succión de Bombas	77
F-5.6.3 Amortiguación del Golpe de Ariete en Tuberías de Conducción	80
<i>F-6. ESCALERAS PARA PECES</i>	86

F-1. TRATAMIENTOS PRELIMINARES

Los tratamientos preliminares tienen por objeto remover sedimentos y elementos gruesos flotantes del agua de entrada a las plantas. Esto es bastante importante debido a que estos materiales tienden a depositarse en las estructuras de tratamiento, restándoles capacidad, o a obstruir los conductos o dispositivos por donde circula el agua.

Los equipos que más se utilizan actualmente para remover los sedimentos son los tanques desarenadores, que requieren ser limpiados periódicamente para evitar una acumulación que produce la pérdida en la eficiencia. En el caso de la remoción de flotantes, actualmente se utilizan principalmente las rejillas estáticas, que tienden a taponarse al quedar retenidos los materiales allí, y su limpieza manual resulta dispendiosa. También existe la alternativa de rejillas mecánicas, que se limpian automáticamente, pero son bastante costosas.

Para la remoción de flotantes se ha diseñado una rejilla basculante en forma de canaleta, que se ubica sobre un tanque desarenador. Esta rejilla está conformada por marcos metálicos soldados entre sí, cubiertos por una malla de acero inoxidable, con aberturas generalmente menores a 3 mm. Esto permite remover los materiales que pueden obstruir los dispositivos de aireación a chorro, tales como las tuberías perforadas que generan los chorros emergidos, y las boquillas de tubo transversal, que tienen secciones de flujo de poco más de 3 mm de ancho. Estas mallas también retienen la materia orgánica particulada, que puede ser removida a menor costo de esta manera que mediante el tratamiento biológico. Por esta razón, en ocasiones se recomiendan mallas con aberturas menores, que pueden remover mayor cantidad de materia orgánica particulada, a pesar de que limpieza debe hacerse con mayor frecuencia, puesto que la rejilla se obstruye más rápido.

Las rejillas fijas utilizadas actualmente, se encuentran conformadas por barras verticales que interceptan en flujo, y deben ser limpiadas mecánicamente, o manualmente mediante rastrillos. De acuerdo a las guías RAS, en el caso de plantas de potabilización la separación entre las barras es de 2 a 4 cm (Numeral B-4.4.5.1 del RAS), y en el caso de tratamientos de aguas residuales, se estipula una separación de entre 15 y 50 mm para las rejillas con limpieza manual, y de entre 3 y 77 mm en rejillas con limpieza mecánica.

El agua de entrada atraviesa la rejilla basculante, donde quedan retenidos los elementos flotantes gruesos. Al atravesar la rejilla, el agua es dividida en pequeños chorros que caen en forma distribuida sobre el desarenador. Por lo tanto, no provocan grandes turbulencias en éste, lo cual facilita la decantación de los sedimentos.

La rejilla basculante debe colocarse sobre la zona del desarenador donde entra el afluente, para que pueda retener los materiales que trae el flujo. La rejilla se voltea periódicamente mediante un mango largo hecho de madera o de tubo de PVC SCH 89, provistos de un gancho en el extremo, de tal manera que su contenido caiga sobre la plataforma aledaña. El golpe de la rejilla al caer sobre la plataforma facilita la descarga de su contenido. La plataforma tiene una pequeña pendiente para que el agua que contiene los sedimentos escurra hacia el desarenador. Durante este periodo de limpieza de la rejilla, se coloca una compuerta hecha de malla en la tubería de entrada del flujo, con el objeto de que retenga

los elementos gruesos dentro de la tubería durante esta operación de limpieza. Al terminar dicha operación, se gira la rejilla basculante para colocarla nuevamente sobre el desarenador.

Mediante estos equipos, las operaciones de limpieza resultan más sencillas y toman menos tiempo que cuando se utilizan las rejillas manuales tradicionales, donde la presión del flujo aprisiona los flotantes contra las rejillas, y es dispendioso retirarlos de ellas. La operación de limpieza de la rejilla basculante es sencilla y rápida.

De acuerdo a las normas RAS, las velocidades máximas para el flujo en las rejillas son de 0.15 m/sg en el caso de plantas de potabilización (RAS B-4.4.5.2), y de 0.6 a 1.2 m/s en caso de rejillas con limpieza manual (RAS E-4.4.2.5). Esto se cumple fácilmente en las rejillas basculantes, que pueden tener un área de flujo bastante grande, lo cual reduce las velocidades a través.

Las guías para el diseño de los desarenadores de flujo horizontal, que se recomiendan para los tratamientos de aguas residuales y potabilización, se encuentran en el Numeral 4.4.4 del Título E, y en el Numeral 6.4 del Título B del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Para el cálculo de los desarenadores, se asume que su longitud debe ser suficiente para que las partículas de arena ubicadas en la superficie en el flujo de entrada lleguen al fondo durante el recorrido hasta la salida. La pendiente de la trayectoria se calcula como la velocidad de sedimentación v_s dividida por la velocidad del flujo V , que debe ser igual a la relación entre la profundidad del desarenador h y su longitud L .

$$\frac{v_s}{V} = \frac{h}{L} \quad \text{Ecuación F- 1}$$

De modo que la longitud requerida es: $L = \frac{h \times V}{v_s}$ Ecuación F- 2

En el Título B del RAS Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, se establece que la velocidad de sedimentación v_s sigue la siguiente ecuación de Stokes:

$$v_s = \frac{(\rho_s - \rho) \times g \times d^2}{18 \times \eta} \quad \text{Ecuación F- 3}$$

Donde:

v_s ((m/s): Velocidad de sedimentación

ρ (kg/m³): Densidad de la arena

ρ_s (kg/m³): Densidad del agua:

d : Diámetro de la partícula de arena (m).

g (m/s²): Aceleración de la gravedad).

ϑ (m²/s): Viscosidad cinemática del agua

La ecuación de Stokes es válida siempre y cuando el número de Reynolds Re de la partícula sea inferior o igual a 1. Este número se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v_s \times d}{\vartheta} \quad \text{Ecuación F- 4}$$

Por otra parte, el RAS establece que la velocidad horizontal V en el desarenador debe ser suficiente para que el flujo arrastre las partículas. Para el caso de plantas de potabilización, esta velocidad debe ser mayor de 0.25 m/s. En el caso de tratamientos de aguas residuales, la velocidad mínima debe estar entre 0.2 y 0.4 m/s, puesto que velocidades menores generarían procesos de descomposición anaeróbica que ocasionan malos olores. Para estos desarenadores se fijan rangos de periodos de retención hidráulico entre 20 segundos y 3 minutos, y tasas de desbordamiento entre 700 y 1.600 m³/m²/día, que se miden como el caudal dividido por el área en planta del desarenador. Para los desarenadores de sistemas de potabilización, dicha tasa debe ser menor de 1.000 m³/m²/día.

Una solución utilizada frecuentemente para el retiro de los sedimentos acumulados en el desarenador consiste en tener dos unidades en paralelo, de tal forma que se pueda interrumpir el flujo en una de ellas, con el objeto de remover los sedimentos allí sin la interferencia de éste. Esta remoción se hace manualmente y demanda bastante esfuerzo físico, debido a las altas profundidades que se requieren para el desarenador de acuerdo al numeral B 4.6.4 del RAS, donde se trata lo referente al dimensionamiento.

Con los tratamientos preliminares propuestos se tiene un solo desarenador, lo cual reduce los costos de las estructuras. En este caso, los sedimentos se remueven utilizando una aspiradora hidráulica, que está compuesta por una bomba autocebante, en cuya succión se acopla una manguera anillada flexible, que está conectada mediante un tubo de PVC a una boquilla similar a la de las aspiradoras. Este equipo funciona en forma similar a una draga hidráulica de succión simple, que es bastante eficiente para dragar arenas no consolidadas, y puede ser manejado por un operario, en forma similar a una aspiradora de aire. El bombeo de arenas produce el desgaste del rotor de la bomba, y por lo tanto es importante que el proveedor suministre estas piezas para recambios.

Para lograr un buen rendimiento, se recomienda que el operario mueva el tubo continuamente sobre el depósito de sedimentos en forma similar a una aspiradora. Con el objeto de facilitar esta operación, se recomienda colocar una plataforma de madera sobre el desarenador, que se desliza sobre éste, con el fin de que el operario pueda ubicarse adecuadamente para remover con el tubo aspirante todo el material acumulado allí.

La descarga de la bomba de dragado del desarenador se hace en un lecho de secado aledaño al desarenador, que funciona también como decantador. Este lecho consiste en un tanque amplio y de poca profundidad, en el cual se encuentra una capa de arena. Bajo dicha capa se encuentra un sistema de drenaje formado por geodrenes planares. El geodrén planar es producido por Pavco, y consiste en una manta conformada por una

georred ubicada entre dos geotextiles no tejidos, en cuyo extremo se encuentra una manguera perforada de 2 ½" de diámetro, que recolecta el agua que se filtra por la georred. Esta manguera se conecta con una tubería que saca el drenaje del lecho hacia el desarenador.

El caudal junto con los sedimentos que la aspiradora hidráulica extrae del desarenador, es distribuido mediante una tubería perforada en un costado del lecho de secado. En el costado opuesto se coloca una tubería perforada de rebose a cierta altura, de tal forma que cuando el agua alcance el nivel máximo, es evacuada hacia la cámara de salida del desarenador. Al terminar el dragado de los sedimentos, el agua acumulada en el lecho sale a través de los geodrenes planares en forma relativamente rápida, puesto que los sedimentos acumulados en el desarenador son generalmente granulares y permeables.

Antes de los tratamientos preliminares, puede ser necesario colocar un rebose para desviar los excesos de caudal, y evitar que las plantas de potabilización o tratamiento de aguas operen con caudales mayores de los de diseño. Este rebose puede consistir en una té con salida vertical ubicado sobre la tubería de entrada a la planta.

Con los tratamientos preliminares descritos, los costos de operación de las plantas de tratamiento se pueden reducir sustancialmente, puesto que se evitan las siguientes labores:

- Limpieza manual de las rejillas, que es una labor dispendiosa y poco efectiva, puesto que la presión del agua mantiene los materiales atrapados en ellas. Esta labor normalmente se hace con mucha frecuencia
- Remoción de material acumulado en los desarenadores, para lo cual actualmente se requiere el vaciado de éstos. En ocasiones, lo anterior requiere tener dos desarenadores en paralelo.

En las figuras a continuación se presenta un ejemplo del diseño de dichos tratamientos.

Figura F-1. Tratamientos Preliminares - Vista en Planta

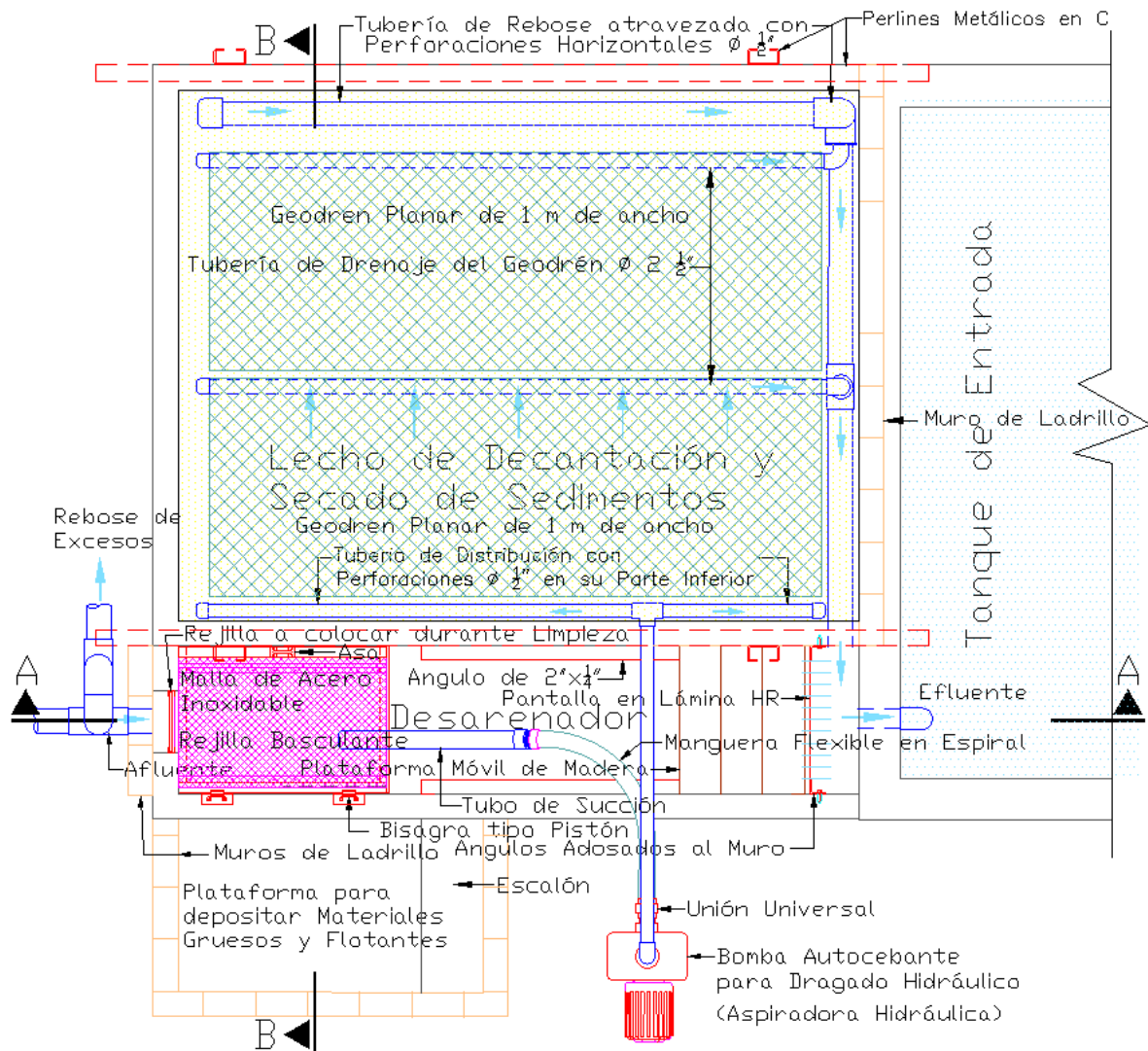


Figura F-2 Tratamientos Preliminares - Vista de Corte Longitudinal A-A

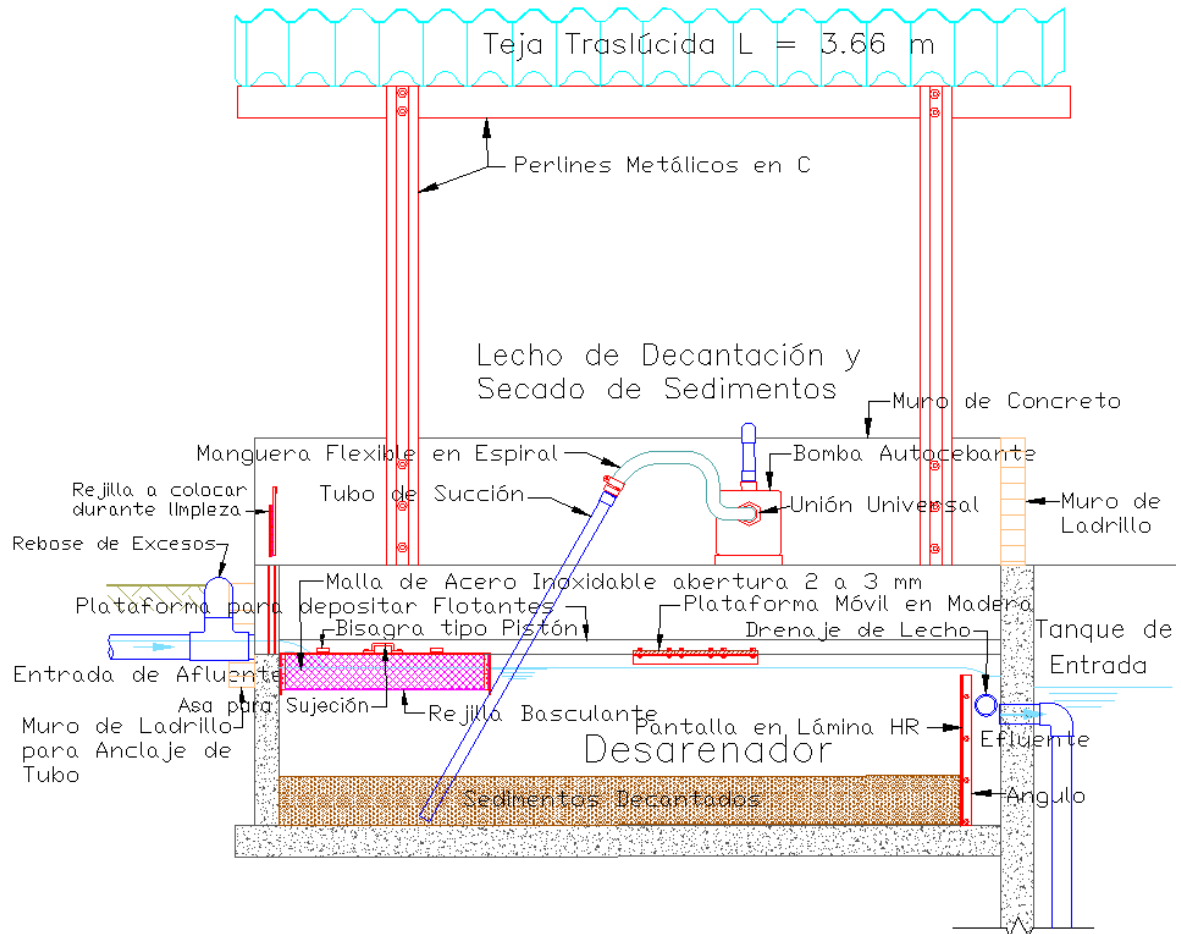
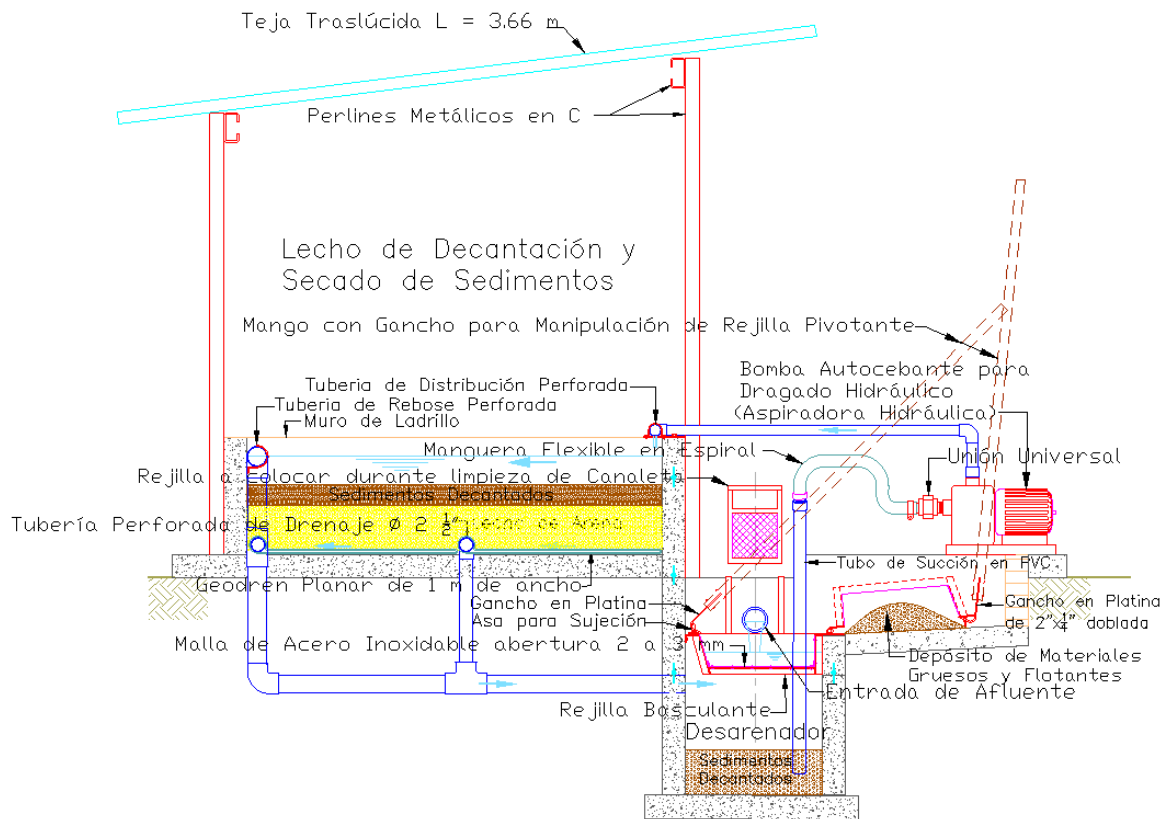


Figura F-3 Tratamientos Preliminares

Vista de Corte Transversal B-B



F-2. LECHOS DE SECADO DE LODOS

F-2.1. Características y Manejo de Lodos Producidos en Sistemas de Tratamiento.

En todos los sistemas de tratamiento de aguas se generan principalmente lodos, sedimentos y materiales flotantes, que requieren ser extraídos, y luego procesados para facilitar su manejo y disposición final. Las características de los lodos varían de acuerdo a los elementos contenidos en el agua afluente, y a los procesos de tratamiento que se realicen. El agua contenida en los lodos de origen orgánico es más difícil de extraer que la que se encuentra en los lodos inorgánicos, porque dicha agua hace parte de dichos microorganismos o está atrapada por ellos. Los tipos de lodos producidos en las plantas de tratamiento y su manejo se describen a continuación:

- Lodos Primarios

Estos son materiales granulares o coloidales decantables, que contienen arenas y partículas de menor tamaño con buena sedimentabilidad, tales como materia orgánica particulada, arenas y limos. Los lodos de origen orgánico pueden estar en cantidades similares a los de origen inorgánico. La cantidad de sólidos suspendidos volátiles, que es un indicador de la materia orgánica, se estima del 55 al 60%¹. El hecho que estén constituidos esencialmente por partículas relativamente gruesas los hacen relativamente fáciles de deshidratar.

La mayor parte de los lodos primarios se retienen en los desarenadores de los tratamientos preliminares, donde la decantación de partículas ocurre sin ayuda de coagulantes. Estos lodos se pueden extraer mediante el equipo de dragado hidráulico que se describe en el Capítulo F-1, que descargan el agua en un lecho de decantación y secado de sedimentos, que es diferente a los lechos de secado de lodos propiamente dichos, donde se procesan los materiales que se describen a continuación.

- Lodos Procedentes de Procesos Aeróbicos

En el caso de tratamientos biológicos para remover la contaminación orgánica, los lodos están compuestos por microorganismos vivos y en proceso de descomposición. La cantidad de sólidos suspendidos volátiles se estima entre 70 y el 80%, lo cual los hace difíciles de deshidratar, y su descomposición genera condiciones anaeróbicas y emisión de malos olores. Por lo tanto, generalmente requieren procesos de estabilización biológica mediante procesos de digestión anaeróbica, oxidación química, estabilización alcalina, o aireación extendida.

En los procesos biológicos para remoción de carga orgánica mediante lodos activados convencionales, se generan lodos aeróbicos muy diluidos, pero éstos se pueden flocular mediante procesos de biopelícula, que generan lodos más densos y mejor

¹ SNF Floerger. "Sludge Dewatering".

<https://www.snf.com/wp-content/uploads/2019/12/Sludge-Dewatering-EN.pdf>

sedimentabilidad. Estos procesos utilizan bioportadores, sobre los cuales se aglomera la materia orgánica en forma de biopelículas, y luego se desprenden en forma de flóculos que se decantan fácilmente. En diversos estudios se anota que, en el caso de lodos orgánicos, las sustancias que se utilizan para flocular los lodos, tales como las de hierro o aluminio y los polímeros orgánicos, tienen una eficiencia limitada, que no justifican sus altos costos (ver M. D. Gomelya y I. V. Radovenchyk ²). Según Nothando Cyntia Shiba³, cuando se busca recuperar nutrientes, no se recomienda utilizar compuestos de hierro como floculantes, puesto que se producen lodos con fosfato de hierro FePO_4 , que tiene baja solubilidad

El secado de los lodos procedentes de procesos biológicos puede producir biosólidos que contengan nutrientes, lo cual los hacen atractivos para su utilización como fertilizantes en la agricultura y el medio ambiente. Con este propósito se ha desarrollado la planta Pich (ver Capítulo D-7), que incorpora los nutrientes en un humus utilizado para fertilizar suelos, y la planta Pinbasa, cuyos biosólidos pueden emplearse en acondicionar y fertilizar suelos ácidos (ver Numeral C- 4.5).

- Lodos Procedentes de Tanques Anaeróbicos

En los procesos anaeróbicos, la materia orgánica se gasifica en forma de metano, amoníaco y gas carbónico, y los lodos tienen un volumen reducido, cuya deshidratación es relativamente sencilla. Sin embargo, su manejo puede tener dificultades debido a los gases nauseabundo que expelen y a su alto contenido de patógenos que proliferen en condiciones anaeróbicas. A esta categoría pertenecen los llamados lodos digeridos, que proceden de los tratamientos aeróbicos, y que luego han sido sometidos a procesos anaeróbicos para su desnitrificación.

En las plantas de tratamiento de aguas residuales MBBR Secuencial y USA, que se presentan en este sitio web, los lodos generados en reactores aeróbicos son retornados a un tanque Uasb, donde sufren un proceso de digestión anaeróbica antes de ser llevado a los lechos de secado. En este proceso los sólidos suspendidos volátiles son eliminados en gran parte, y el lodo se estabiliza. La producción de lodos orgánicos P_S se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$P_S = \frac{Y Q (S_i - S_o)}{1 + K_d SRT} \quad \text{Ecuación F- 5}$$

² M. D. Gomelya y I. V. Radovenchyk. "The Research of Activated Dewatering Processes". Department of Ecology and Plant Polymers Technology, National Technical University of Ukraine. Kiev Polytechnic Institute. http://www.energiomiljo.org/kth/Polishproject/rep17/Gomelya_Radovenchyk.pdf

³ Nothando Cyntia Shiba y Freeman Ntuli. "Extraction and precipitation of phosphorus from sewage sludge". Waste Management. Elsevier. 2.017. https://www.researchgate.net/publication/305749544_Extraction_and_precipitation_of_phosphorus_from_sewage_sludge

Donde Y es el Coeficiente de Producción de Lodos en SSV/mgDBO, donde SSV son sólidos Suspendidos Volátiles. Q es el caudal de diseño del tanque UASB, S_i y S_o son las concentraciones de DBO5 de entrada y de salida de éste. K_d es la Constante de Declinación Endógena en 1/días, y SRT es el tiempo de retención de sólidos en días, también conocido como edad de lodos, que se calcula con la Ecuación C-5 del Capítulo C-2. En la Tabla 17.4 del libro de Jairo Alberto Romero⁴ se recomienda para aguas residuales residuales municipales a 20°C, valores de Y de entre 0.4 y 0.8 SSV/mgDBO, con un valor típico de 0.6 SSV/mg DBO, y valores de K_d de entre 0.04 y 0.075/día, con con valor típico de 0.06/día. .

La ecuación anterior se puede expresar también de la siguiente forma:

$$P_s = Y \cdot DBO / (1 + K_d \cdot SRT) \quad \text{Ecuación F- 6}$$

Donde D DBO es la remoción de carga orgánica en el reactor. En la Ecuación E-6, SRT es la relación entre la cantidad de masa celular M en el tanque y su tasa de producción F , y evalúa el tiempo que dicha masa permanece en el tanque. En un documento de Cinara, Ideam y la Universidad UTP se recomienda para los tanques Uasb un SRT de 40 días. En el caso de los UASB Híbridos, el valor del SRT puede ser bastante superior, debido a que éstos tienen una capa de bioportadores tubulares porosos que retienen y almacenan gran cantidad de biomasa anaeróbica dentro del tanque, lo cual aumenta considerablemente el tiempo de retención SRT, y por lo tanto reduce la cantidad de lodos P_s que produce el reactor. En los cálculos de los lechos de secado de lodos procedentes de Uasb Híbridos se asumió un SRT de 60 días considerando un aumento de la masa M de 50%.

Los lodos procedentes de procesos de digestión anaeróbica con alto tiempo de retención de lodos SRT, como los que se realizan en tanques Uasb híbridos, tienen un contenido de sólidos suspendidos volátiles bajo, estimado en cerca del 50%, puesto que la mayoría de la carga orgánica ha salido en forma de CO_2 y metano. Estos lodos se pueden bombear utilizando bombas centrífugas o de diafragma, puesto que no está constituido por flóculos. La deshidratación de estos lodos toma menos tiempo. Según el libro de Jairo Alberto Romero (Ref. F-2), los lodos procedentes de tanques Uasb tienen buena sedimentabilidad, y el secado en lechos de arena tarda unos 7 días. Este tiempo se reduce notablemente mediante el sistema de succión con bombas de diafragma que se describe en el Numeral F-2.3.

La desnitrificación de los nitritos y nitratos que se realiza en el tanque UASB genera una tasa de producción de lodos amoniacales, estimada en 0,13 Kg VSS/Kg N removido por Andrea Bertino (Ref. D-10). Esto genera una carga adicional de lodos P_n , que se suma a la carga de lodos de origen orgánico P_s . Según un documento del Convenio Ideam- UTP- Cinara⁵, se recomienda la remoción de lodos de un tanque Uasb una vez por semana. Este

⁴ Jairo Alberto Romero Rojas. "Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño". Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1.999.

⁵ Convenio Ideam- UTP-Cinara. "Modelo Conceptual de la Selección de la Tecnología para el Control de la Contaminación por Aguas Residuales Domésticas. Bloque 7- Manejo de Lodos". 2.005.

tiempo es suficiente para que se alcance un buen secado de los lodos en un lecho de un solo módulo, considerando la succión de la bomba de diafragma.

- Lodos Procedentes de Procesos TPQA

Los procesos de tratamiento primario químicamente asistido tienen por objeto la remoción de turbiedad utilizando químicos que aglomeran los sólidos suspendidos, y facilitan su decantación. Esta floculación también facilita la deshidratación. Los lodos procedentes de este proceso están compuestos generalmente por materia inorgánica como arcillas y limos que han sido coagulados. Las características de los lodos procedentes de los procesos TPQA dependen de los tipos de coagulantes utilizados, como se explica en el Capítulo D-5, que trata lo referente a los procesos de potabilización.

Los procesos TPQA generan principalmente lodos inorgánicos, constituidos principalmente por acillas y limos que ocasionan la turbiedad, los cuales no tienen interés en usos agrícolas. En la planta de potabilización recomendada en el Capítulo D-5, los lodos se encuentran en forma de flóculos que no han sido destruidos por bombas, puesto que salen del reactor aeróbico a lecho se secado por gravedad. Por lo tanto, generalmente no requieren la adición de coagulantes y polímeros, que se recomiendan para otros lodos con el fin de facilitar su deshidratación. En el caso de tratamientos de aguas residuales industriales que se trata en el Capítulo D-6, se recomienda estudiar la adición de zeolita en polvo y bentonita, que además de facilitar la floculación y decantación de los sólidos suspendidos, ocasionan la adsorción y la inmovilización de sustancias nocivas refractarias al tratamiento biológico.

Los lodos procedentes de los procesos TPQA están formados por flóculos muy frágiles. Estos lodos deben ser llevados al sistema de secado. No es recomendable utilizar para ello bombas centrífugas, puesto que los flóculos son destruidos al pasar por el rotor que gira a gran velocidad. En los procesos TPQA para potabilización, los lodos se extraen por gravedad, de modo que los flóculos llegan intactos al lecho de secado. Para ello se aprovecha la diferencia de niveles entre los reactores y el lecho de secado.

Los lodos procedentes de los procesos TPQA tienen una concentración relativamente baja de sólidos. Normalmente requieren de procesos de espesamiento por gravedad antes de su secado. En este caso se recomienda tener lechos de secado de dos módulos. Mientras uno de ellos funciona como un decantador que realiza procesos de espesamiento, el otro realiza el secado de los lodos espesados. El proceso de espesamiento por gravedad (en inglés gravity thickening) se describe en el libro de Metcalf & Eddy (Ref. D-29). Luego de un tiempo se alternan estas funciones, lo cual se hace mediante dos válvulas de 3 vías, una de las cuales canaliza el flujo de lodos hacia uno de los módulos, mientras que la otra conecta la bomba de diafragma con el módulo donde se realiza el secado.

El espesamiento se realiza en condiciones de reposo, cuando los sólidos contenidos en el agua se decantan en el fondo debido a su mayor peso específico. Un aspecto crítico de este proceso es la velocidad de decantación, que determina el tiempo que puede tomar este proceso. Tanto los lodos activados de los procesos biológicos, como las arcillas de los

procesos de potabilización, tienen velocidades de decantación muy pequeñas, y requieren de procesos de floculación o lastrado para acelerar dicha velocidad.

La adición a los lodos de coagulantes permite que se aglomeren para formar flóculos, con lo cual no solo se agiliza la decantación, sino que se facilita su deshidratación, puesto que dichos flóculos se comportan como partículas gruesas con intersticios entre ellas, por donde puede circular el agua. Por lo tanto, una buena floculación reduce las presiones de succión requeridas para extraer el agua. En los procesos TPQA para remoción de arcillas y limos, los coagulantes químicos producen flóculos con buena sedimentabilidad.

- Lodos procedentes de Lagunas de Oxidación

En las lagunas de oxidación se utilizan desarenadores que remueven solo los lodos primarios. En resto se decantan en el fondo de la laguna, donde están sometidos a procesos de digestión anaeróbica durante varios años. En este tiempo, el contenido de materia orgánica se reduce notablemente, y los lodos se han compactado, por lo cual generalmente no necesitan deshidratación. En el Numeral C-3.2.4 se describe una dársena anaeróbica cubierta, que se recomienda colocar a la entrada de las lagunas de oxidación, con el objeto de retener en forma más eficiente materiales gruesos y finos. Estos materiales son retirados periódicamente mediante retroexcavadoras. De esta forma se reduce la sedimentación de los lodos en el interior de las lagunas, cuyo retiro es una operación bastante difícil.

F-2.2. Tecnologías para Secado de Lodos

Los lodos producidos por las plantas de tratamiento o de potabilización del agua deben ser secados y estabilizados, con el fin de disminuir su volumen, reducir efectos ambientales tales como olores y potencial patógeno, y eventualmente aumentar su valor como abono orgánico. La deshidratación de los lodos busca reducir el contenido de agua en los sólidos, de modo que estos representen entre 30 y 40% del peso total, con el objeto de reducir su volumen y darles una consistencia que facilite su manejo y disposición final (Lawrence K. Wang. Ref. F-7). Con un contenido de sólidos del orden del 20 a 30%, el lodo puede ser manejado con equipos tales como palas de cabeza cuadrada. El agua contenida en los lodos se encuentra en diversas condiciones, que se describen a continuación, las cuales determinan la dificultad para extraerla⁶.

- Agua de hidratación. Es la asociada químicamente a las partículas y sólo se puede remover mediante el calentamiento.
- Agua vecinal. Es la formada por capas de moléculas fuertemente adheridas a la superficie de las partículas por enlaces de hidrógeno, cuya extracción requiere altas presiones.
- Agua intersticial. Es la que se encuentra entre las cavidades e intersticios de los flóculos, y como parte de los organismos vivos. Esta agua puede extraerse con la destrucción de

⁶ Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA).
https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/uni_08/9.pdf

los flóculos o la degradación de los organismos aeróbicos mediante la digestión anaeróbica.

