

HOJA DE CÁLCULO PROGRAMADA PARA EL DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE
BOMBEO DE AGUA RESIDUAL CON BASE DE DATOS DE BOMBAS SUMERGIBLES

Presentado por:

JULIE CAROLINA CORREDOR SANTOS

Director:

GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

INGENIERO CIVIL, MSc, PHD.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE

BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

2014

HOJA DE CÁLCULO PROGRAMADA PARA EL DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DE
BOMBEO DE AGUA RESIDUAL CON BASE DE DATOS DE BOMBAS SUMERGIBLES

POR:

JULIE CAROLINA CORREDOR SANTOS

PROYECTO DE GRADO COMO REQUISITO PARA EL GRADO DE:
ESPECIALISTA EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO

BOGOTÁ D.C., COLOMBIA

2014

APROBADA POR:

Germán R. Santos

GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

DIRECTOR DEL PROYECTO DE GRADO

14 Julio 2014

FECHA

Tabla de Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	9
1.1.	Objetivo general	10
1.2.	Objetivos específicos.....	10
2.	BOMBAS Y SISTEMAS DE BOMBEO	12
2.1.	Clasificación las bombas	12
2.1.1.	Bombas centrifugas.....	14
2.1.2.	Bombas de tornillo	15
2.1.3.	Eyectores neumáticos.....	17
2.2.	Bombas centrifugas usuales en una EBAR	18
2.3.	Sistemas de bombeo	21
2.3.1.	Capacidad de bombeo	22
2.3.2.	Altura de bombeo.....	22
2.3.3.	Curva característica de la bomba	23
2.3.4.	Rendimiento y potencia absorbida.....	24
2.3.5.	Línea de impulsión.....	25
2.3.6.	Curva del sistema	25
2.4.	Cavitación en bombas centrifugas.....	26
3.	ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUAS NEGRAS.....	27
3.1.	Datos iniciales del proyecto	27
3.2.	Composición de las estaciones de bombeo	29
3.2.1.	Tubería afluente	30

3.2.2.	Bomba sumergible	31
3.2.3.	Tubo guía	32
3.2.4.	Cadena.....	32
3.2.5.	Pozo húmedo.....	33
3.2.6.	Niveles de arranque y parada	36
3.2.7.	Ventilación	38
3.2.8.	Rejilla	38
3.2.9.	Tapas de acceso.....	39
3.2.10.	Escaleras.....	39
3.2.11.	Tubería de impulsión	39
3.2.12.	Válvula de retención	43
3.2.13.	Válvula de regulación	44
3.2.14.	Cuadro eléctrico de control.....	45
3.3.	Normatividad colombiana.....	46
3.3.1.	Definición.....	47
3.3.2.	Estudios previos	47
3.3.3.	Condiciones Generales.....	48
3.3.4.	Parámetros de diseño	49
3.3.5.	Instalaciones.....	53
4.	HOJA DE CÁLCULO PARA DISEÑO DE EBAR.....	54
4.1.	Datos supuestos para el diseño de la estación de bombeo	54
4.1.1.	Bombas.....	55
4.1.2.	Pozo húmedo.....	55

4.1.3. Tubería de impulsión	55
4.2. Datos de entrada en la hoja de cálculo de la EBAR.....	56
4.3. Datos de salida en la hoja de cálculo de la EBAR	58
4.3.1. Bombas coincidentes con la información entrante	58
4.3.2. Diseño de la línea de impulsión	62
4.3.3. Dimensionamiento del pozo húmedo.....	63
5. MODELO DE OPTIMIZACIÓN	64
5.1. Componentes del modelo de optimización	64
5.1.1. Variables de decisión	65
5.1.2. Función objetivo	65
5.1.3. Restricciones	66
5.2. Descripción del modelo de optimización	66
5.2.1. Modelo de optimización dentro de la hoja de cálculo	68
6. CONCLUSIONES	71
7. REFERENCIAS.....	72
ANEXO 1: PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA	74
ANEXO 2: RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES	75
ANEXO 3: COEFICIENTES DE PÉRDIDAS MENORES.....	76

Lista de Figuras

Figura 1. Clasificación de las bombas	13
Figura 2. Carcasas de Bombas	14
Figura 3. Bomba de tornillo	16
Figura 4. Eyector Neumático	17
Figura 5. Bomba centrífuga sumergible.....	18
Figura 6. Bomba centrífuga vertical.....	19
Figura 7. Bomba centrífuga horizontal	20
Figura 8. Curva característica de la bomba.....	24
Figura 9. Curva del sistema.....	25
Figura 9. Esquema estación de bombeo de agua residual (EBAR).....	30
Figura 10. Esquema del volumen de almacenamiento adicional en colectores de gran diámetro.	35
Figura 11. Esquema estación de bombeo prefabricada.....	36
Figura 12. Niveles de arranque y parada.....	37
Figura 13. Datos de entrada	56
Figura 14. Cantidad de accesorios utilizados en la línea de impulsión.....	57
Figura 16. Datos de salida, hoja 1 - Información del punto de bombeo	59
Figura 17. Validación de bombas coincidentes.....	59
Figura 18. Lista de las bombas que pueden operar en el punto de funcionamiento determinado.....	60
Figura 19. Selección de la bomba a graficar	61

Figura 20. Grafica de la curva del sistema Vs la curva de la bomba.	61
Figura 21. Hoja 2 – dimensionamiento de la línea de impulsión.....	62
Figura 22. Hoja 3 – dimensionamiento del pozo húmedo	63
Figura 23. Hoja 4 – Optimización de la EBAR	69
Figura 24. Hoja 4 – Presupuesto preliminar	70

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Tipos de bombas centrifugas	15
Cuadro 2. Ventajas y desventajas de las bombas utilizadas en estaciones de bombeo de agua residual o pluvial	20
Cuadro 3. Factores utilizados para la estimación del caudal mínimo	28
Cuadro 4. Ejemplo de secuencia de encendido de bombas.....	32
Cuadro 5. Tipo de válvulas de retención.....	44
Cuadro 6 Periodo de diseño, según nivel de complejidad del sistema	49

Resumen

Un buen diseño de una estación de bombeo de agua residual o lluvia requiere de bastante tiempo y esfuerzo por parte del diseñador para encontrar las suficientes alternativas que definan un óptimo diseño en cuanto a los equipos a instalar. Por lo anterior, el presente proyecto muestra la elaboración de una hoja de cálculo para el diseño de una estación de bombeo de agua residual o lluvias la cual a su vez cuenta con una base de datos de bombas sumergibles que pueden ser utilizadas en este tipo de estaciones. Dentro de las aplicaciones de la hoja de cálculo se tiene el indicar cuáles son todas las bombas (de la base de datos creada) que funcionan para unos datos de entrada del proyecto y, adicionalmente, presenta un modulo de optimización para determinar cuál es el equipo optimo y el diseño de la línea de impulsión mas económica para el proyecto.

Palabras Claves: estación de bombeo de aguas residuales, estación de bombeo de aguas lluvias, Alcantarillado, optimización.

1. Introducción

Dentro de los diseños de los sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y lluvias es posible que se requiera transportar estas aguas desde un punto a otro más alto topográficamente lo cual no se puede lograr por medio de la gravedad. Por tal razón se requiere el diseño de estaciones elevadoras o de bombeo de aguas residuales o pluviales dentro del proyecto para suplir esta necesidad.

Generalmente, estas estaciones de bombeo representan un costo muy significativo dentro del diseño del sistema de alcantarillado de una ciudad por lo cual es importante considerar todas las alternativas posibles que existen y evaluar los costos y beneficios de cada una de ellas como lo expone las Empresas Públicas de Medellín E. S. P, 2009:

“Siempre que se diseña una estación elevadora y/o de bombeo, existen varias alternativas de combinación de tipo de bomba, potencia de bomba, diámetro de tubería de impulsión y material de tubería impulsión, las cuales cumplen con las condiciones hidráulicas de caudal de bombeo y altura estática entre los tanques aguas arriba (succión) y aguas abajo (descarga). Por consiguiente, el diseño de la estación elevadora y/o de bombeo debe buscar la alternativa óptima económica de combinación de los diferentes diámetros y materiales de tubería de impulsión, potencia de las bombas y consumo de energía de estas a lo largo del periodo de diseño y que cumpla con todas las restricciones hidráulicas”.

Adicionalmente, existen varias empresas a nivel mundial que fabrican bombas para este tipo de estaciones, lo cual hace exhaustivo el trabajo de encontrar las bombas que cumplan con los parámetros de diseño de la estación de bombeo y así evaluarlas como una alternativa, por lo

cual muchas veces los diseños de las estaciones de bombeo solo tienen en cuenta una sola empresa fabricante sin importar los costos de los equipos que suministre ésta.

Por lo anterior, el presente proyecto se desarrolló con el objetivo de crear una hoja de cálculo que diseñe una estación de bombeo óptima de aguas residuales o lluvias teniendo en cuenta una base de datos con la información actualizada de diferentes empresas fabricantes de bombas sumergibles las cuales se pueden evaluar, dentro de un módulo de optimización, y seleccionar la mejor bomba.

Es importante aclarar que estas estaciones de bombeo se diseñan de acuerdo con las exigencias de las normas que se aplican a cada país o ciudad, sin embargo, las normas son, en general, muy parecidas entre sí lo cual hace que, en cierta medida, el procedimiento a seguir para el diseño de estas estaciones de bombeo sea general, por lo tanto la hoja de cálculo creada puede ser utilizada para diseñar estaciones de bombeo en cualquier lugar.

1.1. Objetivo general

Desarrollar una hoja de cálculo para el diseño de una estación de bombeo de agua residual (EBAR) seleccionando de una base de datos la bomba sumergible óptima, las dimensiones del pozo húmedo y las características línea de impulsión.

1.2. Objetivos específicos

- Elaborar una base de datos de bombas sumergibles para aguas residuales donde se tendrán en cuenta 5 diferentes empresas a nivel mundial.

- Establecer el modelo de optimización del diseño de estaciones de bombeo de agua residuales (EBAR) teniendo en cuenta los costos constructivos y operativos del sistema.

- Elaborar un macro en Microsoft Excel que determine el tipo de bomba, las dimensiones del pozo húmedo y las características de la línea de impulsión óptimas de diseño de una estación de bombeo de agua residual dados unos los datos del proyecto.

2. Bombas y Sistemas de Bombeo

Una bomba es un dispositivo mecánico el cual, mediante un eje rotatorio impulsado por un motor eléctrico, añade energía a un fluido provocándole movimiento y aumento de su presión. Las bombas se utilizan para impulsar líquidos a través de un sistema de tuberías. (Mott, 2006)

