

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

EL CONCEPTO HIDRÁULICO EN

EL DISEÑO DE UNA PTAR

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniería Química

P R E S E N T A

Ivonne Cuéllar Martínez

DIRECTOR DE TESIS

Mtro. Ad, I.Q. Morales Cabrera Juan Mario



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNAM –Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Cuando echo un vistazo a lo que fue mi paso por la licenciatura de Ingeniería Química, no puedo evitar pensar en todos, quienes formaron parte de tan maravillosa etapa, por lo que no quiero dejar pasar la oportunidad de agradecerles por tanto apoyo incondicional a lo largo de mis estudios.

A mis padres **Miguel y Elvia**, porque creyeron en mí y me incentivaron a seguir siempre adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Sé que no existe forma de agradecer su sacrificio y esfuerzo, gracias por todo.

A mis hermanos, **Jonathan y Yuridia**, quienes con sus palabras me hacen sentir orgullosos de lo obtenido. Por escucharme cuando tenía desmotivación y orientarme a seguir adelante. Ojalá y algún día me convierta en ese ejemplo para que puedan seguir avanzando en su camino.

A mis amigos, **Daniel, Lidia, Daniela y Vianney**, quienes pasamos momentos felices, tristes y estresantes. Gracias por sus consejos y hacer que cada día me superara en mi trabajo al igual que sus enseñanzas, para mí fueron de gran aprendizaje. Vianney fuiste mi compañera en todo, no tengo palabras para expresar lo agradecida que estoy por haberte tenido a mi lado.

A mi asesor de tesis el Mtro. Ad, I.Q. **Morales Cabrera Juan Mario** por brindarme su tiempo y conocimiento durante la elaboración de este proyecto. Por guiarme en todo momento y hacer que este trabajo haya sido una gran experiencia.

A mis sinodales, el Mtro. I, I.Q. **Ortiz Ramírez José Antonio** y Mtro. I, I.Q. **Álvarez Maciel Carlos**, por su tiempo y por compartir conmigo sus conocimientos y experiencia.

A la **Facultad de Química** de la UNAM y los profesores que infundieron y reafirmaron mi amor por la ingeniería. A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme educación y la oportunidad de crecer en mi vida profesional.

Po mi raza hablará el espíritu.

ÍNDICE

OBJETIVOS	1
OBJETIVO GENERAL	1
OBJETIVO PARTICULAR	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO 1.....	4
1. INFORMACIÓN GENERAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR).....	4
1.1. ¿Qué es una planta de tratamiento de aguas residuales?	5
1.2. Análisis de diseño en una PTAR.....	6
1.3. Diferentes fluidos que se presentan en una PTAR.....	6
1.4. Fomento al tratamiento de aguas residuales	7
CAPÍTULO 2.....	9
2. CONCEPTOS BÁSICOS QUE CONTRIBUYEN A LA HIDRÁULICA	9
2.1. Historia	9
2.2. Concepto de Fluido	10
2.2.1. Fluidos Newtonianos y no Newtonianos.....	10
2.3. Propiedades de los fluidos	11
2.3.2. Densidad.....	12
2.3.3. Número de Reynolds.....	12

2.3.4. Regímenes de Corriente.....	13
2.4. Tubería.....	13
2.5. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos.....	14
2.5.2. Ecuación de Bernoulli	14
2.6. Fundamentos hidráulicos.....	17
2.6.1. Flujo.....	17
2.6.2. Velocidad.....	19
2.6.3. Pérdidas localizadas.....	21
2.7 Bombas.....	24
2.7.1. Definición de un equipo de bombeo.....	25
2.7.2. Clasificación y descripción general de las bombas.....	25
2.7.3. Los términos básicos utilizados en la hidráulica de bombeo	26
CAPÍTULO 3.....	33
3. FLUJO POR BOMBEO Y GRAVEDAD	33
3.1. Sistema por gravedad	34
3.1.2. Las ventajas principales de esta configuración son:	34
3.1.3. La desventaja principal es:.....	34
3.2. Sistema de bombeo.....	35
3.2.1. ¿Qué es el abastecimiento de agua por bombeo?	35

3.2.2. Las ventajas principales de esta configuración son:	35
3.3. Aplicación en una PTAR (Perfil Hidráulico)	36
CAPÍTULO 4.....	38
4. DIFERENTES TIPOS DE BOMBAS QUE SE INTEGRAN EN UNA PTAR	38
4.1. Selección de una bomba	38
4.2. Cavidad progresiva.....	40
4.2.1. ¿Qué es una bomba de cavidad progresiva?	40
4.2.2. Aplicación	41
4.3. Bomba dosificadora	43
4.3.1. ¿Qué es una bomba dosificadora?	43
4.3.2. Aplicación	44
4.3.3. Una bomba de dosificación utilizada en una PTAR	44
4.4. Centrífuga sumergible	47
4.4.1. ¿Qué es una bomba centrífuga sumergible?	47
4.4.2. Aplicación	48
4.5 Localización en una PTAR.....	50
CAPÍTULO 5.....	52
5. IMPORTANCIA DE UN PERFIL HIDRÁULICO EN UNA PTAR.....	52
5.1. Topografía	53

5.2. Plano de un perfil hidráulico	54
5.3. Costo de movimiento de tierras	57
5.4. Ejemplo de cálculo de un perfil hidráulico.....	60
RESUMEN	71
CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO.....	86

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 y 2. Plantas de tratamiento de agua residual.....	4
Figura 3. Sistema de tratamiento residual de agua.....	5
Figura 4. Normas Oficiales Mexicanas.....	8
Figura 5. Esfuerzo cortante aplicado a un fluido.....	11
Figura 6. Diagrama Moody	16
Figura 7. Principales tipos de bombas.....	26
Figura 8. Sistema de bombeo 1.....	28
Figura 9. Sistema de bombeo 2.....	29
Figura 10. Línea Piezométrica.....	32
Figura 11. Sistema por gravedad.....	34
Figura 12. Sistema por bombeo.....	35
Figura 13. Caja de demasías o Cárcamo.....	37
Figura 14. Cárcamo de bombeo.....	37
Figura 15. Partes de una bomba de cavidad progresiva.....	40
Figura 16. Bomba de cavidad progresiva.....	42
Figura 17. Partes de una bomba dosificadora.....	44

Figura 18. Bomba dosificadora.....	45
Figura 19. Partes de una bomba centrífuga sumergible.....	48
Figura 20. Centrífuga Sumergible.....	50
Figura 21. Diagrama de localización.....	51
Figura 22. Perfil hidráulico típico a través de la instalación de tratamiento.....	55
Figura 23. Perfil hidráulico típico a través de la instalación de tratamiento.....	56
Figura 24. Equipos del ejemplo 1.....	59
Figura 25. Equipos del ejemplo 2.....	60
Figura 26. Equipos para el planteamiento del problema	62
Figura 27. Resolución del perfil hidráulico	69

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Explicar la importancia de comprender y visualizar conceptos de un perfil hidráulico en una planta de tratamiento de agua.

OBJETIVO PARTICULAR

- Comprender mejor el sistema por gravedad y bombeo, teniendo en cuenta los fundamentos básicos de la ingeniería hidráulica.
- Conocer acerca del tipo de bombas que se suelen implementar en una planta de tratamiento de agua (PTAR).
- Demostrar la importancia de llevar a cabo un proceso de investigación para la hidráulica de una planta, observando las ventajas y desventajas. Para esto se tomará como ejemplo una planta tratamiento de agua residual (PTAR).

INTRODUCCIÓN

La escasez, el abuso, su contaminación y el uso del agua representan una amenaza seria y creciente al desarrollo social y económico. En este contexto es muy importante impulsar medidas que permitan recuperar y mantener los ecosistemas deteriorados y conservar los recursos naturales, entre los que podemos destacar al agua como recurso renovable e indispensable para la salud, además de un desarrollo económico, por ello es importante tener claro las causas de deterioro ambiental y planear las medidas necesarias para su recuperación y conservación.

En México, la infraestructura hidráulica en cuestión de una PTAR es lamentable y en muchos casos urge rehabilitarla. Esta tarea requiere la aplicación de nuevos métodos de diseño tanto hidráulico como hidrológico y en lo posible usar los actuales desarrollos tecnológicos.

Entre las actividades cotidianas de un ingeniero químico, está analizar la ingeniería básica. Durante el desarrollo de una ingeniería básica se encuentra el diseñar las redes de transporte de fluidos que conforman la planta industrial, mismas que dependen de los materiales a transportar. Por otro lado, un ingeniero químico, por su formación, tiene la capacidad de brindar las mejores soluciones: técnicas, seguras, económicas, ecológicas y más convenientes, por mencionar algunas de sus cualidades.

En este trabajo se presenta el concepto hidráulico en el diseño de una planta de tratamiento, que permite la comprensión y visualización de la mecánica de fluidos como también una visión económica. La investigación trata acerca de reunir información más certera del perfil hidráulico, ya que no hay suficiente información en la red la cual hable de este tema; no todos los proyectos consideraban un perfil hidráulico en la etapa de ingeniería básica, debido a lo anterior no se encuentra documentada la importancia del mismo.

La presente tesis consta de cinco capítulos que ayudan a reportar el trabajo realizado, los cuales se mencionarán a continuación más detalladamente:

En el primer capítulo se mencionarán características y conceptos básicos que se deben de comprender en una planta de tratamiento de agua.

En el segundo capítulo se hablará acerca de conceptos de ingeniería de fluidos con sus respectivas ecuaciones fundamentales que contribuyen a la hidráulica. También se menciona un

pequeño resumen de este tema tomando en cuenta el punto de vista de épocas pasadas hasta la actualidad.

El tercer capítulo está dedicado a diferenciar las características de cómo transportar el fluido, ya sea por bombeo y por gravedad.

En el cuarto capítulo se enseñan las propiedades de las bombas utilizadas en las plantas de tratamiento (PTAR), como también la importancia de éstas.

En el último capítulo que le pertenece el número cinco, trata específicamente del perfil hidráulico y qué características se deben de tomar en cuenta para su conformación, ya que con ayuda de los anteriores capítulos se tendrá una mejor percepción de lo que conlleva.

CAPÍTULO 1

1. INFORMACIÓN GENERAL DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)

El agua se constituye en un líquido vital, ya que es necesario e indispensable para la supervivencia de los seres humanos y es un factor clave en las actividades cotidianas, domésticas, industriales, ganaderas y agrícolas. El uso como degradación de este recurso ha ido en aumento y se le ha sumado el bajo perfil en cuanto al interés por tratar este tipo de aguas, que tiene un alto impacto nocivo en los cuerpos de agua. De ahí la inquietud y preocupación para realizar el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

Figura 1 y 2.

Plantas de tratamiento de agua residual.

1



2



Nota. Figura 1. “Planta de tratamiento de aguas residuales I, se localiza en el predio denominado “La Palma” en la congregación el Lencero, municipio de Emiliano Zapata, estado de Veracruz” (Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa, 2021).

Figura 2. “Planta de tratamiento de aguas residuales en el noreste, ubicada en el Antiguo Camino a Agua Fría, Apodaca, Nuevo León” (Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D., 2021)

1.1. ¿Qué es una planta de tratamiento de aguas residuales?

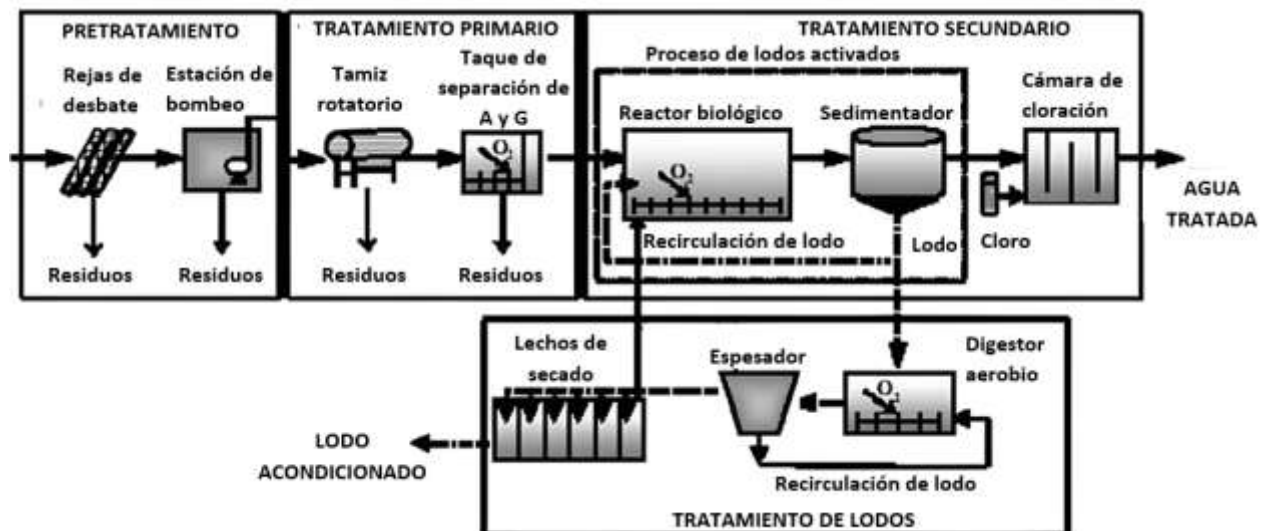
Es una instalación que cuenta con sistemas diseñados especialmente para retirar los contaminantes que son vertidos en el agua, esto con el objetivo de hacer que el agua no represente un riesgo a la salud o al medio ambiente al ser incorporada a un cuerpo lacustre natural (mares, lagos o ríos) o, de ser así, ocuparse en la parte de servicios auxiliares en el área industrial. Asimismo, ser reusada en otras actividades de la vida cotidiana con la excepción del consumo humano, es decir, no para ser ingerida o para aseo personal.

Las diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias de una planta de tratamiento funcionan como un sistema, por lo que la elección del tren de tratamiento a utilizar se debe abordar desde una perspectiva global, tomando en cuenta todas las variables involucradas para que el agua entrante a la planta cumpla con las características requeridas al final del tratamiento.

Una planta de tratamiento principalmente consiste en una sección de tratamiento primario y secundario, y dependiendo de la calidad requerida del efluente, se implementará un tratamiento terciario.

Figura 3.

Sistema de tratamiento residual de agua.



Nota. Unidades del sistema de tratamiento de aguas residuales de la industria avícola zuliana. (Caldera, Gutiérrez, Luengo, Chávez, & Ruesga, 2010).

1.2. Análisis de diseño en una PTAR

Dentro de las condiciones específicas para un diseño de aguas residuales, normalmente se deberían tener claros los parámetros básicos en relación a la naturaleza de la solución óptima y tamaño de la planta de tratamiento con respecto a directrices importantes.

En la actualidad, se han desarrollado diferentes tecnologías para el tratamiento de aguas. En resumen, los principales elementos que intervienen en la selección de tecnologías en los procesos de tratamiento son:

- a. Calidad del agua residual.
- b. Requerimientos de la calidad del agua residual tratada, en otras palabras, el origen de éstas.
- c. Selección y análisis de las operaciones y procesos unitarios.
- d. Análisis de un perfil hidráulico teniendo en cuenta flujo por gravedad y bombeo.
- e. Compatibilidad con las instalaciones existentes, en caso de haberlas.
- f. Costo de la tecnología.
- g. Operación y mantenimiento.
- h. Consideraciones ambientales.
- i. Características del sitio (topografía).
- j. Emisión de gases.
- k. Emisión de ruidos.
- l. Generación de residuos.

1.3. Diferentes fluidos que se presentan en una PTAR

En términos generales, en una PTAR ocurren operaciones, procesos físicos, químicos y biológicos.

Las cuatro fuentes principales de aguas residuales son: aguas domésticas o urbanas, aguas residuales industriales, escorrentías (cauce, caudal) de usos agrícolas y pluviales.

- a. Aguas domésticas o urbanas: las aguas residuales urbanas poseen diversos tipos de contaminantes como sólidos totales, sólidos en suspensión, nitrógeno, amoníaco, fósforo, grasa, DBO_5^1 y DQO^2 . Las causas de su origen son:
- Excretas: contienen los residuos sólidos y líquidos que constituyen las heces humanas.
 - Residuos domésticos: proceden de la evacuación de los residuos y manipulaciones de cocinas, lavados domésticos, detergentes sintéticos con espumantes y tensoactivos generales de viviendas.
- b. Aguas residuales industriales: proceden de cualquier actividad industrial de cuyo proceso de producción se generan residuos que son acarreados por agua, conformando así a las aguas de drenaje; pero también existen las aguas de proceso, las cuales intervienen directamente en el proceso industrial, con lo que entran en equilibrio con las sustancias principales. Contienen gran cantidad de contaminantes como minerales, compuestos orgánicos, y temperatura elevada o abatida debido a su uso en la refrigeración.
- c. Escorrentías (cauce, caudal) de usos agrícolas: las zonas utilizadas para la agricultura por la composición del suelo permiten el paso del agua de arrastre hacia los acuíferos, con la consecuencia de ser contaminados. Debido a que los acuíferos están próximos a la superficie, existe peligro de infiltración o fugas a través de tuberías en mal estado.
- d. Pluviales: cuando cae la lluvia en la ciudad, arrastrará las partículas y fluidos presentes en la superficie como hollín, cemento, esporas, polvo, hidrocarburos, restos vegetales y animales, etc., así como las suspendidas en el aire troposférico. Si la precipitación es en abundancia, el arrastre de esta materia puede provocar taponamientos en las redes de evacuación, produciendo como resultado inundaciones y con ello la proliferación de algas y microorganismos que incrementarán la dificultad para el tratamiento de esta agua.

1.4. Fomento al tratamiento de aguas residuales

¹ Demanda biológica de oxígeno. Mide la cantidad de oxígeno consumido por organismos unicelulares como bacterias.

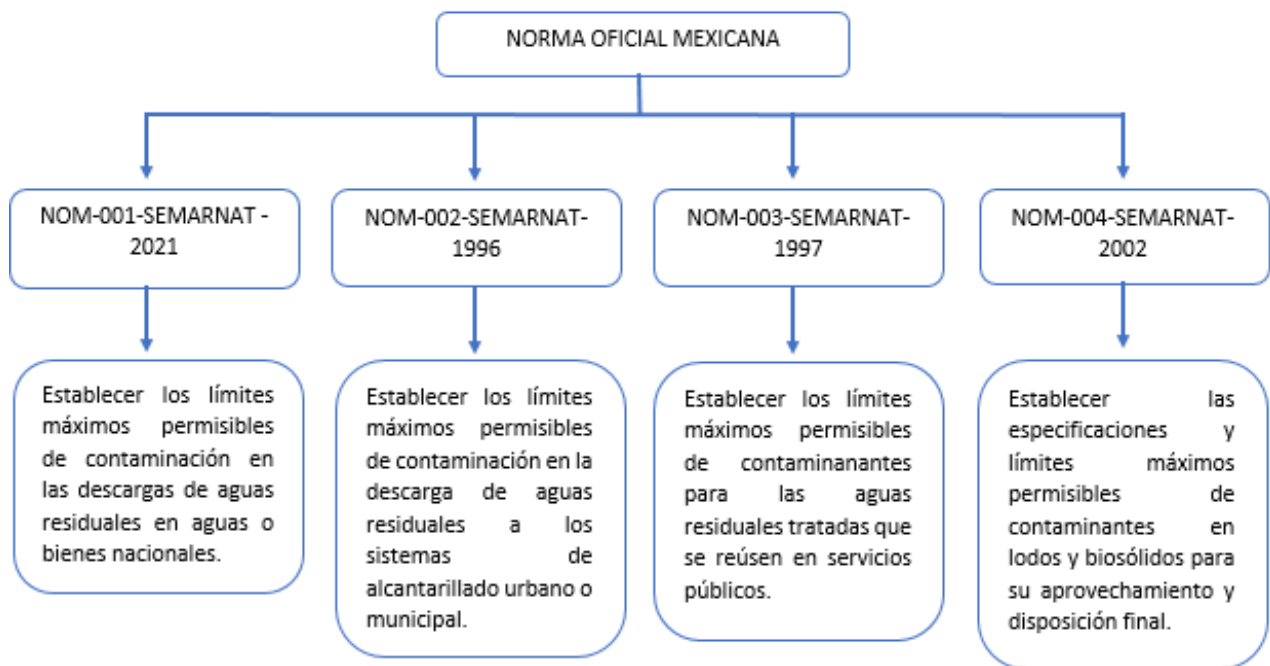
² Demanda química de oxígeno. Es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer químicamente la materia orgánica.

A partir de 2008, la CONAGUA ha impulsado el tratamiento de aguas residuales industriales, promoviendo la participación del sector industrial en sus diferentes giros para la realización de obras y acciones de saneamiento y dotación de infraestructura.

Muestra de ello es el decreto que compila diversos beneficios fiscales y establece medidas de simplificación administrativa, el cual establece que se otorgará un estímulo a aquellos contribuyentes que cuenten con planta de tratamiento de aguas residuales, que además estén exentos del pago del derecho por descargas en términos de lo dispuesto en el artículo 282, fracción de la Ley Federal de Derechos, siempre y cuando la descarga cumpla con los límites máximos permisibles establecidos en las NOM-003-SEMARNAT-1997, NOM-001-SEMARNAT-2021, NOM-002-SEMARNAT-1996, NOM-003-SEMARNAT-1997 y NOM-004-SEMARNAT-2002.

Figura 4.

Normas Oficiales Mexicanas.



Nota. Normatividad en materia de descargas de aguas residuales. (Girón, 2015)

CAPÍTULO 2

2. CONCEPTOS BÁSICOS QUE CONTRIBUYEN A LA HIDRÁULICA

2.1. Historia

En este inicio nos remontaremos a la historia para tener una idea más concisa sobre el surgimiento de la hidráulica.

La hidráulica nace de la necesidad del hombre por aprovechar las fuerzas de los elementos naturales que tiene en su entorno. El estudio de los fenómenos hidráulicos tiene antecedentes remotos hacia el final de la Edad Media e inicio de la Edad Moderna (entre el siglo XV y el siglo XVIII), cuando afamados científicos e ingenieros como Leonardo da Vinci, Edme Mariotte, Pascal, Newton, Leonhard Euler, Daniel Bernoulli, Navier, Darcy y Manning realizaron grandes aportaciones teóricas y experimentales para el desarrollo de la hidráulica con una orientación práctica y aplicada.

Estos nombres, en algunos casos olvidados o poco relacionados con esta temática, resultan imprescindibles para estudiar el surgimiento e incipiente desarrollo de la hidráulica moderna.