- Agua libre. Es la que no se encuentra en las condiciones mencionadas anteriormente, y que puede fluir libremente y ser extraída fácilmente. Esta es la parte del agua que se puede extraer en los lechos de secado.

Para la deshidratación de los lodos se utilizan principalmente las siguientes tecnologías:

- Filtros prensa (en inglés Frame Filter Press)

Estos filtros consisten en una estructura similar a un acordeón, en la cual se encuentra una serie de placas con caras acanaladas, sobre las cuales se encuentran adosadas telas filtrantes. El lodo se introduce dentro de esta estructura, y luego se somete el conjunto a una elevada presión, utilizando para ello un pistón hidráulico. Finalmente se retira el material deshidratado. Este proceso consume bastante mano de obra, pero produce un biosólido bastante seco.

- Filtros banda (en inglés Belt Filter)

Estos filtros tienen en su interior una banda continua hecha de tela filtrante, la cual es movida por unos rodillos giratorios que está distribuidos en forma de zigzag. El lodo se vierte de forma continua sobre la banda, y posteriormente al pasar entre los rodillos es comprimida, y luego una placa rascadora va separando el lodo deshidratado de la banda.

- Decantadores Centrífugos (en inglés Decanter Centrifuge)

Estos equipos realizan la deshidratación mediante la centrifugación del lodo. Dicho lodo entra a una estructura cilíndrica que gira a gran velocidad, y es sometido a grandes fuerzas centrifugas. Mientras el lodo es retenido por las paredes interiores, el agua sale hacia afuera. Generalmente los decantadores centrífugos tienen un rotor rotatorio que gira a gran velocidad, en cuyo interior se encuentra un tornillo helicoidal que gira en el mismo sentido a menor velocidad, y que va arrastrando hacia el exterior los biosólidos que se acumulan en las paredes interiores del rotor, mientras que el agua sale por el extremo opuesto del decantador. El lodo entra al rotor del decantador a través de un tubo central.

Todas las tecnologías de deshidratación descritas anteriormente requieren la adición de químicos acondicionadores de los lodos, tales como polielectrolitos y cal. En un documento “Sludge Dewatering de SNF Floerger (Ref. F-1) se encuentran descripciones y análisis bastante completos de las tecnologías anteriores.

- Lechos de Secado de Arena

Estos lechos están constituidos por una capa de arena, bajo la cual se encuentra un sistema de drenaje, de tal forma que el agua de los lodos que se depositan sobre ellos se filtre a través de la arena, cuyos poros son bastante pequeños y por lo tanto retienen los sólidos

suspendidos. Esta retención se debe a mecanismos de interceptación en los intersticios entre los granos de arena, y decantación en el agua que se aposa sobre el lecho. De acuerdo a Lawrence K. Wang et al⁷, con este sistema se logra reducir la concentración de sólidos entre 15 y 25% en entre 1 y 3 días. Posteriormente ocurre un proceso de secado debido a la evaporación del agua, que es facilitado por el agrietamiento de éste. Luego, el biosólido (lodo deshidratado y estabilizado) puede ser removido del lecho

En zonas tropicales se tienen temperaturas y radiación solar elevadas durante todo el año, por lo cual los lechos de secado son una buena opción para deshidratar los lodos. En estas zonas, se recomienda que los lechos de secado se cubran con un tejado hecho con tejas traslúcidas y soportado por columnas, lo cual permite el paso de la radiación solar y el flujo del viento, y evita la afluencia de aguas lluvias. La deshidratación de los lodos en lechos de secado sencillos ubicados en zonas tropicales puede tardar desde pocos días hasta 2 semanas.

En la siguiente Tabla se encuentran las áreas de lecho per cápita, y la tasa de aplicación recomendadas por Lawrence K. Wang et al (Ref. F-7). Esto se aplica a varios tipos de lodos procedentes de tratamientos anaeróbicos en zonas situadas entre las latitudes 40°, correspondientes a zonas tropicales y subtropicales. Estas tasas se aumentan sustancialmente con la colocación de la bomba de succión en el drenaje que se trata en el siguiente Numeral.

Tabla F- 1. Parámetros Recomendados para Diseño de Lechos de Secado

Procedencia de los Lodos	Tasa de Alicación Kg sólidos/m2 al año	Area de Lecho (m2 per cápita)	
		Condición del Lecho de Secado	
		Descubierto	Cubierto
Lodos de Tratamientos Anaeróbicos Primarios	147,85	0,070	0,052
Lodos de Tratamiento TPQA	118,28	0,140	0,104
Lodos de Tratamiento por Lodos Activados y Digestión Anaeróbica	80,65	0,122	0,094

Fuente: Lawrence K. Wang. (Ref. F-7.)

⁷ Lawrence K. Wang et al. "13 - Drying_Beds". Hanbook of Environmental Engineering. Volume 6. Biosolids Treatment Process. Research Gate. 2,007.

https://www.researchgate.net/publication/225920635_Drying_Beds

F-2.3. Diseño de Lechos de Secado

Según Lawrence K. Wang et al (Ref. F-7), el lecho de secado tradicionalmente usado tiene las siguientes ventajas respecto a otras tecnologías:

- Bajos requerimientos de energía y de mano de obra capacitada
- Menor sensibilidad a las características del lodo
- Bajos o nulos consumos de químicos
- Consistencia más dura y manejable del biosólido producido.

La gran desventaja de los lechos de secado es la gran extensión de terreno que requieren. Sin embargo, esta área puede reducirse sustancialmente si se implementa en el drenaje un sistema de succión mediante bombas de diafragma, como lo propone Lawrence K. Wang et al (Ref. F-7). También se puede rastrillar el lecho de arena con un escarificador para romper la capa impermeabilizada por entrada de finos. Con la implementación de estos dos procesos, se convierte a los lechos en estructuras muy económicas y eficientes para el secado y la estabilización de los lodos, apropiados para las plantas de tratamiento municipales.

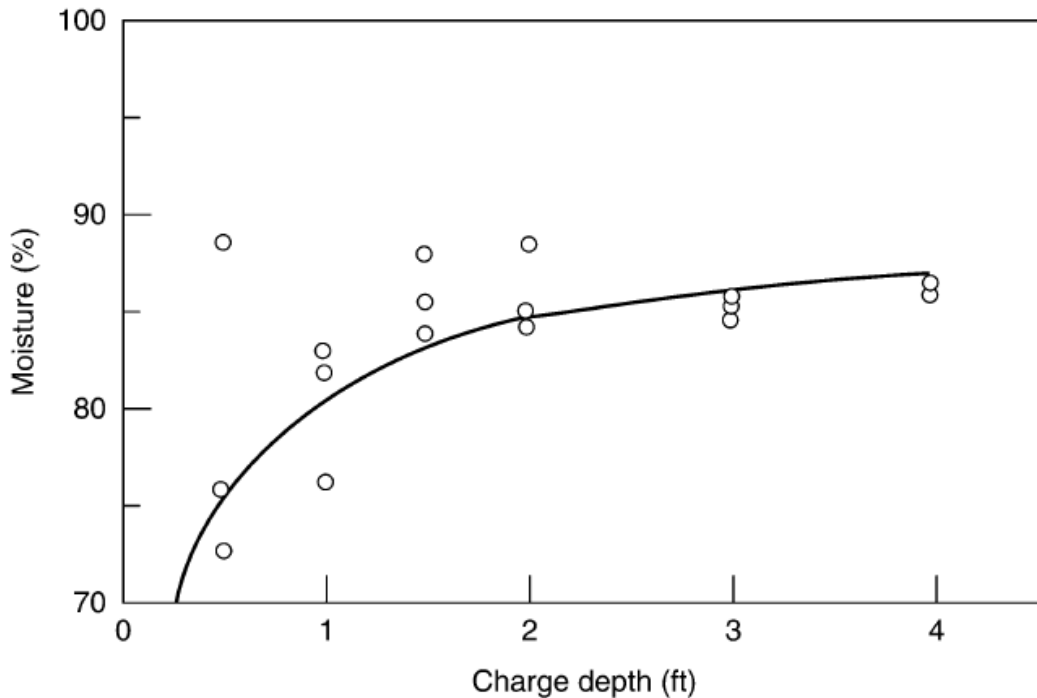
A continuación se describen los procesos mencionados, y las estructuras y equipos para realizarlos, con los cuales se puede reducir sustancialmente el tamaño de los lechos de secado, y además facilitar las operaciones de éstos. La función del lecho de secado es realizar la deshidratación de los lodos con el objeto de facilitar su manejo y disposición final. El lecho de secado recomendado consiste en un tanque amplio y de poca profundidad, en cuyo fondo se encuentra una capa de arena provista de un sistema de subdrenaje, a través del cual se extrae el agua. La arena recomendada por Lawrence K. Wang et al. (Ref. F-7) debe tener grosores entre 0.3 y 1.2 mm, y coeficiente de uniformidad de 5.

Para el drenaje de los lechos se recomienda la utilización de geodrenes planares, que son sistemas de subdrenaje producidos por Pavco, consistentes en una malla plástica llamada georred, revestida por ambos costados por un geotextil no tejido, a través del cual entra el agua. El flujo se canaliza a través de la malla hasta una manguera perforada de drenaje de 2 ½" de diámetro, la cual también está cubierta por el geotextil. Estos geodrenes planares se conectan a una tubería de PVC, la cual conduce el agua hacia una la bomba de diafragma, que la lleva de vuelta al tanque Uasb. También puede llevarla hacia el efluente, considerando que el proceso de filtración puede darle la calidad requerida. .

Una vez llenado el lecho de secado, comienza el proceso de secado mediante los mecanismos de filtración del agua con interceptación de sólidos en los intersticios de la arena, y luego de evaporación, como se indica en el Numeral F-2.1. La permeabilidad de la arena se estima en alrededor de 0.012 cm/sg, que corresponde a la velocidad del agua para un gradiente de 1, que es el que se tienen en el lecho de arena. Para obtener el caudal a través del lecho, se multiplica esta permeabilidad por su área y por el gradiente, que es la caída de presión dividida por la altura del medio poroso. Sin embargo, esta permeabilidad es reducida por la formación de la torta (cake) sobre la arena, lo cual reduce el caudal que sale del lecho.

Al inicio del proceso de extracción del agua, ésta fluye rápidamente, pero este flujo se va reduciendo en la medida que aumente la formación y la densidad del 'caque' o torta. Por lo tanto, la profundidad de los lodos que se alcanza en la etapa de llenado es un parámetro fundamental en la eficiencia del proceso, puesto que si ésta es reducida, se alcanza a extraer toda al agua antes de que se forme una torta (cake) muy impermeable. En la siguiente gráfica se aprecia la relación entre esta profundidad inicial de los lodos (charge depth en inglés), y la humedad que se puede alcanzar.

Figura F-4. Relación entre la Profundidad Inicial del Lodo y la Humedad que se Alcanza



Fuente: Lawrence K. Wang et al, (Ref. F-7, Figura 10).

De acuerdo a la gráfica anterior, se recomienda que la profundidad de los lodos que se introducen en la etapa de llenado sea de 20 cm (0.67'), con lo cual la humedad se puede reducir a un 77%, y se aumenta la concentración de sólidos a alrededor de 23%.

Para reducir el tiempo de drenaje y la humedad que se alcanza, se recomienda utilizar para ello una bomba de diafragma conectada a la tubería de drenaje del geodrén. Con esta bomba se puede generar una succión que aumenta el caudal de agua drenada y reduce el tiempo que toma el proceso. Con la bomba también se reduce el área requerida para el lecho de secado. Las bombas de diafragma son bombas de vacío, que tienen la capacidad de producir una presión negativa que succiona el agua, aumentando el gradiente del flujo a través del medio poroso, y por lo tanto el caudal de drenaje. De acuerdo con un

documento de la EPA⁸, mediante la utilización de bombas de vacío se pueden deshidratar en poco tiempo los lodos de un lecho de secado, utilizando para ello una presión negativa de 1.38 m de agua. Posteriormente el biosólido puede ser removido mediante palas de cabeza cuadrada, que facilitan la extracción de la capa superficial. Según el documento de Lawrence K. Wang et al (Ref. F-7), al utilizar una a bomba de secado con cabeza de succión de 0.14 m de cabeza de agua, se puede aumentar la concentración de sólidos a 20% en 48 horas. Esto es importante, puesto que se considera que el objeto de los lechos de secado es aumentar el contenido de sólidos del orden del 20 a 30%, para hacerlos manejables con palas.

El alto gradiente de presión ocasionado por la bomba de diafragma promueve la formación de la torta sobre la arena (cake en inglés), que consiste en una capa impermeabilizada por los finos que penetran en los intersticios de la arena debido a la presión, lo cual dificulta el drenaje del agua. La caída en la presión se produce esencialmente en dicha torta o 'cake'. Para reducir este efecto y facilitar el flujo del agua que sale del lecho, se puede utilizar un escarificador, que consiste en una pantalla hecha en lámina de acero HR. En su parte inferior, la pantalla tiene adosadas platinas verticales, cuyo extremo inferior tiene forma de diente en V que penetra en la arena (ver Figura F-5 a continuación). Esta herramienta es movida manualmente hacia adelante y atrás mediante un mango largo, unido a la pantalla. Con este movimiento, los dientes hacen pequeños surcos a través de la capa impermeabilizada por los finos o torta, abriendo así rutas para la salida del agua a través de la torta. En este proceso se mezcla la capa superior de arena con los lodos, la cual debe ser extraída luego.

La bomba de diafragma debe funcionar en largos periodos durante el tiempo de secado, y se recomienda que funcione de manera intermitente, de acuerdo a recomendaciones del fabricante. Se recomiendan bombas de diafragma metálicas y con elastómetro de neopreno, que pueden tener cabezas de succión de hasta 5 o 7 m cuando trabajan en seco. La altura de succión máxima se reduce con la altitud del sitio. En el documento de Lawrence K. Wang et al (Ref. F-7) se recomienda aplicar a los lechos con secado al vacío una presión negativa de 0.35 a 3.45 metros de cabeza de agua. Hay que tener en cuenta que el nivel del agua en el tanque de entrada, donde generalmente desagua la bomba de diafragma, está a más de 1 m por debajo del nivel en el lecho, lo cual crea un sifonaje que facilita el bombeo, y reduce la cabeza de succión requerida en la bomba de diafragma.

Si se considera una cabeza de succión de 2 m en la bomba de diafragma, y pérdidas en la tubería muy bajas debido a lo reducido del caudal, se podrían obtener presiones negativas del orden de 3 m con dicha bomba trabajando cerca de su capacidad máxima. Por lo tanto, el secado de los lodos con bombas de diafragma puede ser bastante eficiente y rápido, y así lograr un contenido de sólidos de entre 30 y 40%, que es adecuado para los biosólidos producidos. La bomba de diafragma puede seguir funcionando luego del secado, para hacer circular aire a través del lecho, lo cual agiliza la evaporación de agua.

⁸ EPA. "Vacuum Assisted Sludge Dewatering Beds (VASDB) – An Update". 1.986
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/910251DD.PDF?Dockkey=910251DD.PDF>

tanque mediante un sistema de rebose, para producir un flujo tipo pistón a través del lecho que facilita la decantación. Los lodos se distribuyen en el lecho mediante una tubería perforada ubicado en un costado de éste, mientras que en el costado opuesto se encuentra una canaleta horizontal que recoge el efluente, y que está ubicada al nivel adecuado para que en el lecho se tenga una profundidad igual o menor de 20 cm. Esta es la profundidad de lodos es la máxima recomendada para el proceso de secado de acuerdo a la Figura F-4 de Lawrence K. Wang et al (Ref. F-7). El agua drenada se puede recircular enviándola al tanque de entrada, o se puede sacar hacia el tanque de cloración si se considera que tiene la calidad requerida. Esto último se haría en la planta TPQA para tratar aguas industriales que se trata en el Capítulo D-5.

La canaleta entrega el efluente del lecho de secado a una caja de drenaje, a través de una abertura practicada en el muro de dicho lecho. Esta canaleta está constituida por tramos de 1 m de longitud traslapados. En estos traslapos se presentan pequeñas filtraciones, de modo que luego del llenado, el nivel del agua en el lecho baja hasta el nivel del fondo de la canaleta, lo cual reduce el volumen del agua que es necesario evacuar durante la etapa de secado.

Mientras en un módulo se lleva a cabo el proceso de decantación y espesamiento de los lodos, en el otro se lleva a cabo el proceso de secado de éstos, en el que gran parte del agua es extraída mediante una bomba de diafragma. Posteriormente se hace un secado al aire, que puede ser mejorado mediante la succión del aire realizada por la bomba de diafragma. Finalmente se extraen los biosólidos producidos, incluyendo la capa de arena impermeabilizada, donde se ha formado la torta, la cual luego debe ser repuesta.

Una vez terminados los procesos anteriores, se intercambian las funciones de los módulos mediante el cambio en la válvula de 3 vías ubicada en la tubería que lleva los sedimentos del reactor hacia los lechos, y en la válvula de 3 vías en la tubería que conecta la bomba de diafragma que realiza el secado, con el drenaje los módulos. El agua se sale de los éstos se puede llevar al tanque de entrada para ser recirculada, o se puede conducir al tanque de salida del efluente si tiene la calidad requerida.

El tiempo de salida de lodos se programa para evacuar los lodos acumulados en el reactor, y se puede determinar instalando un turbidímetro en la salida hacia el lecho. La salida de lodos finalizaría cuando se registre un nivel bajo de turbiedad. La salida de lodos se programaría cada varios ciclos de tratamiento, y por lo tanto los lodos se acumulan en el fondo del reactor, produciendo un espesamiento que aumentala concentración de sólidos en los lodos.

Considerando este tiempo de secado al aire, y el que se requiere para las operaciones de extracción de biosólidos y reposición de la arena extraída con estos, se recomienda que para el diseño se asigne 7 días a estas operaciones, lo mismo que la etapa de decantación y espesamiento de los lodos que se realiza en el otro módulo. En estas condiciones, cada 7 días se manipulan las válvulas de 3 vías que alternan los procesos entre los dos módulos, y el tiempo del procesamiento de los lodos toma 14 días.

Al final de este tiempo, se remueve una capa de arena junto con los biosólidos producidos, y se mezclan para distribuir la arena removida, la cual incrementa la permeabilidad y manejabilidad de dichos biosólidos. Esto se hace con una pala de cabeza cuadrada que facilita la remoción de la capa superficial, la cual puede ser de 3 cm de altura o menos. La arena contenida en el biosólido producido no solo facilita el drenaje de los suelos donde se aplica, sino también la entrada de aire. Esto también favorece el secado y el control de los malos olores en el biosólido.

La arena removida del lecho debe ser repuesta antes de iniciar el ciclo siguiente. Esta arena se nivela utilizando el escarificador mostrado en la figura anterior puesto al revés, el cual se mueve horizontalmente. Esta operación termina cuando el nivel del lecho de arena llega hasta el borde superior de las platinas adosadas a las paredes, que sirven como referencia. En las figuras F-6 a F-8 se presenta un diseño de un lecho de secado de un módulo para tratar lodos procedentes de un tanque Uasb Híbrido, y en las figuras F-9 a F-10 un diseño de un lecho de secado de dos módulos para tratar lodos procedentes de procesos TPQA. A continuación de las figuras se encuentra el cálculo de un lecho para tratar lodos procedentes de un tanque Uasb Híbrido.

Figura F-6. Lecho de Secado de 1 Módulo para Lodos Procedentes de Tanques Uasb

Vista en Planta

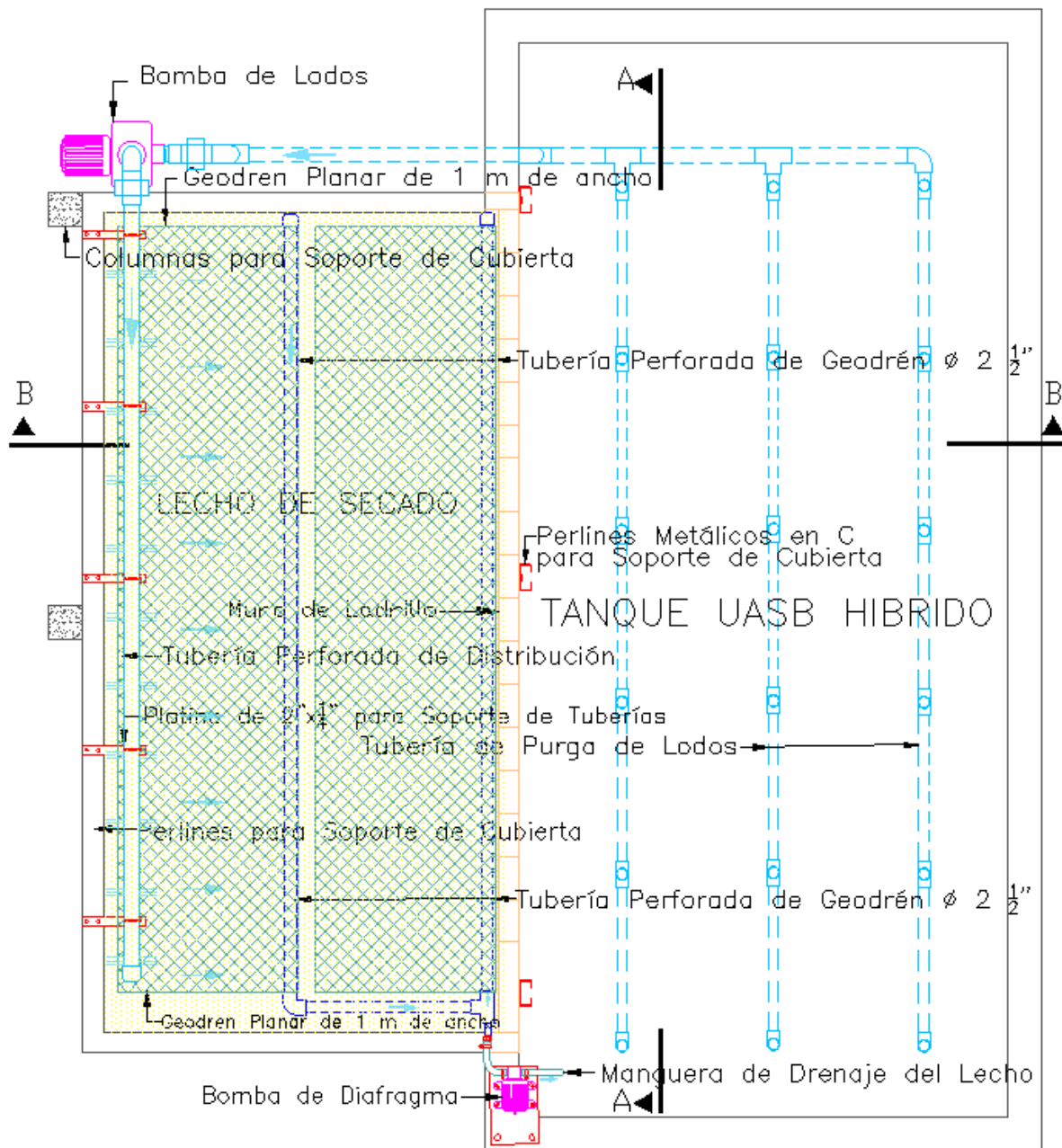


Figura F-7. Lecho de Secado de 1 Módulo para Lodos Procedentes de Tanques Uasb

Vista de Corte Longitudinal A-A

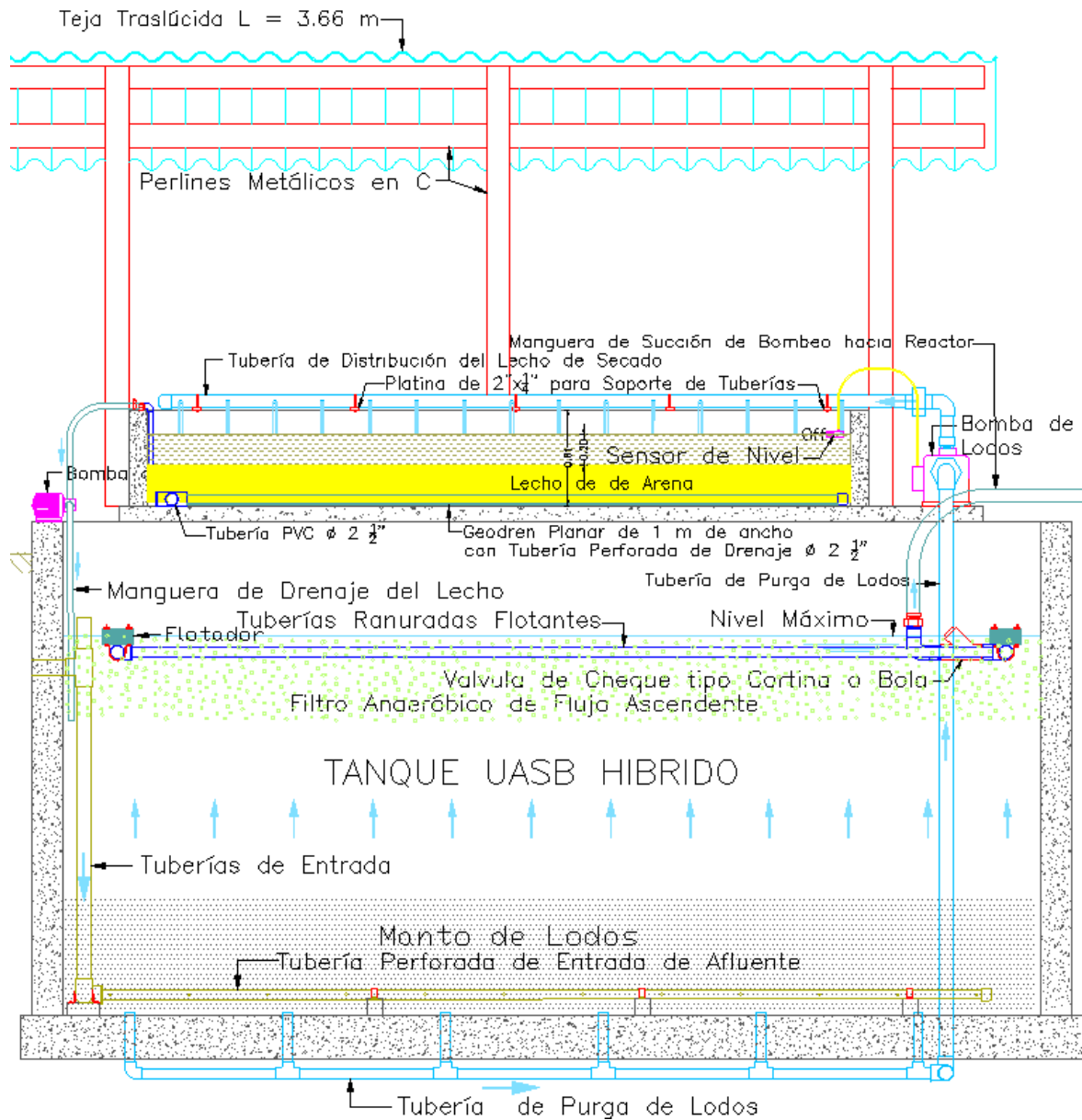


Figura F-8. Lecho de Secado de 1 Módulo para Lodos Procedentes de Tanques Uasb

Vista de Corte Transversal B-B

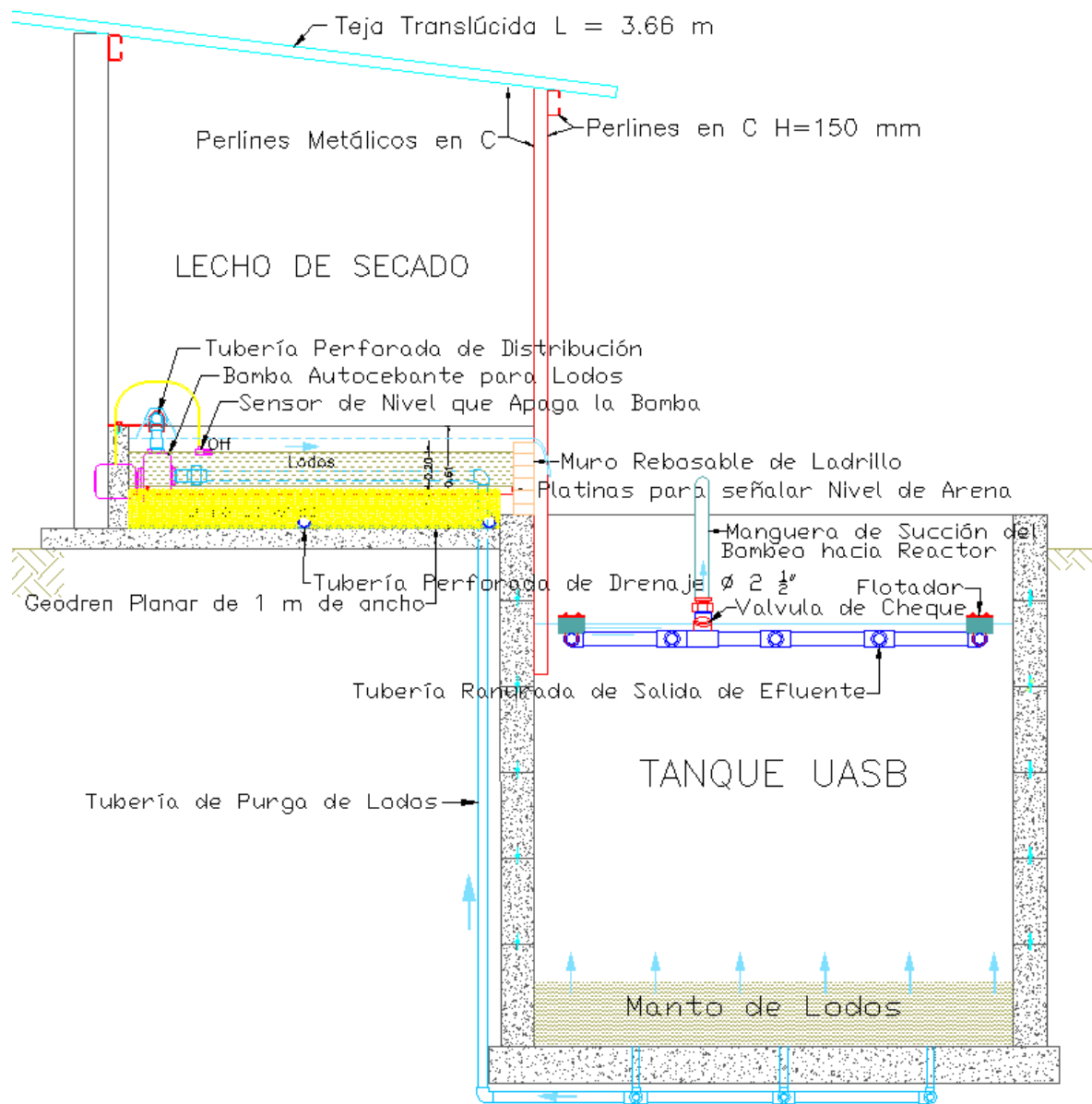


Figura F-9. Lecho de Secado de 2 Módulos para Lodos Procedentes de Procesos TPQA

Vista en Planta

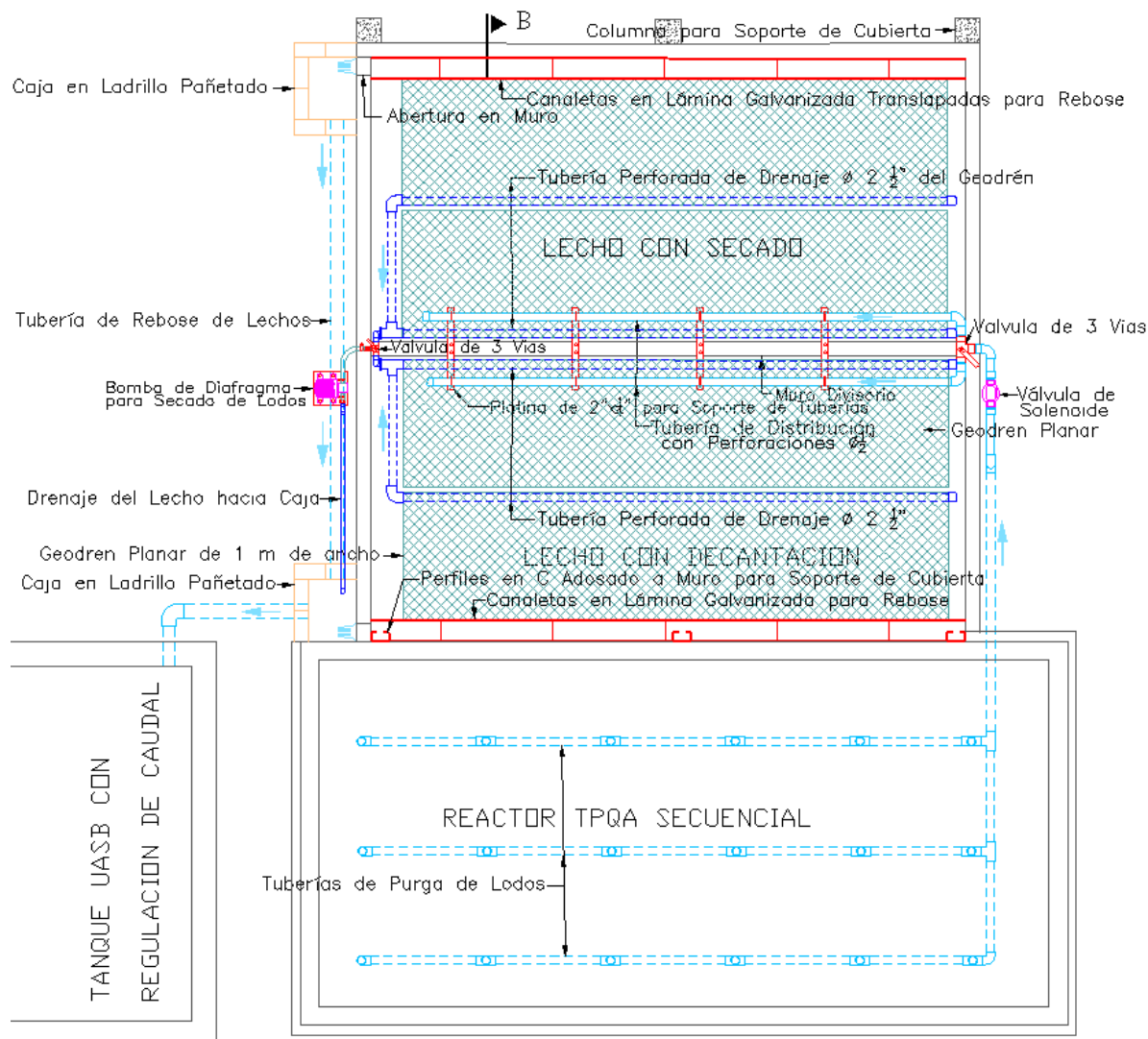


Figura F-10. Lecho de Secado de 2 Módulos para Lodos Procedentes de Procesos TPQA
Vista de Corte Transversal