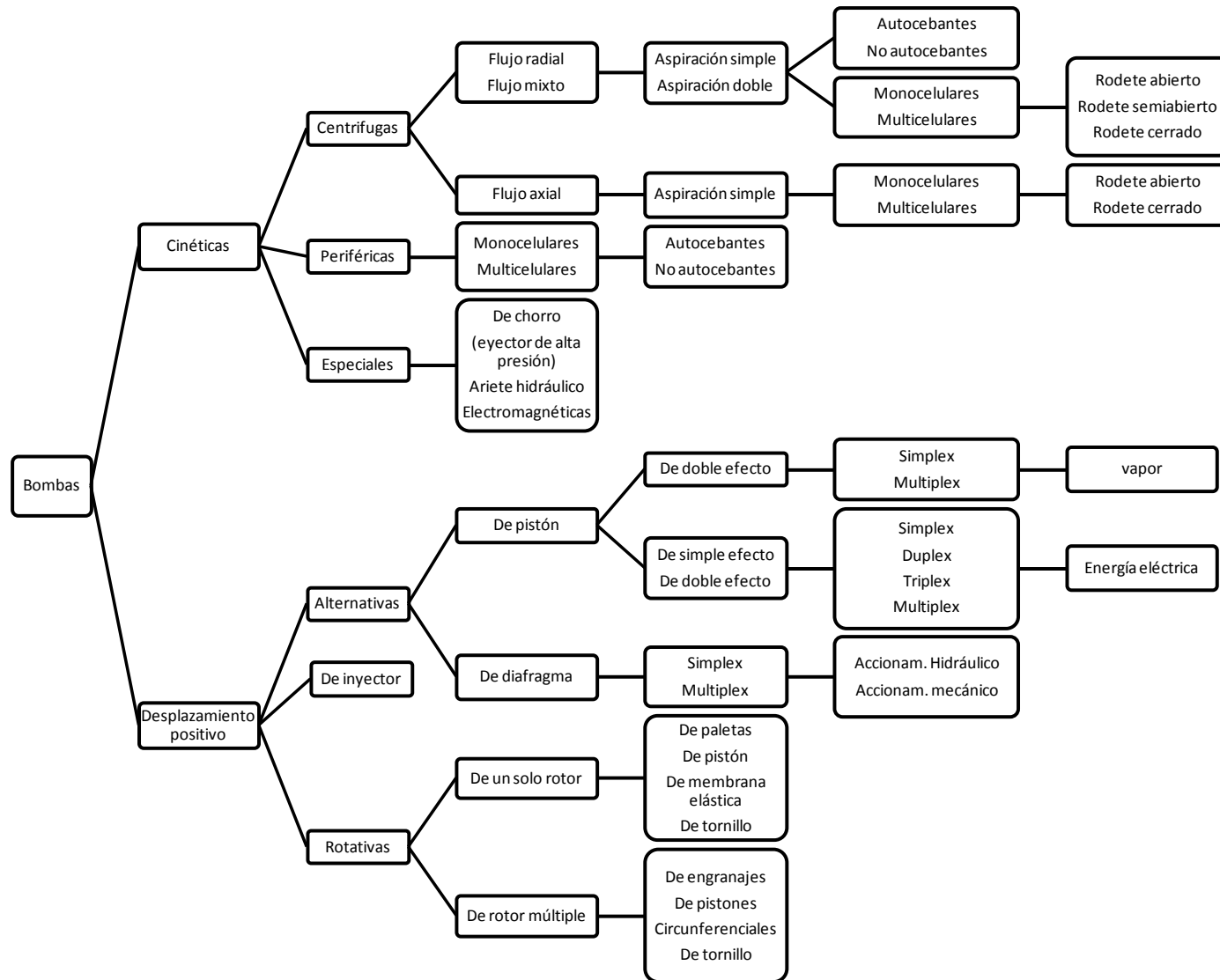
2.1. Clasificación las bombas

Las bombas generalmente se clasifican de acuerdo con su configuración mecánica, por lo tanto las bombas se pueden clasificar en dos grandes grupos (Jones, 2004):

- *Bombas cinéticas*: la característica principal de estas bombas es que imparten velocidad al líquido cuando pasa por el impulsor y luego convierte algo de esa velocidad en presión adicional. Este tipo de bombas a su vez se dividen en dos, en bombas centrífugas (o de voluta) y en bombas verticales (o de turbina).
- *Bombas de desplazamiento positivo*: son aquellos en los que el elemento móvil de la bomba (pistón, rotor, embolo o engranaje) desplaza el líquido hacia el cilindro de la bomba y al mismo tiempo eleva la presión del líquido. Este tipo de bombas a su vez se divide en tres: Bombas de pistones, bombas neumáticas y bombas rotativas. Raramente las bombas de desplazamiento positivo se utilizan para estaciones de bombeo de aguas residuales o pluviales sin embargo las bombas de tornillo se utilizan en este tipo de estaciones.

En la Figura 1 se muestra una clasificación general de las bombas mencionadas anteriormente. En las estaciones de aguas residuales y pluviales, las bombas más comunes son las centrífugas, seguidas de las bombas de tornillo y las bombas eectoras.

Figura 1. Clasificación de las bombas



Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, Figura 8.4

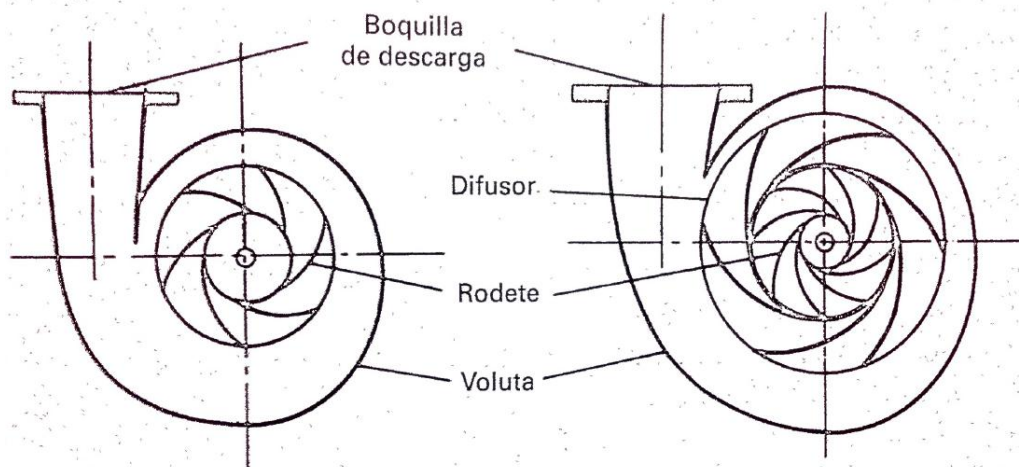
Julie Carolina Corredor Santos

2.1.1. Bombas centrifugas

En una bomba centrifuga, el líquido que se encuentra dentro de la bomba adquiere una velocidad y una presión superiores a las que tenía en la entrada y, antes de que el fluido salga por la boquilla de descarga, la velocidad de salida se convierte parcialmente en presión.

Las bombas centrifugas se componen principalmente de un rodete el cual fuerza al líquido a seguir un movimiento rotativo y le suministra a este la velocidad y la presión, y la carcasa la cual dirige el líquido hacia el rodete y hacia la salida y es el lugar en donde la velocidad se convierte en presión. Esta carcasa puede ser de dos tipos, de voluta o de difusión y su diferencia radica en su forma y configuración ya que las de difusión presentan unas chapas guías como se muestra en la Figura 2.

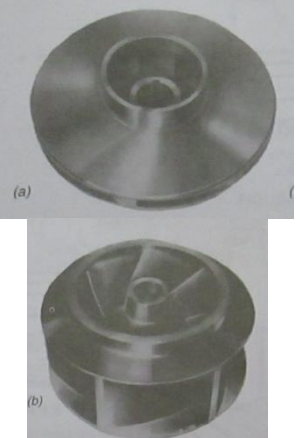


Figura 2. Carcasas de Bombas



Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, Figura 8.5

Como se describió anteriormente, las bombas centrífugas se pueden clasificar en bombas de flujo axial, flujo radial y flujo mixto. En el Cuadro 1 se muestran una breve descripción de cada tipo de bomba.

Cuadro 1. Tipos de bombas centrífugas

Tipo de bomba centrífuga	Descripción	Figura del rodete
Flujo radial	El líquido entra axialmente en el rodete a través de la boquilla de aspiración y es descargado radialmente hacia la carcasa.	
Flujo mixto	El líquido entra axialmente en el rodete y es descargado a una dirección intermedia entre la radial y la axial.	
Flujo axial	El líquido entra y sale del rodete de forma axial.	

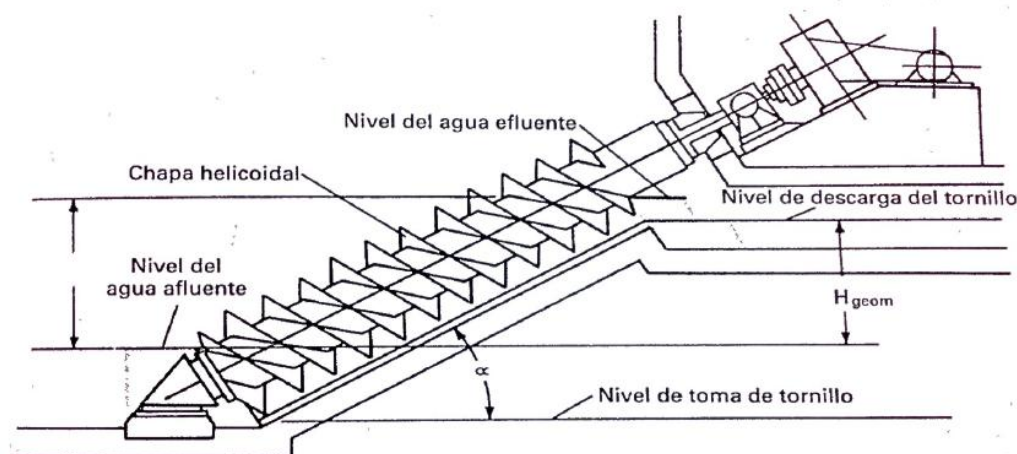
Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995

2.1.2. Bombas de tornillo

Este tipo de bombas son de desplazamiento positivo y se basa en el principio del tornillo de Arquímedes en donde un eje giratorio con chapas helicoidales gira en un canal inclinado

empujando el agua hacia arriba. Este tipo de bombas son utilizadas en estaciones de bombeo en donde la diferencia de altura entre el punto de succión y el punto de descarga no es mayor a 9m con caudales entre 0.01 a 3.2 m³/s.

Figura 3. Bomba de tornillo



Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, Figura 8.12

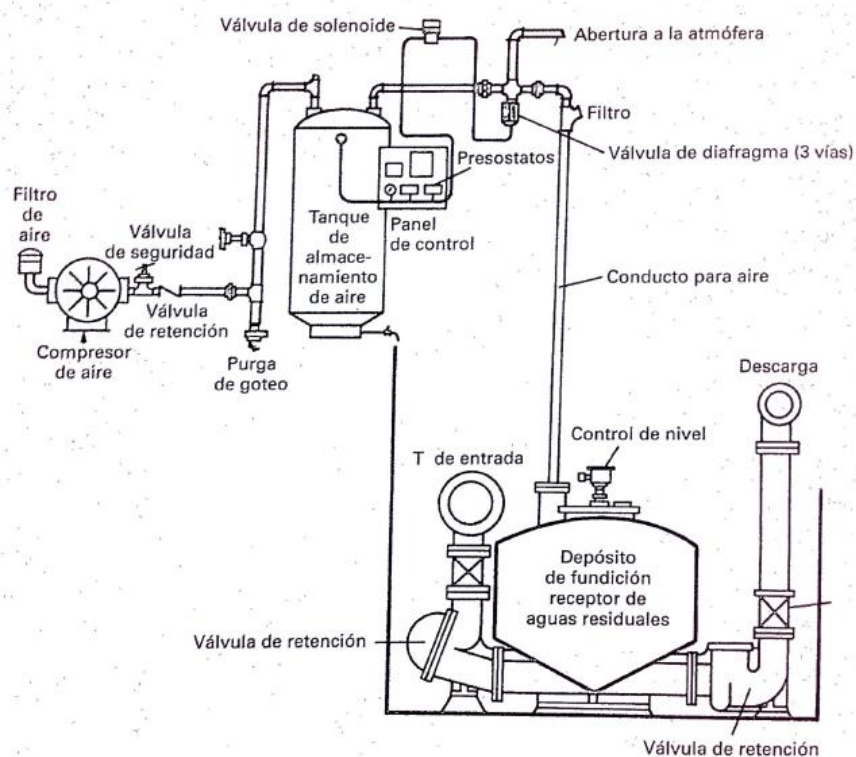
Para Metcalf & Eddy, INC, existen dos ventajas principales en este tipo de bombas con respecto a las bombas centrífugas, la primera es que puede transportar sólidos de mayor tamaño sin presentar atascamientos, y la segunda, es que funciona a velocidad constante para una amplia gama de caudales con rendimientos buenos.

Como características generales para este tipo de bombas, los motores son de velocidad constante y reductores con salida de 30 a 50 RPM, los rendimientos normales son del 85% a la máxima capacidad y del 65% a un 25% de la capacidad máxima, la máxima capacidad se obtiene cuando la altura del líquido sobre el tornillo es máxima, son instaladas en el exterior.

2.1.3. Eyectores neumáticos

Los eyectores neumáticos se instalan en estaciones de bombeo de pequeña capacidad ya que no se atascan fácilmente. La capacidad en los eyectores neumáticos varía entre 2 y 38 l/s. En condiciones normales, el ciclo de estos eyectores es de 1 minuto (30 segundos de llenado y 30 segundos de vaciado) por lo cual se recomienda que la tubería de impulsión sea calculada con el 200% del caudal del proyecto. En cuanto a los costos, los eyectores neumáticos son económicos hasta un caudal de 20 l/s.