Podemos decir que la hidráulica es la rama de la Física que se encarga de estudiar el comportamiento y el movimiento de fluidos. Dentro de los principios básicos de la hidráulica se establece la conservación de la materia, conocida también como ecuación de continuidad. Ésta manifiesta que la masa de fluido por una unidad de tiempo entra a un volumen especificado en el trayecto del flujo, una parte se queda almacenada de su interior y el resto sale de dicho volumen. Si este volumen es de forma y magnitud constantes (volumen de control), el almacenaje no puede ser indefinido. Por lo tanto, “el principio de la conservación de la materia define que la cantidad neta de masa que sale y entra sumadas algebraicamente sea cero y que se aplica lo mismo a un volumen de control de tamaño diferencial que a uno finito, de lo cual se deriva la ecuación de continuidad” (Stoleo, 1997).

En este trabajo, se permite observar el fenómeno de flujo de fluidos a través de un sistema de tuberías tomando en cuenta los principios básicos de los conceptos aplicados a este

sistema. El conocer y entender los principios básicos de la mecánica de fluidos es esencial en el análisis y diseño de cualquier sistema en el cual el fluido es el elemento de trabajo y es indispensable saber este tema para el desarrollo del ingeniero químico.

La mecánica de fluidos se aplica a todo el medio que nos rodea; particularmente en el flujo de fluidos, se ve atribuido a través de tuberías y equipos, con esto podemos mencionar que se puede ver la manifestación en los sistemas de tubería que están incluidos en escuelas, hospitales, casas, etc.

2.2. Concepto de Fluido

Desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, un fluido es una sustancia que puede resistir esfuerzo cortante. Si éste se presenta, el fluido se deforma y continúa deformándose mientras exista el esfuerzo cortante. En esta deformación continua, las diferentes partes del fluido cambian de posición relativa permanentemente, a la vez que tienen un movimiento relativo con respecto a un contorno sólido. Esta combinación de movimientos se conoce como flujo.

2.2.1. Fluidos Newtonianos y no Newtonianos

Un fluido newtoniano es todo aquel fluido en el cual el esfuerzo de corte es proporcional a la rapidez de deformación, es decir, para una temperatura y una presión dadas, la viscosidad puede considerarse constante. Los fluidos newtonianos son uno de los tipos de fluidos más sencillos de describir.

Un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido newtoniano.

“La mecánica de los fluidos se ocupa del estudio de los fluidos newtonianos exclusivamente, mientras que los fluidos no Newtonianos son parte de una ciencia más amplia denominada reología” (Zitzewitz, 2004).

2.3. Propiedades de los fluidos

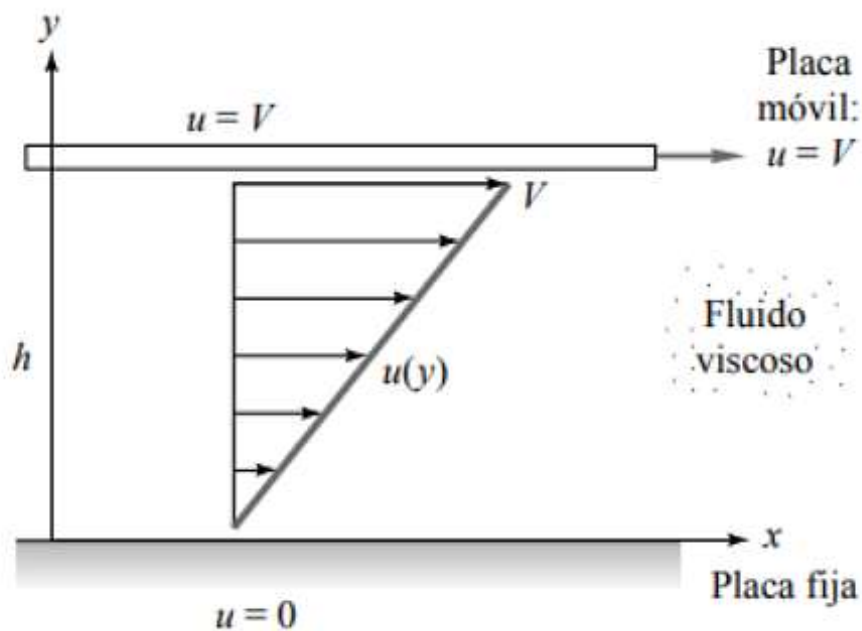
2.3.1. Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los fluidos cuyo efecto es entendido cuando el fluido se encuentra en movimiento. Es una medida de su resistencia a fluir cuando se le aplica una fuerza externa.

En un flujo, cuando los elementos del fluido se mueven a diferentes velocidades, cada elemento experimentará una resistencia debido a la fricción del fluido entre elementos. Por lo tanto, entre los elementos del fluido con diferentes velocidades existirá un esfuerzo cortante.

Figura 5.

Esfuerzo cortante aplicado a un fluido.



(Girón, 2015)

De la **Figura 5** puede apreciarse que el plato superior se desplaza a velocidad constante, mientras que el plato inferior se mantiene en reposo, lo que resulta en una fuerza F aplicada sobre la capa inferior con dirección del flujo. De manera similar, la capa inferior trata de detener a la superior, de acuerdo con la tercera Ley de Newton, con una fuerza F de igual magnitud y sentido

opuesto. Entonces, como la fuerza F actúa sobre un área de contacto A , el esfuerzo cortante τ es definido como:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Newton postuló que τ es proporcional a la cantidad $\frac{\Delta u}{\Delta y}$, donde Δy es la distancia de separación de las dos capas y Δu es la diferencia de velocidades. En el caso límite, el gradiente de velocidad en un punto en dirección perpendicular al movimiento de la capa cumple la siguiente relación:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Donde la constante de proporcionalidad μ es conocida como el coeficiente de viscosidad o simplemente viscosidad, la cual es una propiedad del fluido y depende de su estado. Dicha definición de la viscosidad es conocida como la ley de viscosidad de Newton. Los fluidos que obedecen dicha ley son llamados fluidos Newtonianos.

2.3.2. Densidad

La densidad de un fluido es su masa por unidad de volumen, denominada con la letra griega ρ (*rho*). En ocasiones se habla de densidad relativa que es la relación entre densidad de un cuerpo y la densidad del agua (en el caso de líquidos, porque para gases el fluido de referencia es el aire). Entonces, la densidad absoluta del fluido es:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

ρ Densidad [kg/L],

m Masa de un cuerpo [kg],

V Volumen [L].

2.3.3. Número de Reynolds

El número de Reynolds es el parámetro primario que determina el comportamiento de los fluidos newtonianos, pues establece la relación de fuerzas inerciales a las fuerzas viscosas, también conocido como el número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Donde:

V Velocidad del flujo del líquido [m/s],

D Diámetro interno de tubería [m],

ν Viscosidad cinemática del fluido [m²/s] $\nu = \frac{\mu}{\rho}$.

2.3.4. Regímenes de Corriente

Con base en lo anterior, se ha llegado con varios experimentos a determinar los límites del comportamiento del flujo laminar a flujo turbulento cuantificado al número de Reynolds para tuberías, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Límites del número de Reynolds para tuberías.

Rango	Flujo
$Re \leq 2000$	Flujo laminar
$2000 > Re \leq 4000$	Flujo transitorio
$Re > 4000$	Flujo turbulento

Nota. “El número de Reynolds es adimensional, por lo que es independiente del sistema de unidades adoptado. En general y en forma práctica, el flujo se presenta en régimen turbulento, con excepción a los flujos con velocidades muy bajas o fluidos de viscosidad alta” (Sotelo, 1997).

2.4. Tubería

El método más común para transportar fluidos de un punto a otro es impulsarlo a través de un sistema de tuberías. Una tubería se define como el conjunto formado por el tubo de forma cilíndrica (con sección circular o de otra geometría) y su sistema de unión entre partes (conocido como el conjunto de accesorios). El requisito principal de cualquier clase de tubo es que debe de ser capaz de satisfacer las necesidades hidráulicas y mecánicas sin que se presenten fugas en sus uniones o juntas. Las tuberías de sección circular son las más frecuentes, ya que esta forma ofrece mayor resistencia estructural.

Dada la diversidad de materiales en la fabricación de los tubos, la selección adecuada entre los que reúnen los requisitos hidráulicos y mecánicos es con frecuencia una decisión por seguridad, económica y eventualmente depende de su disponibilidad inmediata en el mercado, aunque existan razones aparentes que favorecen la utilización de un tipo u otro material.

2.5. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos

2.5.1. Ecuación de la hidrostática

Esta ecuación indica que para un líquido dado y para una presión exterior constante la presión en el interior depende únicamente de la altura. Por tanto, todos los puntos del líquido que se encuentren al mismo nivel soportan igual presión. Con ello implica que ni la forma de un recipiente ni la cantidad de líquido que contiene influyen en la presión que se ejerce sobre su fondo, tan sólo la altura de líquido.

2.5.2. Ecuación de Bernoulli

En la mayoría de los problemas de flujo de fluidos presentes en ingeniería, intervienen corrientes que están influidas por superficies sólidas y que por lo tanto contienen capas límite. Esto ocurre especialmente en el flujo de fluidos a través de tuberías y otros equipos, en los cuales es posible que la corriente entera posea flujo de capa límite.

El planteamiento de un balance energético, que es la ecuación de Bernoulli en términos de energía específica media, permite su generalización al caso del flujo unidimensional, en que no se pueda considerar que el fluido sea ideal y, por tanto, que no haya fricción y que ésta sea constante a lo largo del tubo de corriente en su línea media. Por otro lado, si se plantea la ecuación de Bernoulli corregida, resulta de mayor utilidad en la resolución de problemas de flujo de fluidos no compresibles, ya que un conducto de sección variable en el cual hay bombas que incrementan la energía específica al comunicar potencia al fluido (o turbinas que la disminuyen), accesorios que disipan potencia y disminuyen la energía específica de la corriente, esto hace que el ejercicio se acerque mayor a la realidad.

La ecuación en el caso más general:

$$\frac{P_a}{\rho} + \frac{gZ_a}{g_c} + \frac{u_a^2}{2g_c} = \frac{P_b}{\rho} + \frac{gZ_b}{g_c} + \frac{u_b^2}{2g_c}$$

La ecuación corregida para el trabajo de bomba es:

$$\frac{P_a}{\rho} + gZ_a + \frac{\alpha_a \bar{V}_a^2}{2} + \eta W_p = \frac{P_b}{\rho} + gZ_b + \frac{\alpha_b \bar{V}_b^2}{2} + h_f$$

El término $\frac{P_{a/b}}{\rho}$ es la carga de presión, la cual se refiere a la energía correspondiente al trabajo mecánico ejecutado por las fuerzas debidas a la presión.

El segundo término $gZ_{a/b}$ es la carga de posición, la cual se refiere a la energía potencial que interviene desde una línea de referencia para cuantificar la altura de carga donde se encuentra nuestro sistema.

El término $\frac{\bar{v}_{a/b}^2}{2}$ de la ecuación es la energía cinética por una unidad de masa de fluido.

En el caso de fluidos no compresibles, la ecuación de Bernoulli se corrige por la fricción, añadiendo un término al lado derecho de la ecuación que es h_f . El término h_f representa toda la fricción que se produce por unidad de masa del fluido (por consiguiente, toda la conversión de la energía mecánica en calor) que tiene lugar en el fluido entre los puntos a y b.

Se puede observar los términos agregados como factores de corrección de la energía cinética que son α_a y α_b , los cuales se conocen como coeficientes de Coriolis³.

Donde $\alpha_a = \alpha_b = 0.5$ para régimen laminar y $0.8 < \alpha_a, \alpha_b < 0.9$ para régimen turbulento.

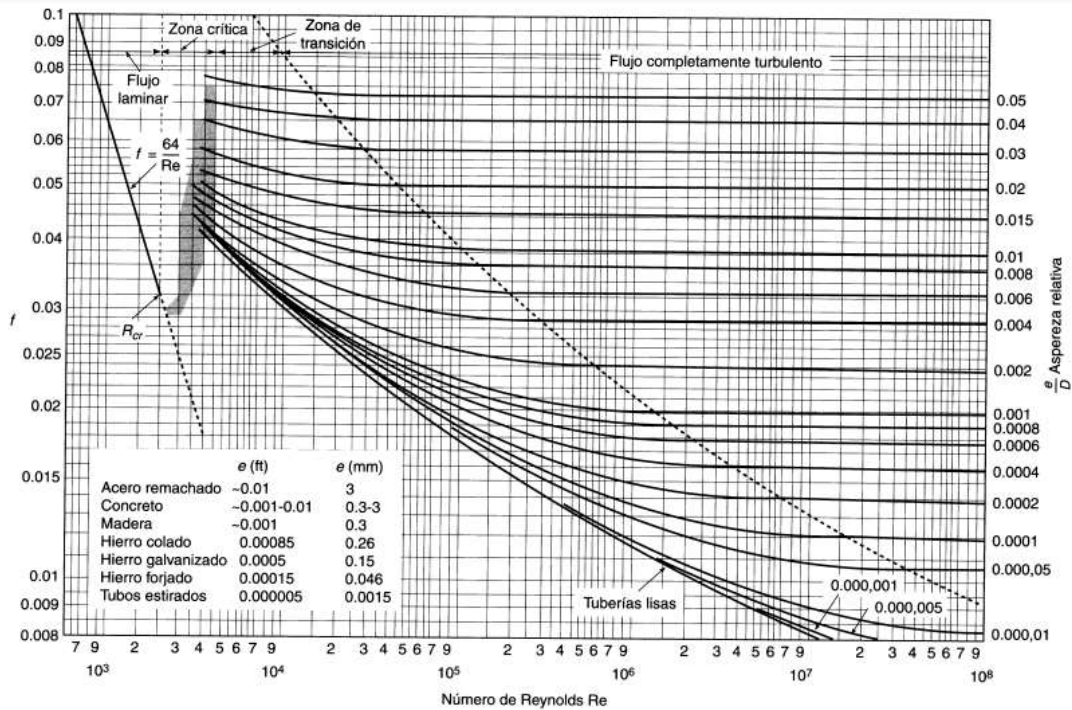
El coeficiente de fricción f es un parámetro adimensional y que varía dependiendo del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la pared.

Se desarrolló un diagrama en el que se muestra la gráfica del coeficiente de fricción (f) contra el número de Reynolds (Re), con una familia de curvas de rugosidad relativa constante, con las que se determina el coeficiente de fricción para flujo turbulento a partir de la intersección de la vertical del número de Reynolds con la curva correspondiente; éste tiene el nombre de Diagrama de Moody.

³ Como resultado de la distribución no uniforme de velocidades en una sección de canal.

Figura 6.

Diagrama de Moody.



(Trans ASME, 1994)

Existen varias ecuaciones que representan los datos mostrados en la figura 6, algunas son implícitas y otras son explícitas, estas últimas son preferibles para fines de cálculo por ser directas, en cambio las implícitas requieren un método numérico para determinar el valor del factor de fricción. En el diagrama de Moody original, el factor de fricción es descrito analíticamente mediante la ecuación implícita de Colebrook-White :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Donde:

f Factor de fricción de Darcy,

e/D Rugosidad relativa,

Re Número de Reynolds.

Además del coeficiente de fricción, se deben incluir otros factores que generan pérdidas por fricción los cuales se irán describiendo adelante más detalladamente.

Por último, pero no menos importante, el término ηW_p , sea W_p el trabajo realizado por la bomba por unidad de masa de fluido. Puesto que la ecuación de Bernoulli es sólo un balance de la energía mecánica, se debe tomar en cuenta la fricción que tiene lugar en la bomba. En una bomba real no solamente existen todas las fuentes de fricción activa del fluido, sino que también hay fricción mecánica en los cojinetes y sellos o prensaestopas. La energía mecánica suministrada a la bomba como trabajo de eje negativo hay que descontarla de esas pérdidas por fricción para obtener la energía mecánica neta realmente disponible para el fluido en movimiento. Sea la fricción total en la bomba por unidad de masa de fluido. Entonces, el trabajo neto suministrado al fluido es $W_p - h_{fp}$. En la práctica, en lugar de h_{fp} se utiliza una eficiencia de bomba, que se representa por η y está definida por la ecuación.

$$\eta = \frac{QH\gamma}{3960BHP}$$

Donde:

η Eficiencia de la bomba [Adimensional],

Q Caudal de líquido [gpm],

H Cabezal total diferencial [ft],

γ Gravedad Especifica [Adimensional],

BHP Potencia al eje que debe suministrarel equipo impulsor [HP],

Una parte importante a saber es que las unidades de todas las diferentes formas de energía presentes en la ecuación de Bernoulli se pueden medir también en unidades de distancia y, por lo tanto, estos términos a veces se denominan «cabezas» (cabeza de presión, cabeza de velocidad y cabeza de elevación). La cabeza también se define para bombas, ésta generalmente se conoce como la cabeza estática.

2.6. Fundamentos hidráulicos

2.6.1. Flujo

En comparación con el estudio de fluidos en reposo, el estudio del flujo de fluidos (agua en movimiento) es mucho más complicado, pero es importante tener comprensión de estos principios porque el agua en un sistema de tratamiento, así como la distribución, casi siempre está en movimiento. La descarga o caudal es la cantidad de agua que pasa por un punto dado en una tubería o canal durante un período de tiempo determinado, y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$Q = V * A$$

Donde:

Q Descarga en pies cúbicos por segundo $\left(\frac{ft^3}{s}\right)$,

V Velocidad del agua en pies por segundo (ft / s) .

A Área de la sección transversal de la tubería o canal en pies cuadrados (ft^2) .

A continuación, se muestra un ejemplo:

Nota. La descarga se puede convertir de pies cúbicos por segundo (ft^3/s) a otras unidades como galones por minuto (gpm) o millones de galones por día (MGD) , entre otras unidades, usando el factor de conversión apropiado.

Una tubería de 12 in de diámetro tiene agua fluyendo a través de ella a 12 ft/s. ¿Cuál es la descarga en (a) ft^3/s , (b) gpm y (c) MGD ?

Primero, determine el área de la tubería. La ecuación para el área de un círculo es:

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} = \pi * r^2$$

Donde:

π 3,14159...

D Diámetro del círculo en pies,

r Radio del círculo en pies.

Por tanto, el área de la tubería es:

$$A = 3.1416 \left(\frac{1ft^2}{4}\right) = 0.785ft^2$$

(a) Determine la descarga en ft^3/s :

$$Q = V * A = 12 \frac{ft}{s} * 0.785 ft^2 = 9.42 \frac{ft^3}{s}$$

(b) Determine la descarga en gpm . Necesitamos saber que $1 ft^3/s = 449 gpm$, entonces:

$$9.42 \frac{ft^3}{s} * 449 \frac{gpm}{ft^3/s} = 4230 gpm.$$

(c) Determine la descarga en MGD . Sabemos que $1 MGD = 1,55 ft^3/s$; así,

Nota. (Frank R, 2011) Sugiere lo siguiente: “La ley de continuidad establece que la descarga en cada punto de una tubería o canal es el mismo que la descarga en cualquier otro punto (siempre el agua no sale ni entra en la tubería o canal)”.

$$9.42 \frac{ft^3}{s} \left(\frac{1 MGD}{1.55 \frac{ft^3}{s}} \right) = 6.1 MGD$$

A partir de esto, la ecuación usada anteriormente queda como:

$$Q_1 = Q_2 \text{ ó } A_1 V_1 = A_2 V_2$$

A continuación, se muestra un ejemplo:

Una tubería de 12 in de diámetro está conectada a una tubería de 6 in de diámetro. La velocidad del agua en el tramo de 12 in es de 3 ft/s. ¿Cuál es la velocidad en el tubo de 6 in?

Usando la ecuación $A_1 V_1 = A_2 V_2$, primero determine el área de cada tubo:

12 in diámetro:

$$A = \pi \left(\frac{D^2}{4} \right) = 3.1416 * \frac{(1ft)^2}{4} = 0.785 ft^2$$

6 in diámetro:

$$A = 3.1416 * \frac{(5ft)^2}{4} = 0.196 ft^2$$

La ecuación de continuidad ahora se convierte en:

$$0.785 ft^2 * \frac{3ft}{s} = 0.196 ft^2 * V_2$$

Resolviendo para V2

$$V_2 = \frac{0.785 ft^2 * \frac{3ft}{s}}{0.196 ft^2} = \frac{12ft}{s}$$

2.6.2. Velocidad

La velocidad de un fluido que fluye a través de un canal o tubería está relacionada con el área de la sección transversal de la tubería y la cantidad de agua moviéndose a través de la línea; por ejemplo, si el diámetro de una tubería se reduce, entonces la velocidad del agua en la línea debe aumentar para permitir que la misma cantidad de agua pase a través de la línea.

$$Velocidad [ft/s] = \frac{Flujo [ft^3/s]}{\text{Área de la sección transversal} [ft^2]}$$

$$Velocidad \left[\frac{ft}{s} \right] = \frac{Q}{A}$$

A continuación, se muestran unos ejemplos:

Si el flujo a través de una tubería de 2 ft de diámetro es de 9 MGD, ¿cuál es la velocidad?

$$Velocidad = \frac{9MGD * \frac{1.55ft^3}{s} /MGD}{0.785 * 2ft * 2ft}$$

$$Velocidad = 4.5 ft/s$$

Si el mismo flujo de 9 MGD se transfiere a una tubería con un diámetro de 1 ft, ¿cuál sería la velocidad?

$$Velocidad = \frac{9MGD * \frac{1.55ft^3}{s} /MGD}{0.785 * 1ft * 1ft}$$

$$Velocidad = 17.8 ft/s$$

Nota. “Se puede ver que, si se reduce el área de la sección transversal, se debe aumentar la velocidad del flujo” (Frank R, 2011).

Matemáticamente, podemos decir que la velocidad y el área de la sección transversal son inversamente proporcionales cuando la cantidad de flujo (Q) es constante.

$$\text{Área}_1 * Velocidad_1 = \text{Área}_2 * Velocidad_2$$

Nota. (Frank R, 2011) Sugiere lo siguiente: “El concepto que se acaba de explicar es extremadamente importante en el funcionamiento de una bomba centrífuga”.

Una relación similar a la de la velocidad y el área de la sección transversal existe para velocidad y presión. Como la velocidad del flujo en una tubería llena aumenta, la presión del líquido disminuye. Esta relación posee unidades de energía por unidad de área transversal, y resulta ser:

$$Presión_1 * Velocidad_1 = Presión_2 * Velocidad_2$$

A continuación, se muestra un ejemplo:

Si el flujo en una tubería tiene una velocidad de 3 ft/s y una presión de 4 psi, y la velocidad del flujo aumenta a 4 ft/s, ¿cuál será la presión?

$$Presión_1 * Velocidad_1 = Presión_2 * Velocidad_2$$

Despeje la presión 2 de la ecuación anterior:

$$4psi * \frac{3ft}{s} = P_2 * \frac{4ft}{s}$$
$$P_2 = \frac{4psi * 3ft/s}{4ft/s} = 3psi$$

2.6.3. Pérdidas localizadas

Se entiende como pérdidas por fricción al rozamiento de las partículas fluidas entre sí y el contacto sobre el contorno sólido que las contiene, es decir, las tuberías. Los factores que afectan la pérdida por fricción incluyen:

- a. Mayor caudal.
- b. Tipo de tubería.
- c. Mayor longitud de la tubería.
- d. Recubrimiento de tuberías.
- e. Reducción del diámetro de la tubería.
- f. Tubería constreñida⁴.
- g. Adición de codos, accesorios y válvulas.
- h. Antigüedad de la tubería.
- i. Suavidad o rugosidad de la superficie interior de la tubería.