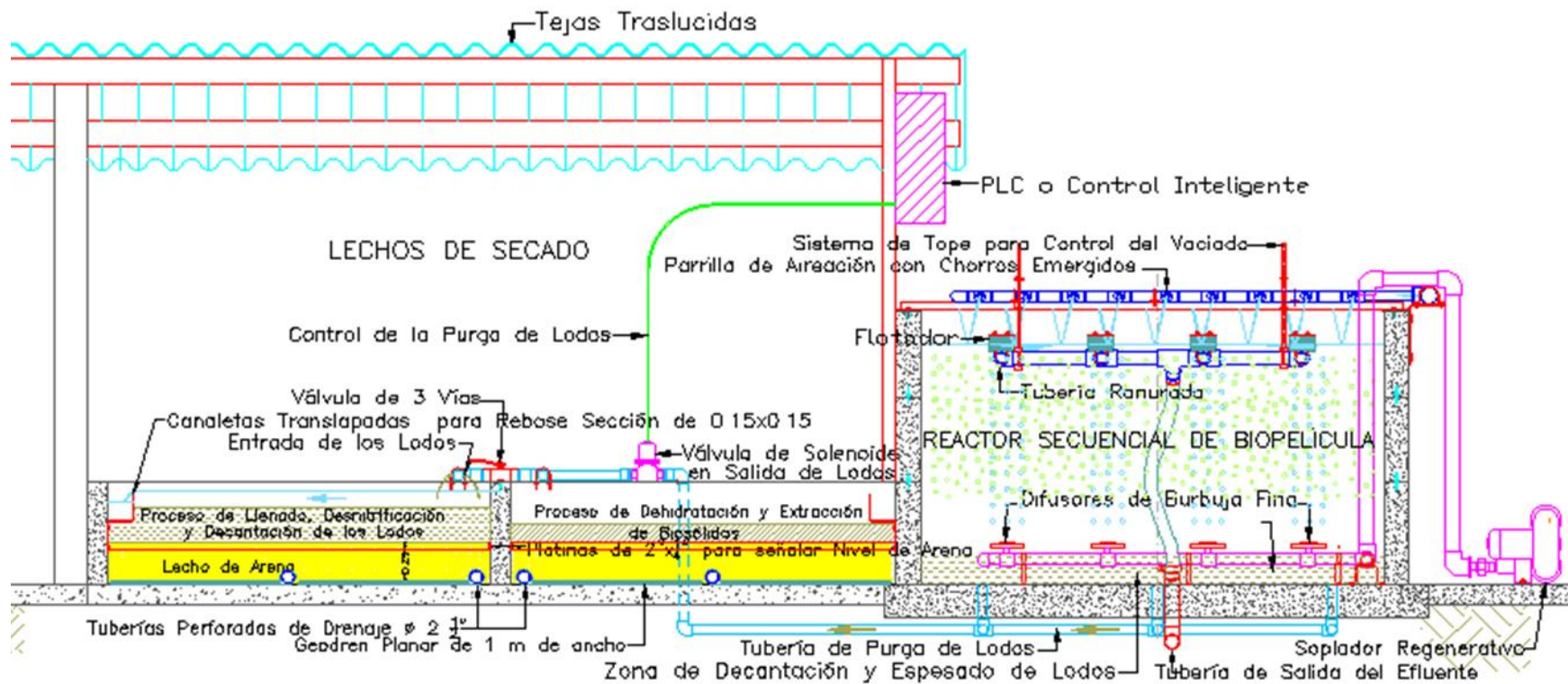


Tabla F-2. Cálculo de Lecho de Secado de Lodos Procedente de un Tanque Uasb Híbrido

Población Servida		500 habitantes
Aporte per Cápita de Carga Orgánica		52,14 gr DBO5/hab-día
Carga Orgánica Afluente	DDBO	26,07 kg DBO/día
Coeficiente de Producción de Lodos	Yn	0,60
Constante de Declinación Endógena	Kd	0,06 1/día
Edad de Lodos	θ_c	60 Días
Producción de Lodos Organicos con base Seca	Ps	3,40 Kg SSV/día
Aporte per Cápita de Carga Amoniacal		9,48 gr DBO5/hab-día
Carga Diaria de NH4 a Remover		4,74 kg NH4/día
Tasa de Produccion de Lodos Amoniacales	Pn	1,00 Kg VSS/Kg N removido
Producción de Lodos Amoniacales con Base Seca	Pn	4,74 kg SSV/día
Cantidad Total de Lodos con Base Seca	Ps+Pn	8,14 Kg SSV/día
Frecuencia de Purga de Lodos por Unidad		7 días
Profundidad de los Lodos		0,20 m
Tasa de Aplicación Máxima		296 Kg sólidos/m2-año
Area de Módulo Requerida		10,05 m2
No de Unidades		1 u
Largo		4,80 m
Ancho		2,20 m
Area de Módulos	suficiente	10,56 m2
Area de Lechos Total		10,56 m2
Tiempo de Etapa de Decantación y Secado		7,00 días
Volumen de Lodos y Agua por Módulo		2.112 Lts
Contenido a Sólidos a Alcanzar con Bombeo	30 a 40%	35%
Volumen de Agua a Extraer		1.373 Lts
Caudal de Operación de la Bomba		2,00 GPM 0,13 Lps
Factor de Operación de la Bomba		0,25
Tiempo de Drenaje de Lodos con Bombeo		12,04 horas 0,50 días
Presion de Succión de Bomba Especificada		2,00 mca
Altura del Sifonaje		0,80 m
Presion de Succión en Lecho de Secado		2,80 mca
Espesor del Lecho		0,25 m
Gradiente Teorico de Filtración por Gravedad		11,20
Peso del Lodo Seco por Jornada		56,98 Kg
Densidad de la Arena		1,50 gr/cm3 1.500 Kg/m3
Altura de la Capa de Arena Removida		3,00 cm
Volúmen de la Arena Extraída a Reponer		0,32 m3
Peso de la Arena Extraída por Jornada		475 Kg
Peso Total de Solidos Secos Extraído por Jornada		532 Kg
Peso del Agua Remanente		346 Kg
Peso Total de Biosólido Extraído por Jornada		878 Kg

F-3. ASPERSOR DE HÉLICE PARA EL RIEGO DEL COMPOSTAJE

Este aspersor consiste en una hélice de eje vertical que se coloca sobre una perforación hecha en la parte superior de la tubería, de tal manera que el flujo que sale por dicha perforación haga girar la hélice. Esta rotación impulsa el flujo hacia afuera debido a las fuerzas centrífugas, dispersando el agua alrededor del aspersor. Este aspersor puede funcionar con cabezas hidráulicas muy bajas, menores de 1 m, y se utilizaría en la planta Parab que se trata en el Texto B, y en la planta Pinch que se trata en el Numeral C-4.5, para distribuir el agua en los lechos de compostaje. Los cálculos del aspersor de hélice se encuentran en los archivos Parab Tilapias.xls y Parab Camarones.xls del Texto B, y en el archivo Planta Pinch.xls del Texto C.

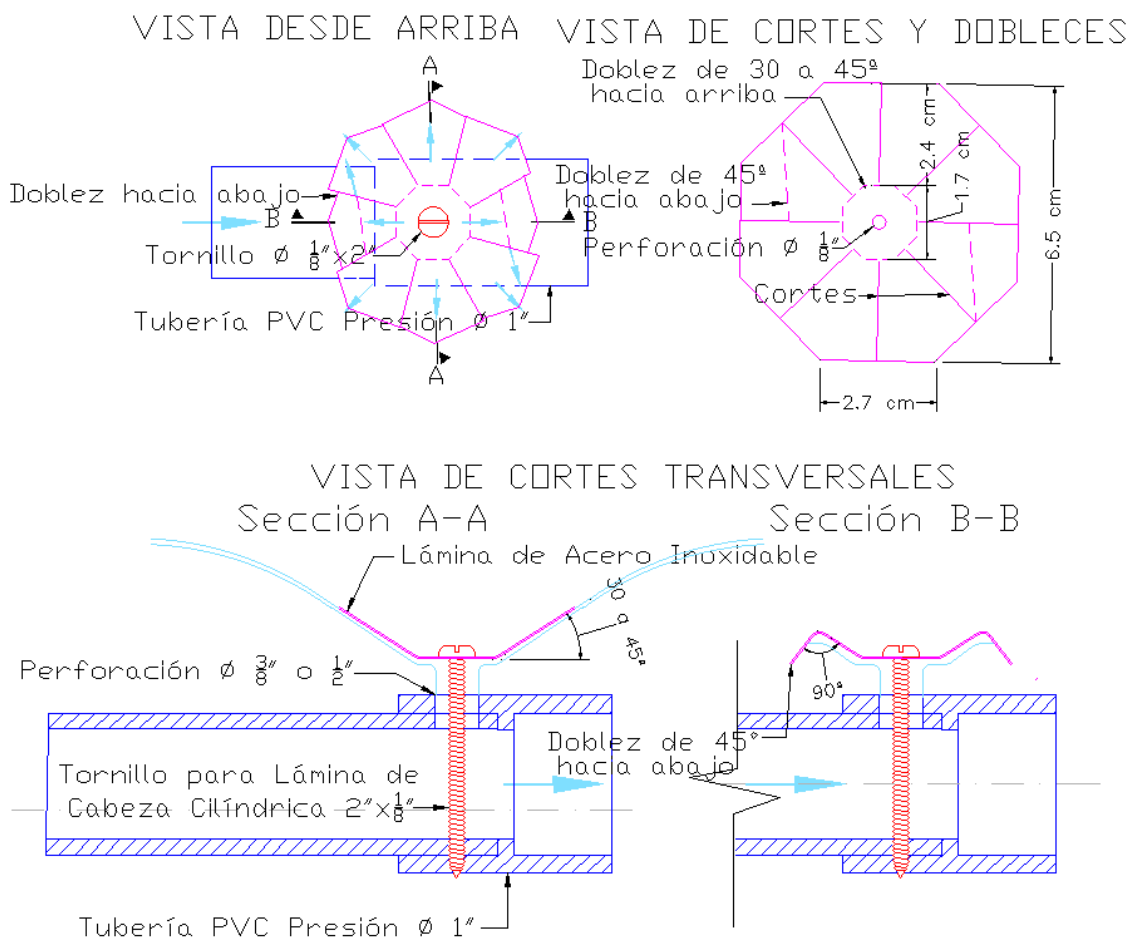
La hélice se haría con una lámina metálica octogonal, y consta de 8 aspas. Esta hélice se muestra en la Figura F-11, y su eje de rotación está constituido por un tornillo para lámina largo, cuyo eje está ubicado en el centro de la perforación en la tubería por donde sale el agua. Dicho tornillo está sujeto al extremo opuesto de dicha tubería. El flujo sale del tubo por el espacio entre el agujero y el tornillo, y se adhiere a la cara inferior de la hélice. Luego sale proyectado hacia afuera debido a la fuerza centrífuga, distribuyendo el agua en un importante radio alrededor del aspersor. Dos de las aspas opuestas tienen un pequeño ángulo hacia arriba, y un doblez a 90° que intercepta el flujo y cambia su dirección, produciendo una fuerza de torsión sobre la hélice que la hace girar (ver Figura F-11). Las aspas restantes se doblan hacia arriba con ángulos que varían entre 30 y 45°, con el objeto de lanzar el agua a diferentes distancias, y distribuir el agua de forma relativamente uniforme en un círculo alrededor del aspersor. Los diseños presentados en la Figura F-16 se consideran apropiados para el riego de sistemas de compostaje, donde se tiene una presión muy baja y escasa distancia entre aspersores.

Para la hélice se recomienda utilizar lámina metálica lisa protegida contra la corrosión. El aspersor de hélice podría ubicarse en el acople de un accesorio de PVC presión, de modo que el tornillo se pueda fijar en una pared doble, lo cual le da firmeza. Las tuberías que alimentan los aspersores se conectarían utilizando este acople, que puede ser una unión en el caso de sistemas de aspersión ubicados sobre el suelo, o un codo cuando los aspersores se abastecen de tuberías enterradas, como se observa en la Figura F-13.

Para regar lechos de compostaje, se recomienda que la tubería del aspersor tenga un diámetro de 1", que el tornillo tenga 2" de longitud y 1/8" de diámetro, y que la perforación por donde sale el agua tenga un diámetro de 1/2". En estas condiciones la distancia entre el tornillo y el borde de la perforación en la tubería es 1/8", y por allí pueden pasar las partículas que atraviesan las mallas de la rejilla triangular que se recomienda colocar (ver Numeral F-5.3), las cuales tienen una apertura de máximo 3 mm. En el caso de que ocurra una obstrucción, se desatornilla la hélice, y luego se coloca por un tiempo el flujo para que arrastre los elementos que la obstruyen. Se recomienda que la perforación se haga en el acople de una unión o un codo con un niple del tubo, para que el tornillo tenga una mejor sujeción, como se observa en los cortes transversales de la Figura F-11. Para el caso del riego del compostaje de la planta Parab, donde se tiene una cabeza hidráulica de 0.83 m,

se calculó un caudal por aspersor de 0.23 Lps (ver Tabla B-11). Para este cálculo se asumió un área de flujo igual al área del orificio menos la del tornillo que sirve de eje, y un coeficiente de descarga C_d de 0.58. En las figuras a continuación se muestra el diseño de un aspersor de hélice que se recomienda para el riego de los lechos de compostaje.

Figura F-11. Aspersor de Hélice



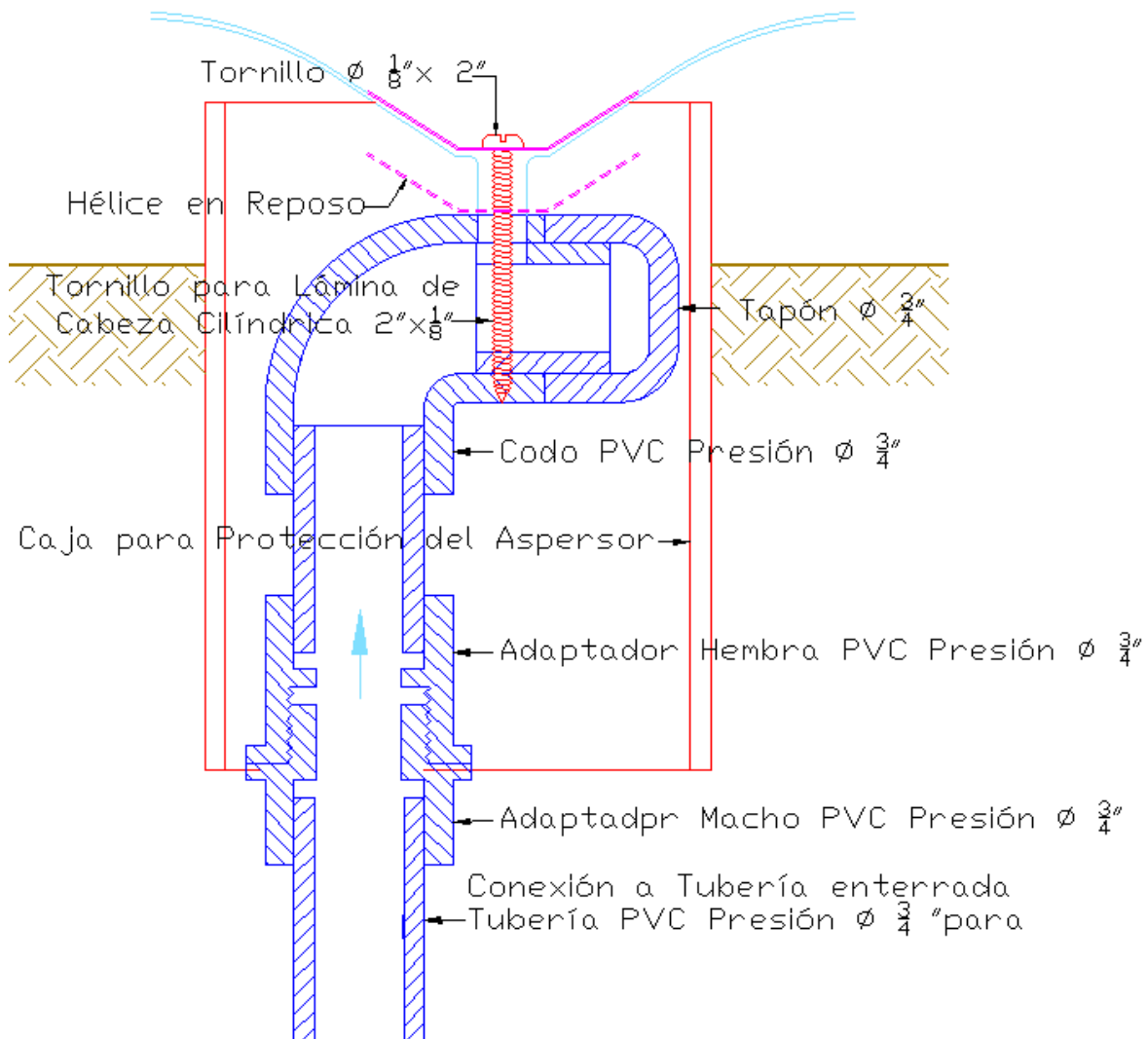
En el caso de aspersores que funcionan con presiones superiores, lo cual es necesario para el riego de plantas, el caudal aumenta proporcionalmente a la raíz cuadrada de la cabeza de presión. En este caso puede ser necesario aumentar el diámetro del aspersor, para que el espesor de la película de agua que sale de este se mantenga relativamente constante.

Figura F-12. - Aspersor de Hélice en Funcionamiento a Presión de Menos de 1 psi



Los aspersores de hélice que se utilizarían en sistemas de riego estarían ubicados sobre tubo vertical que conecte con una tubería enterrada, y se instalaría sobre un codo un codo y un tapón, de la forma que se indica en la Figura F-13. En este caso es importante colocar una caja que proteja la hélice. Cuando no está funcionando, dicha hélice descansa sobre el tubo, pero cuando éste se presuriza, ésta emerge.

Figura F-13. Conexión del Aspersor a una Tubería Enterrada



F-4. FORMALETAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE TANQUES Y ESTANQUES

Estas formaletas se diseñaron para la construcción estructuras de concreto que contienen aguas, tales como tanques, estanques y canales rectangulares de dimensiones medianas, que se utilizarían principalmente en zonas apartadas. En las zonas urbanas y sus alrededores, actualmente se tienen camiones mezcladores que suministran grandes volúmenes concreto en cada viaje, y por esa razón se utilizan generalmente formaletas de gran tamaño. En las zonas apartadas es más adecuado utilizar mezcladoras pequeñas, llamadas trompos. Con ellas se pueden construir los tanques y otras estructuras fundiendo el concreto por capas de volumen reducido. De esta forma se evitan las juntas frías verticales, que tienden a abrirse debido a la retracción de fraguado, creando vías para las filtraciones. Para eliminar las filtraciones se recomienda colocar cinta de PVC en las juntas horizontales. Los empates entre el muro y la placa de fondo se pueden sellar con la silicona especificada para juntas de tanques. Las formaletas utilizadas para fraguar el concreto por capas son livianas y económicas, puesto que las presiones que ejerce el concreto sobre ellas son reducidas.

Las formaletas para construir los muros por capas consisten en paneles hechos en lámina de acero, que se colocan a ambas caras del muro, y funcionan como formaletas deslizantes. Los paneles se amarran entre mediante 4 barras roscados de $\frac{1}{4}$ " de diámetro provistas de tuercas. Las dos barras inferiores se encuentran empotradas en el muro fraguado anteriormente, y soportan el peso de los paneles. Las otras dos barras amarran entre sí los paneles por su parte superior, para soportar la presión del concreto fresco. Allí se tienen tuercas interiores que fijan el espesor del muro. Luego del fraguado, se desenroscan todas las tuercas exteriores, y los paneles se trasladan hacia arriba, y entonces se repite el proceso anterior para fundir una nueva capa. En este traslado, las dos barras superiores, que han quedado empotradas en el concreto nuevo, sirven de soporte para los paneles de la nueva capa.

Las capas de concreto a fundir serían de altura reducida, con lo cual se disminuye la presión que ejerce sobre las formaletas. Por lo tanto éstas son más livianas y económicas que las utilizadas tradicionalmente, y pueden ser manipuladas manualmente por solo dos operarios. Las formaletas deslizantes utilizadas actualmente son armazones bastante grandes, que requieren ser movidos mediante equipos mecánicos.

La lámina de los paneles debe ser protegida contra la corrosión y la abrasión mediante el revestimiento adecuado, y su superficie debe ser lisa para facilitar el desencofrado. Para rigidizar el panel, se le un doblez a la lámina en uno de sus extremos., y se le adosan 3 ángulos soldados entre sí en forma de H, que se remachan a dicha lámina. Cada panel se traslapa sobre el panel de al lado en una distancia que varía para ajustar la longitud total del muro. Con las formaletas se puede fundir un tramo del muro de longitud y espesor variable, y con altura fija. El número de tramos determina la altura del muro. En el diseño presentado, los paneles se hacen con láminas de 1.20 x 2.40 m de área, recortadas en cuatro partes de 0.60 x 1.20 m. El traslapo recomendado es de 10 cm, de modo que la primera capa tiene 60 cm de altura, y las demás 50 cm.

Para fraguar la primera capa, la formaleta se fija a la placa utilizando ángulos de 3", que se adosan a la formaleta mediante tornillos. Cada ángulo se fija a la placa mediante tornillos. Para colocarlo, se hace una perforación en dicha placa a través de orificio ubicado en el ala horizontal del ángulo, se coloca un chazo, y luego el tornillo con su arandela.

Para fraguar las capas superiores se traslada esta formaleta hacia arriba, la cual se sujeta al muro existente utilizando las barras roscadas que quedaron empotradas en éste durante el fraguado anterior. Estas barras pasarían a través de las perforaciones inferiores de la formaleta, la cual quedaría sujeta a ellas mediante tuercas.

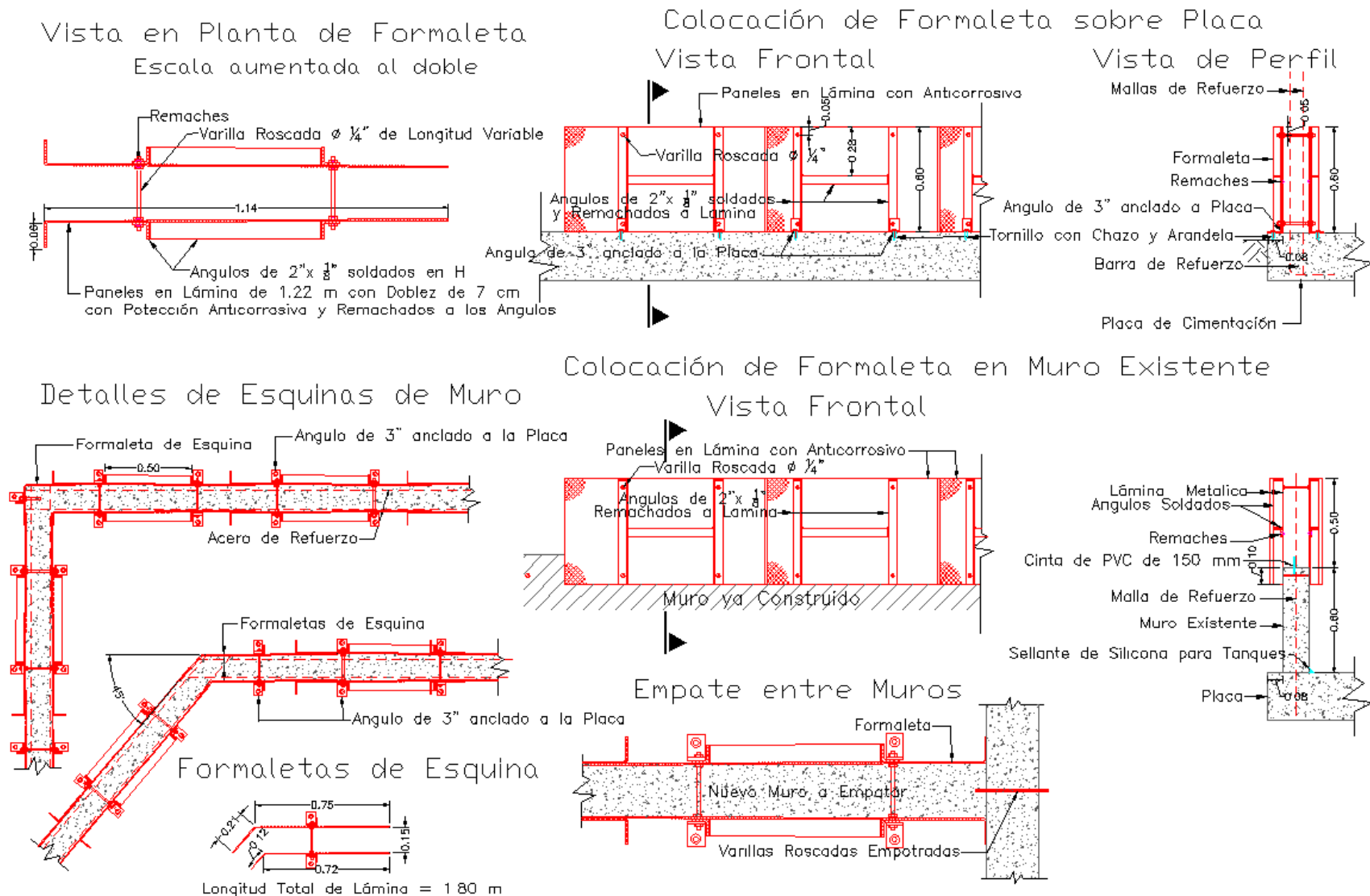
Los tornillos empotrados en los muros podrían extraerse. Para ello se les hace una ranura en la parte que sobresale del muro, y se utiliza un ángulo de acero a manera de destornillador para extraerlo, introduciendo una de sus alas en la ranura. Para facilitar esta operación, se pueden soldar dos perfiles en los extremos del ángulo, y perpendiculares a éste, con lo cual se podría ejercer el torque necesario. Para ello también es importante engrasar el tornillo antes su colocación.

Para conformar las esquinas a 90°, en la parte interior se colocarían las formaletas de tal forma que el doblez de un panel queda adyacente al panel siguiente. Para la conformación de la parte exterior, se utiliza una formaleta hecha con una lámina doblada a 90°, que se ubica dentro de los paneles adyacentes. Una de las caras de dicha lámina se encuentra remachada a un ángulo vertical provisto de perforaciones en su parte inferior y superior, similares de las de los ángulos verticales de las demás formaletas. Este ángulo se fija a la placa mediante un ángulo de 3", como se hace en los paneles. Una vez fraguada esta capa del muro, se traslada la formaleta hacia arriba para fraguar la otra capa. Esta formaleta se sostiene utilizando la barra roscada que ha quedado empotrados en la primera capa, la cual atraviesa la perforación inferior de dicha formaleta.

Para la construcción de los estanques octogonales para la acuicultura, que se describen en el Capítulo B-4 del Texto B, se necesitan paneles con dobleces a 45° especialmente diseñados para un espesor de muro. Los procesos de construcción de dichos estanques se muestran en las Figuras B-16 a B-18. Los tanques octogonales también son muy apropiados para el almacenamiento de agua, puesto que requieren menores áreas de muros, y estos se comportan mejor estructuralmente, puesto que la separación entre las esquinas es menor, lo cual reduce los momentos en el centro. La pendiente del fondo hacia el centro facilita la salida del agua. Los empalmes de los muros a 45° también pueden emplearse en el caso de muros para conformar lagunas de oxidación, o para elevar la profundidad de lagunas existentes, donde es necesario empalmar muros con ángulos diferentes al recto, para ajustarse a la forma en planta de estas lagunas.

También se pueden colocar muros divisorios entre dos muros paralelos. Se recomienda realizar los empates entre muros en los puntos donde afloran los tornillos empotrados. De esta forma, estos tornillos resisten las fuerzas cortantes ocasionadas por la presión sobre el nuevo muro. Los tornillos empotrados también pueden ser utilizados para fijar diversos elementos, tales como tuberías o escaleras. Todo lo anterior se muestran en la siguiente figura.

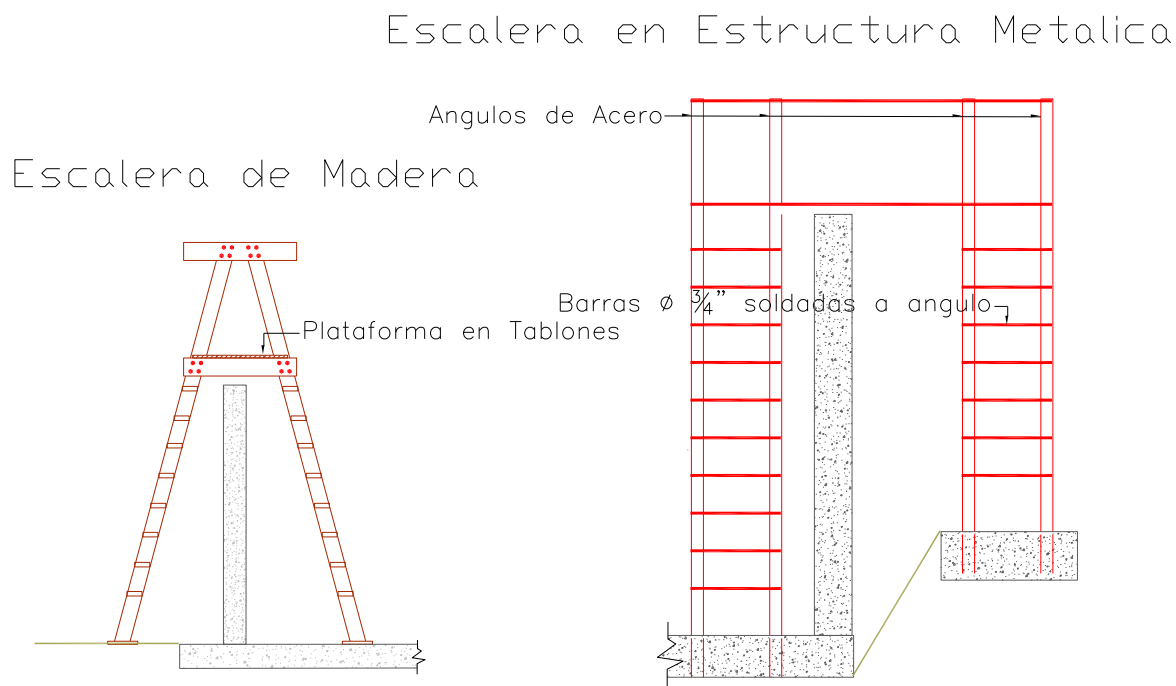
Figura F-14. Formaletas Metálicas para la Construcción de Tanques



El refuerzo más adecuado para los tanques son las mallas electrosoldadas de acero, que tienen unas dimensiones de 2.35 x 6 metros. En la base del muro, se dejan empotradas barras de acero en L para sostener las mallas, y también para tener un anclaje entre el muro a la placa, que tenga la resistencia a la flexión adecuada. Esta resistencia es crítica para resistir las presiones del agua o del suelo a los que se ven sometidos los muros de los tanques.

Con el objeto de facilitar el acceso al interior del tanque o estanque, se puede usar una escalera de madera en forma de A, con una plataforma en su parte superior para facilitar el tránsito a través de ella. Esta escalera es portátil, lo cual es muy útil cuando se construyen varios tanques. También podrían utilizarse escaleras verticales fijas hechas con barras de hierro soldadas, cuya base se encuentran empotrada en concreto. En su parte superior, las escaleras tendrían dos barras de hierro horizontales, para permitir el desplazamiento de las personas entre ellas, como se indica en la figura siguiente. Estas escaleras pueden permanecer para facilitar su operación y mantenimiento.

Figura F-15. - Escaleras para Acceso al Interior del Tanque.



La utilización de muros para conformar lagunas de oxidación o elevar su profundidad puede ser una solución más económica que la excavación, que implica grandes movimientos de tierra y una mayor área, especialmente en lagunas de mayor extensión.

F-5. EQUIPOS PARA SISTEMAS CONDUCCIÓN

F-5.1. Tuberías

Las tuberías estas formadas por tubos y por accesorios que los conectan. La selección de los materiales y de otras características de estos elementos se hace considerando numerosos factores, tales como la degradación debida a las características del fluido a conducir, la resistencia mecánica que se debe tener de acuerdo a las presiones máximas, y las deflexiones que puedan ocurrir, entre otras.

Uno de los aspectos más importante de las tuberías son las pérdidas de cabeza hidráulica. En el caso de los tubos, estas pérdidas se deben esencialmente a la rugosidad de las paredes, que dependen del material de la tubería, sus procesos de fabricación, y al deterioro de la superficie. Para la determinación de las pérdidas en los tubos se utilizan generalmente dos métodos. Uno de ellos se basa en la ecuación de Darcy-Weisbach, que se encuentra a continuación.

$$hf = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación F-5}$$

Donde:

D: Diámetro interno real de la tubería en metros

f = Coeficiente de fricción de Darcy

hf = Pérdida de altura debida a la fricción en metros

L = Longitud total de la tubería en metros

v = Velocidad media del flujo en metros por segundo

g = Aceleración de la gravedad en metros por segundo

El factor de fricción f se calcula con la siguiente ecuación , llamada de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10} \left(\frac{Ks}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación F-6}$$

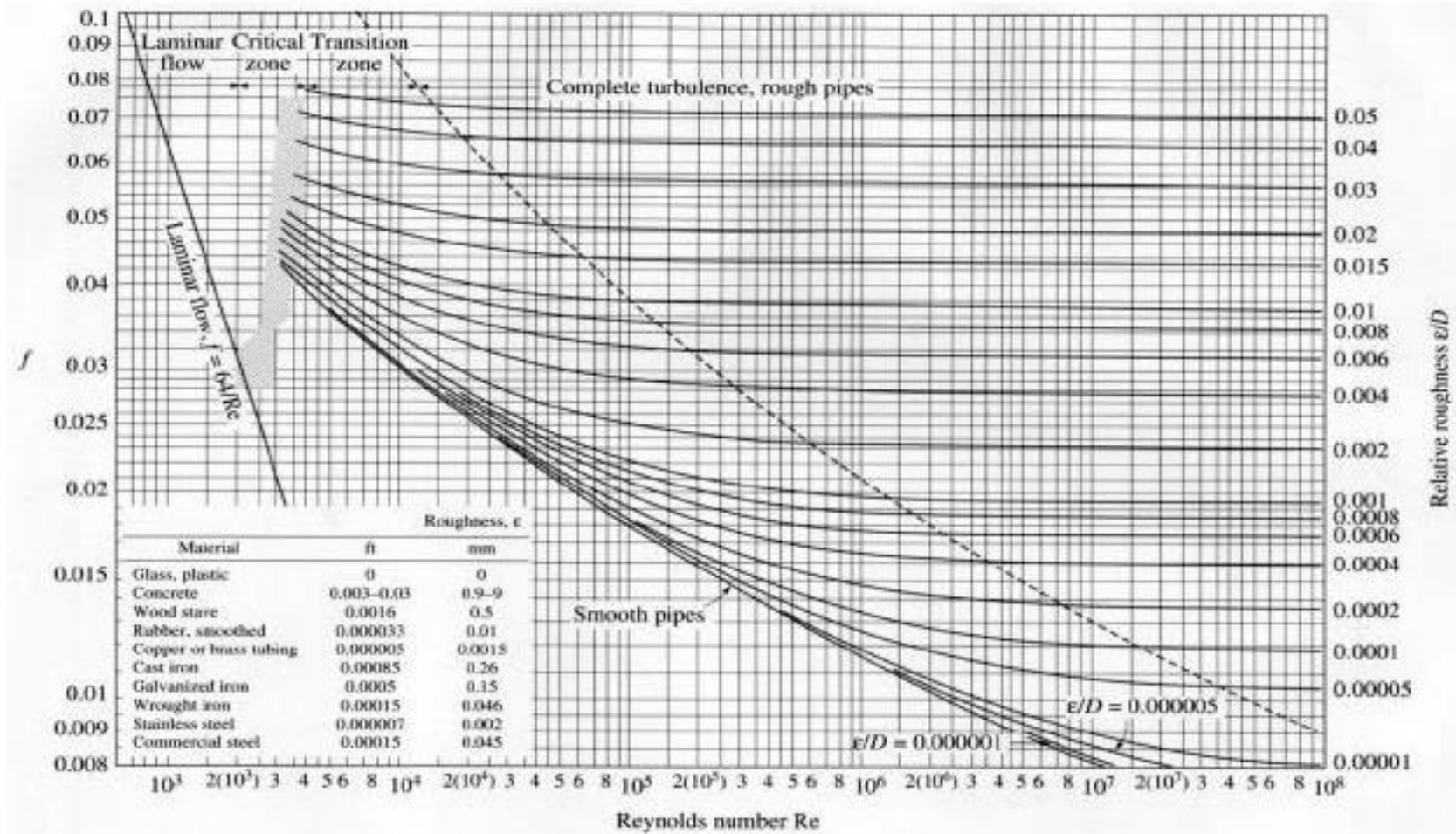
Donde:

ks = Rugosidad absoluta de la tubería en metros

Re = Número de Reynolds del flujo

El valor del coeficiente de fricción se puede calcular mediante el diagrama de Moody que se encuentra en la figura a continuación.