Figura 4. Eyector Neumático



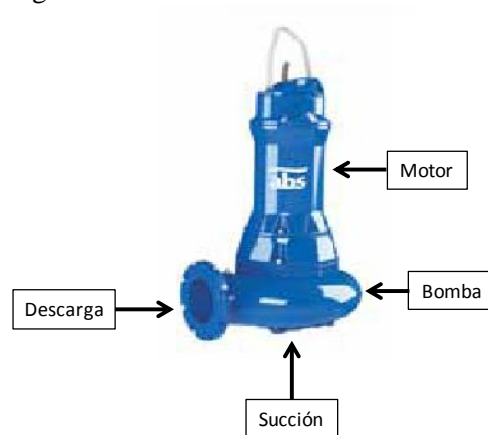
Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, Figura 8.13

2.2. Bombas centrifugas usuales en una EBAR

Generalmente existen tres tipos de bombas utilizadas en las estaciones de bombeo de agua residual o pluvial:

- Bombas centrifugas sumergibles: Son bombas que trabajan, como su nombre lo indica, de manera sumergida y por lo tanto requieren que la carcasa de la bomba (en donde se encuentra el impulsor) esté sumergido en el fluido con el fin de bombear. Este tipo de bombas presentan un nivel de sugerencia mínimo el cual debe ser considerado en el diseño, ya que si la cubierta superior está por encima del nivel del líquido, el aire se introduce dentro de la bomba causando problemas en su operación. Estas bombas cuentan con diferentes tipos de impulsores por lo cual generan una alta gama de trabajo con respecto el tipo de agua a bombear y las especificaciones de bombeo. Debido a que la bomba se instala en el pozo húmedo, no se requiere una cámara seca lo cual disminuye los costos constructivos de la estación de bombeo.

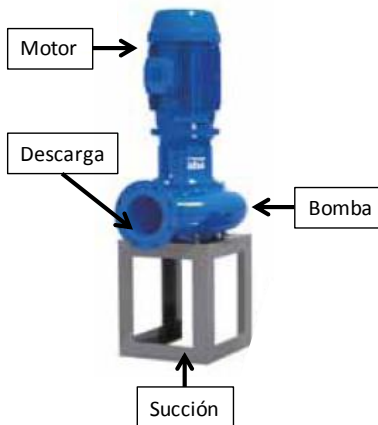
Figura 5. Bomba centrifuga sumergible



Fuente: Adaptado de Sulzer

-
- Bombas centrifugas verticales: Las bombas verticales cuentan con un difusor axial en lugar de una voluta. Este tipo de bombas también debe tener una parte sumergida por donde se realiza la succión del líquido y la descarga va conectada directamente a la bomba. Al igual que las anteriores, no se requiere una cámara seca para su instalación lo cual disminuye los costos constructivos de la estación de bombeo.

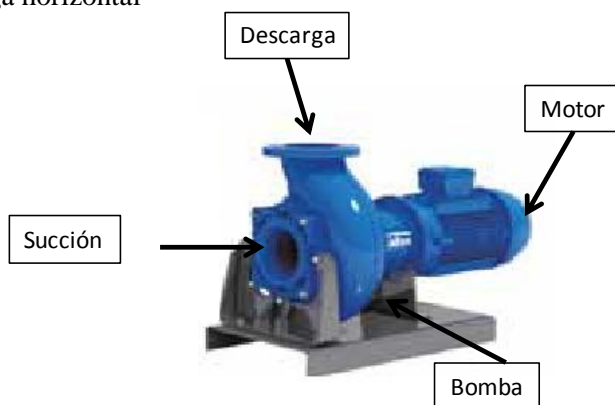
Figura 6. Bomba centrifuga vertical



Fuente: Adaptado de Sulzer

- Bombas centrifugas horizontales: Este tipo de bombas por lo general el impulsor está alojado en una carcasa en forma de espiral llamada una voluta. Tanto el impulsor como el motor deben estar ubicados en una cámara seca y la succión del líquido se realiza en el pozo húmedo mediante la tubería de succión.

Figura 7. Bomba centrífuga horizontal



Fuente: Adaptado de Sulzer

A continuación se muestran las ventajas y desventajas que tiene cada tipo de bomba para la operación en estaciones de bombeo.

Cuadro 2. Ventajas y desventajas de las bombas utilizadas en estaciones de bombeo de agua residual o pluvial

Tipo Bomba	Ventajas	Desventajas
Sumergible	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Existe gran disponibilidad de bombas sumergibles, por lo que es posible el diseño de grandes estaciones con varias bombas sumergibles. ✓ Amplia gama de tamaños y características de una bomba de hélice vertical. ✓ Protección contra las inundaciones en el pozo seco. ✓ Fácil extracción para reparaciones y mantenimientos. ✓ Eliminación de la necesidad de largos ejes de transmisión. ✓ Enfriamiento natural por las aguas a bombear. ✓ Tiempos de ciclo más cortos. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Disponibilidad limitada de tamaños de motor. ✓ Costos de adquisición mayores. ✓ Necesidad de operar en condiciones de sugerencia para la refrigeración. ✓ Necesidad potencial de un mayor tamaño de pozo húmedo y espaciamiento de la bomba.
Verticales	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajos requisitos de mantenimiento. ✓ Fácil acceso al motor. ✓ Uso de ejes motrices de hasta 12 m. ✓ Los rodamientos se pueden lavar fácilmente con agua dulce en vez de engrasar. ✓ Se requiere una pequeña superficie que 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Dudosa rentabilidad de lubricación con agua. ✓ Se requiere sugerencia de la bomba en el líquido. ✓ Requisito de dos codos adicionales para el tipo vertical, uno en la succión y uno en la descarga.

Tipo Bomba	Ventajas	Desventajas
	sea suficiente para acomodar la bomba axial.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Un acceso limitado a la bomba, lo que requiere retirar todo el conjunto de la bomba fuera de la estación. ✓ El nivel de ruido es generalmente mayor que el de las bombas sumergibles.
Horizontales	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alta fiabilidad. ✓ Simplicidad mecánica y eléctrica en comparación con las bombas de eje vertical. ✓ Fácil acceso para el mantenimiento, ya que las bombas se colocan en una cámara seca. ✓ Vida útil más larga que las bombas verticales. ✓ Motores menos costosos que las bombas verticales. ✓ Requisitos altura libre más bajas que las bombas verticales. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los impulsores tienen típicamente una eficiencia del 70% o inferior. ✓ Se requiere un pozo seco de gran tamaño para la instalación de las bombas. ✓ Los motores están sujetas a inundaciones si la cámara seca se inunda. ✓ Se necesita ventilación para enfriar los motores.

Fuente: Adaptado de Federal Highway Administration, 2001

2.3. Sistemas de bombeo

En los sistemas de bombeo se pueden identificar 6 puntos importantes que lo componen:

i) la capacidad, ii) la altura, iii) la curva característica de la bomba, iv) el rendimiento y la potencia absorbida, v) la línea de impulsión y vi) la curva del sistema.

Los 4 primeros puntos dependen del funcionamiento de la bomba, el punto ii depende también de la topografía del terreno y de la línea de impulsión. Por lo tanto es importante identificar las características de las bombas.

Las características de funcionamiento de las bombas dependen del tamaño, velocidad y diseño de la bomba. Existen diversas empresas especializadas en la construcción de bombas para aguas residuales, sin embargo cada bomba es diferente en cuanto a las 3 características

mencionadas anteriormente. Toda la información necesaria para el diseño de un sistema de bombeo se puede encontrar en los catálogos que presenta cada empresa.

2.3.1. Capacidad de bombeo

La capacidad se define como el caudal que es bombeado por una bomba y generalmente se expresa en l/s o m³/s, aunque los fabricantes también lo expresan en m³/h en la mayoría de casos.

2.3.2. Altura de bombeo

En los sistemas de bombeo generalmente la altura es la distancia vertical entre la superficie libre del agua y una cota de referencia. Sin embargo en los sistemas de bombeo se utilizan varios términos referentes a la altura como la altura geométrica, la altura de velocidad, la altura por las pérdidas de rozamiento, la altura por pérdidas menores y la altura total.

La altura geométrica total se refiere a la diferencia entre las cotas de los niveles del líquido en la descarga y en la aspiración y la altura de velocidad es la energía cinética contenida en el líquido bombeado en cualquier punto del sistema.

Por otro lado, la altura por pérdidas de rozamiento y la altura por pérdidas menores se pueden definir como la altura o carga del agua que debe suministrarse al sistema para vencer las pérdidas que se producen por la fricción del líquido a través de las tuberías o por accesorio y válvulas ubicadas en la tubería. En el numeral 3.2.11 se explica más detalladamente como determinar estas alturas.

Por último, la altura total es la suma de las alturas explicadas anteriormente y aquella contra la trabaja la bomba durante su funcionamiento. Se puede determinar entonces la altura total con la siguiente ecuación:

$$H_t = H_{geom} + h_f + \sum h_m + \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

H_t : Altura total [m]

h_f : Perdidas por fricción [m]

h_m : Perdidas menores [m]

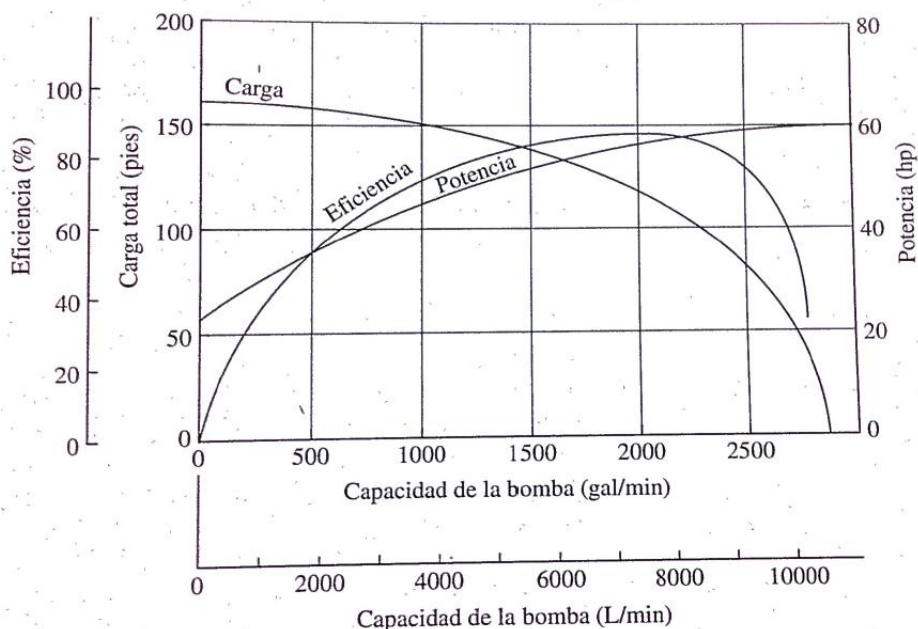
V : Velocidad en el conducto de impulsión [m/s]

g : Aceleración de la gravedad [m/s^2]

2.3.3. Curva característica de la bomba

El primer dato a verificar en una bomba para ver si cumple con los requerimientos del diseño es la capacidad que tiene la bomba de impulsar cierto caudal a una altura dada. Para ello, las bombas cuentan con curvas características que muestran el comportamiento de la bomba. En estas curvas también se incluyen las gráficas de eficiencia y potencia. La operación normal de la bomba debe estar cercana al punto de máxima eficiencia, por lo general está entre 60% y 80%. En la Figura 8 se muestra una curva característica típica de una bomba centrífuga.

Figura 8. Curva característica de la bomba



Fuente: Adaptado de Mott, 2006, figura 13.20

2.3.4. Rendimiento y potencia absorbida

Se debe determinar la potencia requerida de la bomba la cual debe ser la suficiente para obtener la capacidad del sistema bajo la condición del caudal máximo de operación. Esta potencia está dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{Q\gamma H}{\eta}$$

Donde:

P : Potencia requerida de la bomba [W]

Q : Caudal de operación [m^3/s]

γ : Peso específico del agua [N/m^3]

H : Altura total de bombeo [m]

η : Eficiencia del bombeo

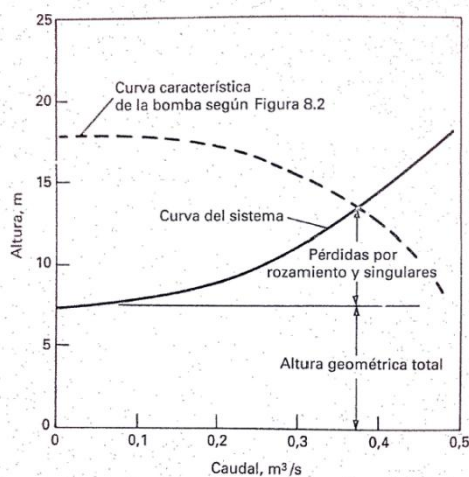
2.3.5. Línea de impulsión

La línea de impulsión de un sistema de bombeo se refiere a la tubería por la cual se conduce el líquido bombeado desde la bomba hasta el punto de descarga. Este elemento es importante en los sistemas de bombeo ya que determina las pérdidas por fricción y pérdidas menores. En el numeral 3.2.11 se explica más detalladamente las características de este elemento.