Las pérdidas pueden clasificarse como distribuidas (pérdidas que ocurren en tramos rectos de la tubería) y localizadas (pérdidas de presión ocasionadas por las piezas y singularidades a lo largo de la tubería), tales como, curvas, válvulas, desviaciones, reducciones, expansiones, etc.

⁴ Que su estructura no es recta, ejemplo un tubo Venturi.

Nota. “Cada tipo de accesorio ejerce una pérdida de carga específica sobre la velocidad del agua a través del accesorio. Por ejemplo, la pérdida de carga a través de una válvula de retención es 2.25 veces mayor que a través de un codo de 90 ° y 10 veces mayor que la pérdida de carga a través de una válvula de compuerta abierta” (Frank R, 2011).

La fricción se manifiesta por la desaparición de energía mecánica. En el flujo con fricción, la magnitud no es constante a lo largo de una línea de corriente, sino que siempre disminuye en la dirección del flujo y, de acuerdo con el principio de conservación de la energía, se genera una cantidad de calor equivalente a la pérdida de energía mecánica. La fricción de un fluido se define como una conversión de la energía mecánica en calor que tiene lugar en una corriente en movimiento.

La resistencia al flujo que ofrece la fricción también depende de la velocidad del agua a través de la tubería; cuanta más agua se intenta bombear a través de una tubería, más presión se necesitará para superar la fricción. La resistencia se puede expresar en términos de la presión adicional requerida para empujar el agua a través de la tubería, ya sea en psi o en pies de cabeza.

La pérdida por fricción generalmente se mide en pies por 1000 pies de tubería y se puede convertir fácilmente en pérdida de presión en libras por pulgada cuadrada (psi).

Nota. (Frank R, 2011) Sugiere que (1) “Si el flujo a través de una tubería se duplica, la pérdida por fricción en la tubería se incrementará casi cuatro veces (obviamente, este factor más que cualquier otro factor individual afecta la pérdida de carga)”. (2) “El diámetro de una tubería, determina el área de la pared en contacto con el agua corriente; para una descarga determinada, el diámetro también determina la velocidad del agua”.

2.6.3.1. Pérdida de cabeza

Cuando el agua corre por una tubería y la presión (llamada presión altura) se mide en varios puntos a lo largo del flujo, la presión disminuye con distancia de la fuente. Esta disminución de presión es el resultado de pérdida de fricción. El flujo de agua se retarda por la fricción del agua contra el interior de la tubería.

2.6.3.2. Cabeza de fricción

Varias fórmulas calculan las pérdidas por fricción. Una es la de Hazen-Williams, la ecuación es una de las más comunes para tuberías de acero lisas. Por lo general, nosotros como

ingenieros no necesitamos calcular las pérdidas por fricción, porque manuales como el Manual de Fricción de Tuberías del Instituto Hidráulico los tabuló hace mucho tiempo.

“Este importante manual también muestra las velocidades en diferentes diámetros de tubería a caudales variables, así como el coeficiente de resistencia (K) para válvulas y accesorios” (Wahren, 1997).

La cabeza de fricción (en pies) es la cantidad de energía que se utiliza para vencer la resistencia al flujo de líquidos a través del sistema. Esto influirá en gran medida en el cabezal de fricción del sistema. Estos deben convertirse a su longitud equivalente de tubería e incluirse en el cálculo:

$$\text{Cabeza de fricción [ft]} = \text{factor de rugosidad} * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

El factor de rugosidad (f) varía con la longitud (L) y el diámetro (D), así como el estado de la tubería y el material con el que está construida; normalmente, está en el rango de 0.01 a 0.04. La aceleración debida a la gravedad es denotada como g.

A continuación, se muestra un ejemplo de tabla con valores que se pueden usar para el factor de rugosidad:

Tabla 2. *Rugosidad absoluta de materiales para tuberías.*

Material	Rugosidad	
	Ft	Mm
Concreto	0.003-0.03	0.9-9
Duela de madera	0.0016	0.5
Hule aislado	0.000033	0.01
Tubería de cobre o latón	0.000005	0.0015
Hierro fundido	0.00085	0.26
Hierro galvanizado	0.0005	0.15
Hierro forjado	0.00015	0.046
Acero inoxidable	0.000007	0.002
Acero comercial	0.00015	0.045

Nota. Esta tabla muestra rugosidades absolutas de materiales, colocando algunas de las más utilizadas en la industria.

A continuación, se muestra un ejemplo:

¿Cuál es la cabeza de fricción en un sistema que usa un tubo de 150 ft de largo por 6 in de diámetro cuando la velocidad es de 3 ft/s? La válvula del sistema es equivalente a 75 ft adicionales de tubería. El material de referencia indica un factor de rugosidad (f) de 0.025 para esta tubería y caudal en particular.

$$\begin{aligned} \text{Cabeza de fricción} &= 0.0025 * \frac{(150ft + 75ft)}{0.5ft} * \frac{\left(\frac{3ft}{s}\right)^2}{2 * 32ft/s^2} \\ \text{Cabeza de fricción} &= 0.025 * 450 * 0.140ft \\ \text{Cabeza de fricción} &= 1.58ft \end{aligned}$$

También es posible calcular la cabeza de fricción utilizando tablas. La cabeza de fricción también se puede determinar en el lado de succión de la bomba y el lado de descarga de la misma. En cada caso, es necesario determinar:

- a. Longitud de la tubería.
- b. Diámetro de la tubería.
- c. Velocidad.
- d. Longitud de tubo equivalente a válvulas, codos, T, entre otros accesorios.

2.7 Bombas

La bomba es un tipo de máquina hidráulica que se utiliza para mover fluidos como el agua. Si el agua se extrae del subsuelo o de la superficie, o si en un proceso unitario de tratamiento se le traslada de a otro equipo, como a un tanque de almacenamiento, para eventual entrega final a través de varios tamaños y tipos de tuberías al cliente, las bombas son la fuente habitual de energía necesaria para el transporte de agua. Una vez más, la única excepción puede ser, por supuesto, donde la fuente de energía es suministrada íntegramente por la gravedad.

Cuando se determina cuál es la mejor opción para el movimiento de fluidos teniendo en cuenta todas las características necesarias, se debe considerar que en la ecuación de Bernoulli se tiene que diferenciar si es por bombeo o si se van a hacer los cálculos de flujo por gravedad.

No hay trabajo externo en la ecuación de Bernoulli cuando hay flujo por gravedad. En cambio, en el uso de un sistema de bombeo, en la ecuación de Bernoulli se debe de agregar el cálculo del trabajo, ya que a la bomba se le debe cuantificar su potencia. Con la ecuación siguiente se puede visualizar el ηW_p , el cual es el trabajo agregado:

Ecuación de Bernoulli para el uso de flujo por bombeo.

$$\frac{P_a}{\rho} + gZ_a + \frac{\alpha_a \bar{V}_a^2}{2} + \eta W_p = \frac{P_b}{\rho} + gZ_b + \frac{\alpha_b \bar{V}_b^2}{2} + h_f$$

2.7.1. Definición de un equipo de bombeo

Un equipo de bombeo consiste en dos elementos, una bomba y su accionador el cual puede ser un motor eléctrico, motor de combustión interna, etc. El accionador entrega energía mecánica y la bomba la convierte en energía cinética que un fluido adquiere en forma de presión, posición y de velocidad.

2.7.2. Clasificación y descripción general de las bombas

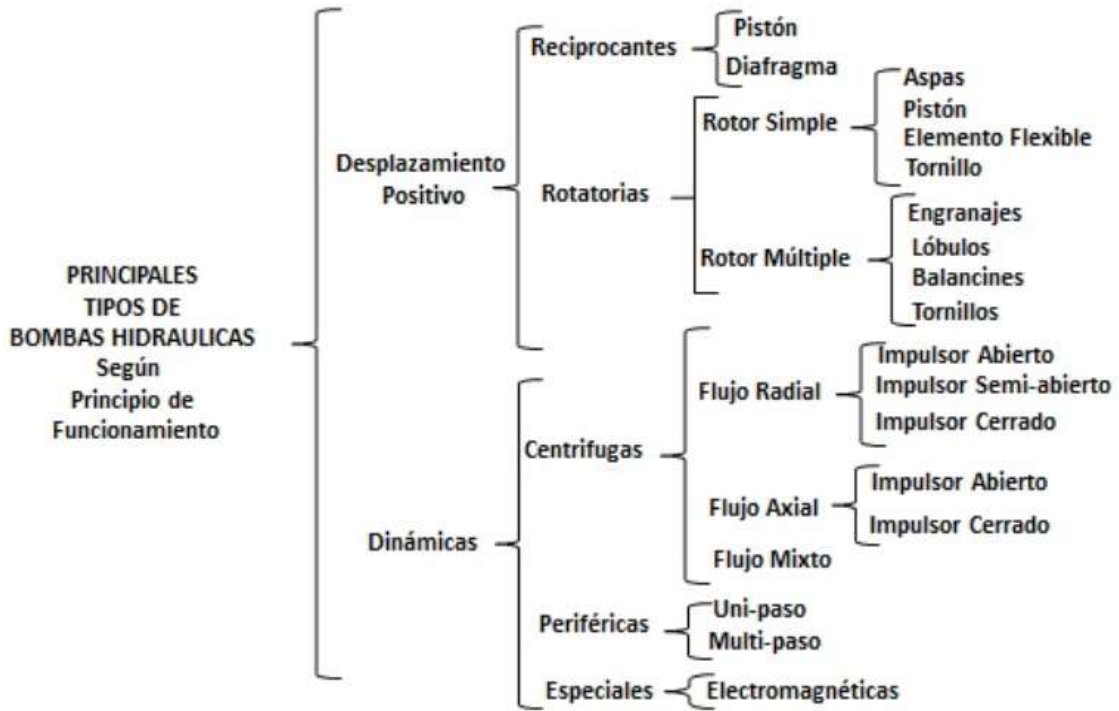
Las bombas se clasifican con base en una gran cantidad de criterios, que van desde sus aplicaciones, materiales de construcción, hasta su configuración mecánica.

Un criterio básico, que incluye una clasificación general, es el que se basa en el principio por el cual se adiciona energía al fluido. Bajo este criterio, las bombas pueden dividirse en dos grandes grupos:

- a. Dinámicos. Bombas a las que se agrega energía continuamente para incrementar la velocidad de fluido dentro de la bomba a valores mayores de los que existen en la succión, de manera que la subsecuente reducción de velocidad dentro o más allá de la bomba, produce un incremento en la presión.
- b. De desplazamiento positivo. Bombas en las cuales se agrega energía periódicamente mediante la aplicación de fuerza a uno o más elementos móviles para desplazar un número deseado de volúmenes de fluido, lo que resulta en un incremento directo en la presión.

Figura 7.

Principales tipos de bombas.



(Francos, 1994)

Las bombas están diseñadas para funcionar en condiciones específicas de altura. Además de la cabeza estática, todas las pérdidas por fricción y pérdidas menores deben calcularse para determinar la carga total contra la que la bomba funcionará. Se utiliza una bomba en un sistema de flujo para aumentar la energía mecánica de un fluido en movimiento; dicho aumento se emplea para mantener el flujo, proveer energía cinética, para compensar las pérdidas de fricción y, a veces, incrementar la energía potencial. La presión total proporcionada por la bomba representa la presión de descarga del cabezal de salida.

2.7.3. Los términos básicos utilizados en la hidráulica de bombeo

2.7.3.1. La cabeza estática

La presión, en un punto dado, se origina en la altura o profundidad de agua sobre ella. Es esta presión o cabeza la que da energía al agua y hace que fluya. Por definición, la altura estática es la distancia vertical, en la cual el líquido viaja desde el tanque de suministro hasta el punto de descarga.

La cabeza estática es la distancia entre los niveles de la succión y la descarga de agua cuando la bomba no está en funcionamiento. Las condiciones de cabeza estática a menudo se indican con la letra Z:

$$\text{Cabeza estática [ft]} = \text{Elevación de descarga} - \text{Elevación de suministro}$$

O bien:

$$\text{Cabeza estática [ft]} = \text{Nivel de descarga} - \text{Nivel de suministro}$$

En muchos casos, es deseable separar el cabezal estático en dos partes separadas: (1) la porción que ocurre antes de la bomba (cabezal de succión o elevación de succión) y (2) la porción que ocurre después de la bomba (cabezal de descarga). Cuando se hace esto, el centro (o referencia) de la bomba se convierte en el punto de referencia.

La cabeza de succión es la distancia entre el nivel del agua de succión y el centro del impulsor de la bomba. Este término se usa sólo cuando la bomba está en una condición de altura de succión. En la práctica, se dice que una bomba está en condición de elevación de succión cada vez que el ojo (centro) del impulsor está por encima del agua que se bombea.

$$\text{Cabeza de succión estática [ft]} = \text{Nivel de suministro} - \text{Nivel de la bomba}$$

La elevación de succión estática es la distancia entre el nivel del agua de succión y el centro del impulsor de la bomba (es decir, cada vez que el impulsor está por debajo del nivel del agua bombeada).

$$\text{Elevación de succión estática [ft]} = \text{Nivel de la bomba} - \text{Nivel de suministro}$$

Cabeza de descarga estática:

$$\text{Cabeza de descarga estática [ft]} = \text{Nivel de descarga} - \text{Bomba de referencia}$$

Si la altura estática total se va a determinar después de calcular el cabezal de succión o elevación y cabezal de descarga estática individualmente, dos diferentes ecuaciones se pueden utilizar para los cálculos, dependiendo de si hay un cabezal de succión o una elevación de succión.

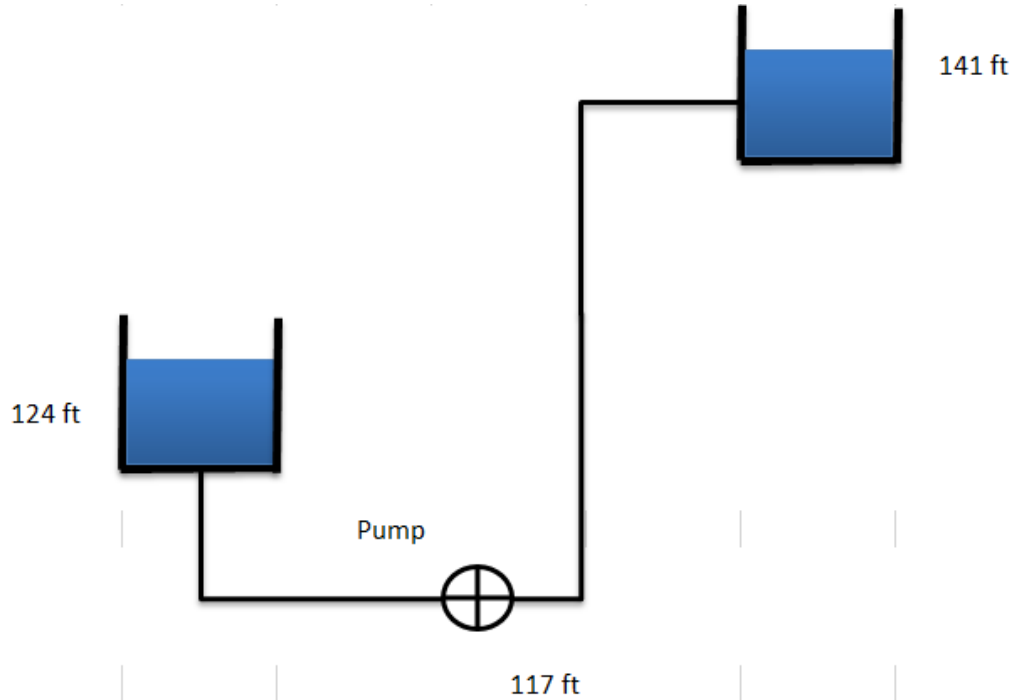
Para cabezal de succión:

$$\begin{aligned} \text{Cabezal total estático [ft]} \\ = \text{Cabezal de descarga estática} - \text{Elevación de succión estática} \end{aligned}$$

Para elevación de succión:

Figura 9.

Sistema de bombeo 2.



(Frank R, 2011)

Cabezal de succión estático = Nivel de suministro – Nivel de la bomba

$$Cabezal\ de\ succión\ estático = 124\ ft - 117ft = 7ft$$

Cabezal de descarga estático = Nivel de descarga – Nivel de la bomba

$$Cabezal\ de\ descarga\ estático = 141\ ft - 117ft = 24ft$$

Cabezal total estático = Cabezal de descarga estática – Elevación de succión estático

$$Cabezal\ total\ estático = 24ft - 7ft = 17ft$$

O se puede obtener de la manera más fácil como:

Cabezal total estático = Nivel de descarga – Nivel de suministro

$$Cabezal\ total\ estático = 141\ ft - 124\ ft = 17\ ft$$

2.7.3.2. La cabeza de velocidad

La cabeza de velocidad es la cantidad de energía requerida por la bomba y motor para superar la tendencia del agua a permanecer en reposo o en movimiento (inercia):

$$\text{Cabezal de velocidad [ft]} = \text{Pérdida de energía para mantener velocidad}$$

La cabeza de velocidad es la cantidad de cabeza o energía requerida para mantener una velocidad establecida en las líneas de succión y descarga. El diseño de la mayoría bombas hace que la altura de velocidad total para el sistema (v) de bombeo sea cero.

El cabezal de velocidad sólo cambia de un punto a otro en una tubería si cambia el diámetro de la tubería. La cabeza de velocidad y la cabeza de velocidad total están determinadas por:

$$\text{Cabezal de velocidad} = \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{Cabezal total de velocidad [ft]}$$

$$= \text{Descarga del cabezal de velocidad} - \text{Succión del cabezal de succión}$$

A continuación, se muestra un ejemplo.

¿Cuál es la cabeza de velocidad en un sistema con una velocidad de 5 ft/s?

$$\text{Cabezal de velocidad} = \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{Cabezal de velocidad} = \frac{(5 \text{ ft/s})^2}{2 * 32 \text{ ft/s}^2} = 0.39 \text{ ft}$$

Nota. Un sistema estático no tiene cabeza de velocidad, ya que el agua no se mueve.

2.7.3.3. La cabeza dinámica total

La cabeza dinámica total (TDH, siglas en inglés) es la cabeza estática (la diferencia de elevación) más la cabeza de fricción (pérdidas de presión debido al movimiento del agua a través de las tuberías) en un sistema de tuberías determinado. Simplemente, es la diferencia de presión de agua entre el comienzo de la tubería (el de la bomba) y el final de la tubería (es decir, el punto final, como el tanque de llenado o del grifo del consumidor). Es la presión de las bombas que debe superar para proporcionar agua al consumidor:

$$\text{Cabezal Total} = \text{Cabeza estática} + \text{Cabeza de fricción} + \text{Cabeza de velocidad}$$

2.7.3.4. Altura total

La altura total es la suma de las cabezas estáticas, de fricción y de velocidad:

$$\text{Cabezal Total [ft]} = \text{Cabeza estática} + \text{Cabeza de fricción} + \text{Cabeza de velocidad}$$

2.7.3.5. Conversión de cabezal de presión

La presión está directamente relacionada con la cabeza. Si el líquido de un recipiente sometido a una determinada presión se libera en un tubo vertical, el agua aumenta 2.31 pies por cada libra por pulgada cuadrada de presión. Para convertir la presión a cabeza en pies:

$$\text{Presión (psi)} = 0.433 * \text{Cabeza [ft]}$$

O bien:

$$\text{Cabezal [ft]} = \text{Presión (psi)} * 2.31 \text{ ft/psi}$$

Este cálculo puede resultar muy útil en los casos en que se mueve un líquido a través de otra línea que está bajo presión. Como el líquido debe superar la presión en la línea a la que está entrando, la bomba debe tener esta cabeza adicional.

A continuación, se muestran unos ejemplos:

1. Una bomba se descarga en una tubería que está llena de líquido debajo de una presión de 20 psi. El sistema de bomba y tubería tiene una altura total de 97 ft. ¿Cuánta altura adicional debe suministrar la bomba para superar la línea?

$$\text{Cabezal [ft]} = \text{Presión (psi)} * 2.31 \text{ ft/psi}$$

$$\text{Cabezal} = 20 \text{ psi} * 2.31 \text{ ft/psi} = 46 \text{ ft}$$

La bomba debe suministrar una altura adicional de 46 pies para superar la presión interna de la línea.

2. Encuentre la presión (psi) en un tanque de 12 ft de profundidad en un punto 6 ft debajo la superficie del agua.

$$\text{Presión (psi)} = 0.433 * 6 \text{ ft} = 2.6 \text{ psi}$$

Nota. Si se conoce el alto nivel de agua en el agua receptora, este nivel se utiliza como punto de control y los cálculos de pérdida de cabeza se inician hacia atrás a través de la planta.

Concepto que se relaciona para la hidráulica:

La suma de la energía potencial y la energía de presión en un punto se denomina altura piezométrica. La línea que une las alturas piezométricas de todos los puntos recibe el nombre de línea piezométrica

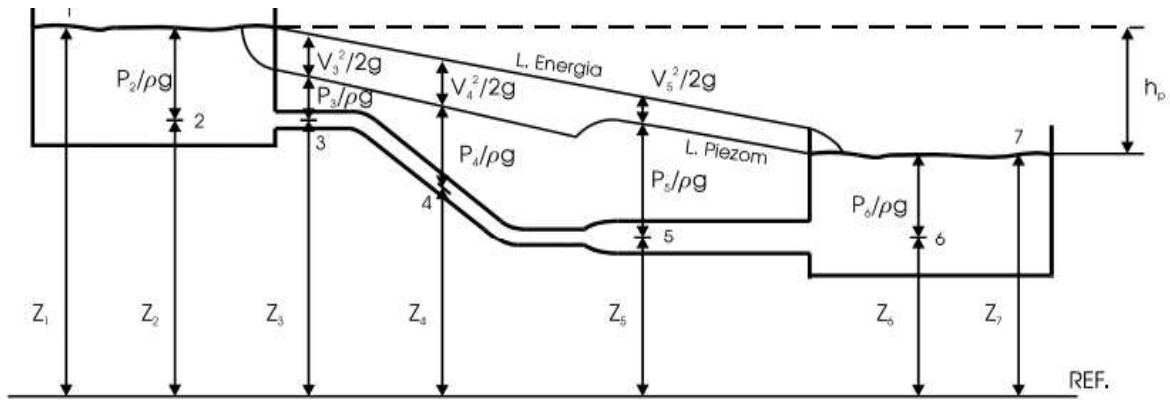
- a. Línea de cotas totales o línea de carga.