Figura F-16. Diagrama de Moody



La ecuación de Darcy-Weisbach es válida para el agua en todas las condiciones. Sin embargo, debido a la dificultad de calcular el coeficiente de fricción f , en muchas ocasiones se prefiere la ecuación de Hazen Williams, que se encuentra a continuación.

$$Q = 0.2785 C_{HW} D^{2.63} S^{0.54} \quad \text{Ecuación F-7}$$

Donde:

Q : Caudal en m^3/sg

C_{HW} : Coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams

D : Diámetro de la tubería en metros

S : Pendiente de pérdidas en la tubería.

La ecuación para calcular las pérdidas hf en una tubería de longitud L en metros que da de la siguiente formula:

$$hf = 10.672 \frac{L}{D^{4.871}} \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.852} \quad \text{Ecuación F-8}$$

En un estudio de CIACUA realizado por Rafael A. Flechas⁹ se comparó la precisión de la ecuación de Hazen Williams con la de Darcy-Weisbach en la estimación de las pérdidas de cabeza en tubería de gran diámetro. En dicho estudio se encontró que, cuando se utiliza la ecuación de Hazen-Williams, las tuberías de acero, con coeficientes C_{HW} de 120, sobreestima las pérdidas en un 40%, mientras que en las tuberías de CCP (concreto con cilindro de acero), con coeficiente C_{HW} de 120, la sobreestima en 20%. En el caso de las tuberías de GRP (de polyester reforzado con fibra de vidrio), cuyo C_{HW} es de 150, se presenta una subestimación menor del 10%, y por lo tanto la ecuación de Hazen-Williams se considera adecuada. En el estudio se recomienda utilizar solo la ecuación de Darcy-Weisbach en el cálculo de tuberías de gran diámetro.

En el caso de los accesorios, las pérdidas de cabeza hf se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$hf = Km \times \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación F-9}$$

⁹ Rafael A. Flechas. "EFECTO DEL USO DE LA ECUACIÓN DE DARCY-WEISBACH VS LA ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS EN EL DISEÑO DE REDES MATRICES". Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de Los Andes –CIACUA. 1.992. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/11544>.

Donde K_m es un coeficiente de pérdidas, que depende de la geometría, y V la velocidad del flujo.

En la siguiente Tabla se encuentran los coeficientes de pérdidas recomendados en los accesorios para tuberías más comunes.

Tabla F-3. Coeficientes de Pérdidas en Accesorios

Accesorio	K_m
Válvula de globo, completamente abierta	10.0
Válvula de mariposa, completamente abierta	5.0
Válvula de cheque, completamente abierta	2.5
Válvula de compuerta, completamente abierta	0.2
Codo de radio corto	0.9
Codo de radio medio	0.8
Codo de gran radio	0.6
Codo de 45°	0.4
Te, en sentido recto	0.3
Te, a través de la salida lateral	1.8
Unión	0.3
Ye de 45°, en sentido recto	0.3
Ye de 45°, salida lateral	0.8
Entrada recta a tope	0.5
Entrada con boca acampanada	0.1
Entrada con tubo entrante	0.9
Salida	1.0

Fuente: Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS. Título B

F-5.2. Dispositivos para el Control de Caudales

La información de las diversas clases de válvulas de control y su utilización se puede encontrar en un documento de CED Engineering¹⁰. De acuerdo a este documento, las válvulas más utilizadas para el control del caudal son las siguientes:

¹⁰ Continuing Education and Development, Inc. CED Engineering. "Control Valve Basics: Sizing and Selection Course No: M04-034".

<https://www.cedengineering.com/userfiles/Control%20Valves%20Basics%20-%20Sizing%20&%20Selection.pdf>

- Válvulas de Bola.

Figura F-17



Fuente: CED Engineering. Ref. F-10

Son apropiadas tanto para el corte del flujo como para el control de éste. Las pérdidas de cabeza de la válvula abierta son reducidas. Pueden tener diámetros entre $\frac{1}{2}$ " y 12", pero normalmente no exceden las 4", puesto que se requiere mucha fuerza para operar diámetros mayores. Son de cierre muy rápido porque esto requiera rotar la bola solo 45°, y por esta razón, con ellas es difícil controlar el caudal con precisión.

- Válvulas de Mariposa

Figura F-18.

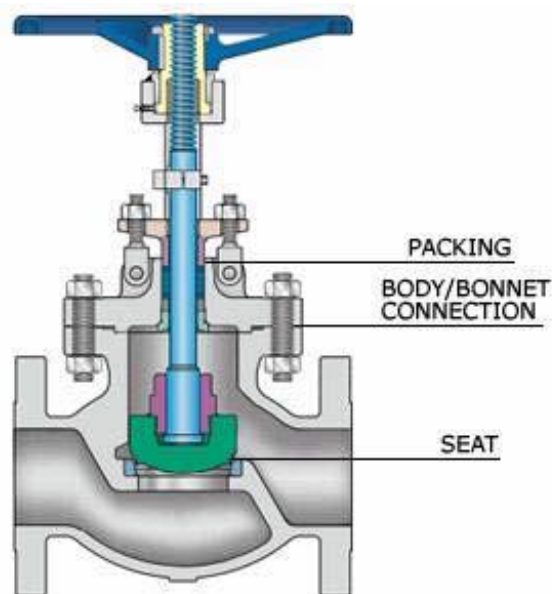


Fuente: CED Engineering. Ref. F-10

Esta válvula también se utiliza tanto para el corte como para el control del flujo, y sus pérdidas de cabeza son reducidas. Generalmente tiene diámetros entre 8" y 48". A diferencia de la válvula de bola, se puede regular la apertura de manera fina, y por lo tanto es más apropiada para el control del caudal.

- Válvulas de Globo

Figura F-19.

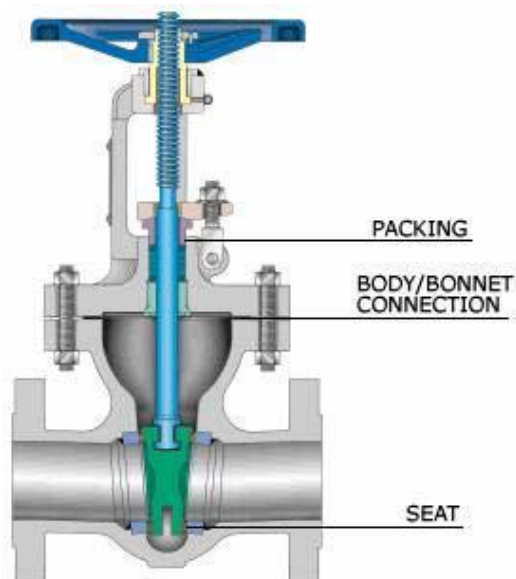


Fuente: CED Engineering. Ref. F-10

Son válvulas muy apropiadas para control del caudal, pues facilitan una regulación precisa de éste. Producen pérdidas de cabeza apreciables, y no se utilizan para corte del flujo. Generalmente se consiguen entre ½" y 8".

- Válvulas de Compuerta

Figura F-20.



Fuente: CED Engineering. Ref. F-10

Se utilizan principalmente como válvulas para el corte del flujo (válvulas de paso), puesto que ocasionan bajas pérdidas de cabeza. Se encuentran en todos los diámetros a partir de 2". Las válvulas se pueden operar manualmente, o mediante actuadores, cuyo mecanismo puede ser operado mediante sistemas eléctricos o neumáticos. Los actuadores facilitan el control automático o inteligente de los caudales mediante sistemas de programación, y la operación remota de las válvulas.

F-5.3. Rejillas Triangulares para Entradas a Tuberías

Las rejillas a la entrada de las tuberías tienen por objeto de prevenir la entrada de elementos gruesos que puedan obstruirlas, y además ocasionar daños en las bombas. Sin embargo, dichas rejillas tienden a obstruirse por elementos que quedan atrapados en ellas, lo cual aumenta las pérdidas de cabeza hidráulica y reduce la NPSH disponible (ver Numeral F-5.5.1), lo cual ocasiona el riesgo de cavitación en la bomba. Las rejillas disponibles en el mercado por lo general tienen un área para entrada del agua muy reducida, que no solo se obstruye con mucha facilidad, sino que en condiciones normales ocasionan altas pérdidas de cabeza. La limpieza de estas rejillas es muy difícil, especialmente en casos en que no se puede bajar el nivel del agua en el lugar donde se encuentran.

Para superar estas dificultades, en Increagua se ha desarrollado una rejilla triangular, la cual tiene un área de entrada del flujo bastante grande, y que podría ser limpiada fácilmente estando sumergida. Esta rejilla está constituida por paneles inclinados a 45°, que está formados por un marco metálico que sostiene una malla plástica o de acero inoxidable. Estos paneles pueden estar fijados al piso y a una pared del tanque. También existe la posibilidad de tener dos paneles fijados entre sí por su parte superior, y al piso en su parte inferior, lo cual permite que puedan ser conectados a tuberías de mayor diámetro que tengan mayor capacidad de flujo, y que además puedan ser ubicados lejos de las paredes.

En sus extremos, los paneles pueden estar fijados a láminas metálicas triangulares, o al muro del tanque. En una de estas láminas se conecta la tubería de salida, o la válvula de cheque horizontal, de la cual parte la succión cuando se tiene bombeo. Estas conexiones se hacen mediante una brida. Los módulos formados por los paneles también se pueden conectar entre sí, para formar una rejilla doble con mayor longitud y capacidad de flujo. En su parte inferior, los paneles están sujetos al piso del tanque, mientras que en su parte superior pueden estar sujetos al muro, o a otro panel para conformar una rejilla doble. Estos diseños se muestran en la Figura F-21 a continuación.

En el caso de rejillas sencillas que se apoyan en la pared, el diseño contempla tener láminas HR triangulares de 0.50 m de lado acopladas a los extremos de éstas. Los paneles se fijan a la pared y al piso, como se observa en la Figura F-26 a continuación. Este diseño serviría para válvulas de cheque de hasta 4". Las rejillas dobles, que se apoyan totalmente en el piso, están conformadas por dos paneles unidos por su parte superior, con dos láminas de 1 m de hipotenusa atornillados en sus extremos. En este caso el diámetro de las válvulas puede ser de hasta 6". En el caso de tuberías de succión de 8", se puede tener una te de este diámetro que conecte dicha tubería con dos rejillas provistas de válvulas de cheque de 6".

La rejilla triangular sencilla o doble también se puede colocar sobre una salida de fondo del tanque. En este caso se deberán colocar laminas HR triangulares en los dos extremos. Otra posibilidad que se tiene es la de conectar dos bombas a los costados de una sola rejilla.

En los casos de bombeo hacia sistemas de aireación por chorros emergidos o por boquillas de tubo transversal, se recomienda que las rejillas triangulares estén provistas de mallas de polietileno de alta densidad con aperturas de 3 mm. Esta malla se conoce como malla

cafetera, que es muy resistente, y permite retener las partículas que pueden obstruir dichos sistemas aireación.

Las ventajas de la utilización de la rejilla triangular en los sistemas de bombeo son las siguientes:

- La estructura es muy simple y económica, y con ella se obtiene una gran área de rejilla para entrada del flujo, lo cual evita el riesgo de taponamiento, y además reduce las pérdidas de cabeza, e incrementa el NPSH disponible.
- La rejilla triangular se arma con dos componentes con diseños estandarizados, como son las láminas triangulares y los paneles con mallas de diferente apertura. Estos elementos se pueden apilar en espacios reducidos, lo cual facilita su almacenamiento y transporte. Se puede ajustar la capacidad de flujo requerida añadiendo módulos en serie, como se observa en la Figura F-26.
- La entrada del agua se encuentra a mayor profundidad, por lo cual se reduce el riesgo de entrada de aire
- La inclinación de la malla a 45° reduce el riesgo de taponamiento por flotantes, como son los plásticos, pues la fuerza de flotación trata de separarlos de la rejilla cuando no hay bombeo.
- Otra ventaja de la utilización de la rejilla triangular es que actúa como supresora de vórtices, pues sus mallas están colocadas sobre la entrada de la succión, e interceptan los posibles vórtices, lo cual evita su formación. Esto implica que se pueda tener en el tanque niveles muy bajos sin que se produzca la entrada de aire. La malla a través de la cual entra el agua tiene una gran área, y sus aberturas son reducidas. El flujo se distribuye en toda esta área, de modo que es improbable que se produzcan fuertes corrientes en el ingreso del agua a la succión de la bomba.

La malla de la rejilla triangular podría limpiarse fácilmente mediante una aspiradora hidráulica, similar al que se recomienda en el Capítulo F-1 para dragar el desarenador. Dicha aspiradora consistiría en un ducto conectado a una bomba autocebante mediante una manguera. En el extremo del ducto se encuentra una boquilla similar al de una aspiradora de aire, a través de la cual se succionan las partículas de la malla. La descarga de la bomba se haría a través de una manguera anillada conectada a una canasta flotante ubicada en el tanque donde se ubica la rejilla triangular. Esta canasta consistiría en una caja formada por ángulos soldados entre sí, a cuyos costados laterales se acoplan paneles de espuma de poliuretano, que actuarían como flotadores. El fondo, y los costados anterior y posterior de la canasta, estarían cubiertos por una malla de acero inoxidable sujeta a los ángulos, y la manguera de entrada se sujetaría a los ángulos de la parte superior de la caja.

Figura F-21 a). Rejilla Triangular Sencilla

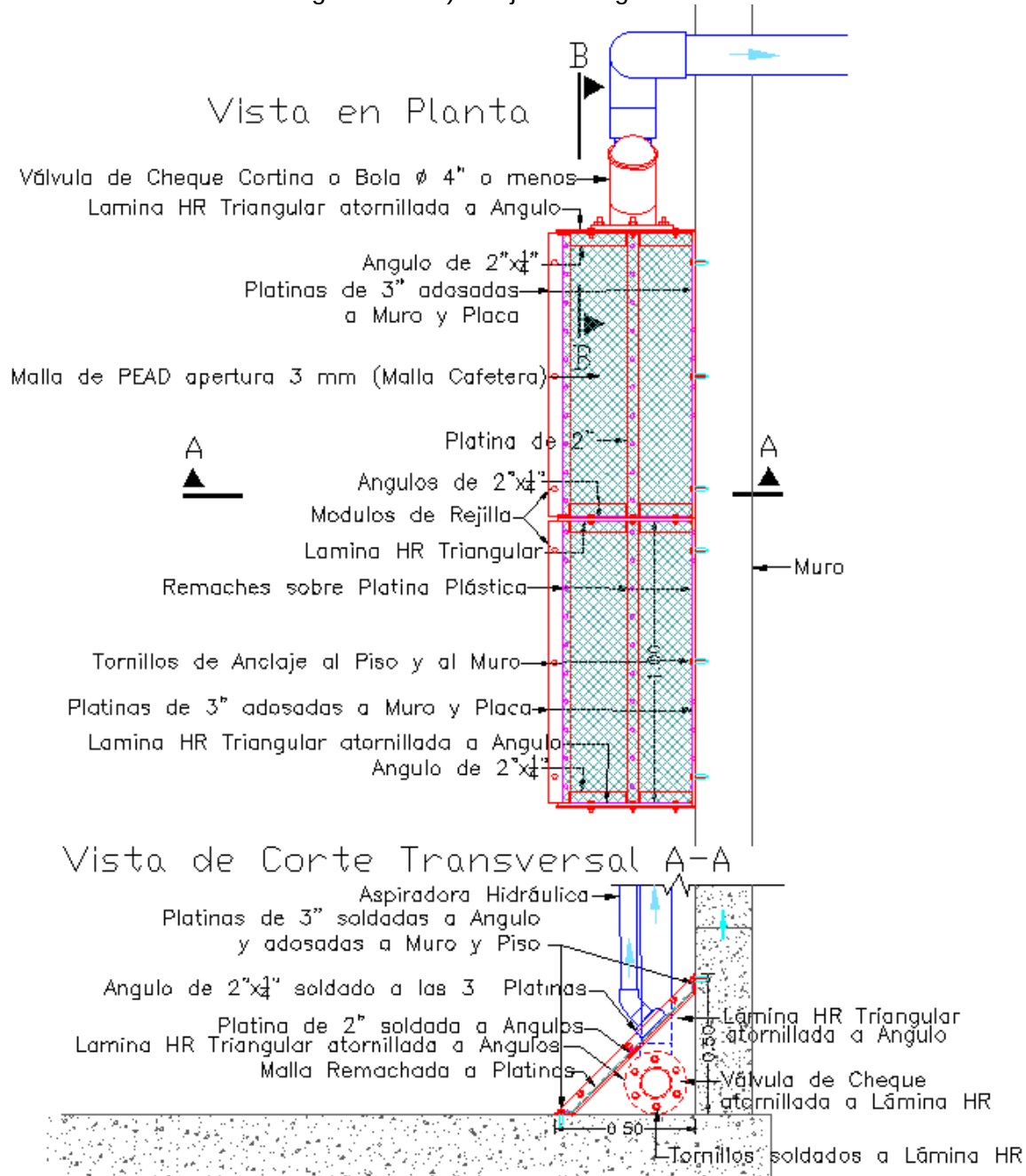
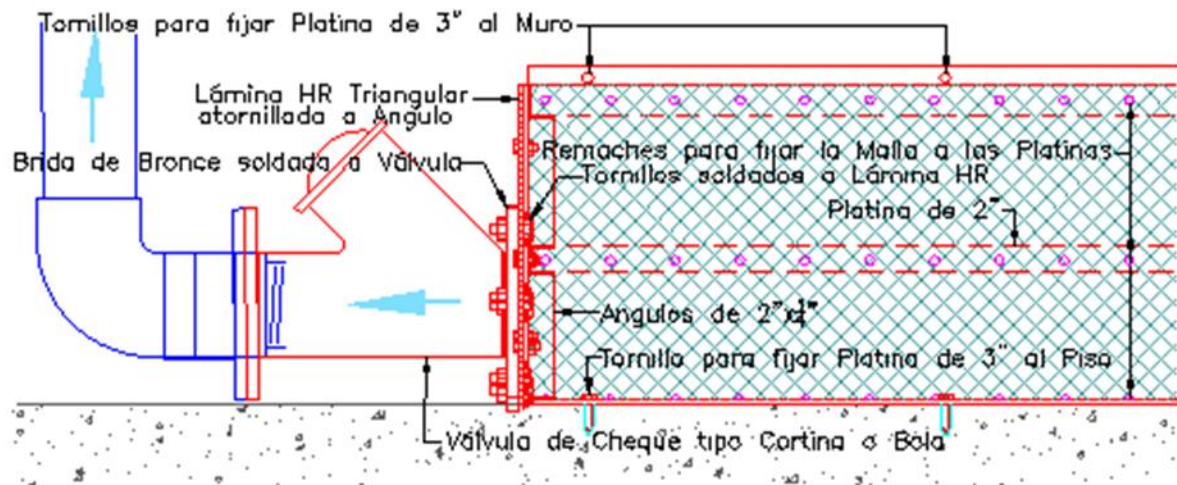
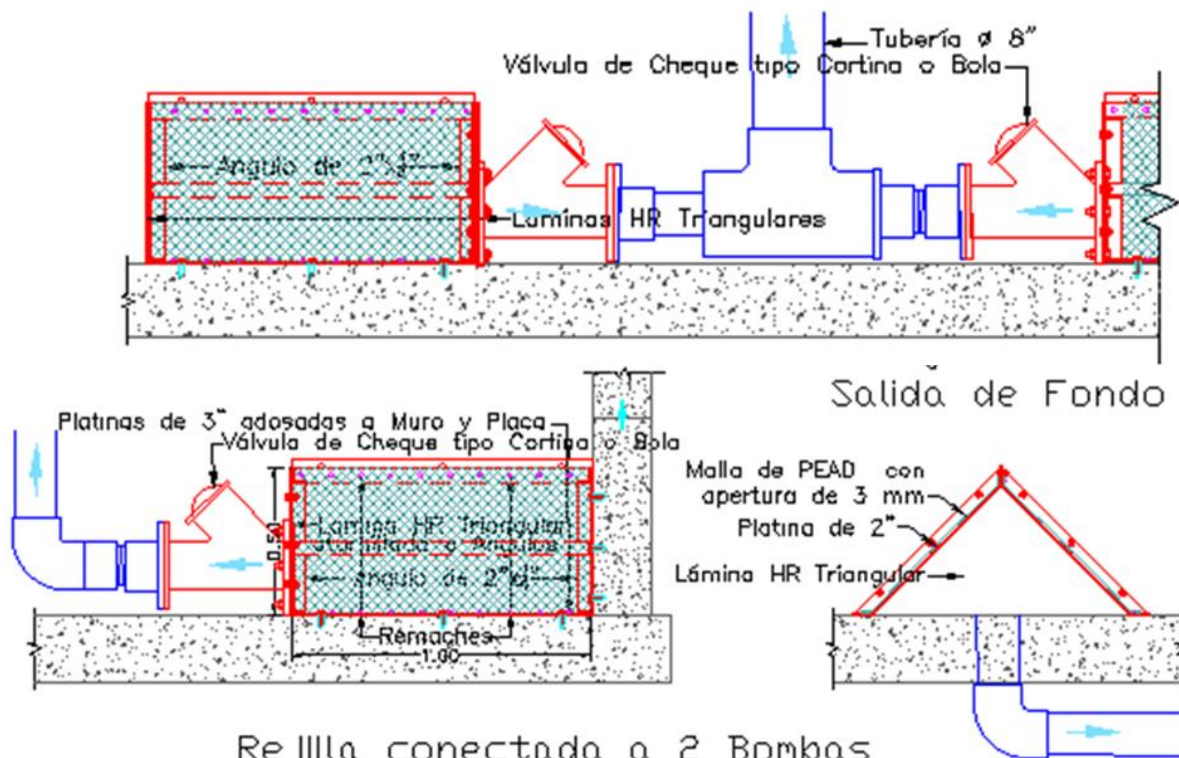


Figura F-21 b). Rejilla Triangular Doble



Rejillas para Succión con Diámetro de 8"



Rejilla conectada a 2 Bombas

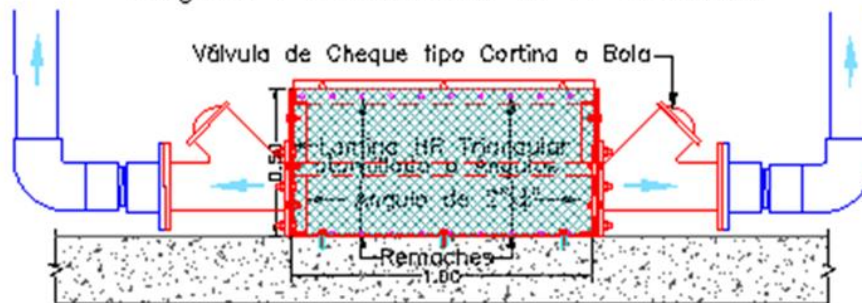
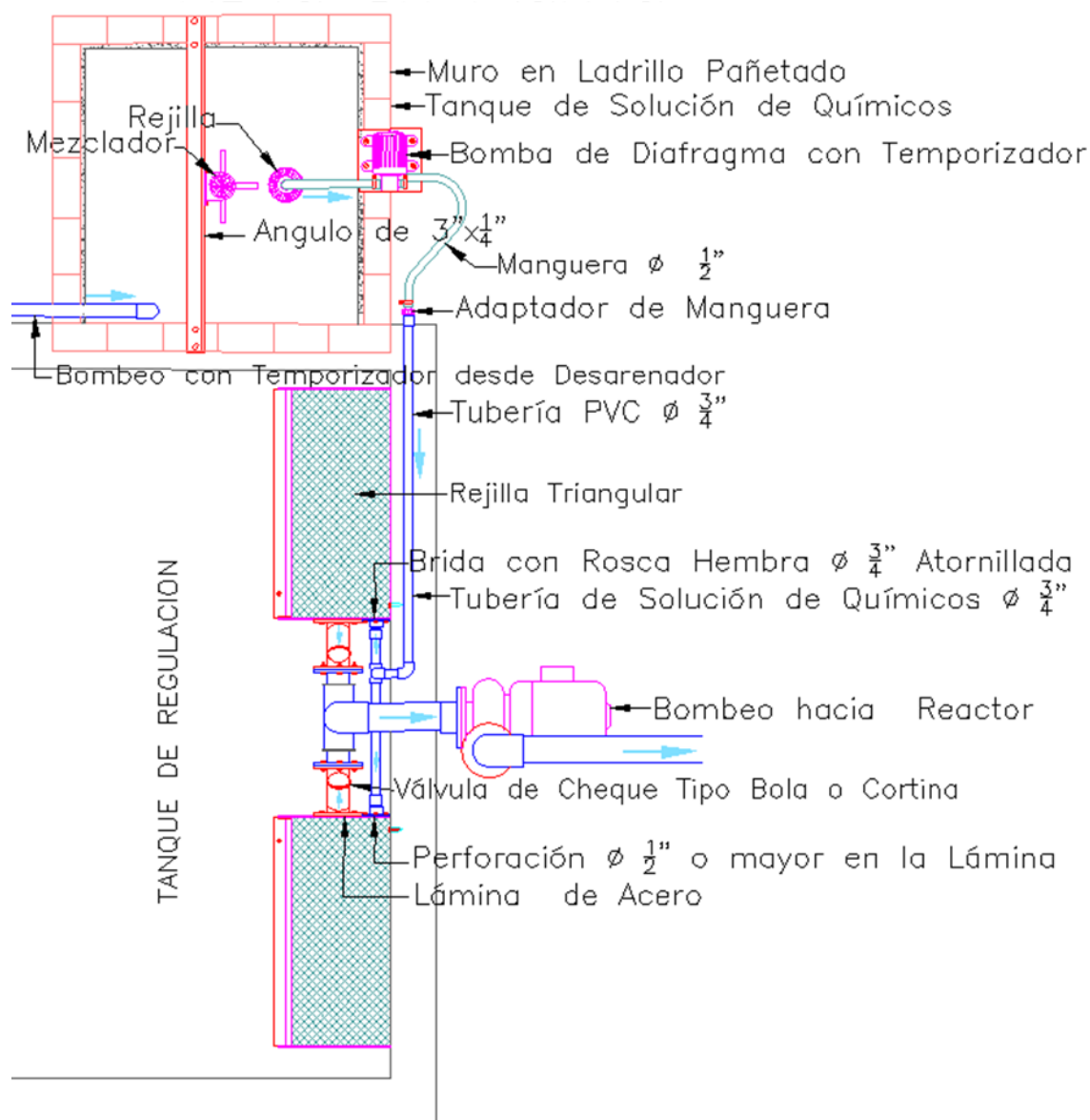


Figura F-22. Conexión del Sistema de Dosificación con la Rejilla Triangular-
 Vista en Planta



Vista de Corte Transversal



En las plantas de tratamiento es necesario añadir al agua reactivos tales como álcalis, coagulantes y floculantes. Como se indica en el Numeral D-8.10, el primer paso es mezclar dichos reactivos con un volumen determinado de agua en un tanque, donde se prepara una solución que tengan concentraciones determinadas de dichos reactivos. En las plantas de tratamiento, esa solución debe ser llevada a un reactor mediante una bomba dosificadora de diafragma, la cual opera por periodos controlados para entregar las dosis requeridas. La mejor forma de hacer este proceso, es llevar esta solución al interior de la rejilla triangular, mediante mangueras y tuberías que conecten la bomba dosificadora, con la placa triangular donde por donde sale el flujo hacia el reactor, como se observa en la Figura F-22. De esta manera, dicha solución es aspirada por la bomba que lleva el agua al reactor, y su rotor mezcla dicha agua con la solución. Esta mezcla luego es distribuida en el reactor, ya sea a través del sistema de aireación por chorros impulsado por el bombeo, o a través de tuberías perforadas. De esta forma se obtiene una mezcla homogénea de los reactivos con el agua, que es necesaria para los procesos que se llevan a cabo en el reactor.

La conexión de la bomba dosificadora con la rejilla se puede hacer mediante una manguera de tipo jardín de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, la cual se conecta con una tuberías de PVC de $\frac{3}{4}$ " mediante un adaptador macho. La conexión de esta tubería con la rejilla se hace utilizando una brida con rosca hembra para la tubería de $\frac{3}{4}$ ", que estaría acoplada a la misma lámina triangular por donde sale el agua de la rejilla. En dicha lámina se practica una perforación de $\frac{1}{2}$ " o mayor para facilitar el flujo de agua por la brida. Se puede conectar la manguera de $\frac{1}{2}$ " de diámetro directamente con la brida, sin utilizar tubería, mediante un adaptador de manguera, que tiene una roca macho de $\frac{3}{4}$ " que se conecta directamente a la brida roscada. En la Figura F-22 se aprecian dichas conexiones.

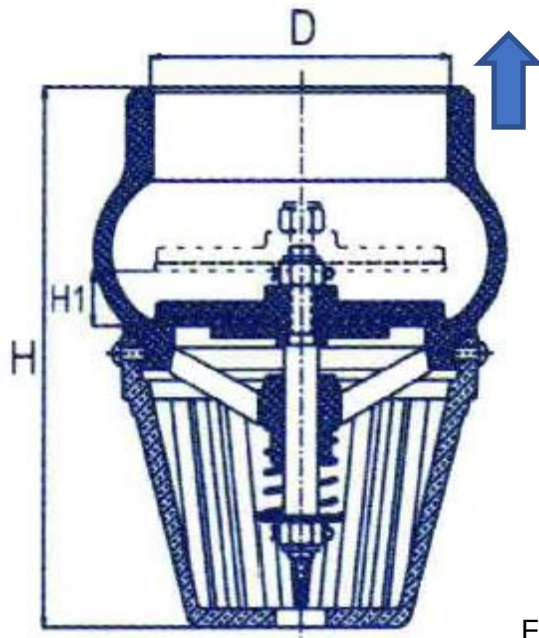
F-5.4. Válvulas de Cheque

Otra gran ventaja de la rejilla triangular que se trata en el Numeral F-5.3, es que facilita la utilización de válvulas de cheque horizontales de tipo cortina o bola, que son las más adecuadas para los sistemas de bombeo debido varios factores que se analizan a continuación.

La función de la válvula de cheque es hacer que el flujo solo pueda circular en una sola dirección, lo cual es necesario en la tubería de succión de una bomba, puesto que ésta generalmente se encuentra sobre el nivel del agua que bombea, y debe permanecer llena para que pueda operar de nuevo. Con este propósito, las válvulas de cheque cuentan con un elemento que cierra el flujo cuando el agua trata de retroceder. Los tipos de válvulas de cheque más utilizados se describen a continuación:

- **Válvula de Pie**

Figura F-23. Válvula de Pie



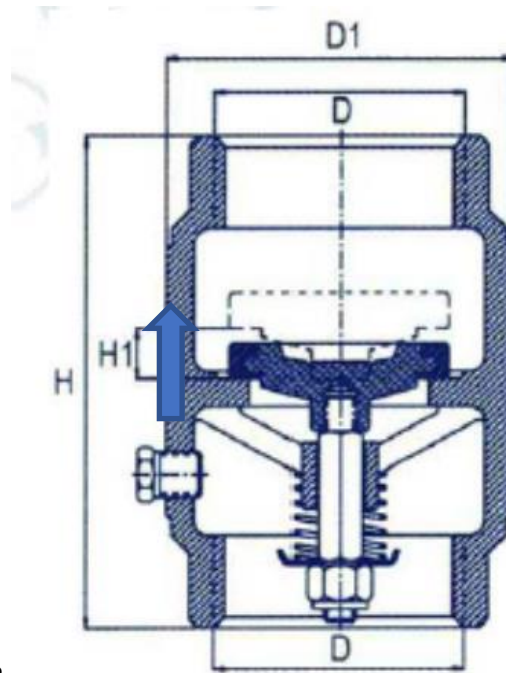
Fuente: Helbert & Cia Ref. F-12

La válvula de pie es la más utilizada en las tuberías de succión de las bombas. Esta válvula se coloca en posición vertical, y tienen una compuerta circular o plato que se mueve en sentido de flujo. Cuando no hay flujo, la compuerta se mantiene sobre su asiento, cerrando así la salida del agua hacia abajo. Cuando se activa el bombeo, el flujo hacia arriba levanta la compuerta, que es mantenida a cierta altura por soportes, mientras el flujo pasa alrededor de ella. La desviación abrupta del agua alrededor de la compuerta genera turbulencias y pérdidas de energía importantes. Cuando se suspende el flujo, se produce un retroceso de este flujo, y la compuerta cae sobre su asiento, produciendo un golpe llamado slam en inglés. Generalmente las válvulas de pie tienen un resorte adosado a la parte inferior de la compuerta, que está distendido durante el bombeo, y cuando este se suspende, amortigua el golpe sobre el asiento al comprimirse. Al reanudarse el bombeo, este resorte ejerce una fuerza hacia arriba, lo cual facilita la apertura total del plato, lo cual reduce las pérdidas de cabeza cuando se tienen caudales bajos, que sin ayuda del resorte no generan las fuerzas hidrodinámicas para abrir totalmente la válvula.

Las válvulas de pie generalmente vienen con una rejilla que evita la entrada de partículas gruesas a la bomba y a su sistema de distribución. Sin embargo, estas rejillas tienen áreas de flujo reducidas que suelen taponarse fácilmente, lo cual ocasiona bajas presiones en la bomba y los problemas de cavitación que pueden dañarla. La limpieza de la canastilla es muy difícil por su ubicación y su forma redondeada, que impide la utilización de rastrillos.

- **Válvula de Cheque tipo Hidro**

Figura F-24.

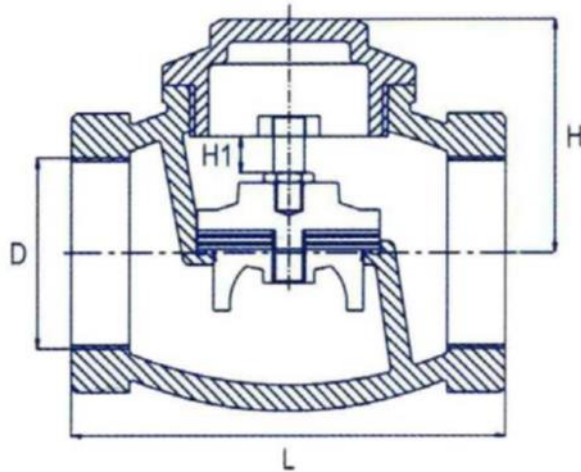


Fuente: Helbert & Cia Ref. F-12

Las válvulas tipo hidro tienen un diseño similar a las de pie, pero en este caso el flujo debe vencer la fuerza que impone el resorte interior, y cuando hay bombeo el resorte está extendido. Cuando se interrumpe el flujo, el resorte cierra la válvula rápidamente, lo cual impide el retroceso de éste, y el golpe sobre el asiento (slam), que produce ruidos. Por esta razón se les llama también 'silent valves'. Las válvulas tipo hidro se recomiendan en tuberías donde la presión hidrostática es alta, y el golpe de ariete es un problema. En la válvula de pie, la fuerza que la cierra es el peso del plato, y en la válvula hidro es el resorte. Dichas válvulas funcionan bien en posición tanto vertical como horizontal, puesto que el movimiento del plato no depende de la gravedad, como en el caso de la válvula de pie. En ambas válvulas se tienen altas pérdidas de cabeza, debido a que el flujo tiene grandes cambios de dirección al rodear el plato, pero en la válvula hidro las pérdidas son mayores debido a que se produce una contracción debido al escaso diámetro de ésta, y a que en la válvula de pie el resorte ayuda a abrirla, mientras que en la válvula hidro el resorte ejerce una fuerza que dificulta la apertura.