2.3.6. Curva del sistema

La curva del sistema es importante para verificar el punto de funcionamiento de una bomba dentro de un sistema de tuberías dado. Como su nombre lo indica, la curva del sistema es una representación gráfica de la altura del sistema vs caudal del sistema y se obtiene con los puntos correspondientes a la altura total para una serie de caudales determinados que varían desde cero hasta el valor máximo esperado. Luego sobre esta curva se grafica también la curva de la bomba y así se puede obtener el punto de funcionamiento de la bomba como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Curva del sistema



Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, figura 8.3

2.4. Cavitación en bombas centrífugas

La cavitación se produce cuando la presión de absoluta a la entrada es menor a la presión de vapor del líquido bombeado lo que conlleva a que se formen burbujas de vapor en la succión de la bomba y luego estas burbujas colapsan en la zona de mayor presión y el líquido circundante llena rápidamente este vacío causando un golpeteo dentro de la bomba perjudicando el buen funcionamiento de ésta.

Para evitar la cavitación en las bombas, se debe verificar que la carga de succión positiva neta disponible ($NPSH_A$) sea mayor al 10% más de la carga de succión positiva neta requerida ($NPSH_R$), es decir, $NPSH_A > 1.10 NPSH_R$. Generalmente, los fabricantes de las bombas determinan el valor del $NPSH_R$. El valor del $NPSH_A$ se calcula con la siguiente ecuación:

$$NPSH_A = \frac{P_{atm}}{\gamma} + H_{es} - h_f - h_m - \frac{v^2}{2g} - \frac{P_{vap}}{\gamma}$$

Donde:

$NPSH_A$: Carga de succión positiva neta disponible [m]

P_{atm} : Presión atmosférica [N/m^2]

γ : Peso específico del agua [N/m^3]

H_{es} : Altura estática de succión [m]

h_f : Pérdida por fricción [m]

h_m : Pérdidas menores sin incluir pérdidas por salida [m]

v : Velocidad media del flujo [m/s]

g : Aceleración de la gravedad [m/s^2]

P_{vap} : Presión de vapor absoluta del agua [N/m^2]

3. Estaciones de Bombeo de Aguas Negras

Las estaciones de bombeo son estructuras diseñadas para la impulsión de aguas residuales domesticas crudas, aguas pluviales, aguas residuales industriales, aguas residuales de redes de alcantarillado sanitario, lodos producidos en las plantas de tratamiento, efluentes tratados o redes de agua en las plantas de tratamiento. Son necesarias, además de las instalaciones típicas en las plantas de tratamiento, cuando la cota de la zona a servir es demasiado baja para que sus aguas residuales puedan ser evacuadas por gravedad a los colectores existentes o cuando se requiere dar servicio a zonas situadas en el exterior de la cuenca vertiente, pero perteneciente al término a sanear o cuando la omisión de bombeo supone un costo de construcción excesivo debido a la necesidad de efectuar grandes excavaciones para la construcción de la alcantarilla que dé servicio a la zona (Metcalf & Eddy, INC, 1995).

3.1. Datos iniciales del proyecto

Para poder diseñar una estación de bombeo se requiere conocer los datos iniciales del proyecto los cuales se explican a continuación:

- Caudales del proyecto: para poder determinar la bomba a utilizar y diseñar la estación de bombeo se debe tener en cuenta los caudales del proyecto. Metcalf & Eddy, INC especifica que “los caudales a tener en cuenta en la selección de las bombas incluyen el caudal punta del proyecto, los caudales medios inicial y del proyecto y el mínimo inicial”. Estos datos se utilizan dentro del diseño de la estacion de tal manera que las bombas sean capaces de impulsar el caudal punta del proyecto. Los caudales medios

inicial y del proyecto son indispensables para seleccionar el equipo de bombeo de la manera más eficiente posible, y el caudal inicial mínimo tiene gran importancia en el dimensionamiento de la línea de impulsión.

- Los caudales mínimos iniciales se calculan a partir del caudal medio inicial mediante un factor multiplicador como se indica en el Cuadro 3. Los caudales punta del proyecto y medios inicial y del proyecto se determinan de acuerdo con los caudales de diseño del alcantarillado sanitario, pluvial o combinado, según sea el caso.

Cuadro 3. Factores utilizados para la estimación del caudal mínimo

Caudal medio [m³/s]	Factor de caudal mínimo
0.05	0.25
0.50	0.35
2.50	0.45
5.00	0.50

- Ubicación de la estación de bombeo: la ubicación de la estación de bombeo determina varios aspectos importantes para el diseño de ésta. Inicialmente, se debe definir las cotas de la succión y la descarga de la tubería de impulsión (Altura geométrica) y la cota de la tubería de entrada a la estación de bombeo.
- Trazado de la tubería de impulsión: El aspecto más importante que se debe identificar inicialmente es el trazado de la línea de impulsión y el perfil que seguirá en su recorrido. Con lo anterior se puede definir la longitud de la línea de impulsión y los accesorios requeridos en ésta.

-
- *Punto de vertimiento del líquido bombeado*: Se debe identificar el punto de descarga de las aguas bombeadas ya sea un tanque, un pozo de inspección o una planta de tratamiento. Es importante identificar la cota de descarga para así poder definir la altura dinámica a la cual la bomba debe trabajar.

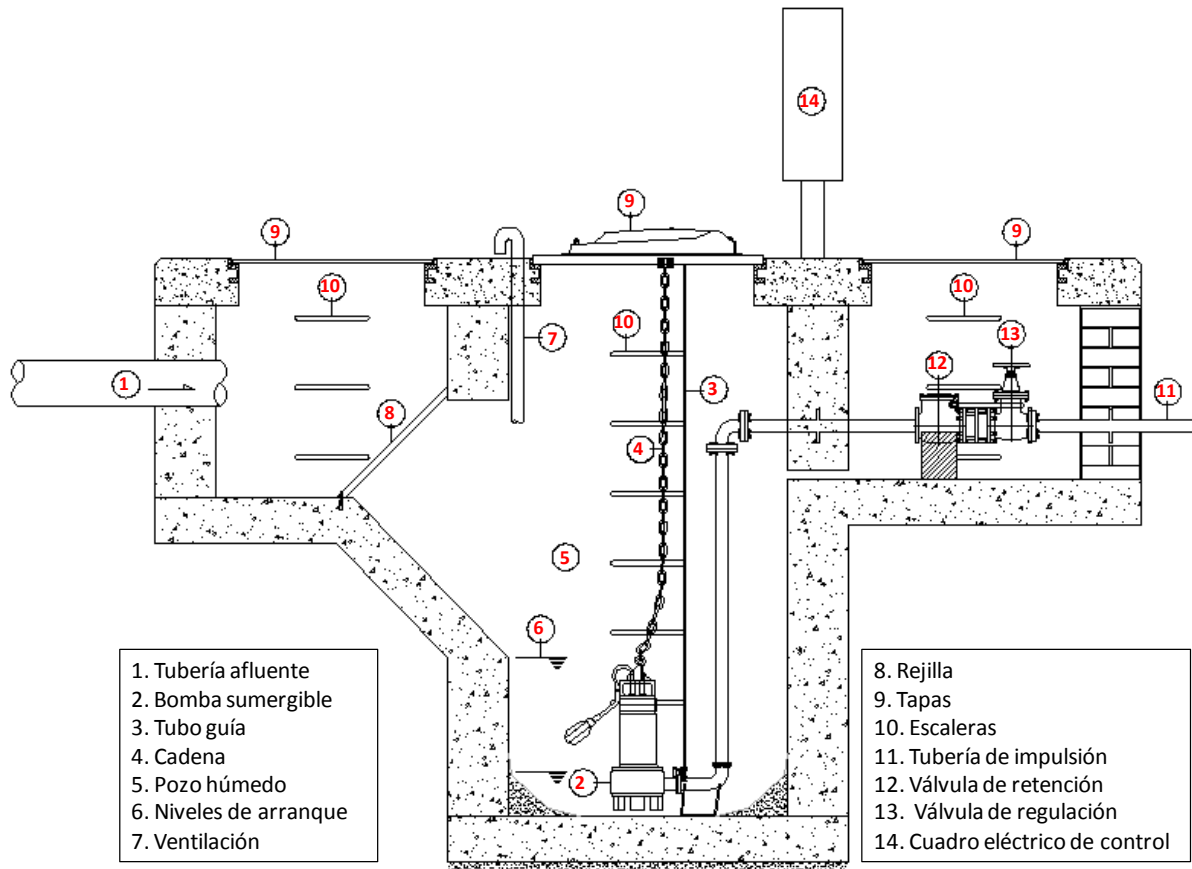
3.2. Composición de las estaciones de bombeo

Las características de una estación de bombeo dependen del tamaño de ésta. Para una estación de bombeo grande se requiere de una infraestructura mayor que un estación pequeña y por lo tanto debe contar, además de la infraestructura para su funcionamiento hidráulico, con una caseta de bombeo, con un cerramiento, un cuarto de máquinas, etcétera.

Es importante aclarar que las estaciones de bombeo pueden ser diseñadas para funcionar con bombas horizontales o verticales y por lo cual se requiere una cámara adicional en donde se instalan las bombas, la cual es llamada cámara seca o pozo seco.

Sin embargo, se puede generalizar que las estaciones de bombeo (para bombas sumergibles) presentan una configuración como la mostrada en la Figura 10 y se componen de los elementos que se describen a continuación lo cual garantizan un adecuado funcionamiento.

Figura 10. Esquema estación de bombeo de agua residual (EBAR)



Fuente: Elaboración propia del autor

3.2.1. Tubería afluyente

Es importante tener presente las características de la tubería afluyente a la estación de bombeo ya que muchos factores en el diseño de la estación dependen de la tubería entrante por lo cual se afirma que “los problemas de funcionamiento de las bombas se deben con frecuencia a un diseño erróneo de la tubería de entrada”. (Grundfos).

Se deben identificar claramente la ubicación, diámetro y velocidad en la tubería de entrada ya que se puede presentar acumulación de aire y formación de remolinos cuando entra al pozo húmedo con una velocidad grande o una cota alta en comparación al fondo del pozo. La

acumulación de aire y los remolinos pueden perjudicar el buen funcionamiento de las bombas al disminuir su rendimiento, puede aumentar las vibraciones y provocar cavitación en la bomba.

Se requiere que la altura de caída de la entrada no sea mayor a 1 m, que la velocidad de entrada no supere los 1.2 m/s y que la ubicación de la entrada no esté muy cercana al punto de aspiración de la bomba.

3.2.2. Bomba sumergible

Como se explicó anteriormente, en las estaciones de bombeo se pueden encontrar diferentes tipos de bombas. Generalmente en estaciones de bombeo pequeñas y prefabricadas se utilizan bombas sumergibles verticales.

Hay que tener presente en el diseño de las estaciones de bombeo que siempre debe incluirse una bomba en reserva, generalmente se escogen bombas iguales para su operación. Por lo tanto, para estaciones de bombeo pequeñas en donde solo se necesite una bomba, siempre se deben incluir dos bombas de iguales características. Por otro lado, en estaciones en donde se requieran más de una bomba, todas ellas deben ser iguales y se debe tener una en reserva.

Es recomendable operar las bombas de manera secuencial y cambiar el modelo de operación de las bombas en cada ciclo de tal manera que se evite que la primera bomba sea la que más trabaje y por ende la que más reparaciones y mantenimiento va a necesitar. En el Cuadro 4 se describe un ejemplo de secuencia de encendido de las bombas para sistemas de 2 a 4 bombas.

Cuadro 4. Ejemplo de secuencia de encendido de bombas

Numero de bombas	Primer secuencia	Segunda secuencia	Tercera secuencia	Cuarta secuencia	Quinta secuencia
2	1-2	2-1	1-2	2-1	1-2
3	1-2-3	3-1-2	2-3-1	1-2-3	3-1-2
4	1-2-3-4	4-1-2-3	3-4-1-2	2-3-4-1	1-2-3-4

Fuente: Adaptado de Federal Highway Administration, 2001

En el numeral 2.2 del presente documento se presentan las principales características de estas bombas junto con las ventajas y desventajas que presentan para estaciones de bombeo de agua residual o aguas lluvias.