Es la que une todos los puntos cuya ordenada es la energía disponible para cada punto a lo largo de la tubería.

b. La línea que une las alturas totales de todos los puntos se conoce como línea de energía.

Figura 10.

Líneas Piezométrica y de Energía.



(Francos, 1994)

CAPÍTULO 3

3. FLUJO POR BOMBEO Y GRAVEDAD

La construcción de una PTAR tiene un impacto positivo industrial e igualmente en la zona que se instale, mejorando la calidad de vida y evitando malos olores, contaminación y enfermedades, asimismo, permite la reutilización del agua tratada. La consideración de diseño inadecuado de las instalaciones de una PTAR trae consigo pérdidas económicas, por lo tanto, las eficiencias hidráulicas de diseño y la incorporación de todos los componentes podrán evitar redimensionamientos a largo plazo.

El diseño de la planta debe contar con la disposición de las unidades de tratamiento diseñadas en el sitio seleccionado, todo esto para tener en cuenta qué equipos se utilizarán para el flujo por bombeo o por gravedad. Aunque para lo anterior, se debe tener en cuenta los componentes a incluirse en una planta de tratamiento, estos deben estar agregados de tal manera que se optimicen las necesidades de suelo, se minimicen las longitudes de las tuberías interconectadas, los cabezales de bombeo y, para posibles reparaciones, debe proporcionarse en el diseño. También los cálculos hidráulicos se deben hacer para los elementos más importantes de las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.

Una parte importante es que cuando se piensa en un perfil hidráulico se debe tomar en cuenta la topografía del lugar, pues dependiendo de esto se podrá usar sistemas por gravedad y por bombeo, porque entre más aproveches los beneficios de la topografía, será más beneficioso económicamente en el perfil hidráulico. El perfil hidráulico debe presentar elevaciones de la superficie del agua, dispositivos de control hidráulico como válvulas de control, presas, elevaciones críticas de estructuras de proceso, canales y tuberías. El perfil también incluye elevaciones de la superficie del suelo, tamaños de tubería y otras características especiales que mejorarán la representación de la planta de tratamiento.

Además, si se cuenta con la topografía adecuada, ayudará a que las instalaciones permitan sistemas por gravedad que mejorarán la confiabilidad y la continuidad del suministro, o en su caso por bombeo que ayudará a vencer alturas complejas.

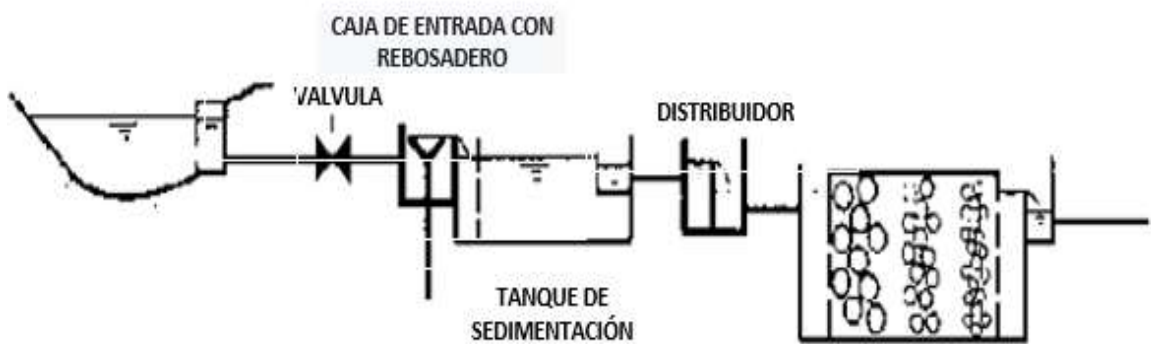
3.1. Sistema por gravedad

3.1.1. ¿Qué es el abastecimiento de agua por gravedad?

Son los sistemas de abastecimiento en la que el agua cae por su propio peso desde una fuente elevada hasta los consumidores situados más abajo. La energía utilizada para el desplazamiento es la energía potencial que tiene el agua en virtud de su altura.

Figura 11.

Sistema por gravedad.



(Wegelin, 1996)

3.1.2. Las ventajas principales de esta configuración son:

- a. No hay gastos de bombeo.
- b. El mantenimiento es pequeño pues apenas tienen partes móviles.
- c. La presión del sistema se controla con mayor facilidad.
- d. Robustez y fiabilidad.

3.1.3. La desventaja principal es:

El sistema de gravedad es sencillo de utilizar, pero el inconveniente es que no siempre puede el flujo por gravedad vencer a la altura donde se requiere el equipo. Si la cabeza total disponible es

menor que la pérdida de cabeza a través de la planta, el flujo por gravedad no se puede lograr. En tales casos, es necesario bombear para elevar la cabeza de modo que pueda producirse un flujo por gravedad.

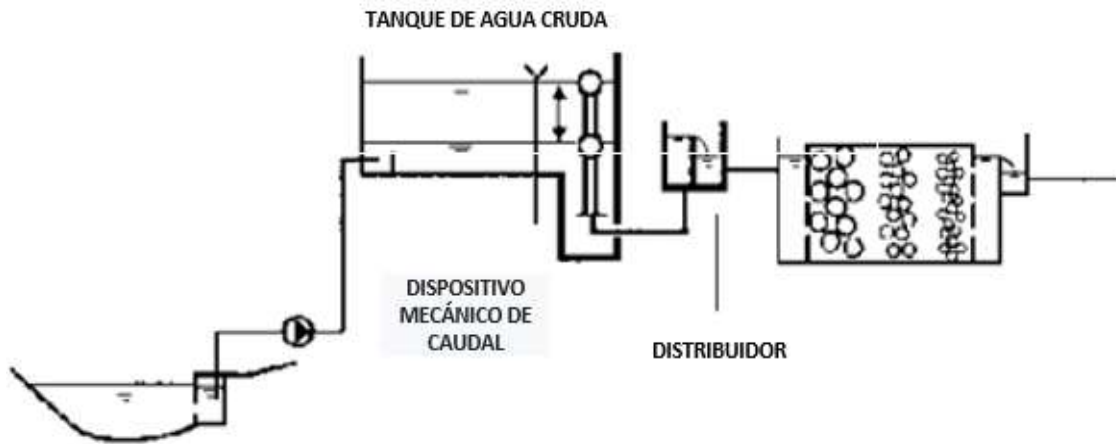
3.2. Sistema de bombeo

3.2.1. ¿Qué es el abastecimiento de agua por bombeo?

Son aquellas instalaciones en las que es necesario aportar una energía adicional (bombeo) al fluido por cuanto éste requiere vencer una diferencia de cotas topográficas adversas.

Figura 12.

Sistema por bombeo.



(Wegelin, 1996)

3.2.2. Las ventajas principales de esta configuración son:

1. Puede suministrar agua a diferentes niveles.
2. Hay diferentes configuraciones de bombeo.
3. Automatizar los procesos, como el control de flujo.

3.2.2. La desventaja principal es:

Dado que los esquemas de suministro de agua bombeada dependen del suministro confiable de energía y repuestos, son muy susceptibles a paradas temporales, como también, al utilizar energía, la bomba hace que haya costos elevados en la parte de la operación de la planta.

3.3. Aplicación en una PTAR (Perfil Hidráulico)

La selección del perfil hidráulico es un criterio básico al planificar una PTAR. La primera opción se debe dar a los sistemas de suministro por gravedad, ya que garantizan un funcionamiento fiable a bajos costos de funcionamiento. Los esquemas que integran el uso de bombas manuales tienen una segunda opción. La instalación de bombas accionadas mecánicamente debe elegirse como última opción y solo aplicarse en casos especiales donde se garantice un suministro de energía confiable y asequible, incluida la infraestructura para el mantenimiento y reparación de bombas.

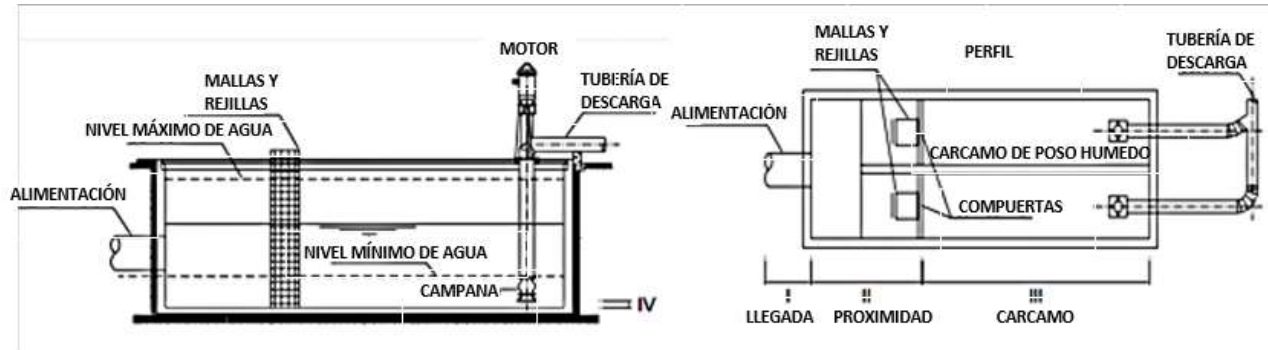
En la industria es muy normal que se tengan sistemas mixtos que tengan bombeo y gravedad. Incluso, los sistemas bombeados suelen diseñarse para distribuir el agua por gravedad a partir de un punto determinado.

Como se puede apreciar, existen varios sistemas para la elección de un solo diseño, es por eso que su correcto diseño y dimensionamiento supone la resolución de diversos problemas fundamentales, previos a su elección. A continuación, podemos poner un ejemplo más específico en cuestión de una PTAR.

Una PTAR se divide en diferentes fases de tratamiento, en una de éstas se utiliza la caja de demasías, la cual es una estructura que recibe el agua de los colectores, de manera tal que pueda introducirse a la planta de tratamiento. Esta caja tiene dos compuertas de apertura inversa, es decir, de abajo hacia arriba, con la finalidad de que trabaje en forma continua con la que permite el acceso a la planta del agua residual, la otra deberá permanecer cerrada y sólo se deberá abrir por mantenimiento, derivando así el agua residual nuevamente al canal de desagüe. La caja cuenta con un orificio de entrada hacia la planta que nos permite dosificar al gasto máximo extraordinario, las excedencias, que se presentarán en caso de precipitaciones pluviales, pasarán por encima del vertedor de excedencias de la caja hacia el canal de desagüe. Si la altura total disponible es menor que la pérdida de altura a través de la planta, no se puede lograr el flujo por gravedad. En tales casos, se necesita bombear para elevar la altura de modo que pueda producirse un flujo por gravedad.

Figura 13.

Caja de demasías o Cárcamo.



Nota. “Cárcamo de bombeo convencional típico para aguas residuales. El arreglo de cárcamo de bombeo se puede subdividir en cuatro secciones como se muestra en la figura” (Perez, 2006).

Figura 14.

Cárcamo de bombeo.



(JUMAPAC, n.d.)

CAPÍTULO 4

4. DIFERENTES TIPOS DE BOMBAS QUE SE INTEGRAN EN UNA PTAR

4.1. Selección de una bomba

La bomba adecuada para cualquier aplicación entre la multitud de estilos, tipos y tamaños puede ser difícil para el usuario o el contratista de construcción. El mejor método es hacer investigaciones iniciales, llegar a decisiones básicas, selecciones preliminares y analizar la aplicación con el proveedor de la bomba. La clave para hacer la selección correcta de la bomba radica en el conocimiento del sistema en que trabajará la bomba. El ingeniero que especifica una bomba puede hacer una selección errónea por no haber investigado los requisitos totales del sistema ni determinar cuál debe ser el rendimiento de la bomba. Además, cuando la responsabilidad de la sección de la bomba está en manos del representante del proveedor, puede serle difícil o imposible determinar los requisitos totales de la operación.

Cuando las bombas tienen la succión en recipientes, tambores o domos y con altura variable encima de la bomba, el ingeniero en bombas debe encontrar la altura óptima y coordinar los requisitos para la bomba, en cooperación con otros ingenieros encargados del diseño de los recipientes o cimentaciones.

Por ejemplo, si la bomba se va a instalar en un sumidero o en una fosa, los factores esenciales incluyen el tamaño correcto de la fosa, los requisitos de flujo cuando el líquido se aproxima a la bomba y la ubicación de ella en la fosa, con espaciadores y placas desviadoras adecuadas, si se requieren. Cuando la pérdida por fricción en un aparato o la tubería es parte importante de la carga total, el ingeniero especialista podrá influir hasta cierto grado en la selección de la caída permisible de presión.

A menudo, como cuando se trata de ahorrar en el costo inicial, el diseñador de la tubería puede proyectarla de un tamaño que produzca gran caída de presión. Esto necesitará una bomba de mucha más potencia que la requerida para un tubo más grande, lo cual representará siempre costos más altos en toda la duración de la bomba.

Otra parte importante que se debe apreciar son las características que debe tener el fluido del proceso, ya que en la utilización de ciertas bombas es requerido. Hay que tener en cuenta que el fluido de la PTAR cuenta con ciertas similitudes, una de éstas es la viscosidad. Tratar de bombear líquido mucho más viscoso que el agua puede ser un desafío para muchas bombas y completamente imposible para otras.

Para fluidos de alta viscosidad, algunas bombas no son ideales, debido a las tolerancias críticas cercanas y la falta de capacidad para mezclar materiales tixotrópicos⁵ para proporcionar un efecto de adelgazamiento por cizallamiento⁶. Sin este efecto de adelgazamiento, la viscosidad no se reduce naturalmente por la acción de la bomba, lo que hace que la bomba requiera más y más potencia a medida que aumenta la viscosidad. Con ello, el rendimiento de la bomba debe ajustarse para que coincida con las propiedades del líquido y la resistencia al cizallamiento. El bombeo de líquido viscoso generalmente significa una reducción en el flujo y la cabeza, así como un aumento significativo en la potencia necesaria para mover el fluido.

Por otro lado, hay tipos de bombas que cuentan con un rotor geométrico que actúa como mezclador sobre materiales tixotrópicos y proporciona un efecto de adelgazamiento por cizallamiento que permite a la bomba mover líquidos de alta viscosidad.

La viscosidad es fundamental para determinar la selección y el tamaño de las tuberías, válvulas y motores. El uso de un gráfico de pérdida de fricción detallará los datos de pérdida de fricción para un caudal determinado, el tamaño de la tubería y la viscosidad del fluido, lo que le ayudará a seleccionar los componentes adecuados para su trabajo. Esta información combinada con los datos de viscosidad disponibles permitirá un análisis adecuado de las características del sistema de proceso de fluidos. Una vez que se ha diseñado el sistema de proceso de fluidos y se han definido los parámetros de funcionamiento de la bomba, se puede realizar la selección adecuada de la tubería. Al manipular fluidos viscosos, puede ser difícil determinar cómo se comportan.

Este capítulo tiene como objetivo describir el tipo de bombas que se pueden usar en una PTAR en un sistema hidráulico tomando en cuenta las normas o lineamientos que rigen su función. Ya que, como se sabe, todo depende del sistema que se vaya a emplear.

⁵ Es la propiedad de algunos fluidos no newtonianos que muestran un cambio de su viscosidad en relación a la presión aplicada; cuanto más presión se someta el fluido, más disminuye su viscosidad.

⁶ Deformación o corte producido en un sólido por la acción de fuerzas opuestas, iguales y paralelas.

4.2. Cavidad progresiva

4.2.1. ¿Qué es una bomba de cavidad progresiva?

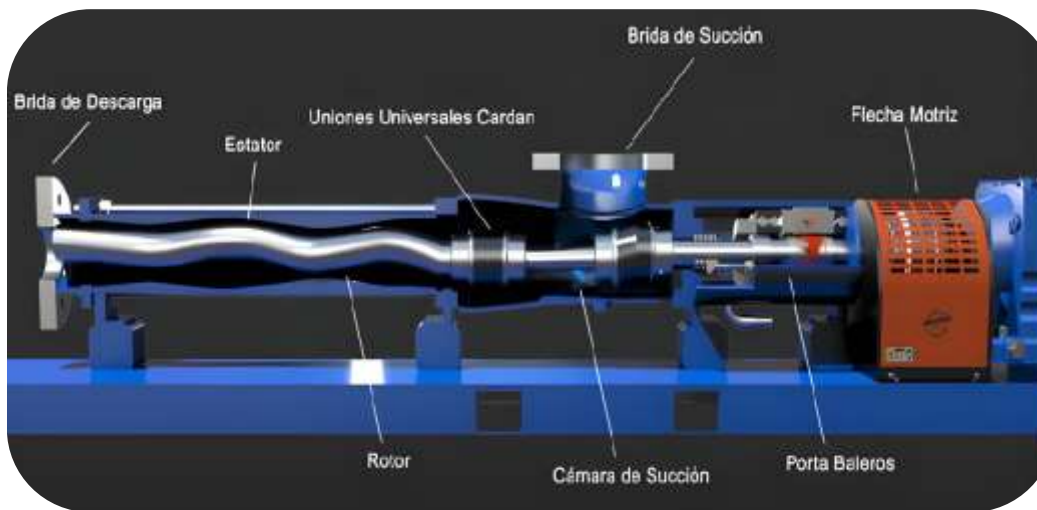
La bomba de cavidad progresiva es un tipo de bomba de desplazamiento positivo y también se conoce como bomba de tornillo excéntrico.

La unidad típica del sistema de bombeo por cavidades progresivas está constituida en el fondo del pozo por los componentes rotor, estator, varillas, centralizador y tuberías de producción. Las partes superficiales son: motor eléctrico, cabezal de rotación, líneas de descarga, tablero de control, sistema de frenado, sistema de transmisión de energía (conjunto de bandas), caja de cambios, caja de sello (stuffing box) y eje impulsor. La integración de los componentes es indispensable, ya que cada uno ejecuta una función esencial en el sistema para tener las condiciones de operación deseadas que permitan impulsar a la superficie el gasto de líquido que se transporte.

La bomba transfiere fluido mediante el avance de una secuencia de cavidades pequeñas, de forma fija y discretas, a medida que gira su rotor. En otras palabras, este sistema utiliza un rotor de una hélice externa simple que es insertada dentro de un estator con forma de una hélice interna doble creando una serie de cavidades. Debido al diseño del rotor y el estator, apenas hay postulaciones o fuerzas de corte que afecten al fluido. En cambio, el medio se transporta de forma suave y continua. Cuando un miembro es rotado, las cavidades van progresando desde un lado de la bomba (succión) hasta el otro lado (descarga), creando un flujo continuo.

Figura 15.

Partes de una bomba de cavidad progresiva.



(Zamora, 2013)

Nota. Cabe mencionar que estas bombas son muy versátiles excepto en lo referente a su compatibilidad entre modelos y marcas ya que ni los estatores ni los rotores son intercambiables.

4.2.2. Aplicación

La bomba de cavidad progresiva es una bomba extremadamente versátil que se puede utilizar en muchas aplicaciones de bombeo diferentes. Ofrece todas las ventajas de una bomba de desplazamiento positivo y está especialmente diseñada para resistir la abrasión en aplicaciones de bombeo difíciles.

Por lo tanto, una bomba de cavidad progresiva es ideal para líquidos con viscosidades más altas. Además, una bomba de cavidad progresiva tendrá aproximadamente el mismo flujo sin importar la viscosidad del líquido. Si se tiene una aplicación de bombeo en la que necesita un flujo constante, pero la viscosidad del líquido es variable y cambiará, entonces la bomba de cavidad progresiva es una opción ideal. Por lo tanto, es bastante fácil regular el flujo de la bomba simplemente regulando la velocidad de la bomba.

Otro buen ejemplo de cuándo utilizar una bomba de cavidad progresiva es cuando las condiciones de succión de las aplicaciones de bombeo no son las ideales. Una bomba de cavidad progresiva requiere una altura de succión positiva neta (NPSH, siglas en inglés) mucho menor en comparación con una bomba centrífuga porque la velocidad interna de la bomba es menor. Por otro lado, esta bomba es ideal para la separación de fluidos, un ejemplo sería bombear mezclas de aceite y agua a dispositivos de separación. Una bomba de cavidad progresiva no cambiará las gotas de aceite, mientras que una bomba centrífuga emulsionará el aceite y hará que las gotas de aceite sean muy pequeñas y reducirá el rendimiento de separación.

La mejor aplicación para una bomba de cavidad progresiva es en el bombeo de lodos, líquidos con sólidos en suspensión y cuando el líquido es abrasivo.

La mayoría de los otros tipos de bombas de desplazamiento positivo no pueden bombear sólidos muy bien o durante mucho tiempo debido a sus estrechas tolerancias y todos los diseños metálicos. Una bomba de engranajes o una bomba de paletas simplemente se desgastarán cuando haya sólidos presentes en el líquido y lo mismo sucedería con la mayoría de las bombas centrífugas pues podrían obstruirse.

Debido a sus características únicas, estas bombas son empleadas regularmente por industrias tales como: aguas residuales, papel y pulpa, pintura, petróleo crudo, desperdicios de alimentos y bebidas, lodos, inyección química, fluidos de perforación, agua de lastre, carbonato de calcio y aceite de resina.

4.2.3 Una bomba de cavidad progresiva utilizada en una PTAR

Las bombas de cavidad progresiva han sido una de las opciones habituales para las industrias de tratamiento de aguas residuales. Estas bombas están diseñadas para transportar fluidos abrasivos y muy viscosos en corrientes de aguas residuales. Por lo tanto, los diseños únicos de estas bombas las hacen ideales para bombear líquidos espesos como lodos activados residuales.

En general, el sistema de bomba de cavidad progresiva es una alternativa económica y confiable que resuelve muchos de los problemas presentados por otros métodos de levantamiento artificial y, una vez optimizado el sistema, su control y seguimiento es muy sencillo.

El sistema de Bombeo por Cavidades Progresivas debe ser la primera opción para considerar por los bajos costos de transporte, instalación, operación y mantenimiento, bajo impacto visual, muy bajos niveles de ruido y mínimos requerimientos de espacio físico tanto en el pozo como en almacén.

Figura 16.

Bomba de cavidad progresiva.



(SULZER, 2020)

Nota. A veces, el lodo contiene materia que obstruye la bomba, como fibras, sólidos grandes y trapos, que pueden depositarse en los digestores y formar masas. Estas corrientes de aguas residuales también pueden contener material de desecho sólido, como pequeñas rocas, que pueden dañar el estator o el rotor de la bomba. Todo esto tomando a consideración qué pasa cuando hay un mal diseño.

4.3. Bomba dosificadora

4.3.1. ¿Qué es una bomba dosificadora?

Se conocen también como de volumen controlado, dosificadora o proporcionadoras. Es, en realidad, un tipo de bomba de desplazamiento positivo en la cual el movimiento se transmite desde el motor por medio de manivelas, placas oscilantes o diversos mecanismos hasta uno o más émbolos recíprocos. La característica especial de estas bombas es que se puede ajustar la carrera en forma manual o automática para permitir la dosificación de la cantidad exacta de líquido en el sistema.