- **Válvula de Cheque tipo Globo**

Figura F-25

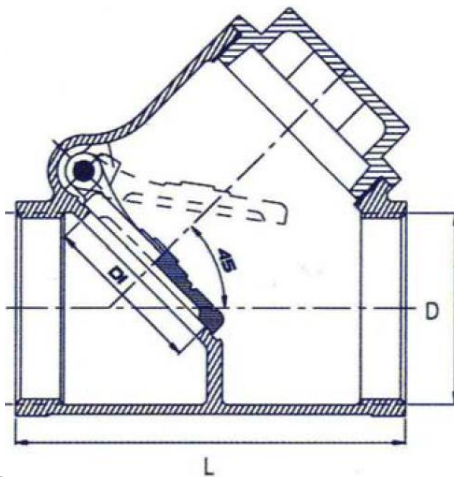


Fuente: Helbert & Cia Ref. F-12

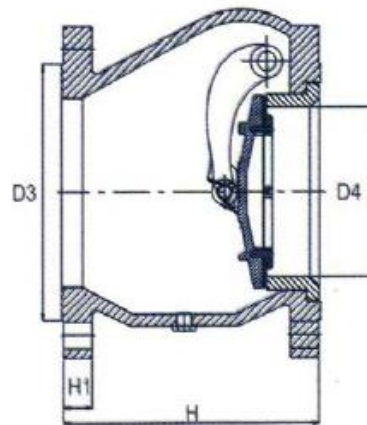
En esta válvula se encuentra una pantalla horizontal que la divide en dos cámaras. En ella se encuentra una abertura y una compuerta que abre o cierra el flujo a través de ésta, con un movimiento vertical. Cuando el flujo va en la dirección permitida, abre la compuerta levantándola, pero cuando éste retrocede la cierra. El flujo a través de la válvula tipo globo tiene cambios abruptos de dirección, lo cual genera bastante turbulencia y pérdidas de cabeza importantes.

- **Válvula de Cheque tipo Cortina (Swing Check Valve)**

Figuras F- 26



a) Plato inclinado

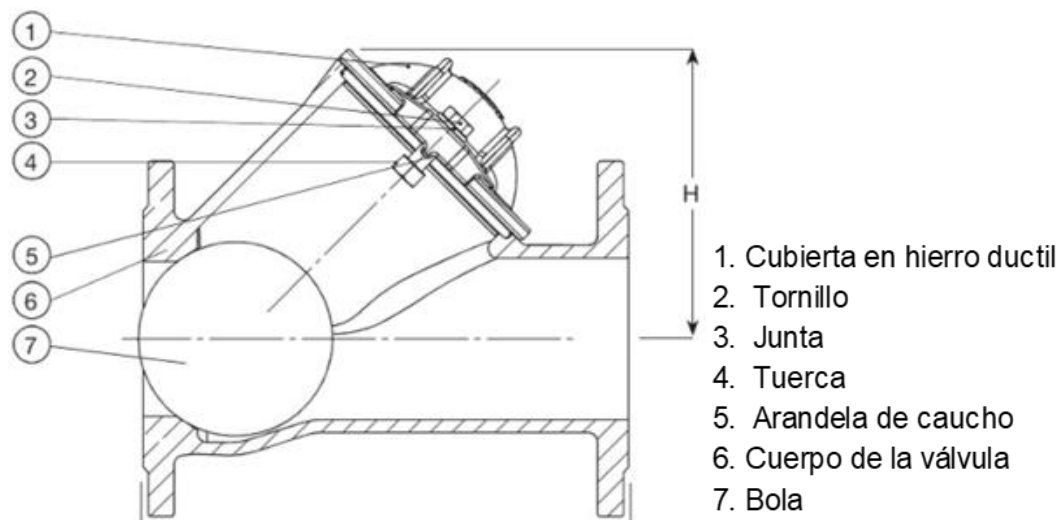


b) Plato vertical

Fuente: Helbert & Cia Ref. F-12

La válvula de cheque tipo cortina tiene en su interior un disco o plato que oscila alrededor de un eje ubicado en la parte superior, cerca de la entrada del flujo. Cuando entra dicho flujo, el disco es levantado hasta una cámara ubicada en la parte superior de la válvula. Esta válvula puede usarse de manera horizontal, o también inclinada siempre y cuando la cortina se cierre cuando se interrumpa flujo.

- **Válvula de Cheque tipo Bola** Figura F-27.



Fuente: AVK International A/S. Ref. F-16

Esta es una válvula similar a la de cortina, con la diferencia de que tiene una bola que reemplaza al plato, que es encauzada mediante guías inclinadas. Cuando al agua contiene partículas abrasivas, se recomienda que el caucho sea reemplazado por poliuretano. Cuando se activa el flujo en sentido correcto, es desplazada hacia arriba, y al suspenderse, el flujo en reversa lleva la bola hacia aguas abajo, y ésta tapona la válvula. En esta válvula también se produce el golpe contra el asiento al cerrarse, y sus pérdidas de cabeza son similares a las de la válvula tipo cortina. Las válvulas de cheque de tipos bola y cortina se recomienda para conducciones de aguas residuales debido a que los sólidos que arrastra el agua no dificulta su funcionamiento, como ocurre con las demás válvulas de cheque. El movimiento rotatorio que el flujo imprime a la bola de la válvula hace que dicha bola se limpie automáticamente.

En un estudio de Daniela Ivana Russi Russi¹¹ se hizo un análisis de válvulas de cheque tipo globo, hidro y cortina producidos por la firma Helbert & Cia¹². Las válvulas analizadas se encuentran en las figuras F-29, F-30 y F-31 a). En dicho análisis se concluye que el cheque tipo globo tiene un flujo bastante turbulento, que genera vibraciones cuando los caudales son muy altos, por lo cual se sugiere que sea utilizado solo con caudales bajos. Se recomienda la utilización de esta válvula solo en instalaciones de vapor o agua potable completamente pura, puesto que las partículas que contiene podrían obstruir el flujo. Debido a la distribución de las partes de su mecanismo interno solo puede utilizarse de manera horizontal. El cheque tipo hidro se recomienda solo cuando no contenga partículas sólidas

¹¹ Daniela Ivana Russi Russi. “Determinación Experimental del Coeficiente de Pérdidas Menores y el Comportamiento Hidráulico de Diferentes Válvulas Tipo Cheque usadas en Sistemas Internos de Distribución de Agua Potable”. Pontificia Universidad Javeriana, 2.015.

<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/21384/RussiRusiDanielaIvana2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

¹² Helbert & Cia Ltda. Catálogo Técnico Digital 2.019.

https://www.helbertcia.com/uploads/files/Catalogo_Tecnico_2019_Digital.pdf

muy grandes, debido a que su mecanismo interno puede ser obstruido por éstas. Estas conclusiones se podrían aplicar a las válvulas de pie, que tienen un funcionamiento similar.

En dicho estudio se indica que el cheque tipo cortina tiene el mecanismo más sencillo, donde no se generan vibraciones ni fallas. A diferencia de las válvulas hidro o de pie, en la válvula de cortina el flujo solo debe vencer parte del peso del plato, pues un extremo de éste se encuentra soportado por la articulación rotatoria, lo cual reduce las pérdidas de cabeza. Este cheque se utiliza en todo tipo de fluidos, y funciona bien cuando el agua trae partículas, pues éstas no afectan su funcionamiento, y no tiene zonas de flujo estrechas o muertas donde puedan acumularse. La válvula de cheque tipo bola tiene un desempeño y un coeficiente de pérdidas similares al de tipo cortina.

Un problema que ofrece el cheque tipo cortina o bola es que cuando se suspende el flujo, se puede producir un fuerte golpe del disco contra el asiento debido al retroceso del agua (en inglés slam), puesto que generalmente no tiene un resorte que lo amortigüe, como sucede con la válvula de pie y el cheque tipo hidro. Al cerrarse rápidamente la válvula, se produce un golpe de ariete en la tubería. Este golpe es proporcional al ángulo que describe el plato al cerrarse, puesto que con un mayor ángulo se tiene mayor tiempo de cerrado, y mayor velocidad del flujo en reversa. En la válvula tipo cortina de plato inclinado (Figura F-26 a), dicho plato gira 45° al cerrarse, y en la de plato vertical (Figura F-26 b) gira 90°, y por lo tanto puede ocasionar un mayor golpe de ariete. El golpe de ariete que se produce en la tubería, son proporcionales a la longitud de ésta, y a la presión hidrostática en la válvula. Dicha presión corresponde a la que se tiene cuando las tuberías están llenas y no hay flujo.

Otro aspecto por considerar en las válvulas de cheque es su pérdida de cabeza, la cual tiene implicaciones en el NPSH disponible (ver Numeral F-5.5.1). Las pérdidas de cabeza h_f en la válvula de cheque se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$h_f = K_v \times \frac{V^2}{2 \times g} \quad \text{Ecuación F-10}$$

Donde V es la velocidad media del flujo, g la aceleración de la gravedad, y K_v el coeficiente de pérdidas.

En las válvulas de plato inclinado (Figura F-26 a) ocurren variaciones en la sección de flujo y cambios importantes de su dirección, que pueden aumentar el valor de K_v . Esto no ocurre en la válvula de plato vertical (Figura F-26 b), que corresponde a la válvula de cheque cortina de hierro modelo HICH Serie 270 de Helbert & Cia, donde el flujo se mantiene poco perturbado por la válvula. Según un documento de Val Matic¹³, el coeficiente K_v de las válvulas de cheque corrientes (swing check valve) tiene un valor de alrededor de 1.6.

En los sistemas de bombeo se recomienda que las tuberías de succión tengan un diámetro mayor al de descarga, con el objeto de reducir las pérdidas de cabeza H_f de la y aumentar el NPSH disponible. Las válvulas tipo cortina de plato vertical de Helber tienen diámetros

¹³ Val Matic." Design and Selection of Check Valves. White Paper".
<https://www.valmatic.com/Portals/0/pdfs/DesignSelectionCheckValves.pdf>

entre 3 y 6 pulgadas, que corresponden a la mayor parte de los sistemas de bombeo requeridos en las plantas de el presente sitio Web. Estas válvulas tienen uniones bridadas que facilita su acople con las rejillas tratadas en el Numeral F-5.3.

En un documento de la la universidad de Purdue¹⁴ se recomienda adoptar una valor de Kv de 2 para las valvulas de cheque tipo cortina (en inglés swing check valves). Este valor es inferior al de 2.5 que se recomienda en la Tabla B 6.30 del Titulo B del Reglamento de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS para las válvulas de cheque (ver Tabla B-7). En las rejillas tratadas en el Numeral F-5.3, se deben tener en cuenta las pérdidas que ocurren en el codo de radio corto a la salida de éstas, que tienen un coeficiente Kv de 0.9 según la Tabla B 6.30 del Titulo B del RAS, y por lo tanto el valor total de Kv en lla rejilla queda en 2.9. Se considera que las perdidas de cabeza en la rejilla son bajas debido a la gran área de flujo que tiene. Cuando se utiliza malla cafetera de PEAD con aberturas de 3 mm, el área de flujo neta de cada panel es de 0.395 m². En la siguiente tabla se indica el coeficiente de pérdidas Kv en las rejillas de las válvulas de pie que se utilizan generalmente es los sistemas de bombeo, según el documento de J. Kepenyés (Ref. F-18).

Tabla F-4. Coeficiente Kv en las Válvulas de Pie

Velocidad m/sg	Coeficiente Kv
1	6,90
2	1,70
3	0,77
4	0,43

Fuente: J. Kepenyés. (Ref. F-18)

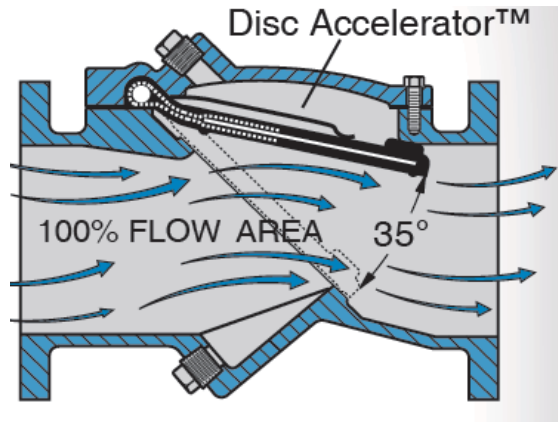
El coeficiente Kv de las válvulas de pie aumenta sustancialmente cuando se reduce la velocidad, debido a que el plato pesa bastante, y para levantarlo completamente se requiere una importante velocidad ascensional. Con bajas velocidades, el área de flujo es reducida y las pérdidas de cabeza muy altas. El resorte que tienen algunas válvulas reduce este efecto, pero puede aumentar el golpe de ariete, puesto que aumenta el tiempo de cierre. Para las válvulas de pie la OPS recomienda un valor de Kv de 1.75 (Ref. F-17) que se muestra en la Tabla F-10 del Numeral F-5.6.1.

Esto no ocurre en las válvulas tipo bola, puesto que tiene una densidad media ligeramente superior a la del agua, y la válvula queda totalmente abierta con una velocidad del agua de solo 0.5 m/s, como se indica en la Figura F-27. La firma Val Matic (Ref, F-13) desarrolló una válvula de cortina de plato inclinado denominada Surgebuster Swing Check, que perturba muy poco el flujo, y minimiza las pérdidas de cabeza hidráulica, debido a que disminuye el giro del plato a 35°, lo cual reduce el golpe de ariete. Esta válvula tiene un disco recubierto

¹⁴ Purdue University. "Pipe Flows – Head Losses. Lecture Note".
https://engineering.purdue.edu/~wassgren/teaching/ME30900/NotesAndReading/PipeFlows_Losses_LectureNotes.pdf.

en caucho, el cual forma una articulación que no gira alrededor de un eje, sino que se flexiona, lo cual reduce el tiempo de cerrado y el golpe de ariete, puesto que el caucho actúa como un resorte¹⁵. La ausencia de una articulación tipo bisagra reduce las labores de mantenimiento. Debido este tipo de articulación, la válvula se llama también “Resilient hinge check valve”, es español válvula de cheque de bisagra resiliente. En la siguiente figura se muestra dicha válvula.

Figura F-28. Válvula de Cheque tipo Cortina modelo Surgebuster de Val Matic.



Fuente: Val Matic Valve & Mfg. Corp. “Surgebuster Swing Check Brochure”.

https://www.valmatic.com/Portals/0/brochures/SBCV_Flyer.pdf

En la siguiente tabla se relaciona el coeficiente de perdidas Kv para diferentes tipos de válvulas de cheque con diámetro de 12”, de acuerdo al documento de Val Matic (Ref. F-13).

Tabla F-5. Valores del Coeficiente Kv para diferentes Válvulas de Cheque

Tipo de Válvula de Cheque	Coeficiente Kv
Hidro	3,00
Cortina	1,60
Bola	1,50
Resilient Hinge (Surgebuster)	0,80

Fuente: Val Matic Valve & Mfg. Tabla 4. Ref. F-13.

En la Figura F-29 a continuación se presentan la curvas de pérdidas de cabeza de las valvulas tipo Surgebuster de Val Matic, y en la Figura F-30 la curva correspondiente a las válvulas de bola de la firma AVK International A/S¹⁶.

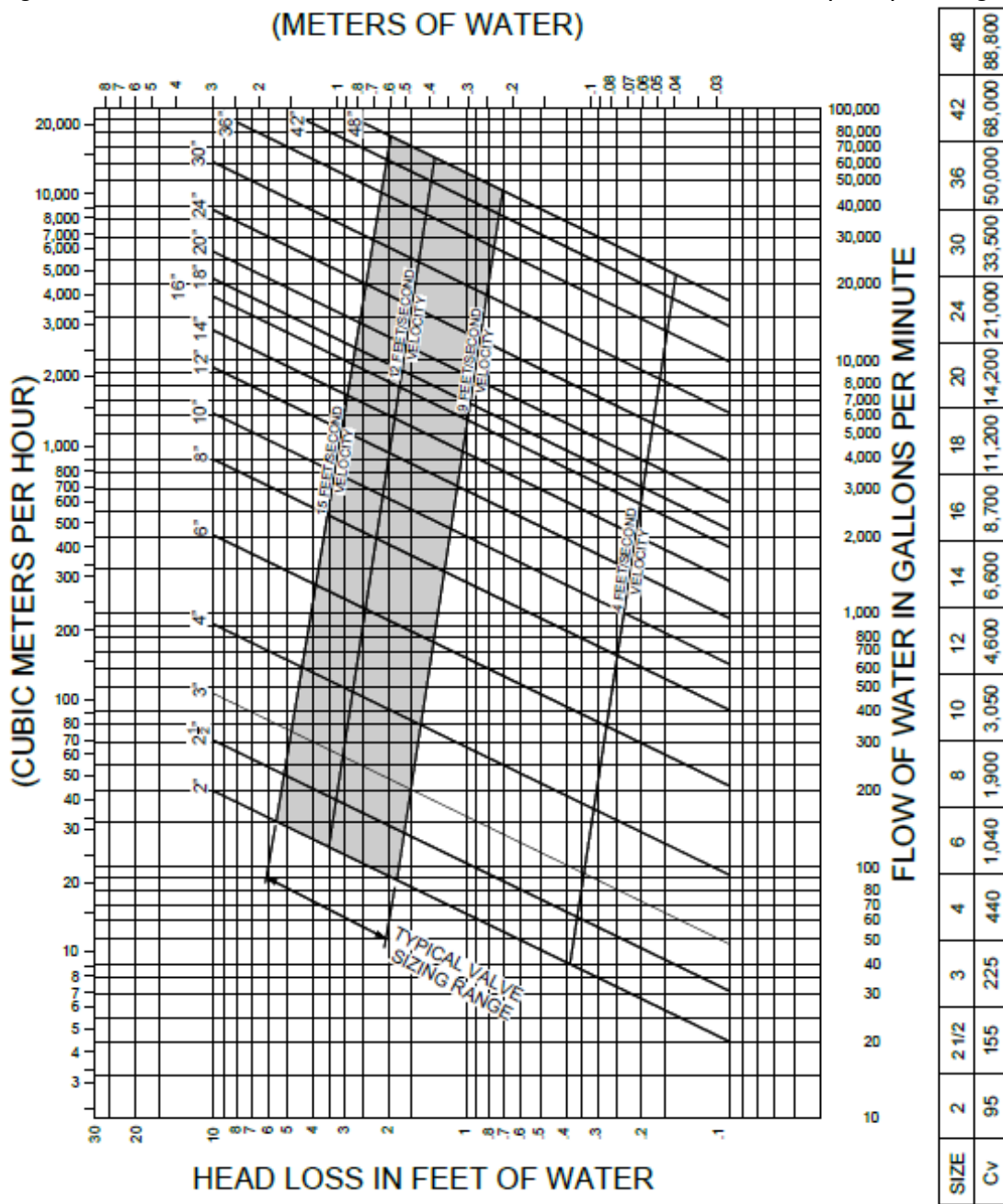
¹⁵ John V. Ballunn. “Trends in Waterworks Swing Check Valves”. Val-Matic. 2020.

<https://www.pumpsandsystems.com/trends-waterworks-swing-check-valves>

¹⁶ AVK International A/S. “AVK ball check valve, flanged, PN10”.

<https://www.avkvalves.eu/en/product-finder/check-valves/ball-check-valves/53-35-003>

Figura F-29. Curvas de Perdidas de Cabeza en Válvulas de Cheque tipo Surgebuster
 (METERS OF WATER)

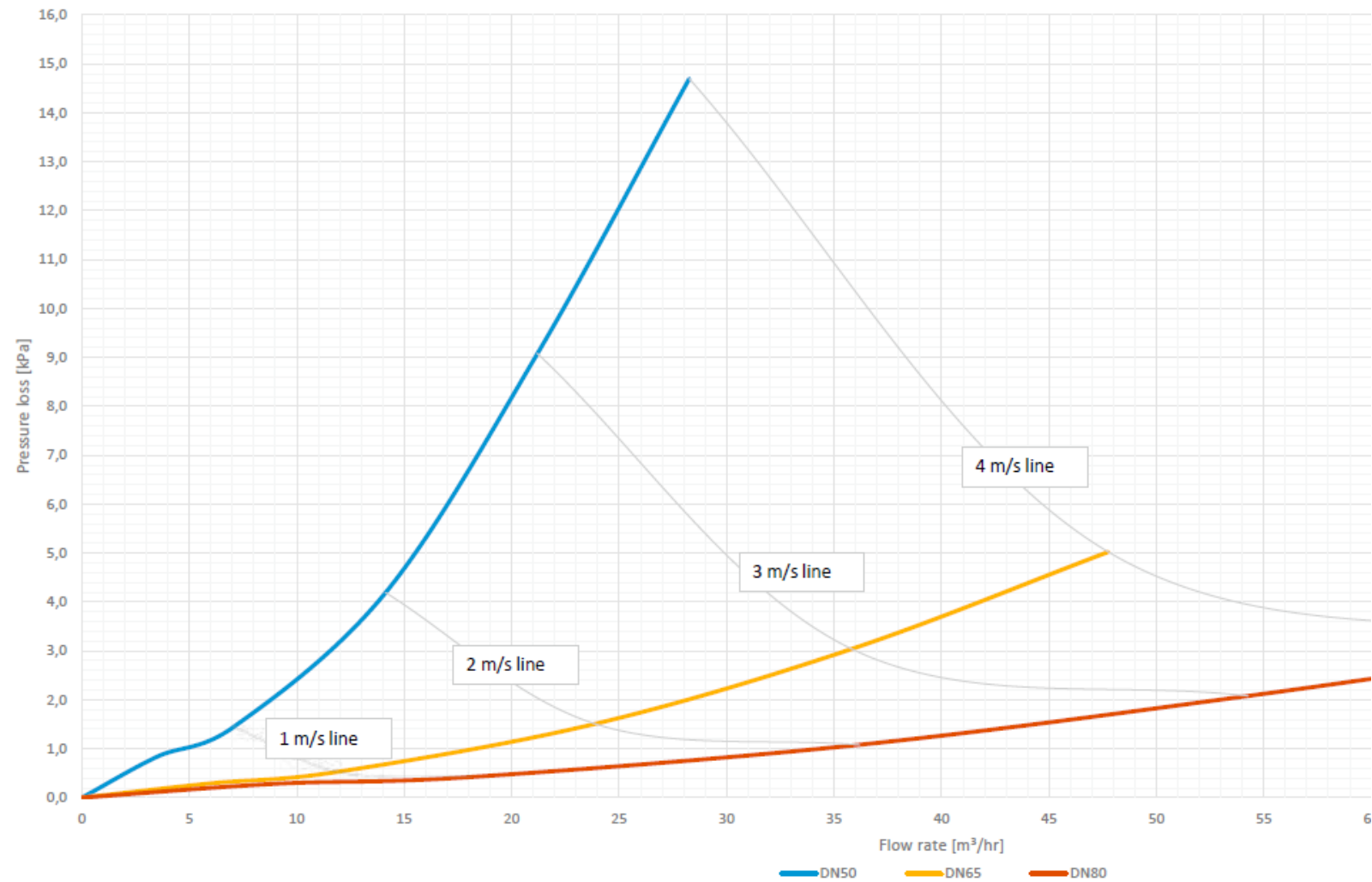


HEAD LOSS CHART FOR SURGEBUSTER CHECK VALVES		Revised 9-12-17
 VAL-MATIC® VALVE AND MANUFACTURING CORP.		DATE 8-18-06
		DRWG. NO. SS-2196

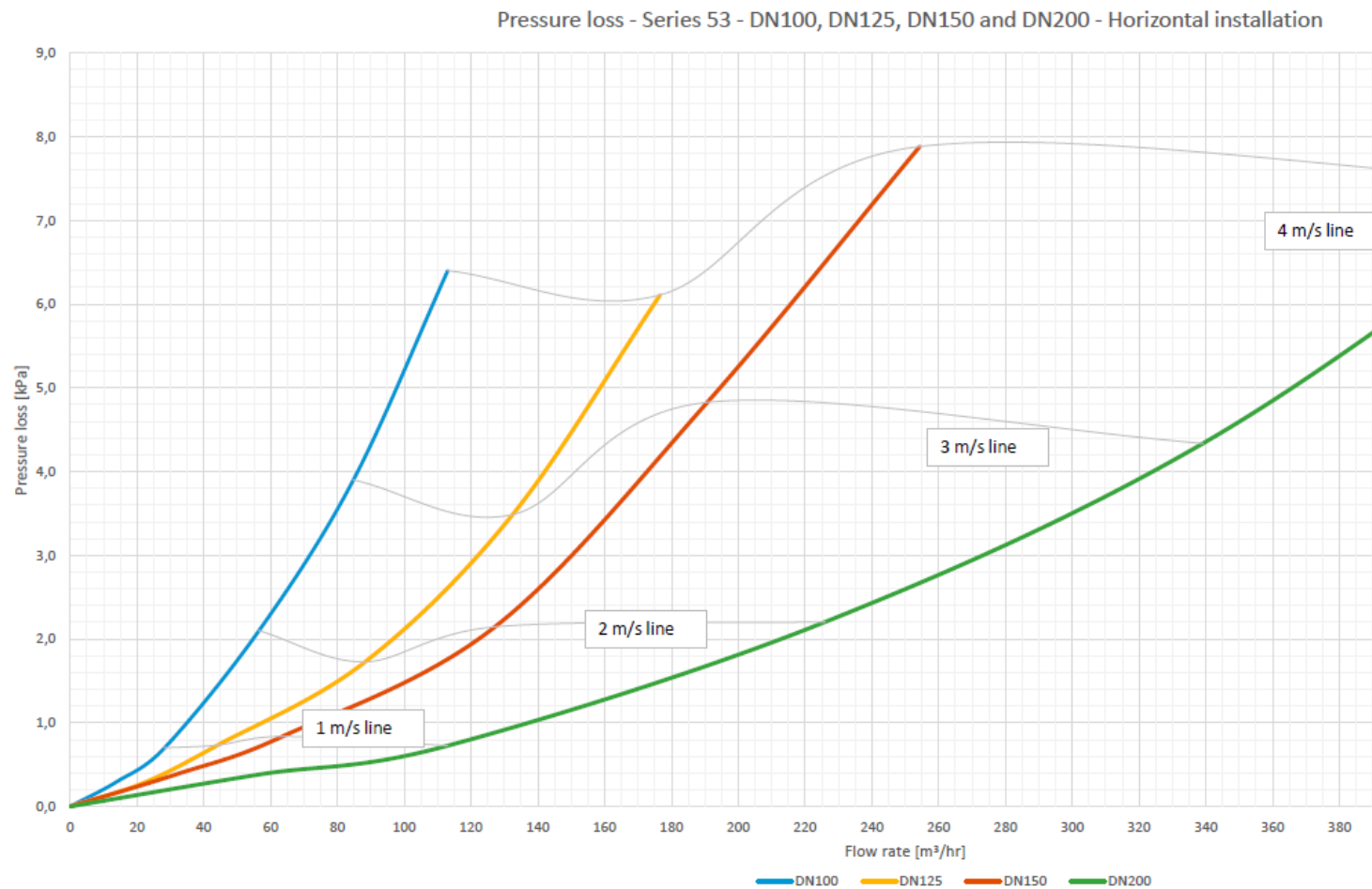
Fuente: Val Matic. https://www.valmatic.com/Portals/0/drawings/SS-2196_9-12-17.pdf

Figura F-30. Curvas de Perdidas de Cabeza en Válvulas de Cheque tipo Bola

Pressure loss - Series 53 - DN50, DN65 and DN80 - Horizontal installation



These curves are based on tests, performed according to EN1267, with a horizontal installation.
All ball check valves are fully open at approx. 0,5m/s.



These curves are based on tests, performed according to EN1267, with a horizontal installation.
All ball check valves are fully open at approx. 0,5m/s.

Fuente: AVK International A/S. Ref. F-16. <https://www.avkvalves.eu/en/product-finder/check-valves/ball-check-valves/53-35-003#:~:text=Pressure loss 53 Horizontal Installation DN50-300.pdf>

A partir de las gráficas de pérdidas de cabeza en las válvulas Surgebuster y de bola se realizó el cálculo de el coeficiente de pérdidas Kv, que se aprecia en la siguiente Tabla.

Tabla F-6. Cálculos de los Coeficientes de Pérdidas Kv en Válvulas de Cheque

Velocidad en la Tubería de 1 m/s

Diametro pg	Caudal m3/hora	Válvula Resilient Hinge o Surgebuster		Válvula de Bola		
		Pérdidas hf m	Coeficiente Kv	Pérdidas hf		Coeficiente Kv
				kPa	m	
2	7,3	0,077	1,51	1,40	0,143	2,80
2,5	11,4	0,062	1,22	0,60	0,061	1,20
3	16,4	0,061	1,20	0,42	0,043	0,84
4	29,2	0,060	1,18	0,74	0,075	1,48
6	65,6	0,057	1,12	0,80	0,082	1,60
8	116,7	0,040	0,78	0,78	0,080	1,56

Velocidad en la Tubería de 2 m/s

Diametro pg	Caudal m3/hora	Válvula Resilient Hinge o Surgebuster		Válvula de Bola		
		Pérdidas hf m	Coeficiente Kv	Pérdidas hf		Coeficiente Kv
				kPa	m	
2	14,6	0,330	1,62	4,19	0,427	2,09
2,5	22,8	0,320	1,57	1,70	0,173	0,85
3	32,8	0,310	1,52	2,00	0,204	1,00
4	58,3	0,250	1,23	2,05	0,209	1,02
6	131,3	0,240	1,18	2,08	0,212	1,04
8	233,4	0,160	0,78	2,2	0,224	1,10

Velocidad en la Tubería de 3 m/s

Diametro pg	Caudal m3/hora	Válvula Resilient Hinge o		Válvula de Bola		
		Pérdidas hf m	Coeficiente Kv	Pérdidas hf		Coeficiente Kv
				kPa	m	
2	21,9	0,630	12,35	9,10	0,928	2,02
2,5	34,2	0,610	11,96	3,20	0,326	0,71
3	49,2	0,600	11,76	3,20	0,326	0,71
4	87,5	0,490	9,60	6,40	0,653	1,42
6	196,9	0,460	9,02	7,90	0,806	1,75
8	350,1	0,450	8,82	8,4	0,857	1,87

De acuerdo a la tabla anterior, en el rango de velocidad recomendado de 1 a 2 m/s en la tubería de succión, y para diámetros entre 2 ½" a 6", la válvula de bola es bastante competitiva frente a la de tipo Surgebuster. Estos son los diámetros que se consideran en las rejillas triangulares que se tratan en el Numeral F 5.3. Estas válvulas tienen uniones bridadas que facilitan su acople a dichas rejillas. En las gráficas de la válvula de bola (Figura F-35) se indican las pérdidas de cada valvula para velocidades de 1 a 4 m/s. Uno de los aspectos a tener en cuenta es la alta perdida de cabeza en la válvula de bola de 2" de

diámetro, o sea DN50. Para cada velocidad, al aumentar el diámetro inicialmente las pérdidas se reducen y luego aumentan ligeramente.

En las guías de la OPS (Ref. F-17), para cada diámetro de la tubería de succión se recomienda tener una velocidad máxima de acuerdo a la siguiente Tabla. Allí se observa que la velocidad máxima recomendada es de 1.80 m/s, donde la válvula de bola de diámetro mayor a 2.5" tiene un coeficiente Kv de 1.48 o menos.

Tabla F-7 Velocidades y Caudales Máximos en Función del Diámetro de la Tubería de Succión

Diámetro mm	Velocidad m/s	Caudal Lps
50	0,75	1,5
75	1,10	4,9
100	1,30	10,2
150	1,45	25,6
200	1,60	50,2
250	1,60	78,5
300	1,70	120,1
400	1,80	226,1

Fuente: OPS (Ref. F-17), basado en el libro “Manual de Hidráulica” de Azevedo Netto

De acuerdo a lo anterior, el coeficiente Kv recomendado para las válvulas de bola es de 1.48, que es el valor máximo encontrado en el rango de velocidades de 1 a 2 m/s, que se recomienda para incrementar le NPSH disponible y evitar la entrada de aire en la tubería de succión (ver Numeral F-5.5.1). Dicho valor de Kv es conservativo, y considera la alta variabilidad de este parámetro.

En conclusión, se recomienda la utilización de válvulas de bola con diámetros de 2½" a 4", mostradas en la Figura F-27, y las de cortina de plato vertical con un diseño similar al que se muestra en la Figura F-26 b), que según su diseño, tendrían bajas pérdidas de energía. Ambos tipos de válvulas son las más económicas del mercado. Sin embargo, las válvulas de pie son bastante competitivas para velocidades cercanas a 2 m/s, y diámetros de 4" o mayores, siempre y cuando el agua no contenga sólidos gruesos que puedan obstruir la rejilla.

F-5.5. Sistemas de Bombeo

F-5.5.1. Estaciones de Bombeo

Las bombas son equipos de gran importancia en los proyectos hidráulicos, y su duración y desempeño depende de su adecuada selección, de las condiciones hidráulicas para su funcionamiento, principalmente a la entrada, y de las sustancias o elementos que puedan traer el agua. Por lo tanto, las estaciones de bombeo donde se utilizan deben tener un diseño adecuado, y además deben estar provistas de las estructuras y equipos necesarios para facilitar la operación, y contar con las actividades de monitoreo y mantenimiento

requeridas. En las guías de la OPS¹⁷ se encuentra un compendio sobre el diseño de estaciones de bombeo, y en un documento de J. Kepenyés se trata lo relativo al diseño de estaciones de bombeo¹⁸. En otro documento de Hamep¹⁹ se trata lo relativo a estaciones de bombeo de aguas residuales. Lo referente a las bombas, sus tipos y criterios de selección, se trata en un curso de la Academia Pumps Bombas²⁰.

A continuación se tratan los equipos y las estructuras más relevantes para los sistemas de bombeo planteados en el presente sitio web. En la entrada del agua a los sistemas de bombeo se encuentran frecuentemente dos elementos básicos, que son la rejilla en la entrada del agua a la tubería de succión, y la válvula de cheque que evita que la bomba se desocupe cuando se suspende en bombeo. Esto último es innecesario en bombas autocebantes o sumergibles. Tampoco se requieren válvulas de cheque los sistemas de bombeo de pozo seco, donde la bomba toma el agua de un tanque a través de una tubería que atraviesa la pared, y el nivel del tanque está sobre dicha bomba. Esto ocurre en los estanques de acuicultura que se tratan en el texto B.

Como se indica en el Numeral F-5.4, las válvulas de cheque recomendadas para los sistemas de bombeo son la de tipo bola o cortina, que tienen bajas pérdidas y precios económicos. Estas válvulas tardan en cerrarse, y cuando las tuberías tienen grandes longitudes o altas cabezas de presión hidrostática, el flujo en reversa produce un importante golpe de ariete (ver Numeral F-5.5.1). Por lo tanto, en ocasiones se requiere colocar aguas una cámara de aire arriba de la válvula de cheque para amortiguarlos. Esta solución se trata en el Numeral F-5.6.2 y se ilustra en la Figura F-42.