3.2.3. Tubo guía

El tubo guía es un elemento indispensable para la instalación y mantenimiento de la bomba ya que la bomba se desliza por medio de ellas al momento de la instalación o extracción de la bomba lo cual no afecta la tubería de descarga.

3.2.4. Cadena

Las estaciones de bombeo deben disponer de elementos que ayuden al fácil mantenimiento, extracción o cambio de equipos, es por ello que se requiere que las bombas instaladas cuenten con una cadena que sirve para movilizar estos elementos con ayuda de una grúa cuando su peso así lo requiera.

3.2.5. Pozo húmedo

El pozo húmedo es necesario para la recepción de las aguas negras antes de comenzar el bombeo y para el bombeo mismo, por lo tanto es importante diseñar una adecuada cámara de tan forma que no perjudique el sistema de bombeo o la bomba misma.

En el diseño del pozo húmedo se requiere determinar el volumen de almacenamiento o volumen efectivo el cual depende del tipo de bomba y del ciclo de bombeo. Es indispensable determinar un correcto tamaño de la cámara húmeda ya que un volumen demasiado grande puede producir acumulación de lodos en el pozo, mientras que un valor pequeño puede ocasionar arranques y paradas más frecuentes en las bombas, es decir, ciclos de bombeo muy cortos lo cual puede causar daños en las bombas y mayores costos energéticos.

El volumen efectivo (volumen comprendido entre el punto de arranque y parada de una sola bomba) del pozo húmedo está dado por la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, INC, 1995):

Ec. 1
$$V = \frac{\theta q}{4}$$

Donde:

V : Volumen necesario [m^3]

θ : Tiempo mínimo de un ciclo de bombeo [min]

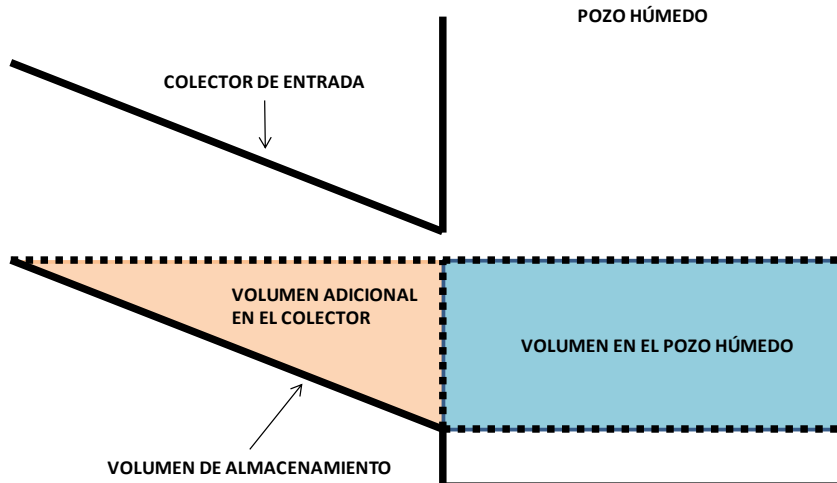
q : capacidad de la bomba [m^3/min]

La anterior ecuación también aplica para estaciones de bombeo con más de una bomba o con variadores de velocidad en donde θ es el tiempo de arranques sucesivos o cambios de velocidad de una bomba que funciona entre límites de un intervalo de control y q es el incremento de la capacidad cuando una bomba se encuentra en funcionamiento y arranca una segunda o cuando se aumenta la velocidad del motor. Por lo tanto el volumen necesario para el pozo húmedo será la suma de los volúmenes necesarios para cada bomba.

Es importante que el área del fondo sea la mínima posible para que el volumen del agua residual por debajo del nivel de parada sea mínimo ya que esto puede ayudar a la eliminación de los posibles depósitos de lodos. (Grundfos)

Uno de los factores más determinantes en el diseño del pozo húmedo es obtener un volumen de almacenamiento a un costo favorable. Por tal razón cuando las estaciones de bombeo son de caudales mayores y el colector de llegada es grande, se puede utilizar la capacidad de almacenamiento del colector mismo para así disminuir el área del pozo húmedo y aumentar el volumen de almacenamiento por ende disminuir los tiempos de ciclo y los costos de energía.

Figura 11. Esquema del volumen de almacenamiento adicional en colectores de gran diámetro.

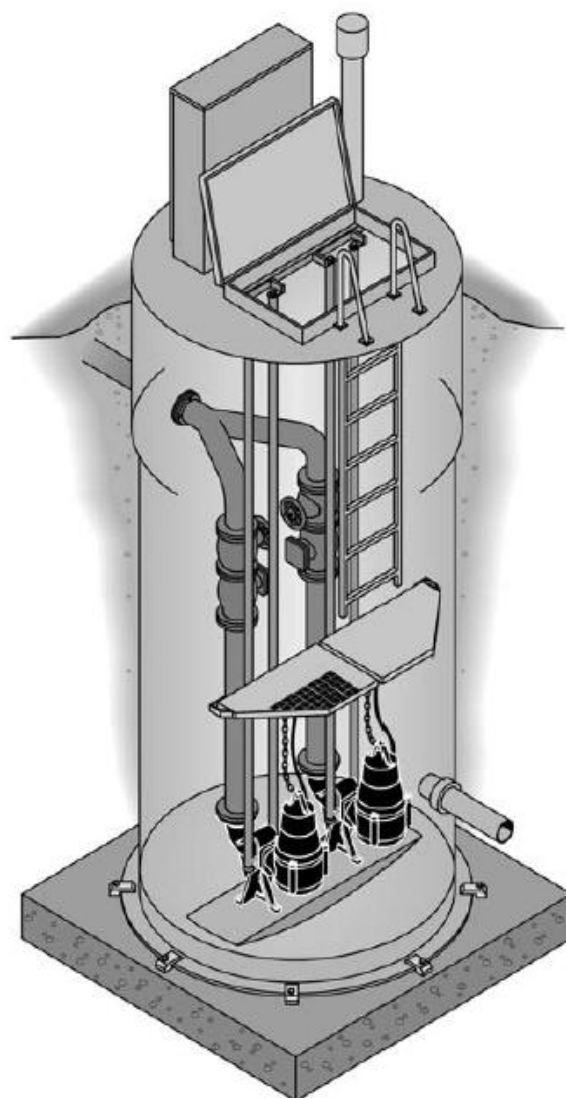


Fuente: Adaptado de Federal Highway Administration, 2001, Figura 6-2

Las secciones más comunes en los pozos húmedos son la rectangular y la cuadrada, sin embargo, las secciones circulares también se pueden utilizar especialmente cuando son estaciones profundas o de pequeño caudal ya que minimiza el área de la superficie del líquido. Generalmente las estaciones prefabricadas pequeñas se encuentran de sección circular ya que no se requiere de una estructura externa como se muestra en la Figura 12.

Por otro lado, existen algunas recomendaciones constructivas y operativas que deben tener los pozos húmedos. Estos pozos húmedos deben ser construidos en concreto reforzado impermeable para evitar infiltraciones, las juntas de las tuberías y los pasamuros deben ser herméticos de tal manera que los gases y vapores no se salgan, el fondo del pozo debe tener una inclinación hacia la zona de aspiración de las bombas, todas las esquinas del fondo deben tener un ángulo de terminación de 45° sin embargo en estaciones pequeñas este ángulo puede llegar a ser de 60° .

Figura 12. Esquema estación de bombeo prefabricada

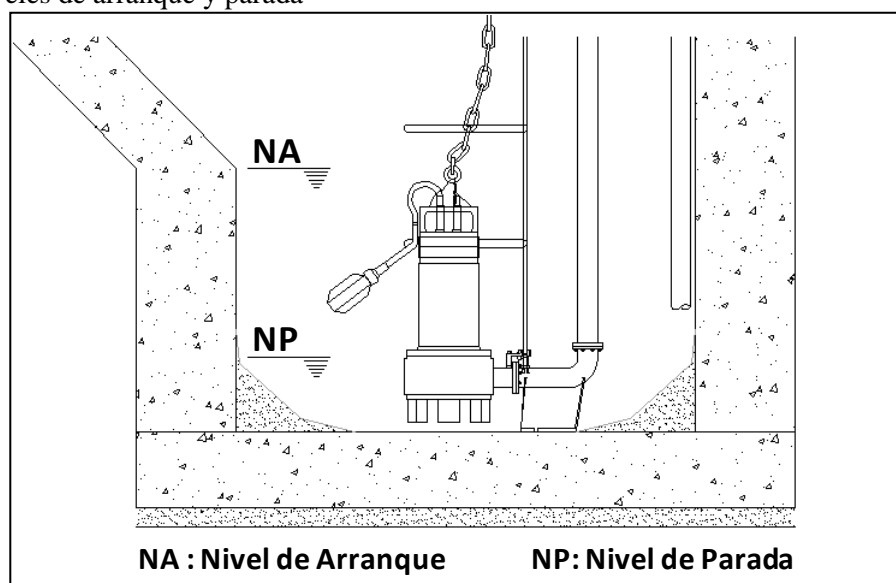


Fuente: Adaptado de Grundfos, Fig. 87

3.2.6. Niveles de arranque y parada

Los niveles de arranque y de parada se presentan en el pozo húmedo para determinar el comienzo y fin del ciclo de bombeo. Estos niveles generalmente se delimitan con sensores o flotadores conectados al encendido y apagado de las bombas. En la Figura 13 se muestra un esquema de los niveles de arranque y de parada de las bombas.

Figura 13. Niveles de arranque y parada



Fuente: Elaboración propia del autor

Cada bomba dentro de la estación de bombeo debe tener los niveles de arranque y parada determinado. Algunas estaciones presentan los niveles de parada iguales para todas las bombas instaladas lo cual obliga a que los niveles de arranque de cada bomba sean diferentes. Sin embargo la diferencia entre el nivel de arranque y de parada de cada bomba se define por el tiempo del ciclo determinado y por el número de prendidas permitido de una bombas durante una hora.

Primero se debe determinar el nivel de parada de las bombas. Existen varias recomendaciones en cuanto al nivel de parada del ciclo, una de ellas es que el nivel de parada debe ser lo más bajo posible para que la velocidad del caudal aumente hacia el final del ciclo de trabajo, sin embargo no puede ser menor que el nivel de inmersión requerido por la bomba sumergible. Es importante que se verifique el nivel de parada cuando se está poniendo en marcha

la estación de bombeo ya que el nivel de parada está fijado por el nivel cuando el aire es aspirado a la aspiración de la bomba.

Por otro lado, el nivel de arranque está determinado por la elevación que determine el volumen mínimo del ciclo, teniendo como referencia el nivel de parada. Como se describió anteriormente, el volumen comprendido entre el punto de arranque y parada de una sola bomba está determinado por la Ec. 1.

3.2.7. Ventilación

Se debe disponer de una buena ventilación hacia el exterior por lo tanto el pozo húmedo debe disponer sistemas de ventilación mecánica distribuidos por toda la cámara y la salida del aire se debe realizar por la parte exterior del pozo. La salida del aire de la cámara húmeda debe situarse cercana a la tubería afluente. La ventilación debe realizarse por intervalos para estaciones de bombeo pequeñas o de manera continua para estaciones de bombeo de mayor caudal, en cualquier caso es indispensable identificar la cantidad de gases expulsados del pozo para que no afecte el olor en la zona en donde se encuentra la estación de bombeo.

3.2.8. Rejilla

La rejilla es un conjunto de barras paralelas destinadas a retener objetos de mayor tamaño que se presenten en las aguas residuales a medida que pasan al través. La separación de estas barras varía entre 25 y 150 mm según las especificaciones del lugar de ubicación de la estación o según las características de la bomba utilizada.

El mantenimiento de estas rejillas puede ser de tipo automático o tipo manual, sin embargo para las rejillas automáticas deben preverse un mecanismo de retención de sólidos de emergencia cuando la rejilla este fuera de servicio. Los sólidos que se extraigan deben ser depositados en un sitio adecuado o triturados para recircularlos por la estación de bombeo.

3.2.9. Tapas de acceso

Las tapas de acceso deben ser lo suficientemente grandes para permitir la extracción de equipos y la entrada del personal de mantenimiento a las diferentes cámaras. Si la estación de bombeo es pequeña y no cuenta con caseta de bombeo, se requiere que las tapas cuenten con dispositivos de seguridad como rejas y candados para que no se permita el acceso a personas no autorizadas.