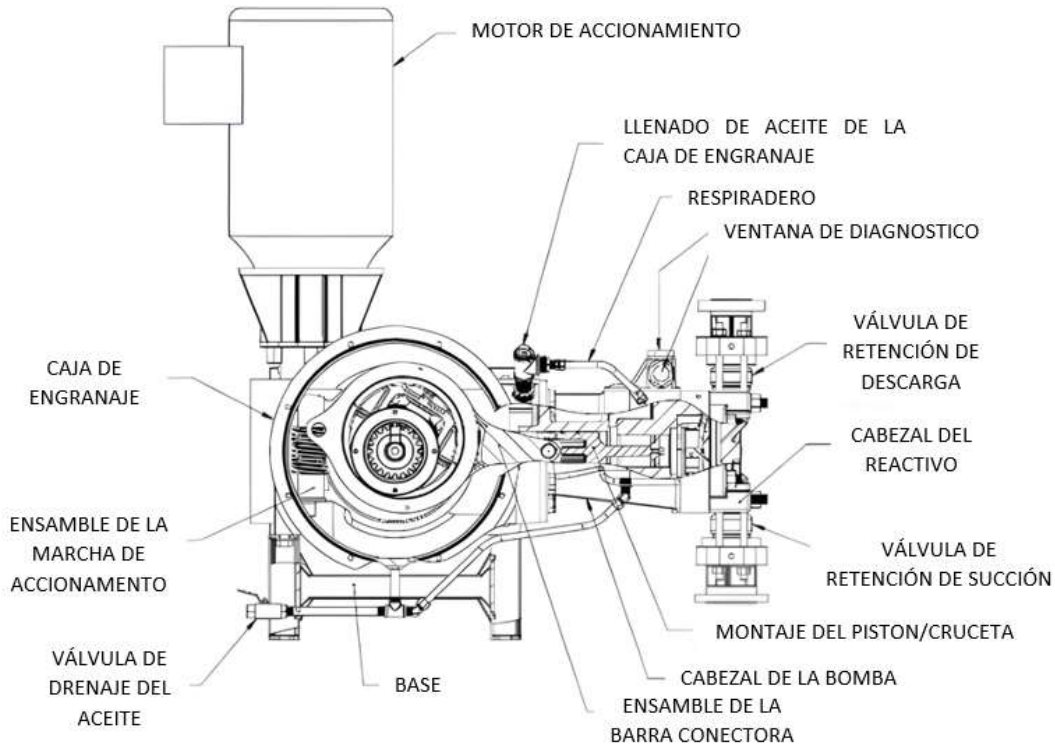
Una bomba dosificadora es un tipo de bomba cuyo objetivo es inyectar un químico líquido en cualquier tipo de fluido. Este químico se suele inyectar en pequeñas cantidades (bien por sus efectos en el proceso o por su costo), por lo que, la bomba debe posibilitar un control preciso a la hora de la inyección.

Una bomba dosificadora siempre debe permitir el ajuste del caudal de una manera lineal y su diseño debe garantizar la reproducibilidad, la repetitividad y la presión del volumen desplazado.

El funcionamiento de las bombas de dosificación se basa en el aspirado de cierto volumen de líquido, el cual es definido por el desplazador. Posteriormente, los líquidos se dirigen hacia la tubería de dosificación, todo ello a una presión increíble, que permite distribuir de forma precisa y uniforme los líquidos (generalmente químicos) que se mezclarán con otro componente y, así, crear un producto o simplemente satisfacer las necesidades de los consumidores finales. Sin duda esta tecnología es una de las mejores, ya que también permite regular la capacidad de bombeo, lo cual se puede traducir en el hecho de que se puede controlar el desplazamiento y las carreras de dosificación a través de las unidades de distribución. Lo cierto es que existen muchos tipos de bombas dosificadoras, siendo las bombas de agua y las de químicos las más comunes, de tal manera que es importante hablar sobre estas dos.

Figura 17.

Partes de una bomba dosificadora.



(PulsaFeeder, 2018)

4.3.2. Aplicación

La bomba dosificadora se caracteriza por ser uno de los elementos más importantes para el funcionamiento de la industria moderna, sobre todo, porque tiene como principal función el distribuir los diferentes líquidos que se utilizan para fabricar un producto. Lo cierto es que lo que caracteriza a las bombas de dosificación es que tienen una precisión milimétrica, sobre todo, cuando es necesario medir las cantidades de ciertos líquidos en volúmenes muy grandes y en un determinado tiempo.

Los sistemas dosificadores son los más efectivos en dicho sector industrial porque tienen la capacidad de inyectar productos que actúan como inhibidores de corrosión, ácido sulfúrico, inhibidores de incrustación o anti-escalante, y buscan lograr un tratamiento adecuado a las características del sistema para ofrecer una protección contra problemas de ensuciamiento, incrustación y corrosión, así como un efectivo control del crecimiento microbiológico.

4.3.3. Una bomba de dosificación utilizada en una PTAR

En principio las bombas dosificadoras son muy importantes para el tratamiento de aguas, sobre todo porque gracias a ellas es posible suministrar los químicos adecuados en el caudal

de agua que se desea tratar y así convertirla en un líquido apto para los procesos de producción de las industrias. Si bien es cierto que las bombas dosificadoras no son la única tecnología para realizar este proceso, porque también existen otros equipos como el clorador, debemos decir que los expertos las consideran como una de las soluciones más efectivas que la tecnología actualmente proporciona.

Un sistema usado para el tratamiento de agua residual es usar la dosificación de polímeros para el tratamiento de aguas residuales. La mayoría de estos sistemas utilizan polímeros para desecar el lodo, a fin de minimizar el volumen y reducir hasta un 75 % el costo de almacenar y eliminar este sedimento.

La calidad en la preparación de los polímeros para los procesos de tratamiento de aguas se ha vuelto un problema en la mayoría de las plantas con caudales de tratamiento muy grandes, debido a la falta de automatización, la preparación artesanal del químico, la falta de cuidado en las cantidades exactas a preparar, los tiempos de mezclado adecuado, la precisión en los tiempos de adición, etc.

Las bombas dosificadoras y mezcladoras se utilizan en varios procesos dentro del tratamiento de aguas y aguas residuales municipales e industriales. Estos equipos son cruciales en varios procesos del tratamiento; como desinfección, equilibrio de pH, filtración, coagulación y floculación. Los productos confiables y precisos permiten que los operadores en las plantas de tratamiento de agua se concentren en el proceso al poder confiar en el equipo de soporte.

Figura 18.

Bomba dosificadora.



(PAC PAM, n.d.)

4.3.3.1. La coagulación y la floculación

La coagulación y la floculación son procesos esenciales para separar y eliminar los sólidos suspendidos en el agua y el tratamiento de aguas residuales. Estos procesos mejoran la claridad del agua y reducen la turbidez. La coagulación y la floculación extraen los sólidos en suspensión que pueden tardar días o incluso décadas para asentarse en el agua de forma natural.

Ambos procesos requieren que se agreguen tanto agitación física como coagulantes al proceso de tratamiento del agua. Esto optimiza el tiempo de procesamiento, la calidad del agua y el costo del tratamiento.

En última instancia, los procesos de coagulación y floculación convierten el agua turbia en agua clara al acelerar el tiempo que tardan las partículas en asentarse. Una vez que estas partículas se han asentado, se pueden filtrar.

La coagulación es el proceso que neutraliza los sólidos suspendidos cargados en el agua. Como las partículas naturales son típicamente negativas, los coagulantes o productos químicos cargados positivamente se agregan al proceso para neutralizar la carga.

Los coagulantes alteran la carga eléctrica de las partículas suspendidas, lo que hace que se aglutinen: es un proceso de neutralización de carga.

Cuando millones de partículas se repelen entre sí, la claridad del agua disminuye. La neutralización de la carga eléctrica permite que las partículas se agrupen formando flóculos. A partir de este punto, las partículas agrupadas se pueden filtrar. No obstante, cuanto más grandes sean los flóculos de partículas, más fácil será filtrarlos. El proceso de aumentar el tamaño de los flóculos se conoce como floculación.

Los coagulantes orgánicos, también conocidos como polímeros, se utilizan de manera predominante en los procesos de tratamiento de agua. Si bien los polímeros son más caros por peso en comparación con los coagulantes inorgánicos, se pueden usar en menor cantidad.

Si bien el proceso de coagulación es crucial, también puede ser costoso. El costo se determina principalmente por la cantidad de productos químicos que se utilizan en el proceso. Si bien el polímero puede ser más caro por peso, puede ser más eficaz que una sal inorgánica. La eficacia del polímero se puede aumentar si se prepara el volumen de polímero adecuado para asegurarse de que reaccione por completo con el agua del proceso, lo que a su vez reduce el uso de polímero y puede tener una ventaja de costo sobre la sal inorgánica.

Mientras que la coagulación es principalmente un proceso químico; la floculación es el agrupamiento de partículas a través de un proceso físico. Una vez que ha tenido lugar el proceso de coagulación, el proceso de floculación comienza con la agitación o mezcla del fluido.

Esto permite que algunos de los sólidos suspendidos comiencen a unirse y a formar grupos más grandes. Este proceso es asistido por la adición de floculantes y mezcladores.

Una vez neutralizada la carga de las partículas coloidales, el mezclar el fluido del proceso permite que se junten más partículas. El objetivo de este proceso es que las partículas agrupadas alcancen un estado en el que se puedan filtrar con más facilidad.

La mezcla del agua del proceso con la adición de floculantes permite que las partículas coloidales se peguen y formen grupos cada vez más grandes. El desafío de este proceso es que se debe agitar el líquido sin separar las partículas.

Por lo tanto, a partir de todo esto, la utilización de este tipo de bombas dosificadoras nos ayudará a determinar la calidad del producto final, así como la calidad del agua, ya que son óptimas cuando se trata de inyectar un químico o fluido con precisión.

4.4. Centrífuga sumergible

4.4.1. ¿Qué es una bomba centrífuga sumergible?

Las bombas sumergibles, como su nombre indica, son bombas que funcionan completamente sumergidas dentro de un líquido. El motor, que está acoplado dentro del cuerpo de la bomba, se cierra herméticamente, para que el agua no pueda acceder a él.

Podemos decir que su funcionamiento es el mismo que el del resto de las bombas, ya que también convierten la energía mecánica en energía hidráulica. La diferencia es que el motor está sumergido y se acopla directamente con la flecha de la misma.

El motor y la flecha están sellados herméticamente para que no entre el agua, algo que puede aumentar la temperatura de la bomba, pero para solucionar este inconveniente, el líquido que fluye por la bomba sirve para enfriarla.

Asimismo, se caracterizan por no depender de la presión del aire que las rodea, de forma que pueden impulsar los líquidos desde alturas considerables, siendo una excelente opción. Cuando se sumerge una bomba, hay una presión de fluido positiva en la entrada de la bomba. Esta condición puede crear una mayor eficiencia debido a que se requiere menos energía para mover el fluido a través de la trayectoria del líquido de la bomba.

Una bomba sumergible funciona empujando en lugar de extraer líquido durante el proceso de bombeo. Esto es extremadamente eficiente porque la bomba utiliza la cabeza de líquido en la que está sumergida para funcionar y no se gasta energía en introducir el líquido en la bomba.

Por último, hay que recordar que es muy importante no utilizar este tipo de bombas fuera del líquido, ya que su motor podría calentarse en exceso. Las bombas sumergibles están diseñadas especialmente para trabajar siempre sumergidas.

Figura 19.

Partes de una bomba centrífuga sumergible.



(Bomba Centrífuga De Agua Sumergible, n.d.)

4.4.2. Aplicación

Existe una gran variedad de bombas sumergibles, que se pueden adaptar a la perfección al bombeo de diferentes tipos de líquidos, con cuerpos sólidos o sin ellos, pueden sumergirse a gran profundidad y tienen una instalación muy sencilla. Por ello, lo más importante a la hora de elegir una bomba sumergible es saber para qué tipo de instalación la vamos a usar, ya que se cuenta con una gran variedad como aguas residuales, tratamiento de aguas residuales, bombeo de un sumidero o un estanque, también en la industria del petróleo y minera.

Una de sus aplicaciones más comunes es para los trabajos de drenaje, aunque también es utilizada para el bombeo de aguas residuales y el bombeo de mezclas. Las bombas sumergibles también se ocupan para la extracción de agua en los pozos.

Además, se pueden colocar en la parte inferior de un depósito de combustible para aumentar la presión en el fondo y elevar el líquido con mucha más facilidad que aspirándolo.

Una ventaja importante de las bombas de agua sumergibles es que la propia presión del..... líquido lo empuja directamente hacia la bomba, por lo que se puede ahorrar una gran cantidad de energía. Además, debido a que están completamente sumergidas, estas bombas no son propensas a la cavitación.

Por otro lado, cuando se sumerge una bomba, hay una presión de fluido positiva en la entrada de la bomba. Esta condición puede aumentar la eficiencia debido a que se requiere menos energía para mover el fluido a través de la trayectoria del líquido de la bomba.

Pero, así como cuenta con sus ventajas, también tiene sus desventajas. Una de ellas es la accesibilidad, las bombas sumergibles a menudo no son fácilmente accesibles para una inspección o mantenimiento de rutina, especialmente en aplicaciones de lugares profundos. Esto hace que sea difícil realizar un mantenimiento preventivo y, en muchas aplicaciones, las bombas se dejan funcionar hasta que se descomponen y necesitan ser reemplazadas.

Igualmente, la exposición prolongada a un líquido de cualquier tipo conducirá a la corrosión. Las bombas sumergibles a menudo se usan para manejar líquidos que son corrosivos y abrasivos. Las juntas son especialmente propensas a la corrosión, lo que provoca fugas y daños en el motor. Para contrarrestar la corrosión, estas bombas deben estar hechas de un material resistente a la corrosión, lo que las puede hacer más costosas que otros tipos de bombas de la misma capacidad.

4.4.3. Una centrífuga sumergible utilizada en una PTAR

Para la aplicación de las bombas sumergibles en una planta de tratamiento pueden tener diferentes funciones y dependiendo de éstas es el costo.

Las que se usan especialmente en una PTAR son las bombas sumergibles para lodos, las cuales son equipos de bombeo utilizados para transferir aguas residuales, lodos y cualquier tipo de agua sucia que pudiera contener sólidos y/o partículas suspendidas.

Estas bombas deben permanecer sumergidas, al menos parcialmente, cuando operan y su diseño especial les permite el manejo de partículas en el fluido a bombear sin atascar el impulsor de la bomba y/o dañarla.

Para su correcto funcionamiento, las bombas, dependiendo su tipo y marca, tienen un límite de profundidad en el que pueden estar bajo el agua sin comprometer su accionar, pero todas tienen que estar sumergidas de forma que el líquido cubra la mitad del motor y, así, el sello mecánico quede por debajo del nivel del agua, con excepción de las bombas diseñadas para trabajar en seco.

Figura 20.

Bomba Centrífuga Sumergible.



(TIMSA, n.d.)

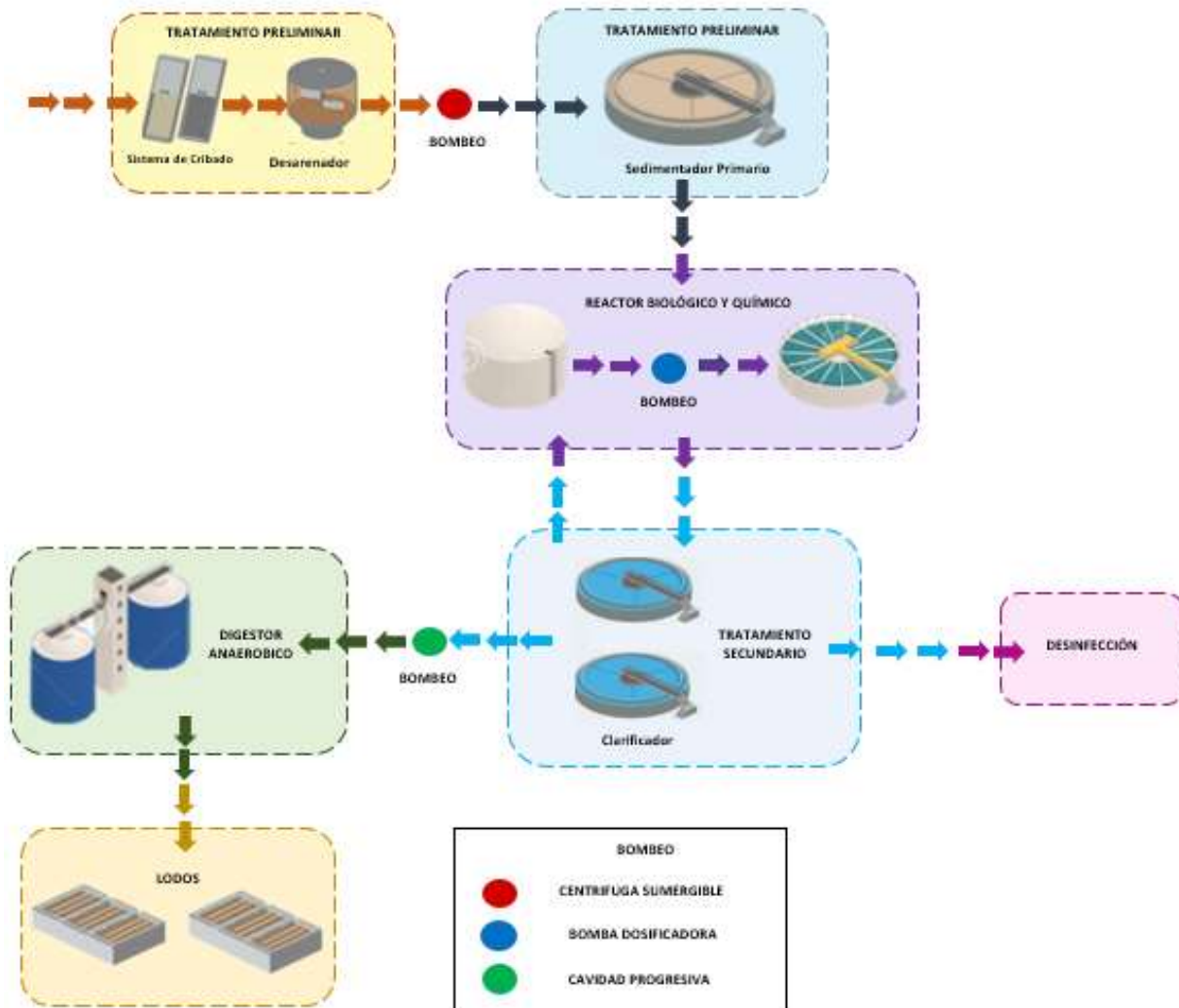
4.5 Localización en una PTAR

En esta sección del capítulo se podrá visualizar de mejor manera los tres tipos de bombas vistos, como también en dónde se podrían ubicar en una PTAR.

En la figura **21**, se señala en forma de círculos los tres tipos de bombas que analizamos en este capítulo, sabiendo que el círculo rojo es la centrífuga sumergible, la cual puede ser usada antes de iniciar el tratamiento preliminar para bombear el agua hasta un sedimentador primario, de ésta su principal la ventaja es que se puede localizar dentro del agua. El círculo de color azul señala la bomba dosificadora, la cual agrega sustancias líquidas químicas al agua para el tratamiento y así poder seguir con el proceso de una PTAR. Por último, el círculo de color verde es la bomba de cavidad progresiva, que se podrá usar en la sección de lodos.

Figura 21.

Diagrama de localización.



CAPÍTULO 5

5. IMPORTANCIA DE UN PERFIL HIDRÁULICO EN UNA PTAR

El perfil hidráulico se puede definir como la representación gráfica de la línea de grado hidráulico a través de la planta de tratamiento o, también, se denomina como el nivel piezómetro del recorrido del flujo que pasa por cada uno de los procesos unitarios de la PTAR.

El perfil hidráulico es necesario para establecer elevaciones de la superficie del agua y elevaciones de la estructura hidráulica (equipos que manejan el fluido), con el fin de superar las variabilidades de las pérdidas de carga y se indique claramente las cotas de la lámina de agua en cada uno de los procesos.

El funcionamiento satisfactorio de las instalaciones de la planta depende en gran medida de la habilidad y acierto con que se determinaron las pérdidas de carga hidráulica. Para lograr lo anterior, es necesario tener un análisis cuidadoso que permitirá tener un buen diseño, el cual proporciona soluciones factibles dentro de los límites de economía y seguridad.

La elaboración de los perfiles hidráulicos requiere considerar cuidadosamente las pérdidas de carga debidas que, como se mencionó en los capítulos anteriores, pueden presentarse en los sistemas de tuberías y las asociadas con las estructuras de control.

Un proyecto de una PTAR supone el trazado, en planta y perfil longitudinal, de la ruta que seguirá la red de tuberías. El trazado de la red está íntimamente ligado a las características topográficas, debido a que éstas representan una ganancia o pérdida. Se debe contar con una consideración en la presión interna del líquido, en este caso el agua, ya que tendrá un impacto directo en la distribución del líquido. No obstante, además del condicionamiento topográfico, otras disposiciones técnicas condicionarán el trazado final del conducto.

En general, desde un punto de vista aplicado, el problema usual en los proyectos hidráulicos de una PTAR puede reducirse a la especificación del tipo, forma y dimensiones de la conducción y sus estructuras especiales, de forma tal que, a la transferencia de un gasto o rango de gastos, le corresponda, en todos los puntos de su desarrollo, secciones netas de flujo compatibles

con las leyes de hidráulica y con las restricciones de naturaleza topográficas, geotécnicas, operativas, de mantenimiento, constructivas y económicas, entre otras que deban plantearse para un caso concreto de diseño. Se acostumbra hacer el cálculo de varios perfiles hidráulicos y comparar los niveles del agua con las elevaciones.

El análisis hidráulico es un requisito previo esencial para cualquier proyecto que implique la implementación de obras. El enfoque del análisis hidráulico determina el nivel de incertidumbre que se puede incorporar en el diseño, por lo tanto, la selección del enfoque hidráulico apropiado es de importancia crítica en términos de la robustez, rentabilidad del diseño y el nivel de riesgo residual asociado con él.

“Una práctica recomendable en el proyecto de plantas de tratamiento es prever ampliaciones futuras de varios elementos. Dada esta circunstancia, deben considerarse las pérdidas de carga correspondientes. A menudo, resulta razonable prever una ampliación futura de 50 a 100 por ciento” (Valdez & Gónzáles, 2003).

5.1. Topografía

El proceso del perfil hidráulico está directamente relacionado con la topografía del terreno donde se construirá la planta. En el caso de áreas planas, el cálculo de las pérdidas de carga adquiere mayor relevancia, pues las mismas implican mayores costos de bombeo y eventualmente la necesidad de excavaciones o terraplenes⁷.