Uno de los parámetros importantes para el diseño de un sistema de bombeo es la altura de la bomba HB sobre el nivel del pozo, la cual está limitada por la NPSH disponible, por las siglas de Net Positive Suction Head, o sea cabeza neta positiva de succión que se encuentra disponible, la cual se calcula mediante la siguiente ecuación .

$$NPSH_d = H_{atm} - (H_v + H_f) \quad \text{Ecuación F-11}$$

Donde H_{atm} la presión atmosférica, H_v es la presión de vapor del agua, que es función de la temperatura, y H_f es la pérdida de cabeza en la succión (OPS, Ref. F-17).

Dicha cabeza debe ser inferior a la NPSHr requerida por el fabricante de la bomba para evitar riesgos de cavitación, que es la es la cabeza hidráulica sobre el eje del rodete. Esta cabeza es tomada en términos absolutos, e incluye la presión atmosférica. Este parámetro

¹⁷ OPS. “Guías para el Diseño de Estaciones de Bombeo de Agua Potable”. Lima, 2.005.
https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/OPS%202005b%20Guia%20dise%C3%B1o%20de%20bombeo.pdf

¹⁸ J. Kepenyés. “Chapter 16 Design of Pumping Stations”. FAO. Fish Culture Research Institute Szarvas, Hungary. <http://www.fao.org/3/X5744E/x5744e0h.htm#6.3%20resistance%20of%20foot%20valve>

¹⁹ Hamep. “Estaciones de Bombeo de Aguas Residuales”.
https://hamep.files.wordpress.com/2013/04/estaciones_de_bombeo.pdf

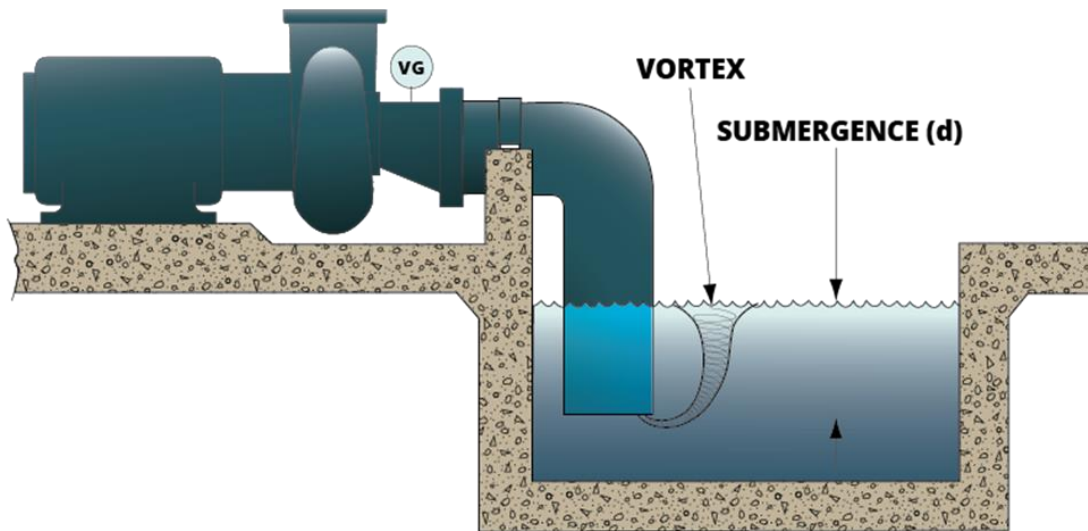
²⁰ Academia Pumps Bombas. “Lección 4- Tipos de bombas y sus características”.
<https://pumpsbombas.com/curso/curso-seleccion-de-bombas-centrifugas/leccion/tipos-bombas-sus-caracteristicas/>

depende de las características de la bomba y del caudal, y generalmente se encuentra en las curvas características cabeza - caudal proporcionadas por el fabricante.

Esta limitación hace que sea muy importante reducir las pérdidas de cabeza H_f en la succión de la bomba, las cuales ocurren principalmente en la rejilla y en la válvula de cheque que se colocan allí.

También se requiere que la entrada de la tubería de succión tenga una sumergencia suficiente para evitar la entrada de aire. Esta entrada se produce a través de vórtices, que son remolinos que arrastran aire. Este aire llega a la bomba en forma de burbujas, que producen efectos similares a las burbujas de vapor que ocasionan la cavitación. En la siguiente figura se aprecia este fenómeno.

Figura F-31. Entrada de Aire en la Succión de la Bomba a través de Vórtices



Fuente: Cornell Pump. "Proper Submergence of Inlet to Avoid Vortex".

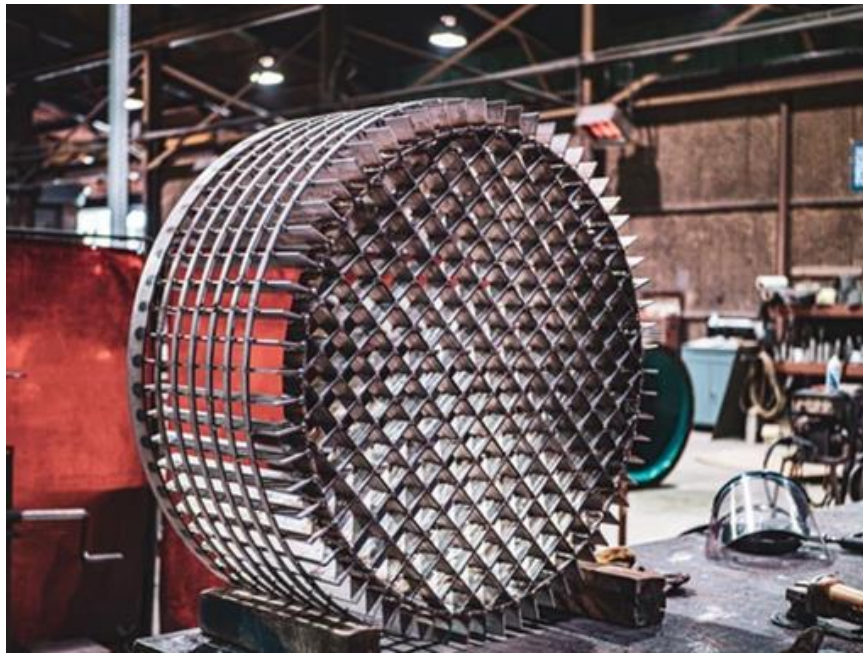
<https://cornellpump.com/proper-submergence-of-inlet-to-avoid-vortex/#:~:text=Vortexes%20form%20between%20the%20pump%20suction%20and%20in%20take,impeller%20can%20be%20damaged%20by%20the%20vortex%20condition.>

La formación de vórtices, que ocasionan la entrada de aire, se debe esencialmente a la escasa sumergencia de la entrada de la tubería de succión, y a la presencia de fuertes corrientes que llegan a dicha entrada. Para evitar dicha entrada de aire, se recomiendan las siguientes medidas:

- Reducir la velocidad a la entrada a la tubería de succión, lo cual se puede hacer colocando allí una campana, o aumentando el diámetro de dicha tubería. Esto último también reduce las pérdidas de cabeza en la válvula de cheque H_f de la Ecuación F-10, y de esta forma se aumenta el NPSH disponible.

- Realizar una aproximación uniforme del flujo, en el cual se eviten las corrientes. En un documento de Drilling Fluid org²¹ se analizan las configuraciones erróneas y las recomendadas a este respecto.
- Colocar dispositivos que eviten la rotación del agua cerca de la superficie, llamados supresores de vórtices, que consisten en dispositivos que interceptan el eje del vórtice, de tal forma que oponen resistencia al flujo circular que éste tiene. Entre los más utilizados se encuentran canastas y pantallas en malla, y las pantallas horizontales que se colocan sobre la entrada a la tubería de succión (ver Drilling Fluid org. Ref. F-21). Cuando la entrada a la tubería de succión se encuentra cerca al fondo, una buena medida para suprimir los vórtices es colocar en éste ranuras o parrillas que dificulten la rotación del flujo. En la figura a continuación se muestra un supresor de vórtices en forma de canasta, que combina una parrilla de fondo con pantallas alrededor de la tubería de succión.

Figura F-32. Supresor de Vórtices



Fuente: <https://smithpump.com/blogs/news/vane-grating-vortex-suppressors>

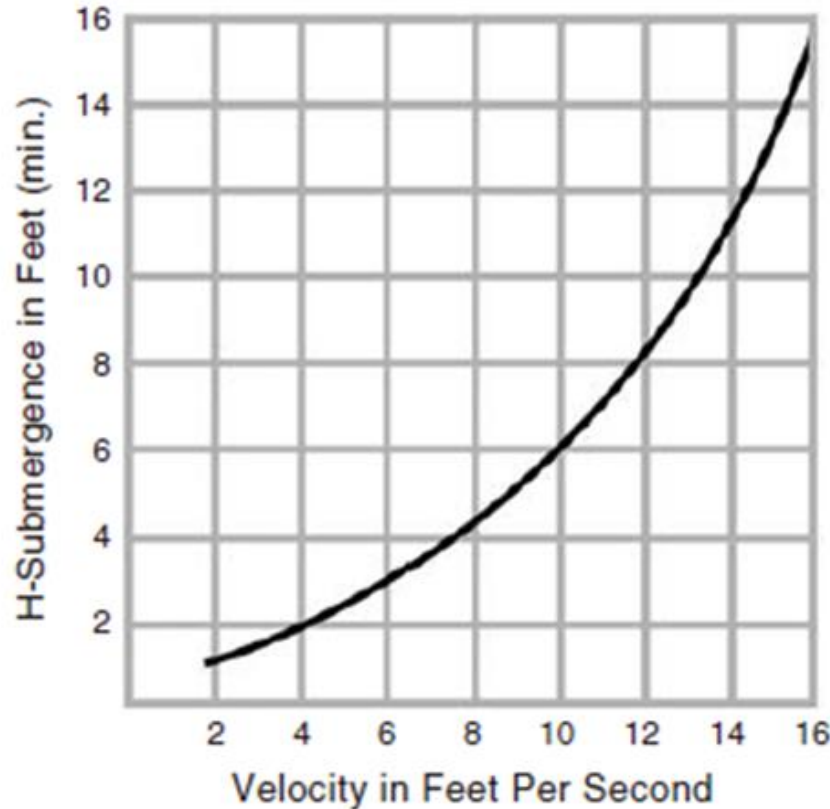
- Colocar en el tanque bolas flotantes, que son atraídas hacia los vórtices en formación, lo cual taponan la entrada de aire en éste y lo desactiva.
- Sumergir la entrada de la tubería de succión a la profundidad adecuada. La profundidad de sumergencia mínima que se recomienda para evitar la entrada de aire es función

²¹ DrillingFluid org. “Recommended Suction Pipe Configurations”. 2.017.

<https://drillingfluid.org/centrifugal-pumps/recommended-suction-pipe-configurations.html>

principalmente de la velocidad del flujo de entrada, como se aprecia en la siguiente figura.

Figura F-33. Sumergencia de la Tubería de Succión en Función de la Velocidad de Entrada



Fuente: Drilling Fluid org. Ref. F-21.

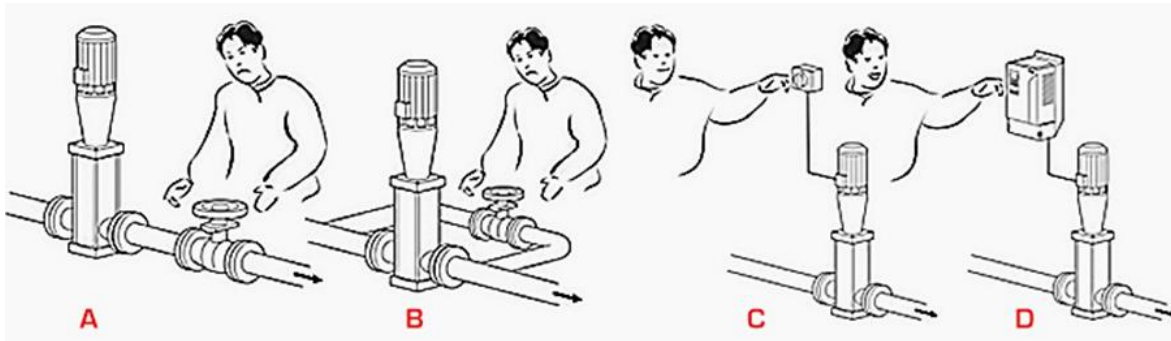
F-5.5.2. Control de Caudales de Bombeo

Los dos aspectos más importantes del control de los sistemas de bombeo es el ajuste de los caudales y volúmenes de agua que suministran, y la optimización del consumo de energía. En este control también deberán tenerse en cuenta limitaciones que se pueden tener tales como el tiempo máximo de bombeo diario de la bomba, las restricciones de la fuente donde se toma el agua, o la disponibilidad del servicio de energía.

De acuerdo con el documento de Edvard Csanyi²², el control del agua puede hacerse de 4 maneras, como se indica en la siguiente figura.

²² Edvard Csanyi . "Comparison of 4 Different Flow Control Methods Of Pumps". EEP Electrical Engineering Portal. 2.015. <https://electrical-engineering-portal.com/comparison-of-4-different-flow-control-methods-of-pumps>

Figura F-34. Métodos de Control del Caudal de Bombeo



- A- Estrangulamiento con Válvula (Throttling)
- B- Válvula en Bypass
- C- Control con Interruptor On -Off
- D- Control con Variador de Velocidad VDS

Fuente: Edvard Csanyi Ref. F-22.

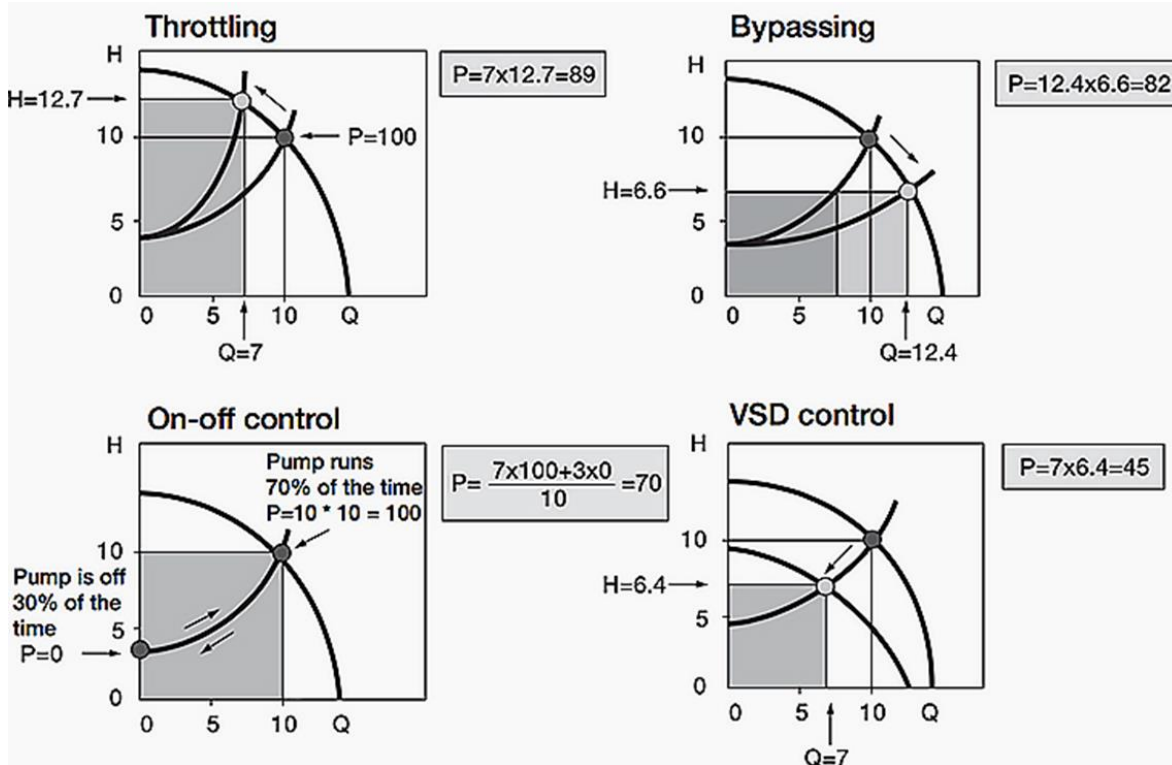
A. Válvula que estrangula el flujo a la salida de la bomba.

En este caso, la válvula proporciona una contracción regulada del área de flujo, y las consecuentes pérdidas de energía. Al cerrar la válvula, se reduce dicha área, y por lo tanto se reduce el caudal y se aumenta la cabeza de bombeo. Entonces el punto de operación se mueve hacia la izquierda en la curva característica de la bomba, como se aprecia en la Figura F-34. Asumiendo que con la válvula abierta, tanto el caudal Q como la cabeza de bombeo H son de 10, entonces la potencia hidráulica sería proporcional a $P \times H$, o sea 100. Según la Figura F-35, al cerrar la válvula se restringe el caudal a 7 y se aumenta la cabeza a 12.7, entonces la potencia del flujo de salida se reduce a 89. Este sistema de control no se recomienda puesto que la reducción drástica del caudal conduce a presiones muy elevadas en la descarga, y cargas excesivas sobre los motores. La manipulación de válvulas sobre la tubería de descarga desplaza el punto de operación lejos del óptimo, y esto es inaceptable, considerando que el consumo de energía de las bombas implica importantes costos económicos y ambientales, y lo recomendable es que éstas operen siempre en su punto de máxima eficiencia energética.

B. Válvula en Bypass

Otra alternativa de control es derivando una parte del flujo que sale de la bomba a través de un bypass, de modo que el caudal que continúa por la tubería de conducción se reduce. Entonces el caudal de bombeo se aumenta, y se reduce la cabeza, desplazando el punto de operación a la derecha en la curva característica. En la Figura F-35, se observa que al abrir la válvula se aumenta el caudal a 12.4 y la cabeza se reduce a 6.6, y por lo tanto la potencia del flujo de salida se reduce a 82. Este sistema también implica un desplazamiento del punto de operación del óptimo, lo cual implica los sobrecostos que se indican en el caso anterior.

Figura F-35. Incidencia del Tipo de Control en el Punto de Operación de la Curva Característica



Fuente: Edvard Csanyi Ref. F-22.

C. Interruptores de Nivel On -Off

En este caso se tienen un tanque en la descarga de la bomba, del cual sale el caudal que se quiere bombear. El caudal de bombeo es mayor al que se debe suministrar, de modo que cuando el nivel en el tanque llega a un mínimo, un interruptor de nivel arranca la bomba, y el tanque se llena hasta su nivel máximo, donde otro interruptor la apaga. Cuando lo que se quiere es bombear todo el caudal de la fuente, como ocurre en los sistemas de drenaje, el tanque se encuentra del lado de la tubería de succión, y un interruptor de nivel prende la bomba cuando el nivel en el tanque llega a un máximo, y otro la apaga cuando éste llega al mínimo. Asumiendo que la bomba solo trabaja el 70% del tiempo, la potencia promedio es de 70.

Este sistema de control es el más recomendable, puesto se puede tener la bomba operando en el punto de mayor eficiencia todo el tiempo, lo cual no ocurre con los métodos A y B. El dispositivo más utilizado para este control es el flotador eléctrico. En el blogspots de Coparoman se encuentra información sobre este dispositivo^{23, 24}.

²³ Coparoman. <https://coparoman.blogspot.com/2015/05/conexion-de-flotador-electrico.html>

²⁴ Coparoman. <https://coparoman.blogspot.com/2015/05/diagrama-electrico-con-2-interruptores.html>

D. Control con Variador de Velocidad VSD

El variador de velocidad VSD, por sus siglas en inglés de variable speed driver, controla la velocidad de rotación del rodete de la bomba, modificando así la curva característica, como se observa en la Figura F-35. Este control permite a la bomba operar cerca del punto de mayor eficiencia en todo momento. Según la Figura F-35, con el VSD y con la válvula estranguladora del método A se obtiene un caudal de 7, pero mientras que con el VSD la cabeza de bombeo es de 6.4, con dicha válvula dicha cabeza es de 12.7, y por lo tanto, el VSD reduce el consumo de energía a casi la mitad.

La tecnología del VSD se puede consultar en las guías del U.S. Department of Energy (DOE) y de Europump²⁵. Esta es una tecnología costosa, que se aplica principalmente en bombas de gran potencia, y por lo tanto los ahorros en el consumo de energía la viabilizan.

E. Disposición de Bombas en Paralelo

Otra forma de controlar los caudales es utilizando varias bombas colocadas en paralelo. De esta forma se tienen caudales que crecen escalonadamente dependiendo de las bombas en funcionamiento. La disposición en paralelo también se utiliza para tener bombas de respaldo, que es necesario para realizar su mantenimiento. En estos casos es necesario tener en cada línea una válvula de cheque para evitar que el flujo se devuelva cuando la bomba no está en funcionamiento. En los extremos de las líneas es necesario colocar válvulas de corte para poder suspender el flujo cuando se requiera el mantenimiento de la bomba o su reemplazo. Una desventaja de este sistema de control del caudal es que la eficiencia energética de las bombas disminuye al reducir el caudal de diseño de éstas, pero a partir de cierto caudal, dichas eficiencias se estabilizan. Por lo tanto, el sistema de control con líneas de bombeo en paralelo es bastante adecuado para grandes caudales, o en proyectos que contemplan incremento de éstos con el tiempo. El caudal que suministra este sistema es escalonado, pero con la introducción de variadores de velocidad en algunas líneas, se puede tener un control más preciso del caudal.

F-5.5.3. Cubiertas para Bombas

En muchas ocasiones se requiere la instalación de bombas fuera de edificaciones techadas. Con el objeto de proteger dichas bombas de la lluvia y de las inclemencias del tiempo, se recomienda colocarles una cubierta basculante. Esta cubierta consiste en una cabina hecha en lámina metálica con protección anticorrosiva, que esta sujeta del piso mediante bisagras tipo pistón soldadas a placas metálicas, las cuales se atornillan al piso. Por lo tanto, al rotar dicha cubierta basculante hacia afuera, se puede tener un amplio acceso a la bomba. Esta cubierta protege la bomba de la lluvia, a la vez que facilita la ventilación del motor.

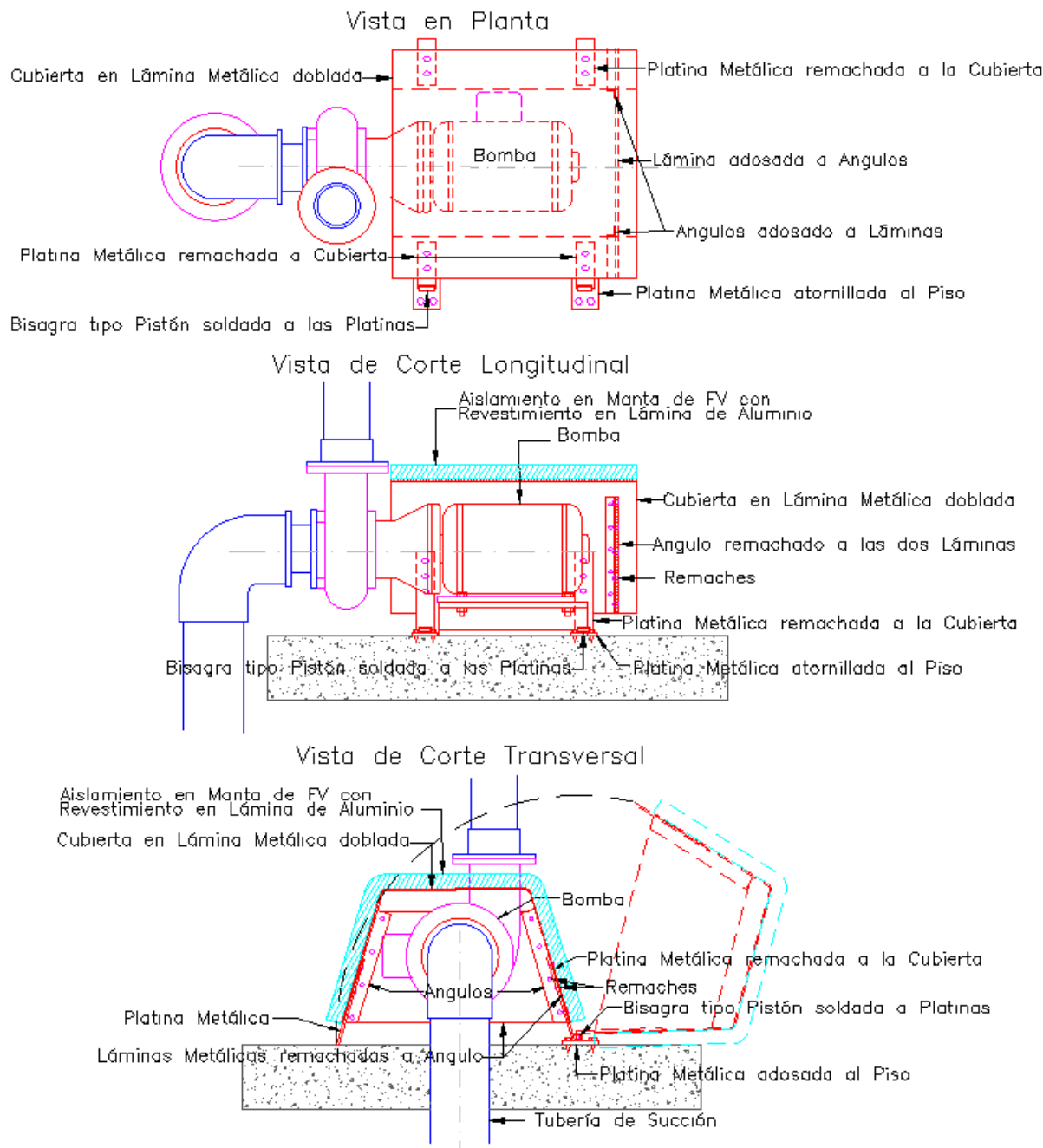
Con el objeto de proteger la bomba de las altas temperaturas que produce la radiación solar, se recomienda colocar sobre esta cubierta, una manta hecha de lana de vidrio con

²⁵ U.S. Department of Energy (DOE) y Europump. "Variable Speed Pumping — A Guide to Successful Applications, Executive Summary". <https://www.energy.gov/eere/amo/downloads/variable-speed-pumping-guide-successful-applications-executive-summary>

revestimiento reflectivo, que puede ser papel de aluminio. Esta manta es importante en las zonas tropicales, debido a que el metal convierte en calor la alta radiación solar que se tiene en estas zonas. Esto se traduce en un aumento de la temperatura, que puede recalentar la bomba y restarle eficiencia. La manta de lana de vidrio también contribuye a la reducción del ruido que genera la bomba. La cubierta debe ajustarse a los diversos tipos y tamaños de bombas.

En la figura a continuación se encuentra un ejemplo de diseño de una cubierta de bomba.

Figura F-36. Cubierta Basculante para Bomba



F-5.5.4. Sistemas de Bombeo Flotantes

Los sistemas de bombeo flotantes son necesarios cuando se capta agua en lagos o ríos que tienen una variación de nivel bastante grande. Con excepción de las bombas sumergibles, los motores eléctricos no pueden sumergirse en el agua, y además la altura de éstos sobre el nivel está limitada por el NPSH (Net Positive Suction Head) disponible, el cual debe ser superior al requerido para que no se presenten riesgos de cavitación en la bomba (ver Numeral F-5.5.1). Estas dos condiciones implican que la altura HB de la bomba sobre el nivel mínimo del agua tenga un valor limitado, que es bastante reducido. Por otra parte, es indispensable evitar que el agua inunde el motor eléctrico o a gasolina de la bomba, lo cual ocasionaría serios daños en ellos.

En muchas ocasiones, los niveles de los ríos o lagos donde se capta el agua tiene grandes variaciones, lo cual impide tener bombas fijas. En estos casos, una forma de mantener una altura constante de la bomba sobre el nivel del agua es instalándola en una plataforma flotante. Se recomienda que esta bomba sea provista de una manguera perforada de succión flotante, que haga las veces de rejilla, la cual se suspende cerca de la superficie del agua mediante flotadores. De esta forma, el agua que se capta tiene un contenido de sólidos suspendidos reducido.

La tubería perforada corrugada de drenaje que se encuentra comercialmente, realmente se puede considerar una manguera por su flexibilidad, y se utiliza generalmente para el subdrenaje de suelos. Esta manguera tiene aberturas de 1.3 mm de ancho por 5 mm de largo, ubicadas en el interior de ranuras, lo cual reduce la obstrucción por parte de las partículas en suspensión.

En la tabla a continuación se encuentran los parámetros suministrados por una firma nacional, con base a los cuales se puede calcular la longitud de la manguera requerida.

Tabla F-8. Parámetros de la Manguera Corrugada Perforada para Succión

Ancho perforaciones	1,3 mm			
Largo perforaciones	5 mm			
Longitud	1 m			
Diámetro de la Manguera	65 mm 2 1/2 pg	100 mm 4 pg	160 mm 6 pg	200 mm 8 pg
Area de perforaciones	30 cm2/m	30 cm2/m	40 cm2/m	60 cm2/m

Fuente: Soluciones Agrícolas Pavco – Drenaje. <https://pavcowavin.com.co/drenaje-tuberia-pavco> Manual Técnico

Como se indica en el Numeral F-5.1, en los sistemas de succión para bombas es necesario evitar la entrada de aire a través de vórtices. En los sistemas de bombeo flotantes, la succión a través de mangueras ranuradas perforadas no tiene la posibilidad de generar vórtices, puesto que el flujo entra a través de numerosas ranuras pequeñas, y se distribuye a lo largo de una longitud importante. En las figuras a continuación se presentan diseños de sistemas de bombeo flotantes para 1 y 2 bombas de máximo 4" o 6" de diámetro.

Figura F-37. Estación de Bombeo Flotante para una Bomba

Vista en Planta

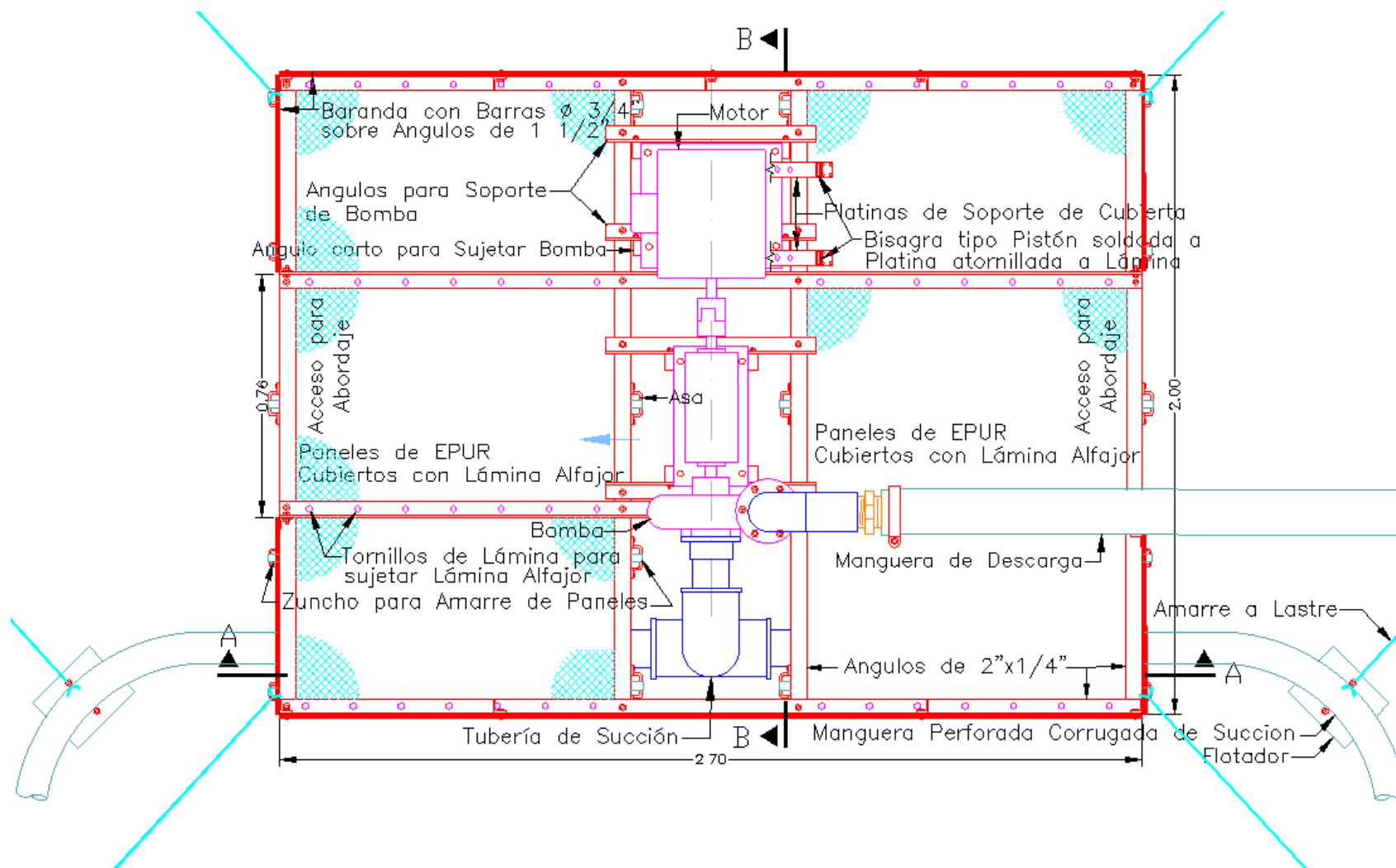
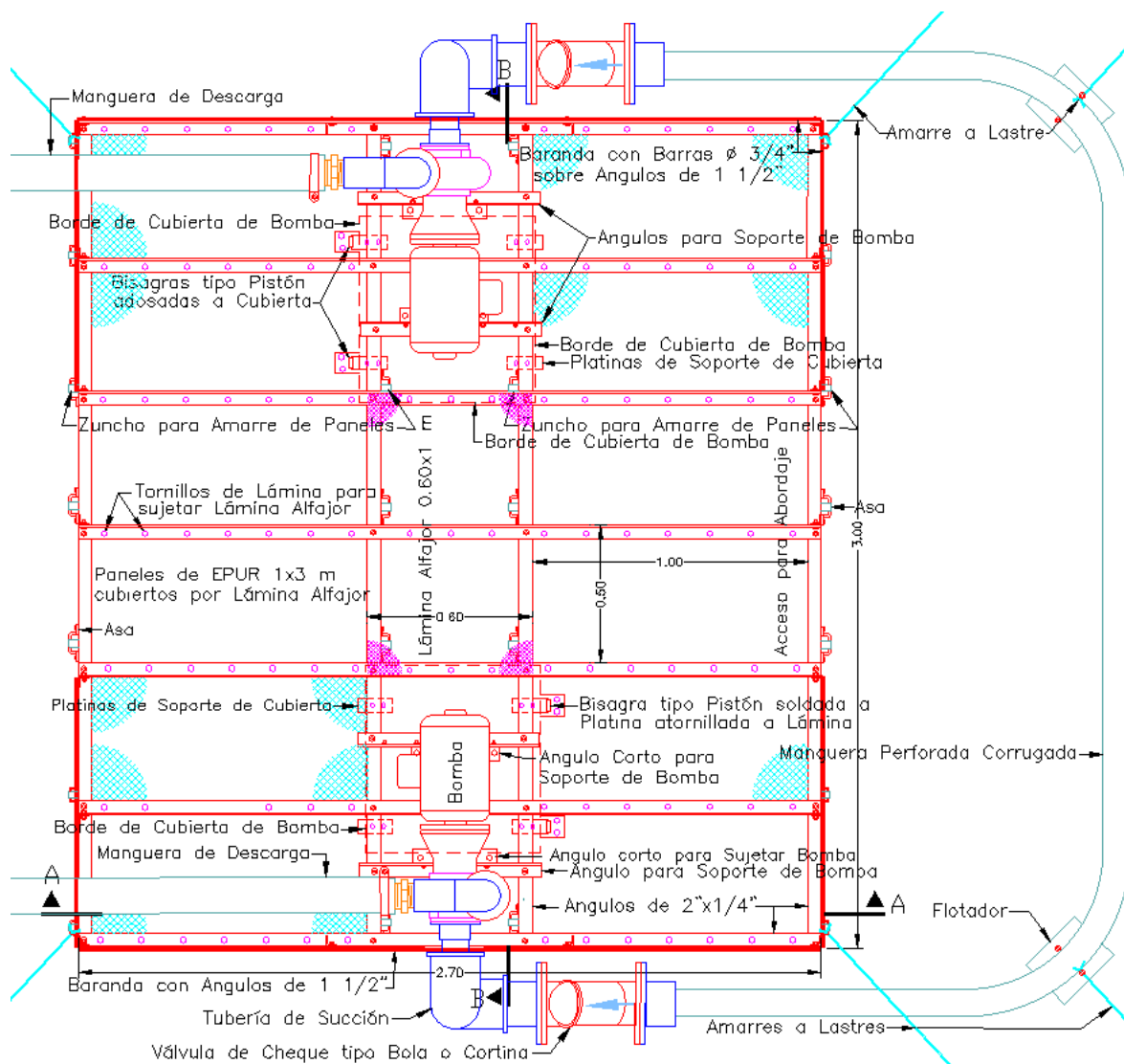