3.2.10. Escaleras

El acceso a las diferentes cámaras en una estación de bombeo se debe realizar directamente desde el exterior por medio de una escalera.

3.2.11. Tubería de impulsión

En estaciones de bombeo se interpreta que la tubería de impulsión es una alcantarilla que transporta a presión el líquido impulsado por una estación de bombeo la cual comienza en el punto de descarga la bomba y termina con la descarga de la tubería ya sea a un punto de vertimiento o a un pozo de inspección de alcantarillado. Estas tuberías de impulsión generalmente cuentan con una serie de accesorios que complementan el funcionamiento

hidráulico del sistema como codos, válvulas, tees, reducciones, ampliaciones, etcétera. Para todas las estaciones de bombeo, la tubería de impulsión debe ser lo más corta y simple posible.

En las tuberías de impulsión es necesario identificar, inicialmente, el diámetro a instalar. Como regla general, a la salida de la bomba debe instalarse un cono de ampliación concéntrico lo cual conlleva a que la tubería de impulsión sea de mayor diámetro que la descarga de la bomba y se debe verificar el tamaño de la tubería de impulsión para que sea consistente con los sólidos que se van a bombear a fin de no obstruir la tubería. Adicionalmente, las tuberías de impulsión al interior de la estación de bombeo deben diseñarse para velocidades de entrada de 1,8 a 2,4 m/s y para tubería de impulsión fuera de la estación de bombeo se puede bajar la velocidad hasta 1,1 m/s la cual garantiza que se puedan arrastrar sólidos que se hubieran podido sedimentarse en la tubería (Metcalf & Eddy, INC, 1995).

Se puede obtener una primera aproximación del diámetro de la tubería de impulsión con la siguiente ecuación (Federal Highway Administration, 2001):

$$D = 1.128 \sqrt{\frac{Q}{v}}$$

Donde:

D : Diámetro de la tubería [m]

Q : Caudal de descarga [m³/s]

v : Velocidad del fluido [m/s]

Otro factor importante a determinar en la tubería de impulsión es el material en que se va a instalar. Existen diferentes tipos de materiales como el PVC, concreto, acero, hierro dúctil, etcétera. Sin embargo, es recomendable instalar siempre dentro de la estación de bombeo tuberías en acero o hierro dúctil mientras que por fuera de la estación se puede instalar cualquier tipo de material. El Federal Highway Administration recomienda que para tuberías menores a 17 m se instalen tubería de acero o hierro dúctil en todo el trayecto mientras que para longitudes mayores se puede realizar un cambio de material fuera de la estación de bombeo.

A toda tubería de impulsión se le deben calcular las pérdidas de energía que se presenta debido a la fricción (pérdidas por fricción) y los accesorios (pérdidas menores).

Las pérdidas debidas a la fricción en una tubería se pueden determinar mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- h_f : Pérdidas por fricción [m]
- f : Factor de fricción
- L : Longitud de la tubería [m]
- D : Diámetro de la tubería [m]
- v : Velocidad del fluido [m/s]
- g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

El coeficiente de fricción de la anterior ecuación se obtiene por medio de dos ecuaciones, dependiendo de si el flujo es laminar o si el flujo es turbulento. A continuación se muestran las ecuaciones para los dos casos mencionados.

Flujo Laminar

$$f = \frac{64}{Re}$$

Donde:

f : factor de fricción

Re : Numero de Reynolds

Flujo turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\text{Log}_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Donde:

f : factor de fricción

ε : Rugosidad absoluta de la tubería [mm]

D : Diámetro de la tubería [m]

Re : Numero de Reynolds

El número de Reynolds se puede determinar mediante:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

Donde:

Re : Numero de Reynolds

ρ : Densidad del fluido [Kg/m³]

μ : Viscosidad del fluido [Pa*s]

Las características del agua según varias temperaturas se muestran en el Anexo 1. Así mismo, en el anexo 2 se presentan los valores de rugosidades absolutas para diferentes tipos de materiales de tuberías.

Por otro lado, las pérdidas menores son producidas por los accesorios que se instalan en la red como válvulas, codos, etcétera. Para determinar estas pérdidas se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_m = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- h_m : Pérdidas menores [m]
- K : Coeficiente de perdidas menores
- v : Velocidad del fluido [m/s]
- g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

En el anexo 3 se presentan algunos valores de los coeficientes de perdidas menores para los accesorios más comunes en las estaciones de bombeo.

3.2.12. Válvula de retención

Según Metcalf & Eddy, INC, las valuvlas de retencion ubicadas en una estacion de bomebo deben ser de alguno de los tipos que se describen en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Tipo de válvulas de retención

<i>Tipo de válvula</i>	<i>Descripción</i>	<i>Instalación</i>
Válvula de clapeta	Disponibles en diámetros de hasta 0.75m. Utilizadas en todo tipo de sistemas excepto en los que requieran una válvula diferente para control de golpe de ariete o tamaño superior a 0.75m. Debe incorporar un contrapeso y manivela exterior para facilitar la maniobra de cierre.	Debe instalarse en posición horizontal. Si se coloca vertical puede producirse la sedimentación de sólidos en la parte superior de la clapeta cuando la bomba está fuera de servicio. Los sólidos pueden penetrar la tapa de la válvula durante el arranque de la bomba impidiendo su apertura.
Válvula cónica	Utilizada en sistemas que requieren válvulas de tamaño superior a 0.75m o cuando se necesite un control temporizado de apertura y cierre para el golpe de ariete. Su funcionamiento es mediante pistón hidráulico.	Las válvulas y el sistema de control hidráulico son muy caros, por lo que solamente se emplean en caso de absoluta necesidad. En la posición abierta, la sección de paso es cilíndrica; en consecuencia y a fin de reducir el coste, la válvula cónica suele ser del mismo diámetro que la boquilla de la bomba, o incluso más pequeña si existe espacio disponible para instalar las piezas de reducción y ampliación.
Válvula de disco basculante	Disponibles en diámetros de hasta 1.8m. Solamente se emplean cuando no existan válvulas de clapeta del tamaño requerido. Tiene un eje que atraviesa la sección de paso del agua.	Los trapos y otros materiales pueden engancharse en el eje e impedir su apertura. Deben instalarse únicamente cuando se precise una válvula de gran tamaño y cuando existan rejillas automáticas con separación inferior a 25mm o dilaceradores.
Válvula de mariposa	Al igual que las válvulas de disco basculante, funciona mediante un pistón hidráulico y tiene un eje que atraviesa la sección de paso del agua. Se emplea únicamente para el control del golpe de ariete en instalaciones de gran tamaño.	Solamente deben instalarse cuando haya un desbaste o dilaceraciones previas.

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, Tabla 9.4

3.2.13. Válvula de regulación

Esta válvula por lo general es una válvula de compuerta.

3.2.14. Cuadro eléctrico de control

El cuadro eléctrico de control es una caja en donde se centraliza la instrumentación de control. En las estaciones de bombeo de gran tamaño este cuadro de control debe incluir los siguientes elementos (Metcalf & Eddy, INC, 1995):

- Indicador del nivel del agua en el pozo húmedo.
- Indicador del funcionamiento del medidor de caudal (si se requiere)
- Interruptores para la selección de la secuencia del bombeo que permita fijar el orden de funcionamiento de las bombas activas y la de reserva.
- Controles de funcionamiento para cada bomba incluyendo: i) interruptor de tres posiciones (manual, paro, automático), ii) señales luminosas indicadoras de funcionamiento o parada, iii) controles de la velocidad variable (cuando las bombas sean de este tipo), y iv) amperímetros para cada bomba o medidores de potencia consumida.
- Panel indicador de alarmas en que se señalen las alarmas individuales y los botones de paro de las señales acústicas.

Este cuadro eléctrico de control esta interconectado con la instrumentación que presenta la estación de bombeo para el funcionamiento y control de la misma. Los elementos que componen esta instrumentación son:

-
- Controles automáticos: Este nivel depende básicamente del nivel del agua en el pozo húmedo. El sistema de control automático se compone de flotadores, electrodos, tubos de burbujas, medidores sónicos y tubos de capacitancia.
 - Controles manuales: Durante emergencias las bombas deben ser maniobradas de forma manual en donde se debe poder controlar del funcionamiento a velocidad constante como a velocidad variable.
 - Alarmas: Las alarmas son indispensables en el sistema de control de la estación de bombeo. Cuando las estaciones no cuentan con personal permanente se debe transmitir por medio telemétrico las alarmas. Las alarmas deben incluir: i) Nivel máximo del agua en el pozo húmedo, ii) Nivel mínimo del agua en el pozo húmedo, y iii) Fallo de las bombas.
 - Dispositivo de paro de emergencia: se debe ubicar debajo del nivel mínimo del agua y debe para el funcionamiento de las bombas cuando se presentan problemas con los controles automáticos.

Como recomendación general, todas las instalaciones eléctricas de la cámara de aspiración deben ser a prueba de explosiones.

3.3. Normatividad colombiana

En Colombia el documento que rige para el diseño de una estación de bombeo de agua residual y/o pluvial es el Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico (RAS – 2000) en su título D “Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales domésticas y pluviales”, numeral D.7. “Estaciones elevadoras y de bombeo”.

Adicionalmente, las empresas prestadoras del servicio de acueducto y alcantarillado en las grandes ciudades cuentan con normas que regulan los diseños de las EBAR, tal es el caso de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogota (EAAB), la empresa EMCALI EICE ESP de la ciudad de Santiago de Cali y las Empresas Públicas de Medellín E. S. P. (EPM).

A continuación se presenta un breve resumen de los requerimientos mínimos que se deben tener para el diseño de las estaciones de bombeo de agua residual y pluvial según el RAS-2000.

3.3.1. Definición

Las estaciones de bombeo son estructuras especiales que se encuentran en los sistemas de alcantarillado residual y pluvial. Como es conocido. Los sistemas de alcantarillado conducen sus aguas servidas por medio de tuberías las cuales trabajan a flujo libre, sin embargo y debido a las irregularidades en el terreno o a terrenos muy planos, algunas veces no es posible conducir las aguas residuales o pluviales por gravedad y se requiere de una estructura para bombear estas aguas.

3.3.2. Estudios previos

Antes de comenzar con la etapa de diseño de la EBAR, se deben identificar claramente aspectos importantes para determinar las condiciones básicas de operación, por lo cual se deben desarrollar algunos estudios previos:

-
1. Conceptualización del proyecto.
 2. Sistema de bombeo.
 3. Caudal de bombeo.
 4. Aspectos generales de la zona.
 5. Estudios topográficos.
 6. Condiciones geológicas.
 7. Disponibilidad de energía.
 8. Factibilidad de ampliación.
 9. Calidad del agua que va a ser bombeada.
 10. Vulnerabilidad y riesgo sísmico.

3.3.3. Condiciones Generales

Se deben cumplir ciertos requisitos mínimos y condiciones básicas como la localización de la estación de bombeo para la cual se deben tener en cuenta factores como la condición del terreno, el drenaje del terreno, menor altura media entre el punto de succión y punto de bombeo, trayecto más corto de la tubería de bombeo, cotas de acceso superiores a las cotas de inundación, o en caso contrario, con posibilidad de protección adecuada, estabilidad geotécnica del terreno, accesibilidad, dimensiones del terreno suficientes para satisfacer las necesidades actuales y futuras, factibilidad de adquisición de predios, facilidad de suministro adecuado de energía y disponibilidad de otros servicios, facilidad de vertimientos de aguas residuales o pluviales en condiciones eventuales e interrupción de bombeo, reacondicionamiento mínimo de interferencias, menos movimiento de tierra, integración de la obra con el pasaje circundante y manejo de olores.

Adicionalmente, características como protección contra incendios e inundaciones, facilidad de mantenimiento, operación económica, restricción de acceso y análisis de costo mínimo, deben ser tenidas en cuenta al realizar el diseño de la EBAR.

3.3.4. Parámetros de diseño

1. Periodo de diseño: El RAS-2000 expone que el periodo de diseño depende del nivel de complejidad del sistema como se establece en el Cuadro 6. El nivel de complejidad es una clasificación (bajo, medio, medio alto y alto) que se le da al proyecto a diseñar y por lo tanto “la clasificación del proyecto en uno de estos niveles depende del número de habitantes en la zona urbana del municipio, su capacidad económica y el grado de exigencia técnica que se requiera para adelantar el proyecto” (Ministerio de desarrollo económico, 2000)

Cuadro 6 Periodo de diseño, según nivel de complejidad del sistema

Nivel de complejidad del sistema	Periodo de diseño (años)
Bajo	15
Medio	20
Medio Alto	25
Alto	30

Fuente: Adaptado de Ministerio de desarrollo económico, 2000, Tabla D.7.1

2. Caudales de diseño: Deben tenerse en cuenta el caudal medio diario, los caudales mínimos y máximos diarios y el caudal pico horario para la etapa inicial de operación del proyecto, las diferentes etapas del proyecto y la etapa final del proyecto.