Es recomendable realizar un levantamiento topográfico de la zona y, después, con esa información y la ayuda de algún programa de computadora, elaborar un plano topográfico donde se incluyan las curvas de nivel. Ahí se ubican, trazan y dibujan las secciones transversales que se consideren convenientes para hacer los cálculos de perfiles hidráulicos.

Por otra parte, intentar estudios topográficos sin tener una idea clara del relieve puede disparar la cantidad de trabajo innecesario. Por ello, hay que tener en cuenta el movimiento de tierras, que es el conjunto de actuaciones que se deben realizar a la hora de preparar un terreno en el que, posteriormente, se llevará a cabo una obra. Éste depende fundamentalmente de la topografía del terreno donde se va a construir.

⁷ Se le llama a la tierra con que se rellena un terreno para levantar su nivel y formar un plano de apoyo adecuado para hacer una obra.

Para el movimiento de tierras en primer lugar, se suelen realizar tareas de desbroce⁸, después, es necesario llevar a cabo trabajos de excavación, separación o extracción. Esta fase se puede realizar de dos maneras diferentes: de forma manual o de forma mecánica con las excavadoras. Las excavaciones pueden ser de desmonte, vaciado o terraplenado.

Para la determinación del perfil hidráulico, se requiere utilizar ecuaciones o expresiones de la hidráulica que permitan determinar las pérdidas de carga en los conductos abiertos y cerrados, y en las singularidades que encuentra el flujo a través de las distintas instalaciones.

El consumo energético soportado será función de la energía necesaria para llevar el agua. El consumo energético dependerá exclusivamente de la topografía favorable o desfavorable del punto de captación respecto al punto de consumo. Se entiende como topografía favorable que la cota de la captación sea superior a la cota de la zona de consumo, ya que no se requerirá un aporte energético para transportar el agua de un punto a otro y, por el contrario, como topografía desfavorable cuando sí sea necesario un aporte de energía para salvar las diferencias de cota.

5.2. Plano de un perfil hidráulico

Otro aspecto importante en una PTAR es el plano en donde se muestra el perfil hidráulico, el cual presenta los resultados en una gráfica cuyos ejes coordenados sean elevaciones y excavaciones en un cadenamiento⁹. También se pueden identificar lugares donde se tienen estructuras hidráulicas (equipos que manejan el fluido). Con esta información, se pueden ubicar las zonas donde se requiere modificar las dimensiones, posteriormente, se hace el cálculo de los nuevos perfiles hidráulicos, para conocer cuánto mejora la capacidad de conducción.

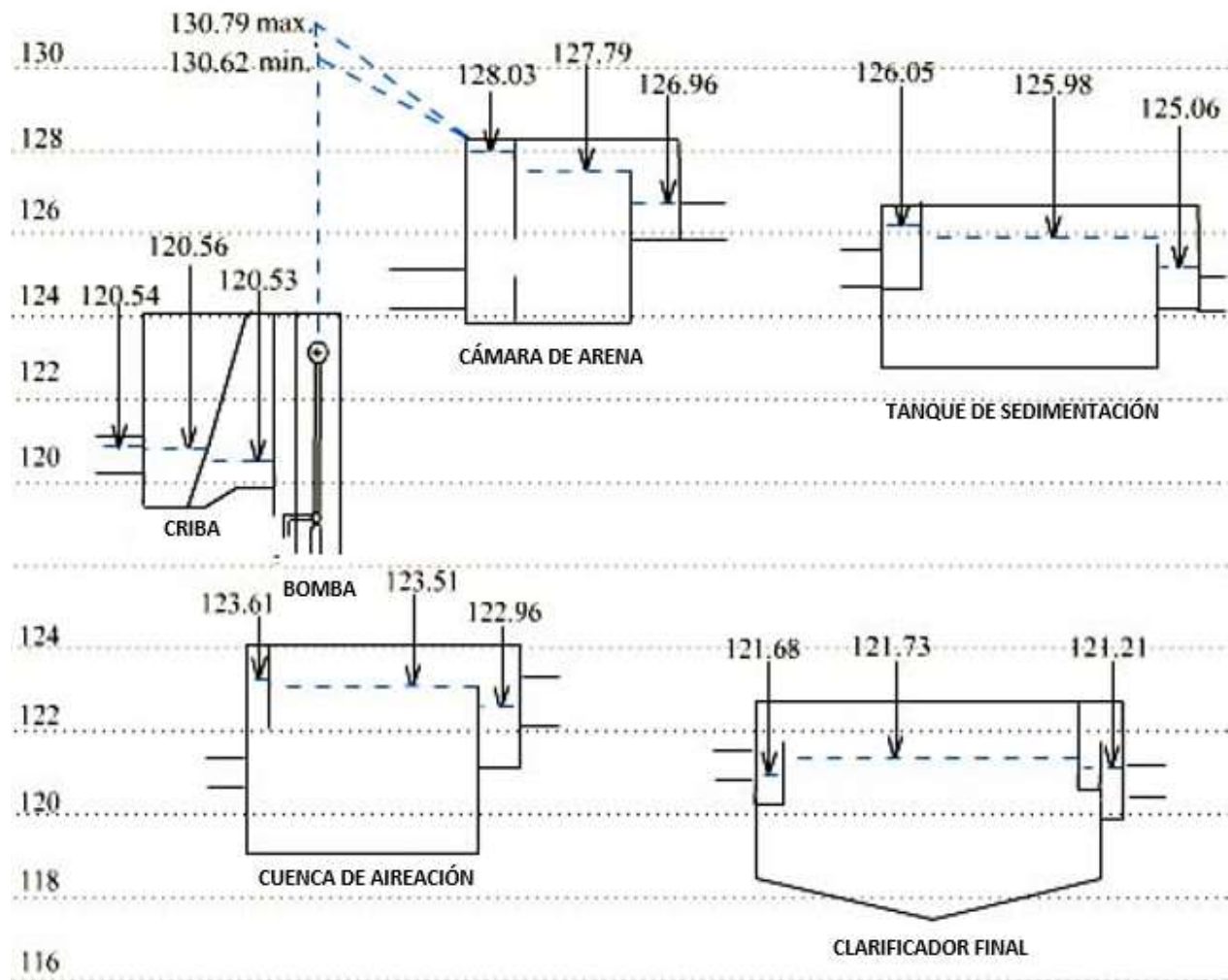
A continuación, se mostrará un perfil hidráulico en donde se describirá mejor a detalle las características de éste:

⁸ Quitar lo innecesario, facilitar un camino para conseguir algo.

⁹ Distancia acumulativa, desde un punto de origen preestablecido, a lo largo de una trayectoria hasta otro punto.

Figura 22.

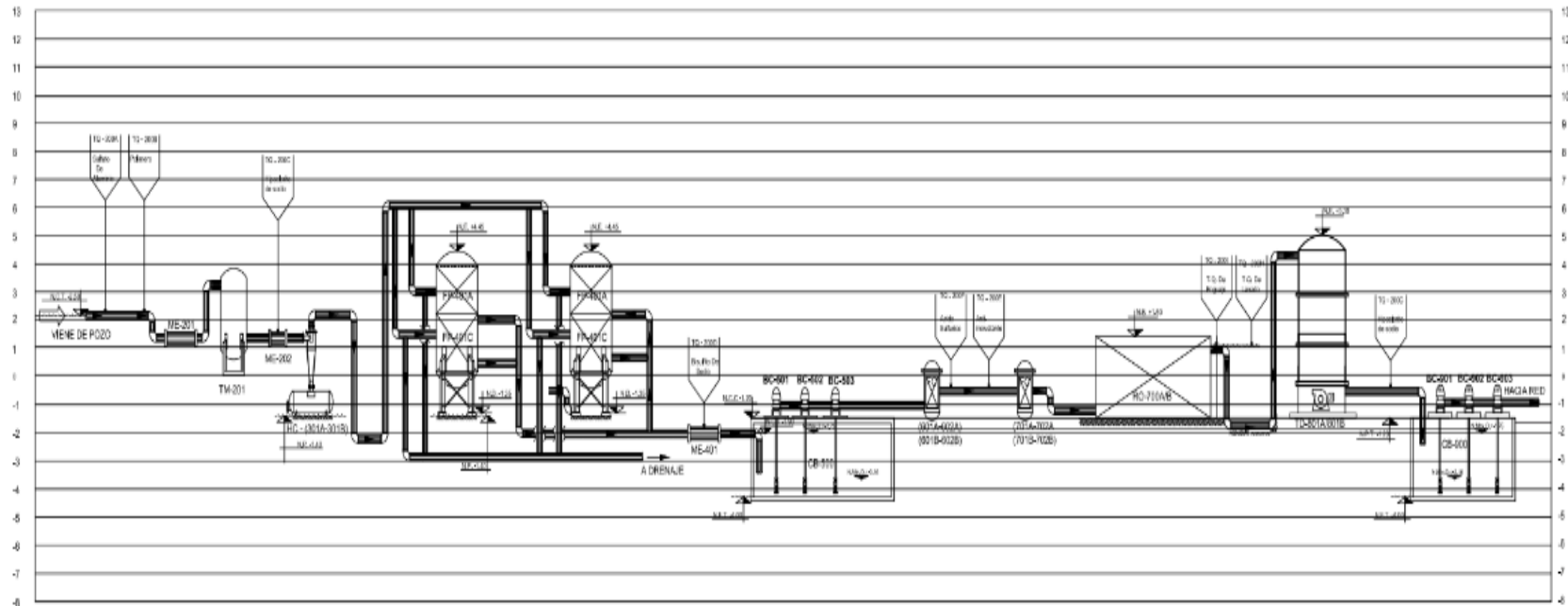
Plano 1 - Perfil hidráulico típico a través de la instalación de tratamiento.



(Wegelin, 1996)

Figura 23.

Plano 2 - Perfil hidráulico típico a través de la instalación de tratamiento.



(Fernández, 2009)

Nota. Para tener una mejor visualización de un plano en una PTAR, en la parte de anexos se contará con dos ejemplos.

Las imágenes anteriores son ejemplos de un perfil hidráulico en una PTAR, y, aunque, a primera vista parecen ser diferentes, no lo son, ya que cuentan con los principios básicos de un plano.

Se puede observar que el **Plano 1** cuenta con una escala en la parte lateral izquierda y en ésta es totalmente positiva la enumeración. Esto se debe a que ya se conoce de dónde se empezará la excavación y en dónde se situarán los equipos en el plano, es por eso que le colocan los números ya encontrados. En cambio, cuando no se conoce el nivel de la cota en dónde se empezará el proyecto para las excavaciones, se le sitúa en el nivel cero de piso terminado y la escala contará con números positivos y números negativos como se muestra en el **Plano 2**.

Por otra parte, el plano debe de contar con todos los equipos que se van a utilizar. De igual forma, se necesita que, para cada uno de los equipos, se cuente con una señalización de altura, tomando en cuenta que todo esto tiene que ver con las características hidráulicas.

Por lo tanto, un plano debe de contar con escala y equipos, todo esto tomando en cuenta que, dependiendo de los cálculos ya realizados, se situarán los equipos y se analizará si se necesita agregar altura o una excavación. Se sabe por el capítulo 3, que, dependiendo de un buen cálculo y una topografía, se requerirá o no bombeo, que, por lo general, en este tipo de plantas, se usa el bombeo y flujo por gravedad al mismo tiempo.

A partir del plano, se podrá analizar si se debe corregir alguna cuestión de cálculos y obtener ganancias de éste. Una característica importante del plano de un perfil hidráulico es que se analizan los costos operativos, ya que como se mencionó anteriormente, se puede analizar cuánto se tiene que excavar para situar un equipo y, de manera similar, cómo subir de nivel a un equipo comparando la energía que se utilizará para bombear y así poder detallar si habrá un ahorro energético.

Hay que tener en cuenta que, a partir del plano, se observa el gasto máximo y mínimo y, así, asegurar que las instalaciones de la planta no se verían inundadas.

5.3. Costo de movimiento de tierras

A partir de lo anterior, se puede hacer un cálculo sencillo para analizar el movimiento de tierras para un equipo, teniendo en cuenta que, cuando un equipo necesita una excavación, llevará consigo más dinero y entre menos se hagan movimientos de tierras, menos se elevará el costo de operación.

Todos estos cálculos son datos supuestos. El único dato obtenido por la red es el de movimiento de tierras. Pongamos de ejemplo el equipo número 3 de la **figura 24**, el cual llamaremos **a.1**. Este equipo se moverá a 2 metros hacia abajo, el cual se verá plasmado en la **figura 25**, por lo tanto, se tendrá que excavar, también cuenta con un volumen 150 m^3 .

A continuación, se agrega la **tabla 3**, en la cual se podrá visualizar mejor los algunos ejemplos:

Tabla 3. Ejemplos de costos de movimiento de tierras.

Ejemplos	a.1	a.2	b.1	b.2
Equipo	3	3	6	6
Volumen supuesto (m³)	150	150	250	250
Lado (m)	5.31	5.31	6.30	6.30
Altura de excavación (m)	2.00	4.00	3.00	5.00
Lado nuevo (m)	6.31	6.31	7.30	7.30
Profundidad (m)	7.31	9.31	9.30	11.30
Área nueva (m²)	39.86	39.86	53.28	53.28
Volumen nuevo (m³)	291.49	371.21	495.52	602.09
Costo (MXN)	102,021.78	129,922.14	173,432.83	210,731.79

En primer lugar, se calcula el lado nuevo, esto se hace obteniendo el lado del área de 150 m^3 más la suma del lado izquierdo y derecho, el cual es una longitud adicional. En este caso quedaría como:

$$\text{Lado nuevo} = 0.5 \text{ m} + 5.31 \text{ m} + 0.5 \text{ m}.$$

$$\text{Lado nuevo} = 6.31 \text{ m}.$$

A continuación, la profundidad se calculará tomando el lado del volumen del equipo y se le sumarán los metros que se tendrán que excavar:

$$\text{Profundidad} = 5.31 \text{ m} + 2 \text{ m}.$$

Profundidad = 7.31 m.

A partir de estos datos, se puede calcular el área y el volumen nuevo, el cual sería:

$$\begin{aligned} \text{Área nueva} &= 6.31\text{m} * 6.31\text{m} = 39.86 \text{ m}^2. \\ \text{Volumen nuevo} &= 39.86 \text{ m}^2 * 7.31 \text{ m} = 291.49 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

Todo esto se multiplicaría con el costo de movimiento de tierras por metro cúbico y ahí se tendrá un aproximado:

$$\begin{aligned} \text{Costo} &= 350 \text{ MNX/m}^3, \text{ (cronoshare, 2022).} \\ &291.49 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

Nota. En esta tabla se utilizó un costo de 350 MNX/m³, como también se agregó una longitud adicional para el lado nuevo, del lado izquierdo y derecho de 0.5m.

Figura 24.

Equipos del ejemplo 1.

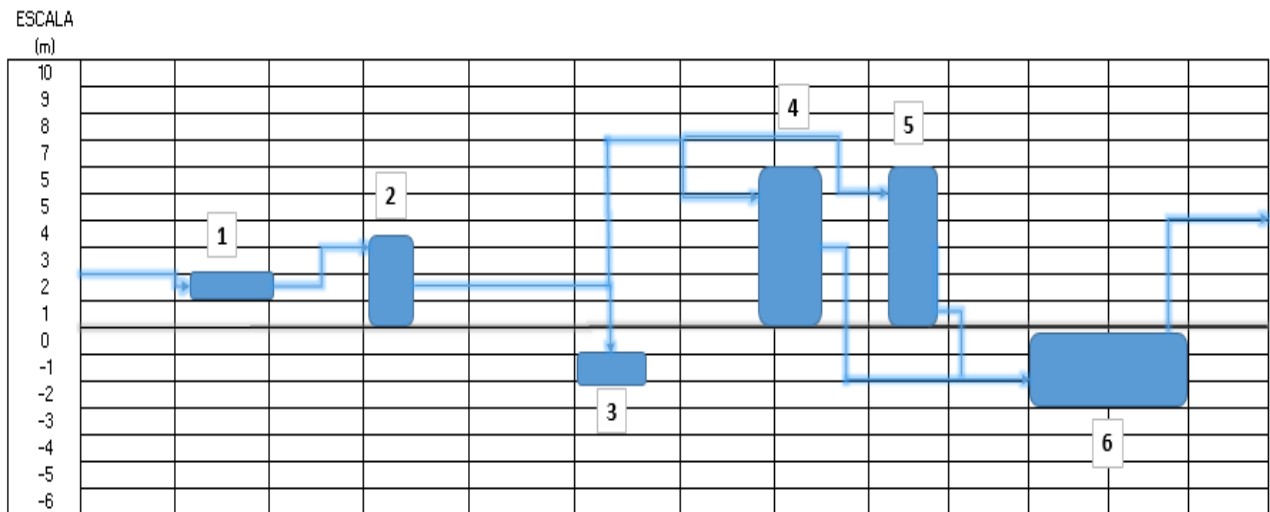
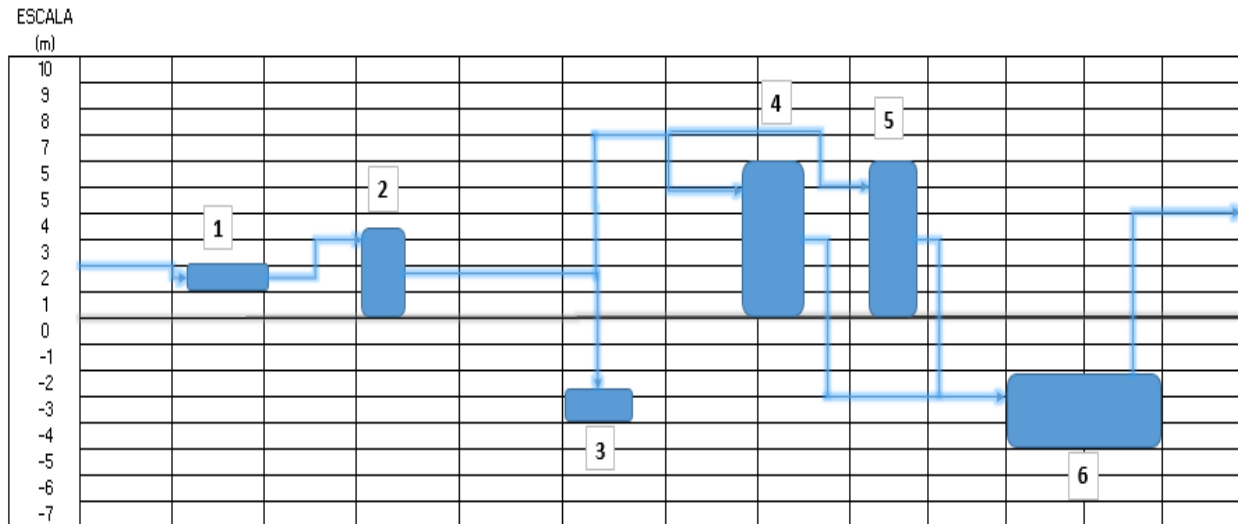


Figura 25.*Equipos del ejemplo 2.*

Con estos ejercicios, podemos observar o notar si uno hace una excavación más profunda y, aunque sea del mismo equipo, necesitará más presupuesto. Por lo tanto, podemos mencionar que es indispensable tomar en cuenta la topografía para el plano hidráulico e, incluso, podemos decir que se puede usar para una visualización del costo operativo.

5.4. Ejemplo de cálculo de un perfil hidráulico

Las aguas residuales que pasan por los diversos elementos de la planta requieren una diferencia de niveles entre la entrada a la instalación y la salida, con el fin de vencer las diversas pérdidas de carga. Estas diferencias de nivel varían con el gasto. El funcionamiento satisfactorio de las instalaciones de la planta depende en gran medida de la habilidad y acierto con que se determinaron las pérdidas de carga hidráulica. La elaboración de los perfiles hidráulicos requiere considerar cuidadosamente las pérdidas de carga debidas a la fricción y menores que pueden presentarse en los sistemas de tuberías y las asociadas con las estructuras de control.

La importancia y las variaciones de las diversas pérdidas de carga pueden resultar afectadas por los factores siguientes:

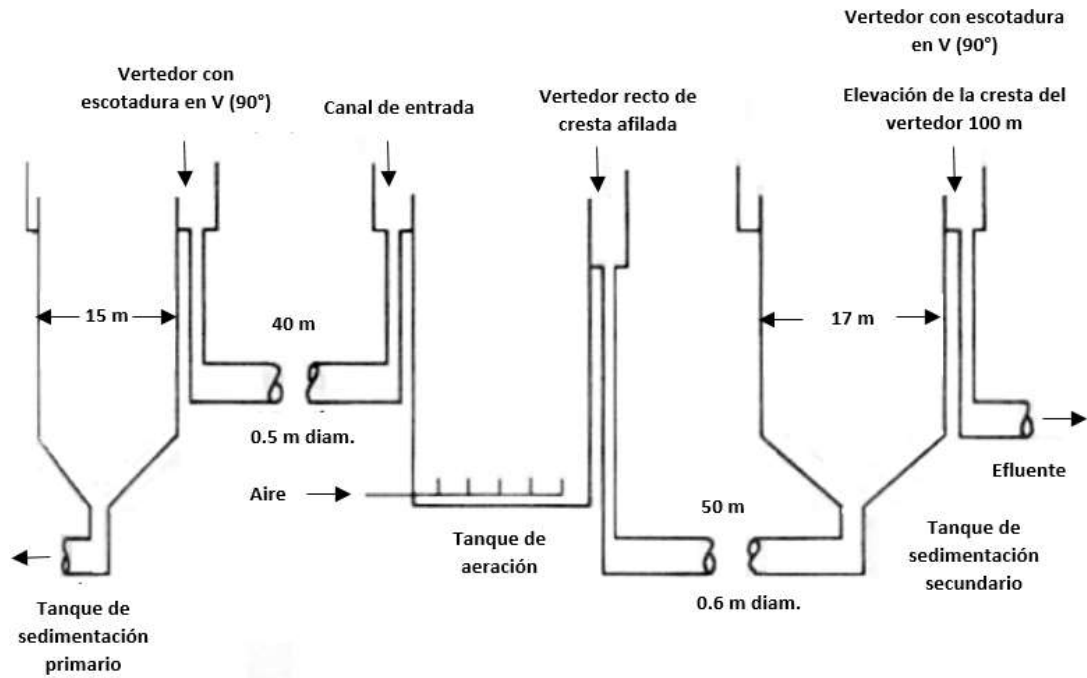
- a. Variaciones en el gasto de aguas residuales, desde un mínimo a un máximo, mientras que las mayores pérdidas de carga se producen con el gasto máximo, para el cual debe preverse la instalación. Este factor es importante.
- b. El tipo y eficiencia de los diversos dispositivos empleados para aforar y regular la distribución de las aguas a través de los diferentes elementos de la instalación. Así, la regulación precisa de la distribución y la exacta medición pueden exigir pérdidas hidráulicas mayores de las que se requerirían con métodos más aproximados.
- c. La tendencia que tienen los sólidos de las aguas residuales a sedimentarse, particularmente antes de su llegada a los tanques de sedimentación. De aquí que, el empleo de mayores velocidades o la agitación por medio de aire u otros métodos para impedir la formación de depósitos en los conductos, pueda provocar mayores pérdidas de carga de las que se presentarían con aguas claras.
- d. El tamaño y clase de las aberturas y la disposición de los canales de circulación. Las aberturas pequeñas y los cambios bruscos de dirección aumentan las pérdidas de carga debidas a la velocidad.