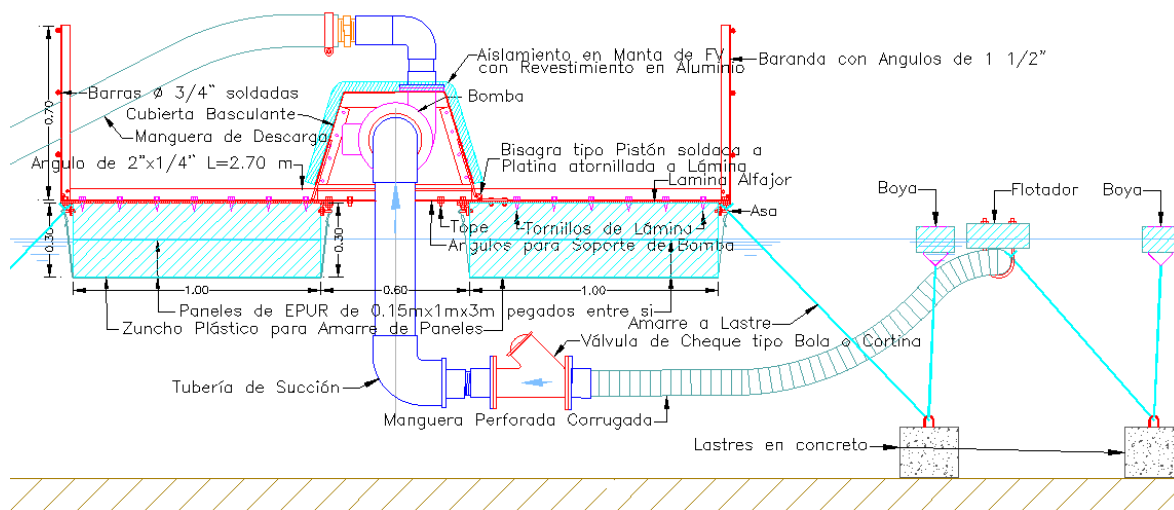
Figura F-39. Estación de Bombeo Flotante para dos Bombas

Vista en Planta



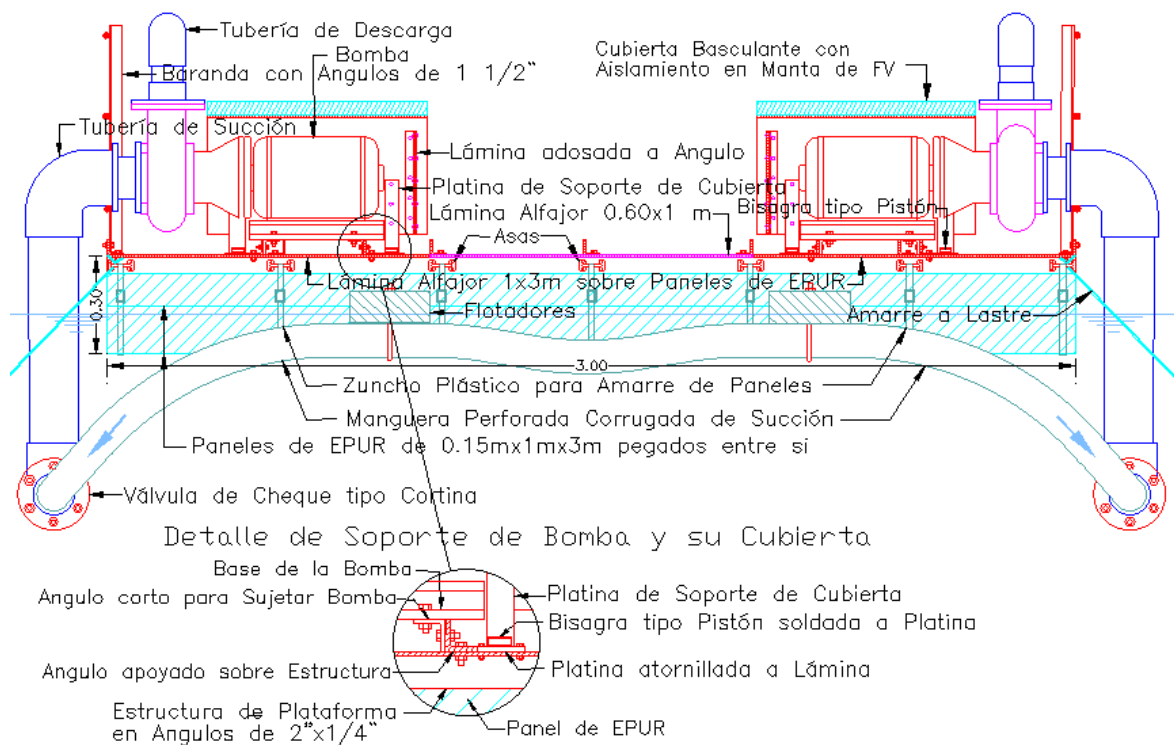
Nota: En el caso de bombas grandes, se pueden tener dos mangueras de succión, que estarías dispuestas hacia ambos lados, como se aprecia en la Figura F-38.

Figura F-40. Estación de Bombeo Flotante para dos Bombas
 Vista de Corte Transversal A-A



Nota: En el caso de bombas grandes, se pueden tener dos mangueras de succión dispuestas de acuerdo a la Figura F-38.

Figura F-41. Estación de Bombeo Flotante para dos Bombas
 Vista de Corte Longitudinal B-B



Para la instalación de un sistema de bombeo flotante, el primer paso es armar la plataforma flotante a la orilla del cuerpo de agua. Esto se hace atornillando los ángulos para conformar la estructura de dicha plataforma, que queda bocabajo. A esta estructura se amarran los flotadores que han sido previamente ensamblados, utilizando zuncho de polipropileno de mínimo 12 mm de ancho, que los sujeta a asas fijadas a los ángulos de la estructura. Los flotadores están constituidos por paneles de espuma de poliuretano rígido (EPUR), sobre los cuales se colocan láminas Alfajor, todo ello pegado entre sí. Se pueden utilizar dos paneles de 15 cm de espesor, o 3 de 10 cm. Luego del amarre de los flotadores, se voltean la plataforma, y se colocan los tornillos de lámina que la fijan a la lámina Alfajor a la estructura, y a continuación se colocan las barandas, menos las que se encuentran sobre el costado por donde se introduce la bomba.

Sobre esta plataforma flotante se fija la bomba, bajo la cual se han colocado previamente ángulos atornillados a sus bases, los cuales se atornillan a su vez a la estructura de la plataforma. Los paneles de EPUR son bastante frágiles, de modo que si la bomba es muy pesada, es aconsejable primero colocar la plataforma en la laguna cerca a la orilla, y luego instalar la bomba allí. De lo contrario, la bomba se puede instalar en la plataforma previamente, y sujetarla ésta de las asas de sus costados para llevarla al cuerpo de agua. A continuación se colocan las barandas restantes. Este conjunto se ubica en el sitio asignado, en el cual se fija mediante amarres a bloques de concreto que actúan como lastres, los cuales están amarrados a su vez a boyas que facilitan el manejo de dichos lastres. Posteriormente se conectan la manguera de descarga, y el sistema de succión, conformado por la tubería de succión y la manguera corrugada perforada, la cual está provista de lastres amarrados a boyas para facilitar esta operación.

Para el adecuado funcionamiento de la bomba y sus conexiones, es importante ubicarlas en la plataforma de tal forma que la superficie ésta quede horizontal. Cuando se tienen 2 bombas, éstas quedan dispuestas simétricamente en la plataforma flotante, pero cuando solo hay una, es necesario ubicarla adecuadamente para garantizar la horizontalidad de la plataforma. Para determinar la posición de la bomba en la plataforma, se puede instalar allí todo el conjunto de bombeo, y sus conexiones hidráulicas y eléctricas, dejando sin atornillar los ángulos que soportan la bomba a la estructura metálica de la plataforma. Luego se pone en funcionamiento la bomba, y ésta se corre mediante cuerdas operadas por personas ubicadas fuera de la plataforma, hasta que ésta quede horizontal. Se recomienda que estas operaciones se realicen en zonas poco profundas cercanas a la orilla, para que las personas ubicadas en la laguna puedan posicionar la bomba mediante las cuerdas. Luego se atornilla en esta posición, la cual se aplica para todos los casos en que se utilice el mismo tipo de bomba. Bajo los ángulos que soportan la bomba sobre la plataforma se colocan unos topes, formados por tornillos, que mantienen la bomba sobre la abertura que hay entre los dos flotadores, y evitan que ésta caiga al agua durante estas operaciones. Estos topes se ubican solo en los ángulos de soporte de la bomba que se encuentran en los extremos.

Para evitar que sean arrastradas por las corrientes, es importante anclar al fondo, tanto la plataforma como la manguera de succión, mediante lastres. Estos lastres pueden ser bloques de concreto, los cuales estarían amarrados a boyas para facilitar su posicionamiento, como se aprecia en las figuras a continuación. En sistemas de bombeo ubicados en ríos, solo es necesario colocar los estos sistemas de anclaje hacia aguas

arriba. En sistemas de bombeo flotantes instalados en lagunas, las cuatro esquinas de la plataforma se amarran a lastres, mediante sogas que deben estar distendidas, para evitar que el ascenso del nivel las tense, lo cual hundiría dicha plataforma. En la siguiente tabla se presenta un análisis de la capacidad de carga de las plataformas flotantes, del peso que deben soportar. En ellas se utilizan paneles de espuma de poliuretano rígidos de 1 m de ancho como flotadores. El peso más importante que deben soportar las plataformas flotantes es el de las personas que hacen mantenimiento y sus equipos.

Tabla F-9. Análisis de la Flotabilidad de las Plataformas Flotantes

PLATAFORMA PARA UNA BOMBA		Dos Flotadores de 2 m de Longitud	
Item	Peso Unitario	Cantidad	Peso Total
Angulos de Hierro de 2"x 1/4"	4,74 Kg/m	22,8 m	108,07 kg
Angulos de Hierro de 1 1/2" x 1/8" para Barandas	1,83 Kg/m	9,8 m	17,93 kg
Barras de Hierro de 1 1/2" para Barandas	1,00 Kg/m	24 m	24,00 kg
Paneles de Espuma de Poliuretano e=15 cm	14,05 Kg/m ²	8 m ²	112,40 kg
Lamina Alfajor e = 4 mm	31,20 Kg/m ²	4 m ²	124,80 kg
Peso de Cubierta de Bomba	11,27 Kg/u	1	11,27
Operarios con Equipamiento (Carga Temporal)	90,00 Kg/u	4	360,00
Peso de Items Invariables			758,48 kg
Desplazamiento Máximo (75% del Volumen de Paneles)			900 Lts
Capacidad para Cargas Variables (Bomba, Tuberías de Succión y Descarga Llenas, e Imprevistos)			142 kg

PLATAFORMA PARA DOS BOMBAS		Dos Flotadores de 3 m de Longitud	
Item	Peso Unitario	Cantidad	Peso Total
Angulos de Hierro de 2"x 1/4"	4,74 Kg/m	34,9 m	165,43 kg
Angulos de Hierro de 1 1/2" x 1/8" para Barandas	1,83 Kg/m	14 m	25,62 kg
Barras de Hierro de 1 1/2" para Barandas	1,00 Kg/m	28,2 m	28,20 kg
Paneles de Espuma de Poliuretano e=15 cm	14,05 Kg/m ²	12 m ²	168,60 kg
Lamina Alfajor e = 4 mm	31,20 Kg/m ²	6 m ²	187,20 kg
Peso de Cubierta de Bomba	11,27 Kg/u	2	22,55
Operarios con Equipamiento (Carga Temporal)	90,00 Kg/u	4	360,00
Peso de Items Invariables			957,59 kg
Desplazamiento Máximo (75% del Volumen de Paneles)			1.350 Lts
Capacidad para Cargas Variables (Bombas, Tuberías de Succión y Descarga Llenas, e Imprevistos)			392 kg

F-5.6. Cámaras de Aire para el Control del Golpe de Ariete en Tuberías

F-5.6.1 Cálculo del Golpe de Ariete

El agua que fluye por las tuberías tiene un momento de inercia proporcional a su masa y velocidad. Al cerrarse una válvula en forma súbita, el agua tiene una fuerte desaceleración, lo cual genera un aumento de presión importante en la tubería, llamado golpe de ariete, que se adiciona a la cabeza de presión que tiene el flujo normal del agua. En el libro de Ricardo Alfredo López Cualla²⁶ se encuentra lo referente al cálculo de las presiones generadas por el golpe de ariete

Si el cierre de la válvula es rápido, el agua sufre un aumento mayor de la presión llamado golpe de ariete, que genera mayores esfuerzos de tensión en la tubería. Esto le produce deformaciones elásticas, que tiene un efecto amortiguador en dicho golpe. Estos esfuerzos de compresión en agua y de tensión en la tubería forman una onda de presión que recorre el conducto desde la válvula hacia aguas arriba, la cual tiene una velocidad denominada celeridad C . En condiciones de cierre rápido, la sobrepresión h_a causada por el golpe de ariete se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$h_a = \frac{C \times V}{g} \quad \text{Ecuación F-12}$$

Donde V es la velocidad inicial del agua, y g es la gravedad. La celeridad C se calcula mediante la ecuación de Allievi, mostrada a continuación:

$$C = \frac{9.900}{\sqrt{48.3 + k \times \frac{D}{e}}} \quad \text{Ecuación F-13}$$

Donde D es el diámetro de la tubería y e es el espesor de sus paredes. El valor de k corresponde a la relación entre los módulos de elasticidad del agua y del material de la tubería, que se indica en la siguiente tabla:

Tabla F-10. Coeficiente K

Material de la Tubería	Coeficiente K
Acero	0.5
Hierro Fundido	1
Concreto	5
Plástico	18

Fuente: Ricardo Alfredo López Cualla. (Ref. F-26)

²⁶ Ricardo Alfredo López Cualla. "Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados". Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, 2.000.

Lo anterior ocurre con el cierre rápido, cuando el tiempo de cerrado t es menor que el tiempo T que toma la onda de presión en recorrer la distancia L entre la válvula y la entrada a la tubería y regresar a ésta, a una velocidad C . T es llamado tiempo de la fase de presión. Por lo tanto, para el cerrado rápido, el tiempo de cerrado t debe cumplir la siguiente condición:

$$t < T = \frac{2 \times L}{C} \quad \text{Ecuación F-14}$$

Donde L es la longitud de la tubería entre el inicio de ésta y la válvula. El cerrado lento ocurre cuando el tiempo de cerrado t es mayor que T . En este caso, el golpe de ariete h_a se calcula multiplicando el valor de h_a de la Ecuación F-12 por la relación entre el tiempo de la fase de presión T sobre el tiempo de cerrado de la válvula t . Cuando el tiempo de cerrado es lento, la sobrepresión causada por el golpe de ariete queda de la siguiente forma:

$$h_a = \frac{2 \times L \times V}{g \times t} \quad \text{Ecuación F-15}$$

F-5.6.2 Amortiguación del Golpe de Ariete en Tuberías de Succión de Bombas

Las válvulas de bola y de cortina tardan corto tiempo en cerrarse, durante el cual produce golpes de ariete importantes que generan ondas de presión hacia aguas arriba, con retrocesos del agua. La magnitud de este golpe es proporcional a la velocidad que alcanza el agua en estos retrocesos, que se incrementan al reducir el tiempo de cerrado de la válvula. La presión generada por el golpe de ariete se suma a la presión hidrostática inicial (presión en la válvula cuando las tuberías están llenas y no hay flujo).

Los golpes de ariete puedan afectar gravemente las tuberías, y una de las soluciones más utilizadas para el controlarlo es la cámara de aire. El mayor problema de estas cámaras es que con las acciones de compresión y descompresión, el aire se mezcla con el agua, y sale de la cámara, por lo cual debe ser repuesto periódicamente. En el caso de las tuberías de succión de las bombas, para superar este problema se propone la cámara de aire que se muestra en las figuras F-47 y F-48 a continuación, que cuenta con un mecanismo automático para reponer el aire, y que se puede utilizar en tuberías de succión de bombas que tienen válvulas de pie o de cheque.

Esta cámara tiene una conexión con la tubería de succión a través de una válvula de bola flotante, que consiste en una válvula de cheque tipo bola, en la cual dicha bola flota en el agua, y por lo tanto no permite la salida del aire cuando ha flujo desde la cámara hacia la tubería. Esta bola puede estar hecha en caucho poroso o silicona.

Esta válvula se conecta mediante una manguera con un punto ubicado inmediatamente aguas arriba de la válvula de cheque. En estas condiciones, cuando se inicia el bombeo, la baja presión en la succión hace que el agua que se encuentra en la cámara de aire salga hacia ella, pero no el aire, puesto que la bola flotante cierra la salida de dicha cámara tan pronto como ésta se desocupa. Para facilitar la entrada de aire a la cámara, ésta tiene en

su parte superior una entrada de aire a través de una manguera que sale hacia la atmosfera. En esta entrada se coloca una válvula de cheque de aire, que solo permite la entrada de éste, pero no su salida.

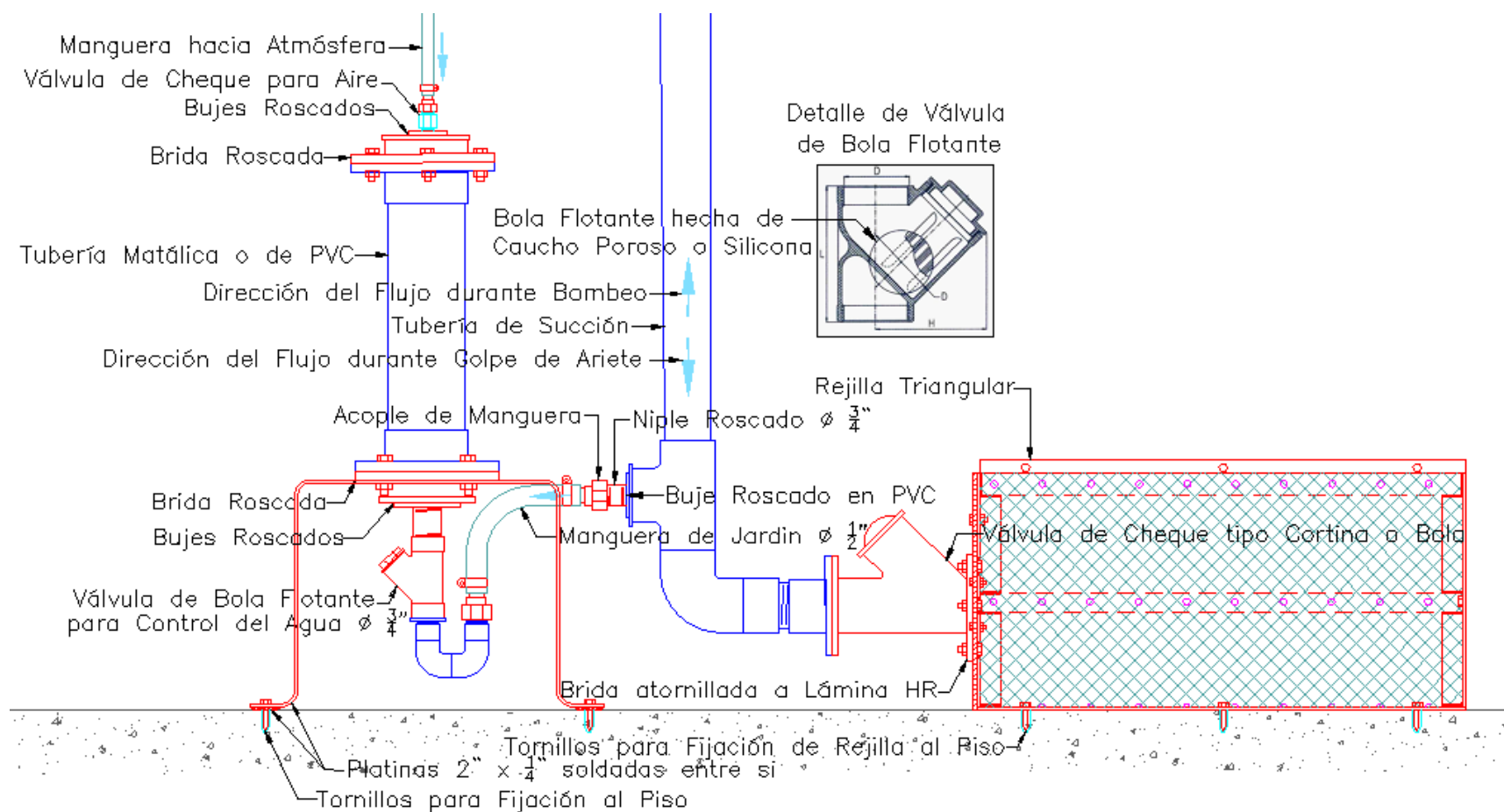
Cuando se interrumpe el bombeo, el golpe de ariete, ocasionado por el retroceso del flujo, abre la válvula de bola flotante, y el agua penetra en la cámara comprimiendo el aire que hay allí, puesto que éste no puede salir debido a la válvula de cheque ubicado en la manguera de salida del aire hacia la atmósfera. De esta forma, cuando se cierra la válvula de pie o de cheque, el agua en la tubería de succión no se detiene abruptamente, sino que ingresa a la cámara de aire, donde la válvula de bola impide su salida. La entrada de agua a la cámara termina cuando la presión del aire en la cámara iguala la presión hidrostática final, más la sobrepresión por el golpe de ariete amortiguado. Una vez pasado el golpe de ariete, el agua sale de la cámara, pero la bola flotante impide que salga el aire.

De acuerdo a la ley de Boyle, la reducción del volumen de aire es proporcional al valor de las presiones dentro de la cámara, correspondientes a la presión hidrostática final, más la sobrepresión que genera la desaceleración del flujo, que corresponde al golpe de ariete amortiguado. El resto del volumen de la cámara es ocupado por el agua que entra en ésta. Este volumen es función de los caudales desviados hacia la cámara y del tiempo que dura la desaceleración del flujo. Entre mayor sea el volumen de la cámara de aire, mejor es la amortiguación del golpe de ariete, puesto que se puede tener menor porcentaje de contracción en el volumen de aire, y por lo tanto menor presión pico. También ocurre que con un mayor volumen de la cámara, el caudal desviado puede fluir hacia ésta durante más tiempo, y por lo tanto el flujo de la tubería de succión tiene una desaceleración menos abrupta.

Cuando se reanuda el bombeo, se genera una presión negativa en la tubería de succión, lo cual facilita la salida automática del agua acumulada en la cámara hacia dicha tubería. Esta agua sale a través de la válvula de bola flotante, mientras que el aire entra al cámara a través de la válvula de aire ubicada en su parte superior. La válvula de bola flotante permanece abierta mientras haya agua dentro de ésta, pero inmediatamente se desocupa dicha válvula, la bola flotante cae en el asiento y la cierra.

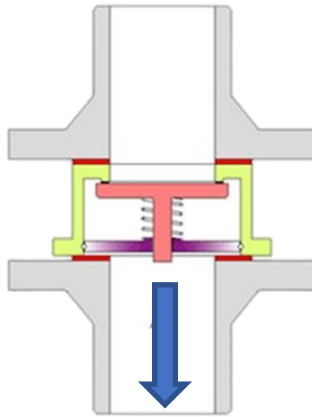
En el Numeral F-5.4 se recomienda colocar en la succión de las bombas válvulas de cheque tipo bola o cortina, las cuales se pueden acoplar mediante uniones bridadas a la rejilla triangular que se recomienda colocar en dicha de succión, que se trata en el Numeral F-5.3. Se recomienda que las mangueras para conectar la cámara de aire con las tuberías sean de tipo jardín, de $\frac{1}{2}$ " de diámetro, las cuales se pueden empatar mediante acoples con tuberías de $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

Figura F-42. Cámara de Aire para Amortiguar el Golpe de Ariete en Tuberías de Succión



En la Figura F-43 a continuación se muestra una válvula de cheque de aire, que se utilizaría en la manguera de entrada de aire a la cámara, para facilitar dicha entrada cuando el bombeo baja la presión en la tubería de succión, y evitar que se escape cuando se produce el golpe de ariete.

Figura F-43. Válvula de Cheque de Aire



Fuente: Tameson Products. “Check Valve - How They Work”. <https://tameson.com/check-valves.html>

Se considera que la cámara de aire es un dispositivo muy económico y efectivo para amortiguar el golpe de ariete, pero las que se utilizan actualmente no tienen un mecanismo efectivo para reponer el aire que es arrastrado por el agua, y la cámara se debe llenar de aire periódicamente, por lo cual su uso no es recomendado. Para controlar el golpe de ariete en tuberías, se utiliza frecuentemente un dispositivo llamado en inglés “water hammer arrestor” (supresor del golpe de ariete), que consiste en una cámara que contiene un pistón que separa el agua del aire, o algún elemento amortiguador ubicado, la cual se conecta a la tubería²⁷. Este elemento se deforma elásticamente cuando ocurre el golpe de ariete, y tiene un efecto similar al de la cámara de aire. El water hammer arrestor es apropiado para tuberías de escaso diámetro.

Las cámaras de aire no son necesarias en el caso de los sistemas de bombeo de las plantas de tratamiento presentadas en la presente página web, donde las presiones hidrostáticas generalmente no exceden los 2 m, y por lo tanto no se presentan golpes de ariete importantes que requieran ser amortiguados.

F-5.6.3 Amortiguación del Golpe de Ariete en Tuberías de Conducción

A diferencia de las tuberías de succión, en las tuberías de conducción generalmente se tienen tramos largos, que aumentan la intensidad del golpe de ariete. Además, al cerrarse

²⁷ Eliot Keefe “What Is a Water Hammer Arrestor & How to Install and Use It”. The Plumbing Info, <http://theplumbinginfo.com/water-hammer-arrestor/>

la válvula puede presentarse una caída de presión aguas abajo de ésta, que puede ejercer esfuerzos de compresión sobre las tuberías y llevarla a su colapso, y además de pueden originar burbujas de gas formados por la vaporización del líquido, que pueden generar efectos de cavitación que ocasionan daños en las estructuras de conducción.

Para amortiguar el golpe de ariete en estos casos, se recomienda la utilización de dos cámaras de aire, similares a la que se utilizaría en la tubería de succión de las bombas que se muestran en las figuras anteriores. En estas cámaras cuales se aprovecha la baja presión que ocurre aguas abajo de la válvula que se cierra, para reponer el aire de dichas cámaras. Por lo tanto, se necesitan dos cámaras que funcionan alternadamente, mientras una de ellas está conectada a un punto aguas arriba de la válvula y amortigua el golpe de ariete producido por el cierre de ésta, la otra está conectada a un punto aguas abajo de la válvula, y recibe aire cada vez que ésta se cierra. Estas cámaras intercambian sus funciones mediante válvulas de 3 vías.

Estas válvulas cambian de posición después de cada golpe de ariete, lo cual permite intercambiar sus funciones. Este sistema de amortiguación se muestra en la Figura F-49 a continuación. En el momento de producirse el cierre de la válvula de paso, el flujo que viene desde aguas arriba de la válvula de paso de la tubería, se desvía hacia una de las cámaras de aire, la cual actúa como amortiguadora del golpe de ariete. En ningún momento el aire entra a la tubería debido a la acción de la válvula de bola flotante ubicada sobre la cámara de aire.

Simultáneamente, al cerrarse la válvula de paso, el agua acumulada en la otra cámara de aire sale por la manguera conectada al punto aguas abajo de dicha válvula, aprovechando la caída en la presión que ocurre en este punto, que se debe a la inercia del agua que fluye aguas abajo de la válvula. Este flujo sale de la cámara a través de una válvula de bola flotante, que se mantiene abierta mientras haya agua dentro de ella. En el momento en que el agua sale de la cámara, la bola cierra la salida e impide el aire fluya hacia la tubería. De esta forma se evita una caída de presión abrupta aguas abajo de la válvula de paso, y se restituye el aire que se pierde en la cámara cuando amortigua el golpe de ariete.

Luego del cierre de la válvula de paso, las posiciones de las dos válvulas de 3 vías se cambian, de tal forma que la cámara que estaba conectada al punto aguas arriba de la válvula, y recibía el agua desviada de la tubería, se conecte ahora con el punto de aguas abajo para evacuar dicha agua, y así llenarse de de aire. La otra cámara se conecta ahora con el punto aguas arriba de la válvula de paso para recibir el agua desviada en el próximo cierre de la válvula de paso.

Para facilitar esta operación, se recomienda utilizar válvulas de 3 vías de bola, también llamadas válvulas en L, que sean operadas por solenoide. Estas válvulas operarían mediante la misma señal del sistema que opera la apertura de la válvula de paso. Dicha señal activa un actuador que hace rotar 90° un interruptor giratorio, de modo que cada vez que se cierra la válvula de paso, se energizaría la válvula de 3 vías que estaba desenergizada, y se desenergizaría la válvula que estaba energizada, como se aprecia en la Figura F-49. La operación de cambio de posiciones de las válvulas de bola de la cámara

de aire iniciaría simultáneamente con el cierre de la válvula de solenoide que controla el caudal en la tubería. Esta válvula generalmente toma un tiempo en cerrarse, mientras que las válvulas pequeñas de bola se abren o cierran casi instantáneamente. Entonces, cuando se abre la válvula de paso, la tubería de aguas arriba está conectada a la cámara llena de aire que amortigua el golpe de ariete, mientras que en la tubería ubicada aguas abajo de la válvula de paso, se produce un vacío que saca el agua que se había acumulado en la otra cámara.

Existe también la posibilidad de operar todas las válvulas de forma manual, para lo cual es necesario que las válvulas de 3 vías se cambien de posición antes de cerrar la válvula de paso. La omisión de este cambio de posición no es grave, puesto que el arrastre del aire por el agua en cada cierre es relativamente reducido. Pero si esas omisiones se repiten, la pérdida en la cantidad de aire en una cámara afecta su capacidad de amortiguar el golpe de ariete. Para facilitar la operación manual, las manijas de las válvulas de bola se unen mediante una platina, que estaría unida a los extremos de dichas manijas mediante tornillos que actúan como pivotes para facilitar el giro, como se muestra en la Figura F-51. De este modo, con una sola operación se comunica una de las cámaras con el punto aguas arriba de la válvula de paso, y la otra con el punto aguas abajo de esta, y en la siguiente operación se alterna esta comunicación. Con la platina que une las válvulas de 3 vías se evita que ambas cámaras queden comunicadas simultáneamente con el punto de aguas arriba o de abajo, lo cual haría fallar el proceso de amortiguación. Para facilitar la operación de las válvulas de 3 vías, es necesario que éstas tengan manijas orientadas a 45° con el eje de la tubería, y que en una de las válvulas la manija quede en sentido contrario respecto a la otra, como se observa en las figuras F-49 y F-50 a continuación.