-
3. Pondajes y lagunas de amortiguación: Se debe considerar la conveniencia de pondajes y lagunas de amortiguación en caso de aguas lluvias, especialmente para niveles de complejidad alto y medio alto.

 4. Colector, interceptor o emisario afluente: Es importante conocer las características del colector afluente a la estación de bombeo como la forma, el material, las dimensiones de la sección, las cotas bateas y cotas mínimas de agua tanto de entrada a la estación de bombeo como de salida de la última estructura de conexión.

 5. Tipo de bombas y etapas del proyecto: El tipo de bomba se determina por la magnitud y las variaciones de los caudales junto con los desniveles. Deben tenerse en cuenta aspectos como las características del agua residual afluente, el tipo de energía disponible, los espacios requeridos y disponibles, la forma prevista de operación, la variación de los niveles máximo y mínimo en la succión y descarga, la variación de los caudales y la compatibilidad con equipos existentes.

Es importante aclarar que la estación de bombeo puede estar conformada por varias bombas por lo cual debe procurarse que las bombas sean del mismo tipo y capacidad. Para seleccionar el número de bombas se utiliza el criterio de las variaciones de caudales de acuerdo a las diferentes etapas del proyecto, sin embargo, siempre debe instalarse una bomba de igual capacidad o mayor que las bombas instaladas como reserva. En el caso de que se requiera una sola bomba, debe instalarse una bomba de reserva de igual capacidad y mismas características que la bomba de diseño.

-
6. Pozo húmedo: La permanencia del agua residual dentro del pozo húmedo genera malos olores, gases y acumulación de lodos en el fondo del pozo por lo cual no debe ser muy largo por tanto se recomienda un tiempo máximo de retención de 30 minutos. En estaciones de bombeo en donde la operación es intermitente se recomienda un máximo de 3 a 5 arranques por hora en bombas horizontales y verticales, y un máximo de 10 arranques por hora en bombas sumergibles. Por lo anterior, el tiempo de un ciclo de bombeo se recomienda entre 10 y 12 minutos con un tiempo de operación no mayor a 5 minutos.

Por otro lado, la profundidad del pozo húmedo se determina respecto a la cota batea del conducto afluyente, la diferencia de altura entre el nivel de aguas máximas (no debe ser superior a la cota batea del conducto afluyente) y aguas mínimas (no debe ser menor al nivel mínimo de sumergencia requerido para la operación de la bomba).

Como recomendaciones generales, el fondo del pozo debe tener una inclinación mínima de 45° hacia la boca de succión y un ancho mínimo de 1.5 metros. Adicionalmente se deben incorporar estructuras de control de entrada del flujo como compuertas o desvíos en caso de ser requerido una desviación del caudal afluyente. Para el caso de bombas centrifugas, se debe verificar que la carga mínima positiva de succión este alrededor de 3 veces el diámetro de succión, y las velocidades de las tuberías de succión e impulsión deben ser de 1m/s y 1.5m/s respectivamente.

-
7. Control de tamaños de sólidos: Antes del pozo húmedo y luego de la descarga del colector afluente se deben instalar rejas de limpieza con separación mínima de 50mm que remuevan los sólidos que puedan perjudicar las bombas instaladas. Se debe tener en consideración los mantenimientos de las rejillas los cuales pueden ser manuales o mecanizados.

 8. Potencia de las bombas y motores: debe determinarse la potencia requerida por la bomba de acuerdo al caudal máximo y la altura dinámica media total junto con la eficiencia en la que esté trabajando la bomba instalada, para ello se pueden utilizar las formulas de Darcy-Weisbach o Hazen-Willams y se deben analizar varios escenarios de operación de las bombas y establecer el comportamiento hidráulico mediante las curvas del sistema y las curvas características de las bombas. Es importante que se verifique el índice de cavitación para todos los caudales previstos.

 9. Golpe de ariete: Para el caudal máximo debe tenerse en cuenta el golpe de ariete calculando las sobreelevaciones de presiones, las subpresiones y las velocidades de onda. Es importante que se instalen accesorios que mitiguen el efecto del golpe de ariete.

 10. Válvulas y accesorios: se deben instalar las válvulas en sitios accesibles para su operación en donde se indique las posiciones de abierta y cerradas, es importante que se tenga en cuenta las presiones de servicio junto con las presiones máximas previstas.

-
11. Diseños estructurales y geotécnicos: Las consideraciones para los diseños complementarios para la estación de bombeo se encuentran en el título G del RAS-2000.

 12. Materiales: Los materiales de las bombas deben ser seleccionados según las características del agua que va a bombearse.

 13. Subestación eléctrica: El diseño de la estación de bombeo debe ir acompañado de una subestación eléctrica cuyo tamaño y dispositivo de control debe estar relacionada con su nivel de complejidad.

3.3.5. Instalaciones

El diseño de la estación de bombeo debe ser consistente al nivel de complejidad del sistema y debe tener en cuenta las necesidades específicas en cada caso. Algunas de las instalaciones que deben preverse en un diseño de una EBAR son la sala de bombas, los dispositivos de medición y control, la sala de control, los accesos, la iluminación, la señalización, la ventilación, la protección contra incendio, los equipos de movilización, las estructuras para el drenaje del suelo, las instalaciones hidrosanitarias y los aislamientos acústicos.

Adicional a lo anteriormente mencionado, el RAS-2000 da algunas pautas en material de puesta en marcha de la EBAR, aspectos de operación y aspectos de mantenimiento los cuales deben ser tenidos en cuenta al momento de realizar la construcción y operación de la estación de bombeo diseñada.

4. Hoja de Cálculo para Diseño de EBAR

En el presente proyecto se elaboró una hoja de cálculo en Microsoft Excel para el diseño óptimo de una estación de bombeo de agua residual o pluvial (EBAR) pequeña, seleccionando de una base de datos de bombas sumergibles la mejor bomba para el proyecto.

Una EBAR pequeña se define, para fines de este proyecto, como una estación de bombeo que solo requiere una bomba para satisfacer la necesidad de bombear el caudal punta del proyecto.

Debido a la amplia oferta que existe de este tipo de bombas, se limitó la base de datos a bombas que trabajaran hasta un caudal máximo de 20 l/s (72 m³/h) y adicionalmente se limitó el número de empresas fabricantes a 5. Sin embargo, esta base de datos puede ser complementada con más información si así requiere el usuario.

Para la programación de la hoja de cálculo se utilizó la herramienta de Visual Basic disponible en Microsoft Excel, así como los controles activeX. A continuación se explica el desarrollo de la hoja de cálculo para la estación de bombeo.

4.1. Datos supuestos para el diseño de la estación de bombeo

Se supusieron algunos parámetros para el diseño de la estación de bombeo dentro de la hoja de cálculo. A continuación se nombran estos parámetros:

4.1.1. Bombas

- Se seleccionan las bombas que cumplan con el caudal y la altura requerida ± 1 m.

4.1.2. Pozo húmedo

- El pozo húmedo es de sección circular de diámetro mínimo 1.2m y máximo de 1.8m.
- La altura útil máxima dentro del pozo húmedo es de 2m.
- El área del pozo húmedo debe ser la menor posible, es decir, el diámetro del pozo húmedo debe ser el menor posible.
- El nivel de alarmas de aguas máximas (NMax) está 0.20m por debajo de la cota de entrada de la tubería afluyente, y 0.05m por encima del nivel de arranque.
- El nivel de alarmas de aguas mínimas esta 0.05m por debajo del nivel de parada.
- La sumergencia mínima de la bomba es de 0.5m independiente de si se especifica una sumergencia menor en los datos del fabricante.

4.1.3. Tubería de impulsión

- Se propone una línea de impulsión con cambio de material a la salida de la estación de bombeo.
- Los materiales de las tuberías de impulsión se limitan a: PVC, Hierro dúctil (HD), Acero, Concreto (CCP), polietileno (PEAD) y Poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP). Ver Anexo 2

- El material de la tubería de impulsión dentro de la estación de bombeo solo puede ser de hierro dúctil (HD) o de Acero, mientras que en la tubería afuera de la estación puede ser de cualquier material de los definidos anteriormente.
- La velocidad mínima de la tubería dentro de la estación de bombeo es de 1.6m/s y la velocidad máxima es de 2.4 m/s.
- La velocidad mínima de la tubería fuera de la estación de bombeo es de 1.1m/s y la velocidad máxima es de 2.4 m/s.
- Los coeficientes de perdidas menores se definieron de acuerdo con los valores dados por el RAS-2000 como se muestra en el anexo 3

4.2. Datos de entrada en la hoja de cálculo de la EBAR

Al iniciar el programa del diseño de la estación de bombeo se pide al usuario que ingrese unos datos de entrada. En la Figura 14 se muestra la interfaz de la entrada de datos. Es importante que el usuario verifique las unidades en las que se piden los datos de entrada para no obtener un diseño erróneo.

Figura 14. Datos de entrada

DATOS DE ENTRADA		
Caudal de diseño		m3/hr
(CT) Cota terreno		msnm
(CAF) Cota Batea entrada afluente		msnm
Nivel de Entrega		msnm
Longitud		m
Temperatura		°C
Tiempo del ciclo		min

Se aclara que el caudal de diseño es el caudal punta del proyecto y con el cual se seleccionan las bombas que cumplen este criterio. Las cotas de terreno y la cota batea entrada

afluente se refiere a las cotas de la estación de bombeo; el nivel de entrega es la cota de descarga de la línea de impulsión; la longitud se refiere a la longitud de la tubería de impulsión desde el punto de salida de la estación de bombeo hasta el punto de descarga; la temperatura es la temperatura del líquido a bombear y el tiempo del ciclo es el tiempo que se desea para que se cumpla un ciclo de bombeo.

Adicionalmente se deben introducir las cantidades de accesorios que se presentan en la línea de impulsión. En la hoja de cálculo se identifica la línea de impulsión 1 como la tubería que está dentro de la estación de bombeo y la línea de impulsión 2 como la línea que esta por fuera de la estación de bombeo después del cambio de material. En la Figura 15 se presentan la imagen del cuadro en donde se requieren estos datos.

Figura 15. Cantidad de accesorios utilizados en la línea de impulsión

Accesorios	Impulsión 1	impulsión 2
	Cant	Cant
Válvula de globo	0	0
Válvula de mariposa	0	0
Válvula de Cheque	0	0
Válvula de compuerta	0	0
Codo 90 radio corto	0	0
Codo 90 radio medio	0	0
Codo 90 gran radio	0	0
Codo 45	0	0
Te, en sentido recto	0	0
Te, a través de la salida lateral	0	0
Uniones	0	0
ye de 45°, en sentido recto	0	0
ye de 45°, en sentido lateral	0	0
Entrada recta a tope	0	0
Entrada con boca acampanada	0	0
Entrada con tubo entrante	0	0
Salida tubería	0	0

4.3. Datos de salida en la hoja de cálculo de la EBAR

Como datos de salida se encuentran, en primera instancia, una hoja con la información de todas las bombas que cumplen el punto de operación, seleccionadas de la base de datos de bombas, en segundo lugar, una hoja con el diseño de la línea de impulsión y por último, una hoja con el dimensionamiento del pozo húmedo. A continuación se describen más detalladamente cada hoja de salida.

4.3.1. Bombas coincidentes con la información entrante

Dentro del alcance de la hoja de cálculo está el determinar la lista de las posibles bombas que pueden trabajar en el punto de funcionamiento calculado con los valores que fueron suministrados por el usuario. Por lo tanto en la primera hoja de resultados o datos de salida se presenta la base de datos de estas bombas que cumplen con los puntos de operación. Adicionalmente se presenta en forma resumida los valores de capacidad y altura determinados con los datos de entrada.

Dentro de la información del punto de bombeo, se encuentran

- los valores del caudal de trabajo en unidades de litros por segundo (l/s) y metros cúbicos por hora (m^3/hr)
- la altura geométrica calcula como la diferencia entre el nivel de parada de la bomba en el pozo húmedo y la cota de descarga de la tubería de impulsión y se muestra en unidades de metro (m)
- la altura total determinada por la suma de la altura geométrica más las pérdidas por fricción y las pérdidas menores de las líneas de impulsión

- los valores de las pérdidas por fricción y menores para las líneas de impulsión y que se pueden ver más detalladamente este cálculo en la hoja de salida de la línea de impulsión.