En la práctica, los cálculos hidráulicos pueden partir del nivel de aguas altas del río o cuerpo de agua en el que haya de verterse el efluente y extenderse a contracorriente por el emisor de salida y la instalación. Con el fin de determinar los niveles convenientes a los varios elementos de la instalación, debe calcularse el gradiente hidráulico para los gastos máximo, mínimo y, también, para el medio.

A continuación, se mostrará un ejemplo tomado de “*Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*” (Valdez & González, 2003), el cual es elaborar un perfil hidráulico para gasto máximo extraordinario y determinar las elevaciones de control para la porción de la planta de tratamiento mostrada en la **figura 26**.

Figura 26.

Equipos para el planteamiento del problema.



(Valdez & Gónzáles, 2003)

Considérense los siguientes datos:

1. Gastos.

a. Gasto promedio = $8000 \text{ m}^3/d$.

b. Gasto máximo extraordinario = $16000 \text{ m}^3/d = 0.185 \text{ m}^3/s$.

2. Tanque de sedimentación primaria.

a. Diámetro al vertedor = 15 m.

- b. Ancho de la cresta del vertedor = 0.30 m .
- c. Tipo de vertedor = 90° escotadura en v .
- d. Profundidad del vertedor = 0.1 m .
- e. Gasto de recirculación del proceso de lodos activados = 0.15 Q .

3. Tanque de aireación.

- a. Tipo de entrada = compuerta deslizante.
- b. Número de compuertas = 6.
- c. Ancho de las compuertas = 0.20 m .
- d. Recirculación de la descarga de lodos activados al canal del influente para el gasto máximo extraordinario = 0.25 Q .
- e. Longitud del vertedor del efluente del tanque de aireación = 15 m .
- f. Tipo de vertedor = recto de cresta afilada.

4. Tanque de sedimentación secundaria.

- a. Elevación de la cresta del vertedor = 100 m .
 - b. Diámetro al vertedor = 17 m .
 - c. Ancho de la cresta del vertedor = 0.3 m .
 - d. Tipo de vertedor = 90° escotadura en v .
 - e. Profundidad del vertedor = 0.1 .
 - f. Flujo inferior = 0.4 Q .
-
-

5. Pérdidas por fricción.

a. Coeficientes de pérdidas. Entrada de la tubería = 0.5, Codos = 0.4, Salida de la tubería = 1.0.

b. Factor de fricción en tuberías empleando la ecuación de Darcy-Weisbach = 0.020.

c. Pérdidas de fricción a través del tanque de aireación = 0.020 m.

d. Ignore el líquido del flujo inferior desde el tanque de sedimentación primaria.

f. Ignore las pérdidas de fricción entre las compuertas deslizantes en el canal del influente del tanque de aireación.

g. Considere que la entrada de las compuertas deslizantes del tanque de aireación puede ser modelada como un vertedor Francis con dos contracciones finales.

h. Considere que el vertedor del efluente en el tanque de aireación puede ser modelado como un vertedor Francis.

i. En la elevación del vertedor considere una caída libre de 0.010 m entre la cresta del vertedor y la superficie del agua en el escurrimiento del canal.

Solución

1. Se determina la elevación de la superficie del agua en el sedimentador secundario.

Cálculo del número de vertedores:

$$\begin{aligned} \text{No. de vertedores} &= \pi D / (d / \text{vertedor}). \\ &= 3.148(17)(0.30 \text{ m} / \text{vertedor}). \\ &= 177.9 \cong 178. \end{aligned}$$

Cálculo del flujo por vertedor:

$$\begin{aligned} q / \text{vertedor} &= (16000 \text{ m}^3 / \text{d}) / 178. \\ &= 89.89 \text{ m}^3 / \text{d} * \text{vertedor}. \\ &= 0.00104 \text{ m}^3 / \text{s} * \text{vertedor}. \end{aligned}$$

Cálculo de la carga en los vertedores con escotadura en v:

$$q = 0.55h^{5/2}.$$

$$h = (q/0.55)^{2/5}.$$

$$= (0.00104/0.55)^{2/5}.$$

$$= 0.081 \text{ m}.$$

Estimación del nivel de la superficie del agua en el sedimentador secundario:

$$Elev. = 100.0 \text{ m} + 0.081 \text{ m} = \mathbf{100.081 \text{ m}}.$$

2. Se determina la elevación de la superficie del agua en el canal del efluente del tanque de aireación.

Resumen de pérdidas de carga y coeficientes de fricción:

1. Pérdidas por salida, $K_{ex} = 1.0$.
2. Pérdidas por codos, 2 con $K_b = 0.4$.
3. Pérdidas por fricción en la tubería, $f = 0.020$.
4. Pérdidas por entrada, $K_{en} = 0.5$.

Cálculo de la velocidad del agua en la tubería que conecta a los tanques de aireación y sedimentación secundaria:

$$V = Q/A.$$

$$V = 1.4(0.185 \text{ m}^3/\text{s})/3.14(0.3 \text{ m})^2.$$

$$V = 0.92 \text{ m/s}.$$

Cálculo de las pérdidas de carga del sistema de tuberías que conectan a los tanques de aireación y sedimentación secundaria:

$$h' \left(K_{ex} \% 2K_b \% f \frac{L}{D} \% K_{en} \right) \frac{V^2}{2g}$$

$$h' \left(1 \% 2(0.4) \% 0.020 \frac{0.50}{0.6 \text{ m}} \% 0.5 \right) \frac{(0.90)^2}{2(9.81)}$$

$$h = 0.171 \text{ m.}$$

Cálculo de la elevación de la superficie del agua en el canal del efluente del tanque de aireación:

$$Elev. = 100.081 \text{ m} + 0.171 \text{ m} = \mathbf{100.252 \text{ m.}}$$

3. Se establece la elevación del efluente descargado en el vertedor y la elevación de la superficie del agua en el tanque de aireación en la posición más cercana a la descarga del efluente en el vertedor.

Se establece la elevación del efluente en el vertedor del tanque de aireación. Como se muestra en la **Figura 26** correspondiente al planteamiento del problema, la distancia de la caída libre entre la cresta del vertedor y la elevación de la superficie del agua en el canal del efluente es de 0.010 m. Entonces:

$$Elev. = 100.252 \text{ m} + 0.010 \text{ m} = \mathbf{100.262 \text{ m.}}$$

Cálculo de la carga del efluente en el vertedor suponiendo dos contracciones finales:

$$Q = 1.84(L - 0.1nh)h^{3/2}$$

$$1.4(0.185 \text{ m}^3/\text{s}) = 1.84[15 \text{ m} - 0.1(2)h]h^{3/2}$$

$$h = 0.044 \text{ m (por análisis de prueba y error).}$$

Cálculo de la elevación de la superficie del agua en el tanque de aireación, próxima al vertedor de descarga del efluente:

$$Elev. = 100.262 \text{ m} + 0.044 \text{ m} = \mathbf{100.306 \text{ m.}}$$

4. Se establece la elevación de las compuertas deslizantes y se determina la elevación de la superficie del agua en el canal del influente al tanque de aireación.

Se supone una pérdida de carga de 0.020 m a través del tanque de aireación. También se supone una caída libre de 0.010 m entre la cresta de la compuerta deslizante y la superficie del agua en el tanque de aireación.

Se establece la elevación de la cresta de la compuerta deslizante:

$$Elev. = 100.306\text{ m} + 0.020\text{ m} + 0.010\text{ m} = \mathbf{100.336\text{ m}}.$$

Se determina la carga sobre las compuertas deslizantes:

a. Gasto de cada compuerta $1.4(0.185\text{ m}^3/\text{s})/6 = 0.043\text{ m}^3/\text{s}$.

b. Cálculo de la carga sobre la compuerta deslizante considerándola como un vertedor Francis con dos contracciones finales.

$$Q = 1.84(L - 0.1nh)h^{3/2}$$

$$0.043\text{ m}^3/\text{s} = 1.84[0.5\text{ m} - 0.1(2)h]h^{3/2}$$

$$h = 0.139\text{ m} \text{ (por análisis de prueba y error).}$$

Se determina la elevación de la superficie del agua en el canal del influente al tanque de aireación:

$$Elev. = 100.336\text{ m} + 0.139\text{ m} = \mathbf{100.475\text{ m}}.$$

5. Se determina la elevación de la superficie del agua en el canal del efluente del tanque de sedimentación primaria.

Se resumen los valores de las pérdidas de carga y de los coeficientes de fricción. Ver el paso 2.

Cálculo de la velocidad en la tubería que conecta al tanque de sedimentación primaria con el canal de entrada al tanque de aireación:

$$V = Q/A.$$

$$V = 1.15(0.185\text{ m}^3/\text{s})/3.14(0.25\text{ m})^2.$$

$$V = 1.08\text{ m/s},$$

Cálculo de la pérdida de carga en el sistema de tuberías que conectan al tanque de sedimentación primaria con el canal de entrada al tanque de aireación:

$$h' \left(K_{ex} \% 2K_b \% f \frac{L}{D} \% K_{en} \right) \frac{V^2}{2g}$$

$$h' \left(1 \% 2(0.4) \% 0.020 \frac{40}{0.5} \% 0.5 \right) \frac{(1.0)^2}{2(9.81)}$$

$$h = 0.232 \text{ m}$$

Se determina la elevación de la superficie del agua en el canal del efluente del tanque de sedimentación primaria:

$$Elev. = 100.475 \text{ m} + 0.232 \text{ m} = \mathbf{100.707 \text{ m.}}$$

6. Se establece la elevación de los vertedores del efluente primario y se determina la elevación de la superficie del agua en el tanque de sedimentación primaria.

Se establece la elevación de los vertedores con escotadura en v del tanque de sedimentación primaria:

$$Elev. = 100.707 \text{ m} + 0.010 \text{ m} = \mathbf{100.717 \text{ m.}}$$

Se calcula el número de vertedores

$$No. \text{ de vertedores} = \pi D / (d / \text{espacio entre vertedores})$$

$$No. \text{ de vertedores} = 3.14(15\text{m}) / (0.3 \text{ m/vertedor})$$

$$No. \text{ de vertedores} = 157$$

Se calcula el gasto por vertedor:

$$q/\text{vertedor} = 1.15(16000 \text{ m}^3 / \text{d}) / 157$$

$$q/\text{vertedor} = 117.2 \text{ m}^3 / \text{d} * \text{vertedor}$$

$$q/\text{vertedor} = 0.00136 \text{ m}^3 / \text{s} * \text{vertedor}$$

Se calcula la carga sobre los vertedores de escotadura en v:

$$q = 0.55h^{5/2}$$

$$h = (q/0.55)^{2/5}$$

$$h = (0.00136/0.55)^{2/5}$$

$$h = 0.091 \text{ m.}$$

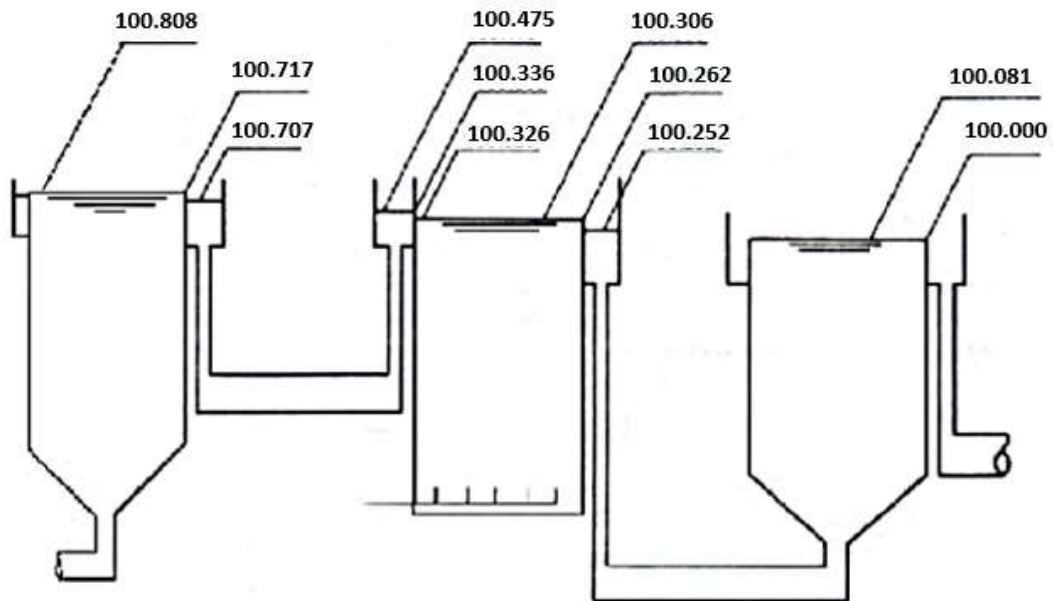
Se determina la elevación de la superficie en el tanque de sedimentación primaria:

$$\text{Elev.} = 100.717 \text{ m} + 0.091 \text{ m} = \mathbf{100.808 \text{ m.}}$$

7. Se elabora el perfil hidráulico, que muestre las elevaciones calculadas. La **Figura 27** muestra el perfil hidráulico:

Figura 27.

Resolución del perfil hidráulico



(Valdez & Gónzáles, 2003)

En este ejemplo, se empleó una distancia de 0.01 m como caída libre en cada vertedor de control. Cuando las pérdidas de carga son críticas, algunos ingenieros permiten que los vertedores queden sumergidos en condiciones de gasto máximo extraordinario. El sumergir las entradas y salidas ha sido usado en muchas plantas. También debe analizarse el diámetro óptimo de tuberías para la interconexión de las unidades de tratamiento. El costo de una tubería de diámetro grande debe compararse con el costo de la energía necesaria para vencer la pérdida de carga asociada con tuberías de diámetro pequeño. En la mayoría de los casos, el diámetro máximo de las tuberías estará limitado por la velocidad mínima requerida para evitar el azolve¹⁰ de sólidos.

¹⁰ Lodo o basura que obstruye un conducto de agua.

RESUMEN

El trabajo de investigación tuvo como finalidad desarrollar un documento que permita comprender y visualizar conceptos de un perfil hidráulico en una planta de tratamiento de agua.

Se comienza a desarrollar la metodología básica de ingeniería de fluidos la cual es crucial para comprender qué se necesita antes de analizar y crear un plano de un perfil hidráulico. Se analizaron las pérdidas de carga y fricción que se tienen durante la construcción de una planta, en nuestro caso es una PTAR, y, las cuales se deben tener en cuenta. Asimismo, si se conoce el alto nivel de agua en el agua receptora, este nivel se utiliza como punto de control y los cálculos de pérdida de cabeza se inician hacia atrás a través de la planta. Todos estos puntos se recapitulan, ya que, a partir de esto, se puede tener un mejor diseño tanto en estructura y costo.

Quienes han estudiado el tema saben que, para diseñar una planta, no sólo son necesarios los cálculos, sino también tener en cuenta los equipos que se utilizarán, todo esto es necesario para su buen funcionamiento. Por lo tanto, podemos mencionar que para un buen manejo de fluido en una PTAR y, si es el caso de bombeo, es necesario colocar/utilizar bombas especializadas, ya que no cualquier bomba se puede utilizar, debido a las características del fluido. No todas las bombas son aptas para fluidos viscosos, en ese caso, las más recomendadas son las mencionadas en el capítulo 4.

Asimismo, la topografía de terreno tiene una enorme importancia en el consumo energético. Una zona regable con poco desnivel requerirá menos aporte de energía, sólo hay que vencer las pérdidas de carga que inevitablemente se producen a lo largo de las tuberías de transporte. En cambio, si existe un gran desnivel en la zona regable, el aporte energético tendrá que ser mucho mayor. La situación de los puntos de entrada de agua determinará en gran medida la necesidad de consumo energético. En cuanto haya mayor desnivel, tendrá que ser necesaria más energía para impulsar el agua. Todo esto conllevará a costos de operación más altos.

Podemos afirmar que nuestro diseño de sistema de flujo dependerá de la topografía, ya que a partir de ésta sabremos si se utilizará un sistema de bombeo o por flujo de gravedad, que es lo más común en un sistema mixto, aunque la elección de cualquiera de los sistemas dependerá de las características y necesidades particulares del proyecto a realizar, siendo responsabilidad del ingeniero o proyectista responsable evaluar las circunstancias, y, para una elección satisfactoria de un sistema, se habrán contemplado las ventajas y desventajas que cada sistema ofrece en particular y adaptarlas de la mejor manera.

De acuerdo con lo expuesto, los perfiles hidráulicos se elaboran con los siguientes propósitos:

1. Asegurar que el gradiente hidráulico es el adecuado para que se desarrolle el mejor sistema, observando que la topografía beneficie el flujo por gravedad sabiendo que éste trae consigo bajos costos.

2. Para establecer las alturas de impulsión requeridas por las bombas, cuando el bombeo sea necesario.

3. Para asegurar que las instalaciones de la planta no se verían inundadas o que el agua alcance cotas no previstas durante los periodos de gasto punta.

A partir de esto, podemos mencionar que una parte indispensable para cualquier proyecto es el costo o presupuesto que se requiere, y, como buen ingeniero, se debe de preocupar por mejorar el costo tomando en cuenta la seguridad y una excelente tecnología porque se puede tener la mejor idea y los mejores criterios y cálculos, pero, si no se cuenta con los suficientes recursos, la materialización del proyecto no será posible. Es por ello que es necesario, como una parte sencilla de este documento, hacer una cuantificación sencilla para entender mejor los temas empleados, aunque no es la intención del presente trabajo realizar una descripción detallada de las técnicas y sistemas para determinar los costos y presupuestos.

De igual modo, podemos decir que, cuando se emplea un plano de un perfil hidráulico correctamente, se podrá hacer una mejora o expansión en la planta para así contar con todos los beneficios posibles. Pudimos comparar que, cuando no se toma en cuenta la topografía y los cálculos, podemos perder dinero en excavaciones de más y esto haría que los costos de operación se eleven.

Finalmente, podemos decir que el perfil hidráulico es indispensable para un buen diseño, en nuestro caso tomando de ejemplo una PTAR, además, se debe mencionar que los problemas relacionados sobre este tema son que no hay suficiente información en la red la cual hable de él.

Podemos enunciar que, anteriormente cuando se realizaba un proyecto para una instalación, no se tomaba la suficiente consideración en un perfil hidráulico, debido a lo anterior, no se encuentra documentada la importancia del mismo y, a partir de esto, muchas PTAR no cuentan con las características necesarias para encontrar una utilidad en una expansión o mejoramiento.

Por lo tanto, un perfil hidráulico es indispensable en todos los sentidos y necesario si la PTAR quiere seguir mejorándose con el paso del tiempo y no quedar obsoleta.

CONCLUSIONES

En principio, se propuso como objetivo general explicar la importancia de comprender y visualizar conceptos de un perfil hidráulico en una planta de tratamiento de agua. Con esto, se logra desarrollar una serie de capítulos en los cuales se muestran temas que ayudan a asimilar mejor el concepto inicial de esta tesis y contar con una mejor visión cuando se habla de un perfil hidráulico.

Asimismo, se agregaron objetivos particulares para abarcar una parte mayoritaria del texto, los cuales se presentarán en forma secuencial a continuación:

En primer lugar, uno de los objetivos que se abordan es comprender mejor los sistemas de flujo por gravedad y bombeo, teniendo en cuenta los fundamentos básicos de la ingeniería hidráulica. A partir de esto, podemos decir que es de suma importancia conocer acerca de un perfil hidráulico y, aunque la mayoría de fluidos son manejados por bombeo, si somos capaces de visualizar a cuáles flujos se les pueden asignar un sistema de flujo por gravedad, se haría un cambio, no sólo desde el punto estructural, sino también en forma financiera. Entre menos bombeo, menos gasto energético. Para plasmar el valor agregado de lo mencionado y en función de los puntos dados, se pudo hacer un análisis en el último capítulo.

En segundo lugar, conocer acerca del tipo de bombas que se suelen implementar en una planta de tratamiento de agua (PTAR). Para esto, se habló de algunos tipos de bombas y sus diversos funcionamientos en específico, además de resumir, englobar y sintetizar en sólo tres tipos de bombas de todo el catálogo en general, siendo las más comunes y usuales en este ámbito de tratamiento de aguas residuales. Con todo esto, se dejó en claro que se pueden usar varios tipos de bombas en una PTAR, conociendo en dónde se pueden localizar.

Por último, pero no menos importante, se planteó llevar a cabo un proceso de investigación para la hidráulica de una planta, observando las ventajas y desventajas. Esta parte se ve mejor reflejada en el último capítulo tal y como hemos podido comprobar, ya que se muestra el impacto que causa lo hidráulico en una PTAR, ya sea, por el lado de la ventaja de tomar en cuenta qué tipo de equipo de bombeo se usará o no cuando se transporta el fluido, como por la desventaja de ser un diseño antieconómico, tanto del lado topográfico como del operativo.

Lo que me agradó de desarrollar este tema fue mencionar información que no se enseña en la universidad y, a pesar de que es un tema sencillo, no se alude a su importancia de comprender y, sobre todo, de contar con un buen diseño desde la ingeniería básica.

Todos estos puntos, cuando se propusieron al inicio de esta investigación, no los conocía de forma evidente, pero, finalmente, comprendí su valor, ya que asimilé cuál era la importancia del perfil hidráulico y su aplicación en cualquier industria.

Para concluir esta redacción me parece indispensable agregar este tema en la materia de Ingeniería de fluidos. Es fundamental que los alumnos que están cursando la carrera de Ingeniería Química conozcan sobre estos temas, ya que por experiencia se los estudiantes no poseemos las habilidades necesarias para la interpretación de perfiles hidráulicos y es cierto que no todos los profesionales van a dedicarse al diseño, operación o construcción de plantas, pero estas habilidades les servirán para todos los momentos de sus vidas.

BIBLIOGRAFÍA

¿Cómo funcionan las bombas centrífugas? (25 de Julio de 2019). Recuperado el 6 de Diciembre de 2021, de SUHISSA: <https://suhissa.com.mx/como-funcionan-las-bombas-centrifugas/>

¿Qué es y cuáles son las ventajas de un sistema de bomba de cavidad progresiva? (s.f.). Recuperado el 19 de Dicimbre de 2021, de Prodetecs: <https://prodetecs.com/que-es-y-cuales-son-las-ventajas-de-un-sistema-de-bomba-de-cavidad-progresiva/>

Afif, K. E. (2004). *Apuntes de hidráulica para explotaciones forestales*. España: Servicio de Publicaciones.