Figura F-44. Cámaras de Aire para el Control del Golpe de Ariete para Válvulas Eléctricas en Tuberías de Conducción

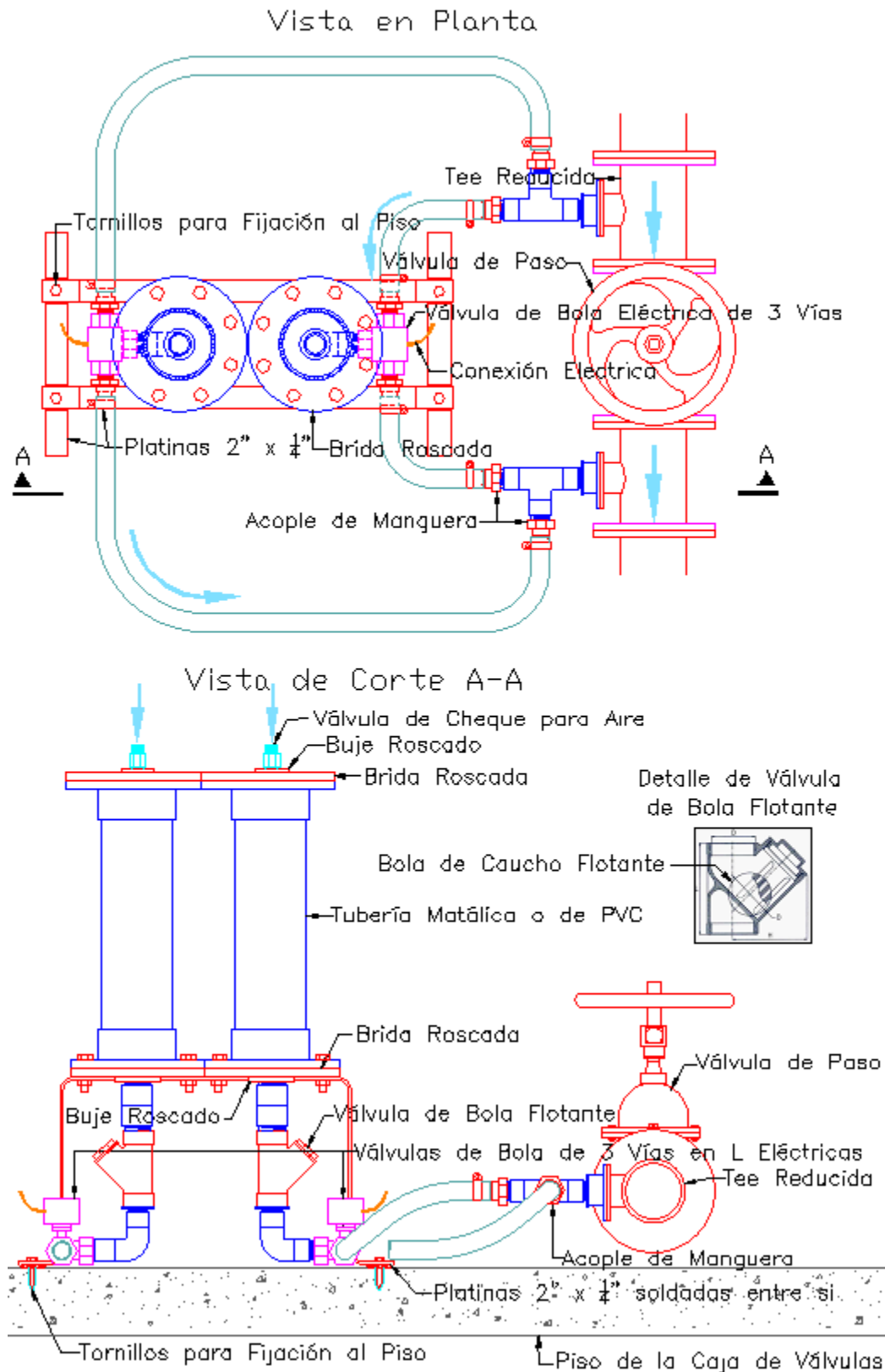


Figura F-45. Esquema del Control del Sistema de Amortiguación del Golpe de Ariete mediante Válvulas Eléctricas y Manuales

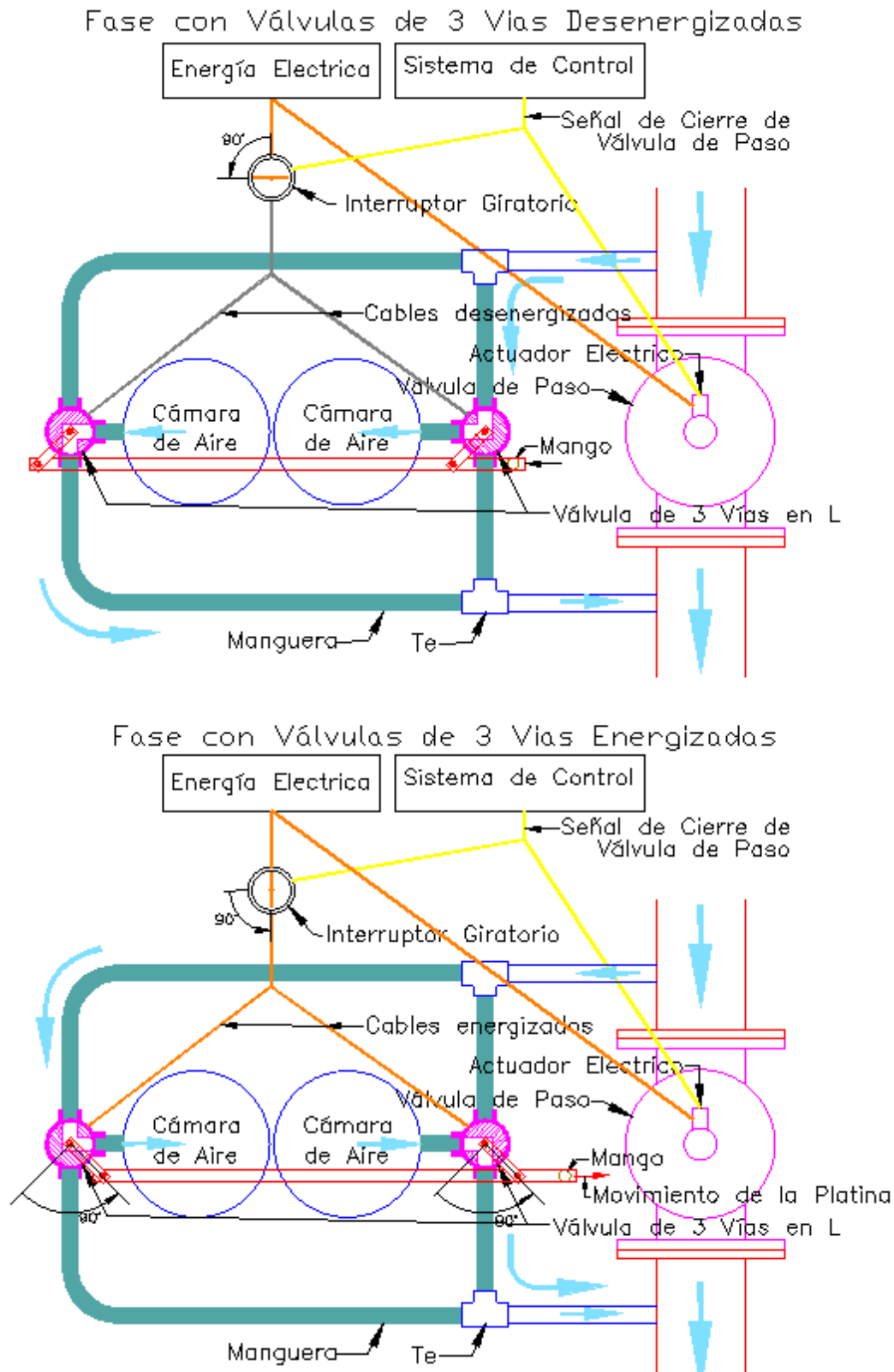
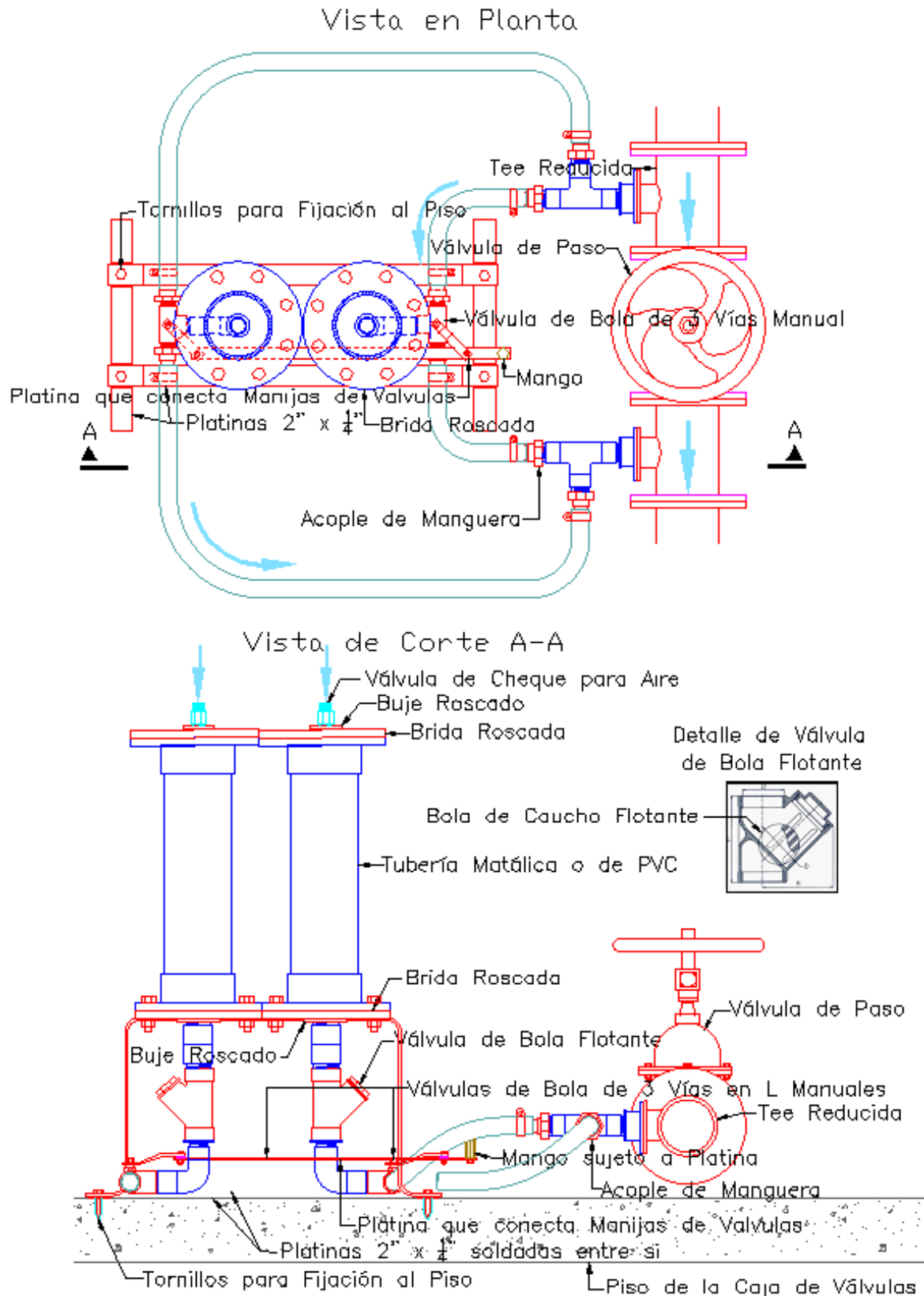


Figura F-46. Cámaras de Aire para el Control del Golpe de Ariete para Válvulas Manuales en Tuberías de Conducción



F-6. ESCALERAS PARA PECES

Las escaleras para peces son estructuras que les permiten salvar las diferencias de nivel creadas en las corrientes naturales por obras tales como represas o presas derivadoras. Estas escaleras se utilizarían en el caso de la planta Pincha que se describe en el Numeral C-4.4, en la cual se incorporan los nutrientes que trae el agua en la cadena trófica acuática. En esta planta existen caídas importantes entre el estanque donde se cultivan los peces y las corrientes naturales, a donde sale el efluente. Para controlar la salida de dichos peces, en la salida del efluente se coloca una compuerta de malla, que facilite la salida del agua del estanque a través de la escalera, y retenga los peces. Periódicamente se retira la compuerta para que el exceso de peces salga hacia un canal que desemboca en las corrientes naturales donde se entregan.

Para permitir que las especies acuáticas salven las diferencias de nivel en las corrientes de agua, la literatura técnica recomienda el uso de la escalera del tipo de estanques sucesivos, la cual ha demostrado ser bastante económica y confiable, y que permite el tránsito de toda clase de especies acuáticas en forma continua. Los diseños de las escaleras de este tipo se pueden consultar un documento del Centro Ibérico de Restauración Fluvial de España realizado con la colaboración del grupo GEA de la Universidad de Valladolid²⁸.

Los diseños hidráulicos de una escalera para peces deben ajustarse a las dimensiones y cantidades de los peces que deben remontarla, a sus capacidades de nado, y su comportamiento migratorio. Entre los aspectos hidráulicos a tener en cuenta, se encuentran los caudales, que deben ser suficientes para que la escalera tenga las profundidades y velocidades adecuadas. Si son muy bajos, no se obtiene las profundidades para que pasen los peces mayores, y si son excesivos, se generan condiciones de velocidad que dificultan el ascenso de los peces.

La altura de la escalera y su pendiente determinan la longitud de la estructura. Las condiciones del terreno donde se ubica la escalera también deben tenerse en cuenta, puesto que ésta tiene un ancho importante, y puede ser difícil ubicarla en laderas muy empinadas o inestables. En los casos de presas de gran altura ubicadas en cañones escarpados, una mejor opción podrían ser los sistemas mecánicos. Entre ellos se encuentran el ascensor para peces, que es una jaula que atrapa los peces, la cual es levantada por una grúa que los deposita aguas arriba²⁹. También están el elevador de peces y el sifón, que atrapan y levantan los peces junto con el agua por medios mecánicos, tales como el tornillo de Arquímedes³⁰.

28 Centro Ibérico de Restauración Fluvial de España. Grupo de Ecohidráulica Aplicada GEA de la Universidad de Valladolid. "Manual para La Evaluación de la Funcionalidad de Pasos para Peces de Estanques Sucesivos. Metodología AEPS". 2.016

http://www.lifemedwetters.eu/sites/default/files/documentos/metodologia_aeps- version 1.0 0.pdf

29 Andrés Martínez de Azagra. "Escalas para Peces". Universidad de Valladolid. 1.999.

https://www.researchgate.net/publication/271196381_Escalas_para_peces

30 The Constructor- "Types of Fish Ladders or Fishways". <https://theconstructor.org/water-resources/types-fish-ladders-fishways/33911/>.

Figura F-47. Fotografía de Escalera de Estanques Sucesivos para Peces.



Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Fish_ladder#/media/File:Cmglee_Uppsala_fish_ladder.jpg

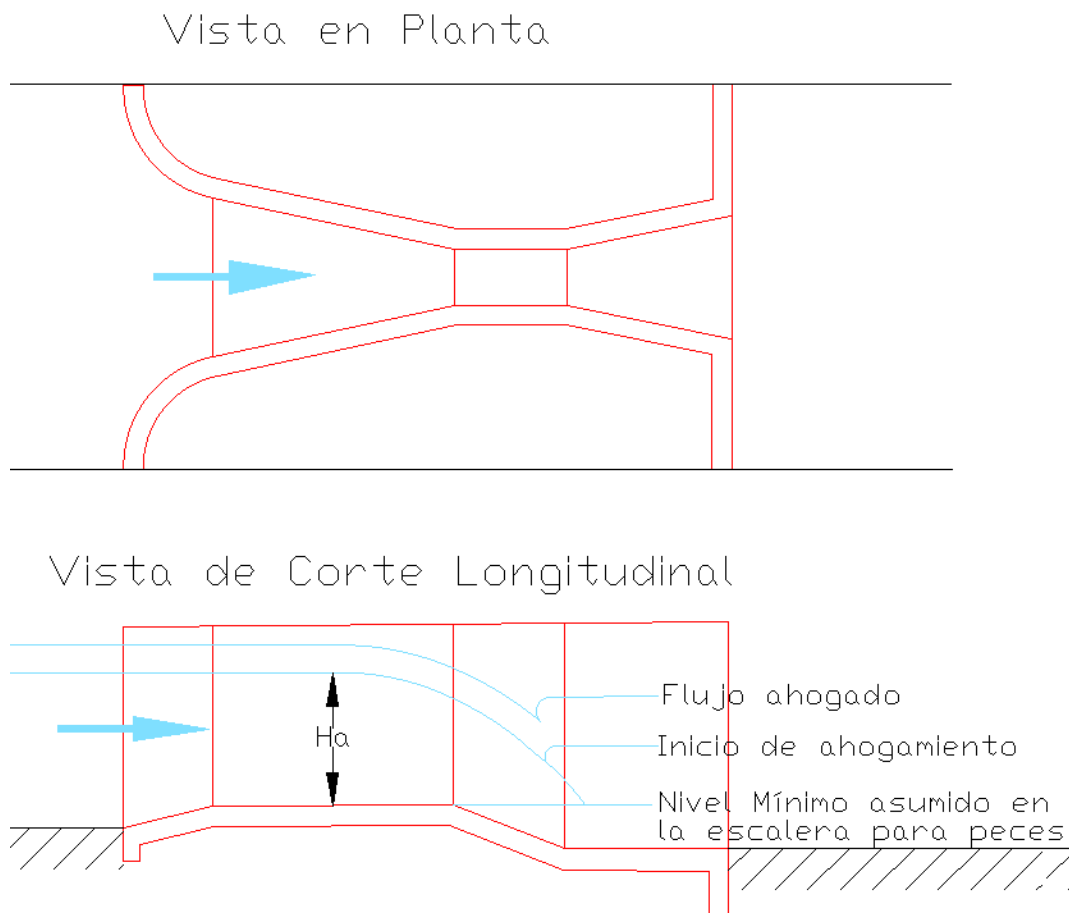
En el diseño de escalera propuesto, los vertederos se alternan a ambos lados, para evitar un corto circuito entre ellos que genere fuertes corrientes. Entre los chorros generados en las gargantas, se encuentran canales horizontales con flujo de velocidad moderada, de modo que los peces que ascienden pueden descansar allí y tomar impulso para superar el siguiente chorro. El chorro se encuentra sobre una curva de radio relativamente grande, de modo que los peces puedan tomarla a una velocidad importante sin chocar contra la pared, en forma similar a como se observa en la fotografía anterior.

El diseño propuesto consiste en un canal rectangular de concreto o mampostería con una pendiente importante, le cual está atravesado por pantallas hechas en láminas de acero HR, que se encuentran adosadas al fondo y a una de las paredes. En el otro extremo, la pantalla está separada de la pared, formando una garganta. Allí la lámina tiene una curvatura de modo que se facilite el giro de los peces que atraviesan la garganta, como se aprecia en la Figura F-49. Las curvas en dicho canal se pueden hacer introduciendo triángulos horizontales entre tramos rectos, los cuales quedarían como extensiones de los estanques, los cuales funcionarían como zonas de descanso de los peces, como se aprecia en la Figura F-49.

Las velocidades que ocurren en la garganta deben estar de acuerdo con capacidades natatorias de los peces para remontar el flujo allí. El ancho y la altura de la garganta está determinada por las dimensiones de los peces de mayor tamaño para los cuales se diseña la escalera. El flujo en la garganta que se encuentra entre la pantalla y la pared del canal es similar al que ocurre en una canaleta Parshall de flujo libre. Este dispositivo se utiliza para la medición del caudal en un canal, lo cual se hace produciendo un estrechamiento, que ocasiona un flujo crítico sin ocasionar una importante caída en la cabeza, como ocurre

en los vertederos de cresta aguda. En la garganta se producen una velocidad y una sección de flujo muy apropiadas para el tránsito de los peces hacia aguas arriba, y la caída del nivel es moderada. Este flujo se muestra en la siguiente figura.

Figura F-48. Flujo en la Canaleta Parshall



En la garganta de la escalera para peces puede producirse un flujo crítico, que no depende de las condiciones de aguas abajo, similar al de la canaleta Parshall, pero también puede tenerse un flujo ahogado cuando se incrementa el nivel aguas abajo, como se observa en la Figura anterior. En estas condiciones se reduce la velocidad del flujo, lo cual facilita el tránsito de los peces. Por lo tanto, los diseños se hacen para que los peces puedan remontar la escalera en condiciones de flujo crítico.

En la garganta de la escalera existe una relación entre el caudal y el nivel aguas arriba, similar a la de la canaleta Parshall, en donde se presenta una obstrucción en condiciones

físicas e hidráulicas semejantes. Según el documento de Harland Bengtson³¹, la ecuación que determina la relación caudal – nivel en dicha canaleta para condiciones de flujo libre, sin ahogamiento, es la siguiente:

$$Q = CxHa^n \quad \text{Ecuación F-16}$$

Por lo tanto, la profundidad en la garganta H_a se calcula con la siguiente ecuación:

$$H_a = \left(\frac{Q}{C}\right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación F-17}$$

Donde Q es el caudal en m^3/s , H_a es la altura en metros del nivel sobre el fondo de la garganta, aguas arriba de ésta, y los parámetros C y n son constantes que están en función del ancho W de la garganta, los cuales que se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla F-11. Constantes C y n para el cálculo de Flujo en la Garganta de la Escalera para Peces

Ancho de Garganta (pg)	Coficiente C	Exponente n
3	0,99	1,55
6	2,06	1,58
9	3,07	1,53
12	4,00	1,522
18	6,00	1,538
24	8,00	1,55

Fuente: Harlan Bengtson (Ref. F-31)

Los diseños de la escalera para peces se presentan en las figuras F-49 y F-50 a continuación.

³¹ Harlan Bengtson. “Parshall Flume Discharge Calculation – Open Channel Flow Measurement with Excel”. 2.011.<https://www.engineeringexcelspreadsheets.com/2011/04/parshall-flume-discharge-calculation/>

Figura F-49. Diseño de Escalera para Peces

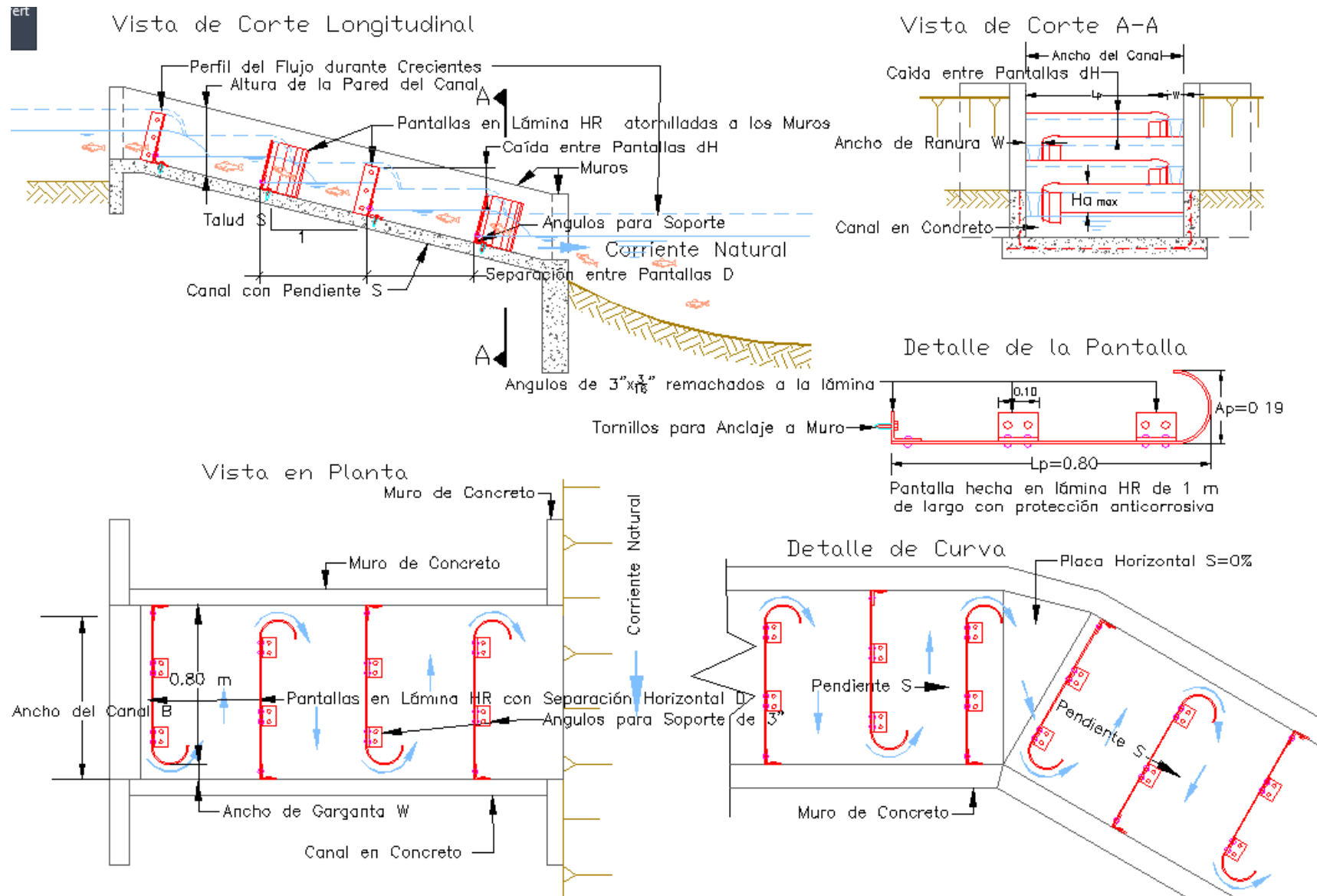
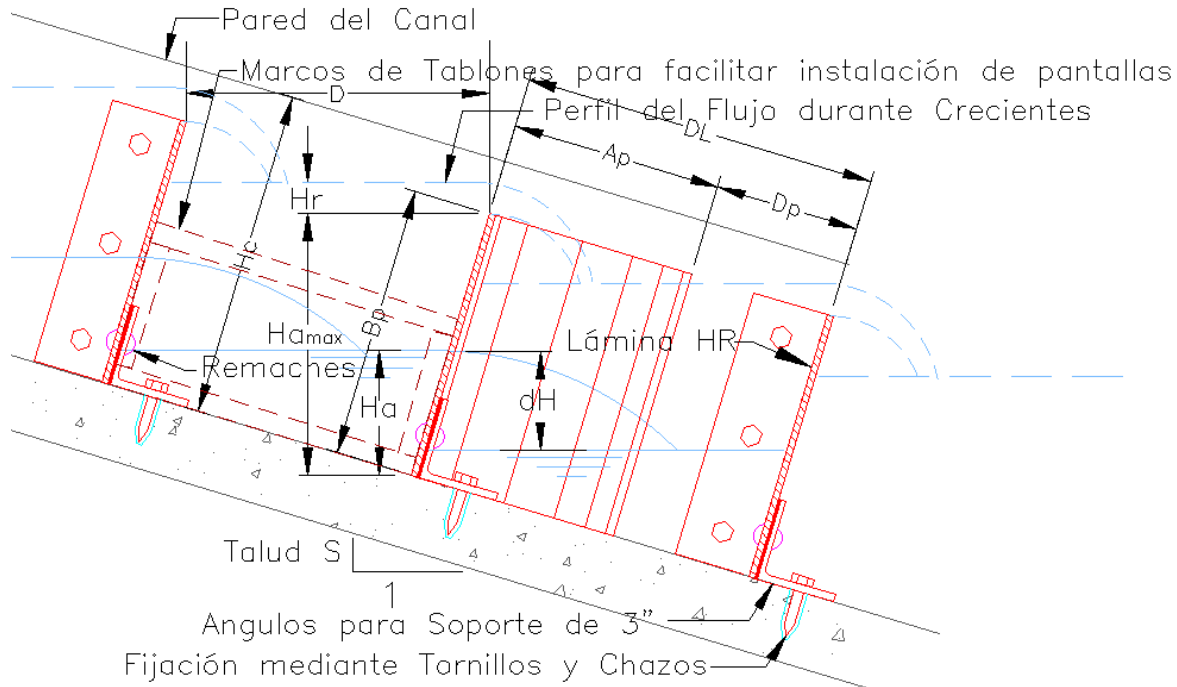


Figura F-50. Detalles del Diseño de la Escalera para Peces



Para el diseño de la escalera se considera que el nivel de aguas abajo debe estar por encima del fondo de la garganta, y por lo tanto la caída en el nivel dH es igual o inferior a la profundidad H_a que ocurre arriba de dicha garganta. Esto produce un flujo supercrítico en un pequeño tramo, muy similar al que ocurre en las quebradas de montaña, y por lo tanto se considera que no afecta el tránsito de peces hacia aguas arriba. En el cálculo de una escalera típica que se presenta en la Tabla F-12, la velocidad en la garganta es de 0.85 m/s, y hacia aguas abajo se incrementa en forma moderada, por lo cual se considera que puede ser remontada por los peces sin mayor dificultad. El caudal Q en la escalera se calcula con la Ecuación F-19 a partir del ancho de la garganta W y de su profundidad H_a . Es importante verificar de la profundidad H_a y el ancho W sean adecuados para el tamaño de los peces.

La distancia horizontal D entre las pantallas debe ser menor a H_a/S para obtener una caída de nivel dH inferior a H_a . La distancia entre pantallas D_p , en el sector donde se encuentra el tramo curvado, también debe ser suficiente para que los peces puedan pasar entre ellas. En el caso de que estas dos condiciones no se cumplan, se debe reducir la pendiente S del canal, lo cual aumenta la distancia entre pantallas. Se considera que la pendiente S máxima el canal de concreto es de 30%, puesto que pendientes mayores dificultan su construcción y la instalación de las pantallas. Dicha instalación se puede facilitar utilizando dos marcos hechos con tablas de madera, que se ubican delante de la pantalla instalada, y permiten coloca la nueva pantalla en su sitio exacto.

Cuando ocurren aumentos de caudal, parte de éste se rebosa sobre las pantallas que conforman la escalera, como se observa en la Figura F-53. Los chorros producidos caen a lo largo del canal que une las gargantas, donde la energía se disipa sin generar corrientes o efectos hidráulicos que puedan afectar a los peces.

El cálculo de la profundidad que alcanzan las crecientes es importante para establecer la altura de las paredes del canal. Este cálculo se puede hacer considerando que la capacidad del canal es la suma del caudal máximo que pasa sobre la garganta, cuando la profundidad alcanza allí $H_{a_{max}} + H_r$, siendo H_r la altura del nivel sobre la pantalla, más el que pasa sobre las pantallas, que funcionan como vertederos de cresta aguda. Para el primer cálculo se utiliza la Ecuación F-19, y para el cálculo del caudal de rebose Q_r sobre vertederos de cresta agua es la siguiente:

$$Q_r = 1.84 \times L_p \times H_r^{1.5n} \quad \text{Ecuación F-18}$$

Donde el caudal Q_r está en m^3/s , y la longitud L_p de la pantalla que se rebosa y la altura de rebose H_r en metros

En resumen, con la escalera propuesta se minimiza el caudal requerido para facilitar el tránsito de los peces hacia aguas arriba, y además puede funcionar eficientemente en evacuar las crecientes. En estos eventos, el agua se rebosa uniformemente a lo largo de la pantalla, lo cual permite disipar la energía a todo lo largo de ésta, sin afectar sustancialmente a los peces que transitan por la escalera. En el caso de la planta Pincta, donde se tiene un estanque de acuicultura donde todo el caudal sale a través de una escalera para peces, éste caudal puede llegar a ser demasiado alto. En este caso se pueden tener pantallas de mayor longitud para reducir la profundidad del rebose.

En la siguiente Tabla se presenta el cálculo de una escalera para peces.

Tabla F-12. Cálculo de una Escalera para Peces

Clasificación de la Información

Información de Entrada

Variables Principales de Entrada
Parámetros de Diseño Asumidos
Parámetros tomados de la Literatura Científica o Técnica

Información de Salida

Resultados Finales e Indicadores de Desempeño
Indicadores de Control
Parámetros y Datos de Diseño Calculados
Otros Cálculos

Operación en Condiciones de Operación Normales			
Pendiente del Canal	S	Máximo 30%	25%
Angulo de Inclinación			14,04 grados
Ancho de Garganta W	W = 3", 6", 9", 12", 18" o 24"		6 pg 15,24 cm
Profundidad Mínima en la Garganta	Ha		15,00 cm
Distancia Horizontal Máxima entre Pantallas	Dmax		0,60 m
Distancia Horizontal entre Pantallas Asumida < Dmax	D		0,56 m
Distancia entre Pantallas a lo Largo del Canal	DL		0,58 m
Ancho de la Pantalla Bp		suficiente	25 cm
Profundidad de la Garganta	Hamax		24,25 cm
Coeficiente C			2,06
Exponente n			1,58
Caudal Mínimo			102,82 Lps
Velocidad Media en la Garganta			4,50 m/s
Caída del Nivel entre Pantallas	dH		0,14 m
Ancho de la Pantalla (Diametro de Zona Curva)	Ap		0,19 m
Longitud de la Zona Curva			0,30 m
Longitud de Lámina			1,00 m
Longitud de la Pantalla			0,80 m
Distancia entre Pantallas en Garganta	Dp	suficiente	38,72 cm
Ancho del Canal	Lp		0,95 m
Diferencia de Niveles en la Escalera			10,00 m
No de Pantallas Requeridas			72 u
Longitud del Canal			41,56 m
Operación con Caudal Máximo			
Caudal Máximo en la Escalera	Q		300 Lps
Caudal Máximo en la Garganta			220 Lps
Caudal de Rebose sobre Pantalla		hay rebose	80 Lps
Coeficiente de Descarga en Vertederos de Cresta Aguda	Cd		1,84
Altura del Flujo sobre la Pantalla	Hr		0,13 cm
Altura Máxima del Flujo sobre la Pantalla			0,20 m
Borde Libre		suficiente	0,07 cm

En el documento del Centro Ibérico de Restauración Fluvial (Ref. F-28) se describe la metodología AEPS para evaluar las escalas para peces en sus aspectos hidráulicos y biológicos. A continuación, se describen los principales parámetros para el diseño de las escaleras para peces de acuerdo a dicho documento.

- Caudal relativo de atracción

Los peces que ascienden por la corriente buscan las corrientes más fuertes hacia aguas abajo para subir por ellas. Si los caudales o velocidades a la salida de la escalera son reducidos, se le dificulta los peces ubicar dicha salida e ingresar a la escalera. Una posibilidad es que el extremo inferior de la escalera llegue hasta un canal estrecho y profundo, cercano a donde se encuentre la barrera del río que hay que superar. De esta forma, en el sitio donde comienza la escalera lo peces no tienen otra corriente por donde

puedan desviarse. En estas condiciones, siempre habrá una corriente veloz que conduzca a los peces hacia la escalera, sin importar las variaciones del nivel el cauce del río.

- Ubicación de la entrada para peces y su orientación respecto a la corriente del río

La ubicación de salida de la escalera hacia aguas abajo también es importante para que los peces la encuentren. Se recomienda que ésta se ubique cerca de donde sale el agua aguas abajo de la presa o la estructura que interrumpe el paso de peces, y donde encuentren la profundidad adecuada para llegar a dicha salida.

La orientación óptima para la entrada de los peces respecto al eje de la corriente del río es de 45° o menor. En el diseño propuesto, el chorro a la salida de cada estanque está orientado perpendicularmente al eje de la escalera, y por lo tanto, se recomienda que el último chorro de la escalera esté orientado hacia aguas abajo.

- Profundidad en la entrada a la escalera y entre los estanques (H)

Los peces necesitan tomar impulso para superar el chorro que se forma en la garganta, de modo que en la salida de ésta debe haber agua profunda y en relativo reposo para que descansen y tomen impulso. Esta profundidad es importante para que los peces entren al primer estanque sin rozar la pantalla que los delimita aguas abajo. En el diseño propuesto, los estanques inferiores podrían estar sumergidos dentro de la corriente, de tal forma que el primer chorro que encuentran los peces que suben la escalera, tiene una profundidad igual o mayor a la que encuentra en las gargantas ubicadas aguas arriba. En el diseño propuesto, la profundidad en la garganta está determinada por la altura de las pantallas, por el caudal, y por el ancho de ésta, como se indicó anteriormente

- Anchura en la entrada a la escalera y entre los estanques (A)

Si el ancho en las gargantas es demasiado pequeño, existe el riesgo de que los peces se lastimen por los golpes y rozamientos contra dichas gargantas. Esto sería grave, porque dichos peces deben pasar por garganta velozmente poder salvar el chorro que se produce allí, y podrían sufrir daños importantes.

- Longitud y ancho de la zona de reposo entre gargantas

En este tramo el flujo es lento, y allí los peces descansan y toman impulso para pasar a través de los chorros que se forman en las gargantas. Esta longitud corresponde al ancho del canal B menos el ancho de la garganta W, y es igual al del rebose de los caudales altos sobre la pantalla. En la escalera proyectada, entre los chorros se tienen canales, con escasa velocidad, y bastante largos, que son apropiados para que los peces descansan y tomen impulso. También es importante el ancho de la zona de reposo, puesto que determina el radio de giro para tomar el chorro. Este ancho está determinado por la separación entre las pantallas, que a su vez depende de la pendiente del canal y de la altura de las gargantas, como se aprecia en el corte longitudinal de la Figura F-53.

Las escaleras para peces que buscan sortear una presa que interrumpe el flujo en corrientes naturales, generalmente requieren un tramo de ascenso hasta alcanzar el nivel superior de dicha presa, y luego un tramo de descenso hasta el otro costado de ésta. En este caso, se requiere tener un estanque ubicado a una altura superior al de la presa, desde donde se derivan las dos escaleras, y un bombeo de agua hasta dicho estanque desde el

embalse. El caudal bombeado debe cubrir las necesidades las dos escaleras que descienden hacia ambos lados de la presa. En el tramo de escalera entre el embalse y el estanque superior, los peces deben remontar la corriente, cuando normalmente buscan ir hacia aguas abajo. Estos peces generalmente se encuentran en sus primeras etapas de desarrollo, posiblemente no tengan la habilidad natatoria suficiente. Una alternativa a la escalera podría ser pescar los peces mediante redes y transportarlos hacia aguas abajo de la presa.