Agua, C. N. (Diciembre de 2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. (S. d. Naturales, Ed.) Recuperado el 15 de Julio de 2021, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/09DisenoDeInstalacionesMecanicas.pdf>

Aguas residuales. (22 de Septiembre de 2014). Recuperado el 19 de Diciembre de 2021, de WaterWorld: <https://www.waterworld.com/wastewater/article/16215140/uk-wastewater-treatment-plant-receives-progressing-cavity-pump-to-help-improve-water-quality>

Arnalich, S. (2008). *Abastecimiento de agua por gravedad* (Tercera ed.). Ciudad de México: N/A.

Beneficios de usar las bombas de cavidad progresiva de MXQ para el tratamiento de aguas residuales. (2 de Julio de 2019). Recuperado el 3 de Enero de 2022, de Fluids in Motion: <https://www.mxq-usa.com/blog/benefits-of-using-mxqs-progressive-cavity-pumps-for-wastewater-treatment>

Bermúdez, C., & Ramírez, F. (Septiembre de 2009). *Estudio del proceso de cuagulación - floculación de aguas residuales de la empresa textil*. Recuperado el 7 de Febrero de 2022, de Tecnología Química: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf>

Bomba Centrífuga De Agua Sumergible. (s.f.). Obtenido de <https://shop13004.shadrychant.com/content?c=bomba%20centrifuga%20vertical%20sumergible&id=17>

Bomba Dosificadora Lo Básico que Debes Saber. (13 de Mayo de 2014). Recuperado el 7 de Enero de 2022, de SUMIO Water System: <https://sumiowater.com/bomba-dosificadora/>

Bombas de transferencia de agua, aguas residuales, desalinización y aguas residuales. (s.f.). Recuperado el 20 de Noviembre de 2021, de albin pump: <https://www.albinpump.com/es-mx/applications/sewage-transfer-water-treatment-pumps>

Bombas Dosificadoras. (s.f.). Recuperado el 7 de Enero de 2022, de TratAgua: <http://www.tratagua.mx/bombas-dosificadoras/>

Bombas dosificadoras para productos químicos. (s.f.). Recuperado el 16 de Enero de 2022, de Serviclora: <https://serviclora.com/productos-lideres-en-equipos-de-dosificacion-bombas-dosificadoras/bombas-dosificadoras>

Bombas para aguas residuales y medio ambiente. (s.f.). Recuperado el 13 de Diciembre de 2021, de PCM: <https://www.pcm.eu/es/industria/mercados/bombas-para-aguas-residuales-y-el-medio-ambiente>

Bombas Peristálticas para tratamientos de agua potable y agua residuales. (15 de Febrero de 2016). Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de Boyser:

<https://www.bombasboyser.com/bombas-peristalticas-para-tratamiento-de-agua-potable-y-aguas-residuales/>

Bombas sumergibles para bombas. (s.f.). Recuperado el 16 de Diciembre de 2021, de Morton Pumps: <https://mortonpumps.com/bombas-sumergibles-para-lodos/>

Bombas Sumergibles, sus características y tipos. (s.f.). Recuperado el 7 de Diciembre de 2021, de Ingeniería y Servicios Ambientales: <https://isa.ec/bombas-sumergibles-sus-caracteristicas-y-tipos/>

Burgos, J. (1993). Bombas dosificadoras de líquidos. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Cálculo de Bombas y Tuberías. (s.f.). Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de Aula Virtual Proyecto fin de carrera de Ingeniería Química: <https://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/principal.html>

Caldera, Y., Gutiérrez, E., Luengo, M., Chávez, J., & Ruesga, L. (JULIO de 2010). *Revista Científica*. Obtenido de Laboratorio de Investigaciones Ambientales. Núcleo Costa Oriental del Lago. Universidad del Zulia: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-22592010000400011

Características de una bomba de cavidad progresiva. (12 de Julio de 2018). Recuperado el 19 de Diciembre de 2021, de Prodetecs: <https://prodetecs.com/caracteristicas-de-una-bomba-de-cavidad-progresiva/>

Castillejos, J. (2010). Diseño y selección de una red hidráulica a presión o gravedad para el abastecimiento de agua potable a una unidad habitacional. (*Tesis de Licenciatura*). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.

Chacín, N. (8 de Septiembre de 2003). *Bombeo de Cavidad Progresiva: Operaciones, Diagnóstico, Análisis de Falla y Trouble Shooting*. Recuperado el 1 de Julio de 2021, de <https://christian3306.files.wordpress.com/2010/10/bombeo-de-cavidad-progresiva.pdf>

Chile, G. d. (Diciembre de 2010). *Manual para Obras de Aprovechamiento Hidráulico*. Recuperado el 22 de Junio de 2021, de Consejo de Ministros de la Comisión Nacional de Riego:
http://www.dirplan.cl/centrodedocumentacion/Documents/Metodologia/Manual_Obras_Aprovechamiento_Hidraulico.pdf

Cholet, H. (1998). *Las bombas de cavidades progresivas*. Francia: TECHNIP.

Coagulación y Floculación en el tratamiento de agua: Bombas dosificadoras y mezcladoras. (2018). Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de LMI: <https://www.lmipumps.com/es-mx/technologies/coagulation-and-flocculation-in-water-treatment>

Coagulación y Floculación en agua. (s.f.). Recuperado el 7 de Enero de 2022, de Técnica e Ingeniería de Mezclas: <https://www.timsa.com/coagulacion-floculacion-agua/>

Comisión Municipal de Agua Potable y Saneamiento de Xalapa. (2021). *Xalapa H. Ayuntamiento*. Obtenido de <https://cmasxalapa.gob.mx/gom/wp-content/uploads/2018/11/DESCRIPCION-DEL-PROCESO-DEL-TRATAMIENTO-DE-AGUAS-RESIDUALES..pdf>

Como funcionan las bombas sumergibles. (s.f.). Recuperado el 5 de Diciembre de 2021, de AIGUAPRES: <https://www.aiguapres.es/bombas-sumergibles-funcionamiento/>
cronoshare. (26 de Enero de 22). *¿Cuánto cuesta el movimiento de tierras?* Obtenido de Cotización: <https://www.cronoshare.com.mx/cuanto-cuesta/movimiento-tierras>

Cruz, A. R. (Abril de 2012). *Cálculos de perfiles hidráulicos en rios*. Recuperado el 29 de Marzo de 2022, de

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/450/10/A10%20Apendices.pdf>

Cruz, E. (2010). Estudio de las caídas de presión de mezcla de hidrocarburos a través de restricciones y expansiones en tuberías. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Cuando usar bombas de unidad progresivas. (s.f.). Recuperado el 28 de Noviembre de 2021, de Liberty Process: <https://www.libertyprocess.com/when-to-use-progressive-cavity-pumps.html>

Diferencias entre bombas centrífugas y sumergibles. (s.f.). Recuperado el 9 de Diciembre de 2021, de Dakxim: <https://bombasumergible.com.mx/2017/02/08/diferencias-entr-bombas-centrifugas-y-bombas-sumergibles/>

Dificultades al bombear fluidos de alta viscosidad. (s.f.). Recuperado el 17 de Noviembre de 2021, de EDDY PUMP CORPORATION: <https://eddyump.com/es/educacion/dificultades-al-bombear-fluidos-de-alta-viscosidad/>

Durán, N. (2019). Desarrollo de un equipo hidráulico para el laboratorio de Mecánica de Fluidos. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Fernández, C. J. (2009). *Perfil Hidráulico*. Sistemas de Aguas de la Ciudad de México, Ciudad de México.

Fortanel, J. (2008). Diseño y construcción de un equipo para la determinación del factor de fricción en un sistema de tuberías lisa de PVC, a partir de datos de caídas de presión para el

- laboratorio de la planta piloto de carrera de ingeniería química de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Franco, L. (2016). Propuesta de modificación de la planta de tratamiento de agua residual de una terminal de almacenamiento y reparto de pemex refinación para dar cumplimiento a la NOM-003-SEMARNAT-1997. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Franco, J. F. (1994). *Sistema de Bombeo*. España.
- Frank R, S. (2011). *Spellman's Standard Handbook Wastewater Operators* (Segunda ed.). United States of America: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Funcionamiento y características de la bomba dosificadora*. (s.f.). Recuperado el 26 de Noviembre de 2021, de Prodetecs: <https://prodetecs.com/funcionamiento-y-caracteristicas-de-la-bomba-dosificadora/>
- Girón, J. (2015). Propuesta de modernización de una planta de tratamiento de agua residual de una refinería. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Gracia, J. S., & Sánchez, B. H. (2018). *Organización, Gestión y Ejecución de Proyectos Industriales*. Madrid: Díaz de Santos.
- Heras, S. d. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Barcelona: Torre Girona.
- Hidráulico, I. (20 de Septiembre de 2017). *Bombas de Cavidad Progresiva y Sellado de Aguas Residuales*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2021, de PumpsySystems: <https://www.pumpsandsystems.com/progressive-cavity-pumps-wastewater-sealing>
-
-

Isabel, S. M. (2011). Ensamble de un variador de frecuencia para el control y regulación de caudal de una bomba dosificadora en el módulo de automatización industrial con pantalla táctil. (*Tesis para Licenciatura*). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

J., K. (s.f.). *Bombas*. (McGRAW-HILL, Ed.) Recuperado el 13 de Enero de 2022, de <http://web.ist.utl.pt/ist11061/leq-II/Documentos/OpUnitarias/Bombas.pdf>

Jesús, M. M. (s.f.). *Impulsión de Aguas Residuales: Bombas para la Impulsión de Aguas Residuales*. Recuperado el 5 de Mayo de 2021, de <https://www.fnmt.es/documents/10179/10666378/Clasificaci%C3%B3n+y+tipos+de+bombas.pdf/9eb9b616-ea47-0841-566b-3b49a93e83bf>

Joana, L. (2018). Cálculo de las pérdidas locales en redes de tuberías a presión y su importancia durante su funcionamiento con flujo permanente. (*Tesis de Maestría*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

JUMAPAC. (s.f.). *Junta Municipal de Agua Potable y Alcantillado de Cortazar GTO*. Obtenido de http://jumapac.com/73_planta_insurgentes.html

Los diferentes tipos de bomba de dosificación que existen en el mercado. (9 de Mayo de 2018). Recuperado el 15 de Enero de 2022, de Fluideco: <https://fluideco.com/los-diferentes-tipos-de-bomba-dosificadora-que-existen-en-el-mercado/>

Méndez, M. V. (2001). *Elementos de Hidráulica de Canales*. Venezuela: Publicaciones UCAB.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (Sexta ed.). Ciudad de México: Pearson Education.

Núñez, C. A. (2016). *Principios de la ecuación de Bernoulli, aplicaciones y esquema del montaje experimental*. Recuperado el 25 de Junio de 2021, de

https://www.academia.edu/34673817/Principios_de_la_ecuaci%C3%B3n_de_Bernoulli_a_plicaciones_y_esquema_del_montaje_experimental

PAC PAM. (s.f.). *El PAC PAM floculante de Aguas Residuales de polímero de Mecánica de la bomba de dosificación dosificación*. Obtenido de Made-in-China: https://es.made-in-china.com/co_shkuosi/product_PAC-PAM-Flocculant-Waste-Water-Mechanical-Polymer-Metering-Dosing-Pump_urorogrhig.html

Parra, S. F. (2019). *Evaluación hidráulica y de operatividda de la PTAR de la urbanización campestre macadamia en el municipio de la calera*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas , Colombia. Recuperado el 25 de Enero de 2022, de <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23167/DeLaRosaParraStevenFelipe2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Perez, J. J. (Diciembre de 2006). Diagnostico Operativo del Sistema de Desalojo de Aguas Residuales en la estación de bombeo "La esperanza" Ciudad Nezahualcoyotl, Estado de México. (*tesis de licenciatura*). Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México. Obtenido de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/03CarcamosDeBombeoParaAlcantarilladoFuncionaleHidraulico.pdf>

Pérez, L., Laca Pérez, A., & Díaz Fernández, J. M. (2019). *Producción y características de lodos*. (Paraninfo, Ed.) Recuperado el 2 de Mayo de 2021, de <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/50969/Laca18%20META%20Produccion%20y%20caracteristicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

PulsaFeeder. (Junio de 2018). *Bomba Dosificadora de Proceso y Diafragma*. Obtenido de https://hugepdf.com/download/bomba-dosificadora-de-proceso-y-diafragma_pdf

Ramos, M. (2019). Diseño de un simulador en visual para el dimensionamiento y análisis hidráulico de redes que transportan fluidos no newtonianos. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Ruiz, J. L. (2015). *Instalaciones con tuberías* (Septimo ed.). España: CasBell.

Salgado, K. (2018). Propuesta para estandarizar el proceso de realización de documentos de ingeniería tomando como ejemplo una planta de tratamiento de agua residual. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Sánchez, R. A. (2013). *Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes*. Valencia, España: Club Universitario.

Selección de bombas de cavidad progresiva para plantas de tratamiento de aguas residuales. (s.f.).

Recuperado el 16 de Diciembre de 2021, de ACCA PUMPS: <https://accapumps.com/selecting-progressing-cavity-pumps-for-waste-water-treatment-plants/>

Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey, I.P.D. (2021). *Servicio de Agua y Drenaje de Monterrey*.

Obtenido de https://www.sadm.gob.mx/SADM/index.jsp?id_html=saneamiento

Suárez, J. (2013). Cálculo y selección de un sistema de bombeo para la línea de conducción principal de aguas tratadas en la fundación xochitla a.c. (*Tesis de Licenciatura*). Instituto Politécnico Nacional , Ciudad de México.

SULZER. (2020). *Bomba PC de cavidad progresiva Quick-Strip*. Obtenido de <https://www.sulzer.com/es-es/spain/shared/products/pc-transfer-perform-pump>

TIMSA. (s.f.). *BOMBAS CENTRÍFUGAS SUMERGIBLES*. Obtenido de <https://www.timsa.com/equipos-de-bombeo/bombas-centrifugas/bombas-centrifugas-sumergibles/>

Tormenta, S. (2 de Abril de 2018). *Las bombas de cavidad progresiva aumentan la eficiencia de una empresa rural de tratamiento de agua*. Recuperado el 3 de Enero de 2022, de Water y Wasted digest: <https://www.wwdmag.com/home/article/10918605/progressive-cavity-pumps-increase-efficiency-for-rural-water-treatment-company>

Trans ASME. (1994). *Diagrama Moody*. Obtenido de <https://blog.utp.edu.co/docenciaedwin/files/2015/06/diagrama-Moody.pdf>

Unidad de preparación de polímeros. (s.f.). Recuperado el 29 de Noviembre de 2021, de Enviroment By Technology: <https://www.emolatina.es/tecnologia-y-productos-emo-france/acondicionamiento-de-lodos/preparacion-polimero-emulsion-polvo/>

Valdez, E. C., & Gónzáles, A. B. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. Ciudad de México: Fundación ICA. Recuperado el 12 de Marzo de 2022, de Tratamiento secundario: <https://pdfcoffee.com/perfiles-hidraulicospdf-3-pdf-free.html>

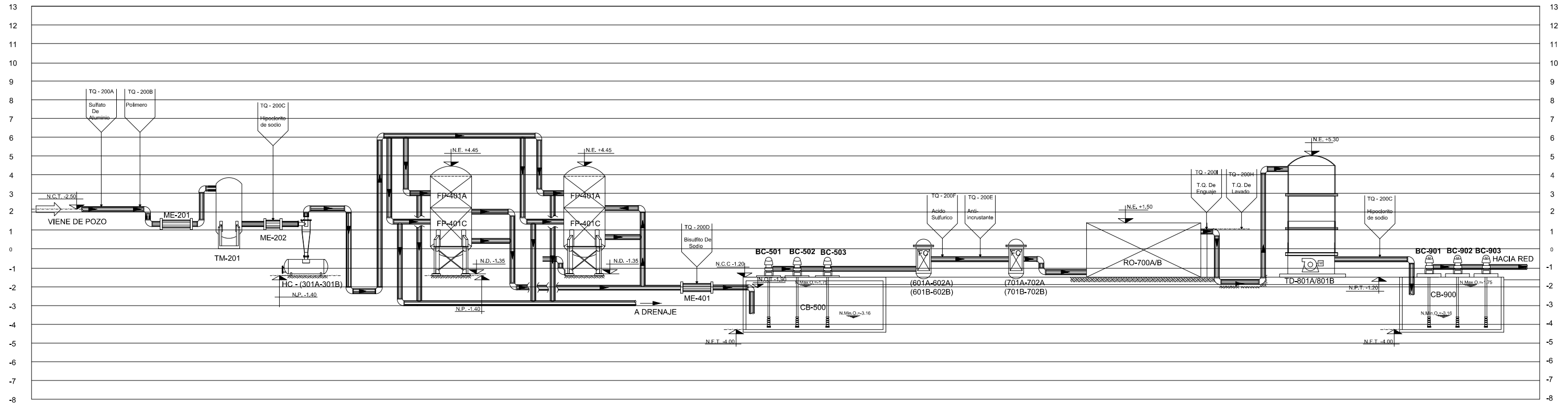
Vega, B. (2017). Consumo energético en sistemas recirculados por bombas y a presión en una planta . (*Tesis de Licenciatura*). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Vicente, M. M. (2007). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas-Venezuela: Texto.

Wegelin, M. (1996). *Surface Water Treatment by Roughing Filters - A Design, Construction and Operation Manual*. Suiza: SANDEC - SKAT. doi:<http://www.nzdl.org/cgi-bin/library?e=d-00000-00---off-0cdl--00-0----0-10-0---0---0direct-10---4-----0-11--11-en-50---20-about---00-0-1-00-0-0-11----0-0-&cl=CL2.19&d=HASH01165bbf8a8dc3251af16cd9.6.6.2&gc=1>

Zamora, E. (Junio de 2013). *Bombeo de cavidad progresiva*. Obtenido de StuDocu: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional-experimental-de-los-llanos-centrales-romulo-gallegos/medicina-general-ii/bombeo-de-cavidad-progresiva/20047664>

ANEXO



NOMENCLATURA

TQ - 200A	TANQUE DE SULFATO DE ALUMINIO
TQ - 200B	TANQUE DE POLIMERO
TQ - 200C	TANQUE DE HIPOCLORITO DE SODIO
BD - (201A-202A)-(201B-202B)	BOMBA DOSIFICADORA
(201C-202C)-(201D-202D)	
(201E-202E)-(201F-202F)	
(201G-202G)	
ME - (201-401)	MEZCLADOR ESTÁTICO
HC - (301A-301B)	HIDRO CICLON
FP - (401A-401C)-(401B-402D)	FILTRO APRESION
TQ - 200D	TANQUE DE BISULFITO DE SODIO
BC - (501-502-503-504)	BOMBA CENTRIFUGA
(601-902)	
CE - 500	CARCAMO EXISTENTE
FC - (601A-602A)-(701A-702A)	FILTRO CARTUCHO
(601B-602B)-(701B-702B)	
TQ - 200E	TANQUE DE ANTI-INCRUSTANTE
TQ - 200F	TANQUE DE ACIDO SULFURICO
TQ - 200G	TANQUE DE DIA H2504
BA - (700A-701B)	BOMBAS DE ALTA PRESION
(703)	
RO-700A	OSMOSIS INVERSA
RO-700B	
TQ - 200H	TANQUE DE AGUA DE LAVADO
TQ - 200I	TANQUE DE ENGUAJE
TD - (801A-801B)	TORRE DESGASIFICADORA
VA - (800A-801B)	VENTILADOR
CB - (900)	CARGAMO DE BOMBEO DE AGUA POTABLE
CP - (CP-01)	COMPRESOR DE AIRE DE SERVICIO
JE-(200H-203H)	JUNTA DE EXPANSION
VC-200H	VALVULA DE COMPUERTA
VR-200H	VALVULA DE RETENCION
N.P.T.	NIVEL DE PISO TERMINADO
N.C.T.	NIVEL DE CENTRO DE TUBERIA
N.F.T.	NIVEL FONDO TERMINADO
N.E.A.	NIVEL DE ESPEJO DE AGUA
N.P.	NIVEL DE PLANCHA
N.E.	NIVEL DE EQUIPO
N.D.	NIVEL DE DADO
N.C.C.	NIVEL DE CORONA DE CARCAMO
N.Max.O	NIVEL MÁXIMO DE OPERACION
N.Min.O.	NIVEL MÍNIMO DE OPERACION

NOTAS:

1. TODAS LAS MEDIDAS ESTAN EN METROS
2. LOS NIVELES ESTAN EN METROS REFERIDOS AL BANCO DE NIVEL
3. LOS DETALLES DE INTERCONEXIÓN SE PRESENTAN EN LOS PLANOS MECANICOS DE CADA EQUIPO
4. LOS DIAMETROS DE TUBERIAS SE ESPECIFICAN EN LOS PLANOS ISOMETRICOS Y MECANICOS

DATOS DEL PROYECTO

FLUIDO	AGUA DE POZO
Q OPERACION	60LS/S
Q DISEÑO	66LS/S
POBLACION BENEFICIADA	
CONSIDERADO	71475 HAB
AGUA PARA	CONSUMO HUMANO
TIPO DE CONDUCCION	A PRESION

FIRMAS :



SUBDIRECCION DE C. DE PLANTAS Y POZOS	DIRECCION DE CONSTRUCCION
PERFIL HIDRAULICO	
JEFE DE GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL	
Lic. Marcelo Luis Ebrard Casaubon	
SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE	DIRECTOR GENERAL
Lic. Martha Delgado Perilla	Ing. Ramón Aguirre Díaz
DIRECTOR CONSTRUCCION	SUBDIRECTOR DE CONSTRUCCION DE PLANTAS Y POZOS
M. en I. Carlos Jesús García Fernández Galicia	Ing. José Ramírez y Flores

DITAPSA CONSULTORES, S.A. DE C.V.

REVISÓ: ING. DELFINO RUIZ MORALES.

REVISÓ: ING. CARLOS E. GUERRERO MONDORO

Tecnología Intercontinental, S.A. de C.V.

TECNOLOGÍA INTERCONTINENTAL, S.A. de C.V.		SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MÉXICO	
PROYECTO:	REVISÓ:	REVISÓ:	AUTORIZÓ:
DIBUJÓ:	AUTORIZÓ:	ING. Mauricio Hernández	ING. L. Arturo Correa
No. DE CONTRATO:		SUBDIRECCION DE CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA	
0163-20-LN-DC-2-08		PROYECTOS	

No. DE ARCHIVO	TITULO	REV.	FECHA	MODIFICACIONES	MODIFICO	REVISO	APROBO
	PLANOS COMPLEMENTARIOS						