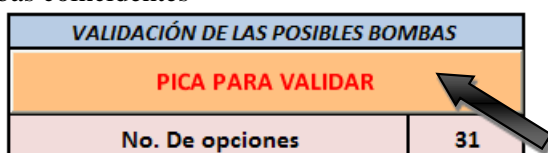
Con estos valores se determina la potencia útil del sistema la cual determina la potencia de la bomba. Lo anterior se puede ver en la Figura 16.

Figura 16. Datos de salida, hoja 1 - Información del punto de bombeo

INFORMACIÓN DEL PUNTO BOMBEO						
Caudal	5.56	l/s		Perdidas por fricción Impulsión 1	0.25	m
Caudal	20	m ³ /hr		Perdidas menores Impulsión 1	0.00	m
Altura Geométrica	4.85	m		Perdidas por fricción Impulsión 2	1.01	m
Altura Total	6.11	m		Perdidas menores Impulsión 2	0.00	m
				Peso específico	9.798	kN/m ³
				Potencia útil	0.33	kW

Luego de que se determinan los datos del punto de bombeo se muestra el número de bombas coincidentes que se encontraron en la base de datos. Para ver la lista de estas bombas y sus respectivas características es necesario picar sobre el botón activeX que se encuentra en la hoja, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Validación de bombas coincidentes



Al realizar este procedimiento, automáticamente van apareciendo una por una las bombas que se encuentran en la base de datos y pueden funcionar para el sistema dado. Luego de escribir las bombas coincidentes, el programa ordena la información de tal manera que las bombas

aparezcan en orden descendente con respecto a la eficiencia, es decir, la primera bomba que se muestra es la de mayor eficiencia de todas las anteriores. En la Figura 18 se muestra la lista de las bombas que funcionan para los valores dados.

Figura 18. Lista de las bombas que pueden operar en el punto de funcionamiento determinado

Graficar	Modelo	Empresa	ϕ Sólidos [mm]	Conexión	ϕ Descarga DN [mm]	Motor	Potencia [kW]	Velocidad [R.P.M]	Sumergencia [mm]	ϕ Impulsor [mm]	Eficiencia [%]
	FEKA GL 1000 M-A (NA)	DAB	46	Roscado	50	Monofásico	1.1	2900	400	110	80.9
	FEKA 2015.2 TNA	DAB	42	Bridado	50	Trifásico	1.1	2900	400	110	77.7
	FEKA 2015.2 MA (MNA)	DAB	42	Bridado	50	Monofásico	1.1	2900	400	110	72.7
	FEKA 2515.2T	DAB	62	Bridado	65	Trifásico	1.1	2900	400	110	72.7
	DRV/A50-135-1.4	EBARA	48	Bridado	50	Trifásico	1.4	2900	358	110	72.5
	DRV/A50-130-1.1M	EBARA	50	Bridado	50	Monofásico	1.1	2900	339	110	69.8
	AS0830 S13/4D	ABS	60	Brida DN	80	Trifásico	1.3	1450	305	160	65.6
	FEKA 2500.4T	DAB	62	Bridado	65	Trifásico	1.4	2900	400	110	62.4
	ARS 80-16V/2,5	BOMBAS IDEAL	60	Bridado	80	Trifásico	1.7	2850	420	110	60.3
	ARS 80-18V/1,7	BOMBAS IDEAL	50	Bridado	80	Trifásico	1	1450	420	110	59.8
	AS0530 S12/2D	ABS	40	Roscado	50	Trifásico	1.2	2900	331	110	55.6
	AS0630 S13/4D	ABS	60	Brida DN	65	Trifásico	1.3	1450	348	160	55.6
	AS0830 S10/4W	ABS	60	Brida DN	80	Monofásico	1	1450	305	160	55.6
	ARS 80-18V/1,5	BOMBAS IDEAL	50	Bridado	80	Trifásico	1.2	1450	420	110	55.3
	AS0530 S12/2W	ABS	40	Roscado	50	Monofásico	1.2	2900	331	110	50.6
	ARS 65-18V/1,7	BOMBAS IDEAL	50	Roscado	65	Trifásico	1.2	1450	383	110	50.2
	ARS 65-18V/1,5	BOMBAS IDEAL	50	Roscado	65	Trifásico	0.9	1450	383	110	45.9
	AS0630 S10/4W	ABS	60	Brida DN	65	Monofásico	1	1450	348	160	45.2
	ARS 80A-19V/1,5	BOMBAS IDEAL	75	Bridado	80	Trifásico	1.1	1450	530	110	44.3
	DRV/A65-108-1.9M	EBARA	65	Bridado	65	Monofásico	1.9	2900	367	110	61.1
	DRV/A65-108-2.3	EBARA	65	Bridado	65	Trifásico	2.3	2900	367	110	58.1
	DRV/A80-155-1.8M	EBARA	60	Bridado	80	Monofásico	1.8	2900	418	110	61.1

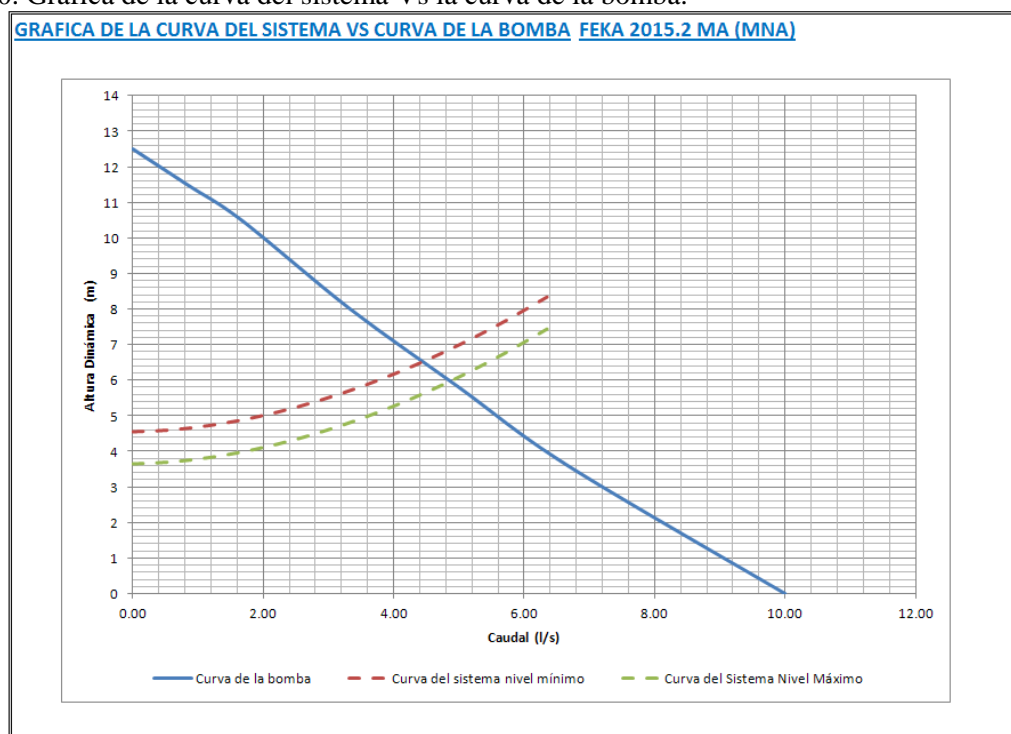
Dentro de esta tabla se encuentra una columna llamada *Graficar* en la cual se selecciona la bomba que se quiere graficar con respecto a la curva del sistema. Para ello se debe escribir X en la columna correspondiente a la bomba que se quiera graficar y así aparece en el gráfico la curva de la bomba. Así por ejemplo si se desea graficar la tercera bomba que aparece en la lista se debe escribir X en la columna inmediatamente anterior al modelo de la bomba como se muestra en la Figura 19.

Figura 19. Selección de la bomba a graficar

Graficar	Modelo	Empresa	ϕ Sólidos [mm]	Conexión	ϕ Descarga DN [mm]	Motor	Potencia [kW]	Velocidad [R.P.M]	Sumergencia [mm]	ϕ Impulsor [mm]	Eficiencia [%]
	FEKA GL 1000 M-A (NA)	DAB	46	Roscado	50	Monofásico	1.1	2900	400	110	80.9
	FEKA 2015.2 MA	DAB	42	Bridado	50	Trifásico	1.1	2900	400	110	77.7
X	FEKA 2015.2 MA (MNA)	DAB	42	Bridado	50	Monofásico	1.1	2900	400	110	72.7
	FEKA 2515.2T	DAB	62	Bridado	65	Trifásico	1.1	2900	400	110	72.7
	DRV/A50-135-1.4	EBARA	48	Bridado	50	Trifásico	1.4	2900	358	110	72.5
	DRV/A50-130-1.1M	EBARA	50	Bridado	50	Monofásico	1.1	2900	339	110	69.8
	AS0830 S13/4D	ABS	60	Brida DN	80	Trifásico	1.3	1450	305	160	65.6
	FEKA 2500.4T	DAB	62	Bridado	65	Trifásico	1.4	2900	400	110	62.4
	ARS 80-16V/2,5	BOMBAS IDEAL	60	Bridado	80	Trifásico	1.7	2850	420	110	60.3
	ARS 80-18V/1,7	BOMBAS IDEAL	50	Bridado	80	Trifásico	1	1450	420	110	59.8

Con la información que contiene la base de datos de las bombas, se puede graficar la curva de la bomba seleccionada. En este gráfico, además, se muestra la curva del sistema calculada con los valores dados por el usuario como se muestra en la Figura 20. Esta curva del sistema se determina para los niveles mínimo y máximo en el pozo húmedo, rango en el que trabaja la bomba.

Figura 20. Grafica de la curva del sistema Vs la curva de la bomba.



4.3.2. Diseño de la línea de impulsión

Dentro de la hoja de cálculo se presenta el diseño óptimo de la línea de impulsión. Esta línea de impulsión fue dividida en dos como se explicó anteriormente. La línea de impulsión 1 es la tubería que se ubica dentro de la estación de bombeo, la cual está limitada a ser de Acero o Hierro Dúctil. La segunda línea de impulsión, es la tubería que se ubica inmediatamente de la salida de la estación de bombeo.

El dimensionamiento de la línea de impulsión tiene en cuenta el diámetro y el material para determinar las pérdidas por fricción. Adicionalmente, se tiene en cuenta los accesorios ubicados en cada línea de impulsión para determinar las pérdidas locales. En la Figura 21 se muestra la imagen del cuadro en donde se especifican los cálculos de la línea de impulsión.

Figura 21. Hoja 2 – dimensionamiento de la línea de impulsión

DIMENSIONAMIENTO LÍNEA DE IMPULSIÓN		
DATOS DE ENTRADA TUBERIA DE IMPULSION		
Longitud	50	m
Temperatura	15.0	°C
Material impulsión 1	HD	
Longitud impulsión 1	3.10	m
Material impulsión 2	PVC	
longitud impulsión 2	50.00	m
PERDIDAS POR FRICCION IMPULSION 1		
Caudal de diseño	4.44	l/s
Velocidad mínima	1.8	m/s
Velocidad máxima	2.4	m/s
Diametro máximo	56	mm
Diametro mínimo	49	mm
Diametro	2.0	plg
Rugosidad absoluta "e"	0.25	mm
Velocidad en la impulsión	2.19	m/s
ν	1.139E-06	m ² /s
Re	97800	-
Coefficiente de fricción "f"	0.031	-
Pérdidas por fricción	0.46	m
Suma de K de accesorio	0.00	
Pérdidas locales	0.00	m
Pérdidas de energía	0.46	m
PERDIDAS POR FRICCION IMPULSION 2		
Caudal de diseño	4.44	l/s
Velocidad mínima	1.1	m/s
Velocidad máxima	2.4	m/s
Diametro máximo	72	mm
Diametro mínimo	49	mm
Diametro	2.5	plg
Rugosidad absoluta "e"	0.0015	mm
Velocidad en la impulsión	1.40	m/s
ν	1.139E-06	m ² /s
Re	78240	-
Coefficiente de fricción "f"	0.019	-
Pérdidas por fricción	1.50	m
Suma de K de accesorio	0.00	
Pérdidas locales	0.00	m
Pérdidas de energía	1.50	m

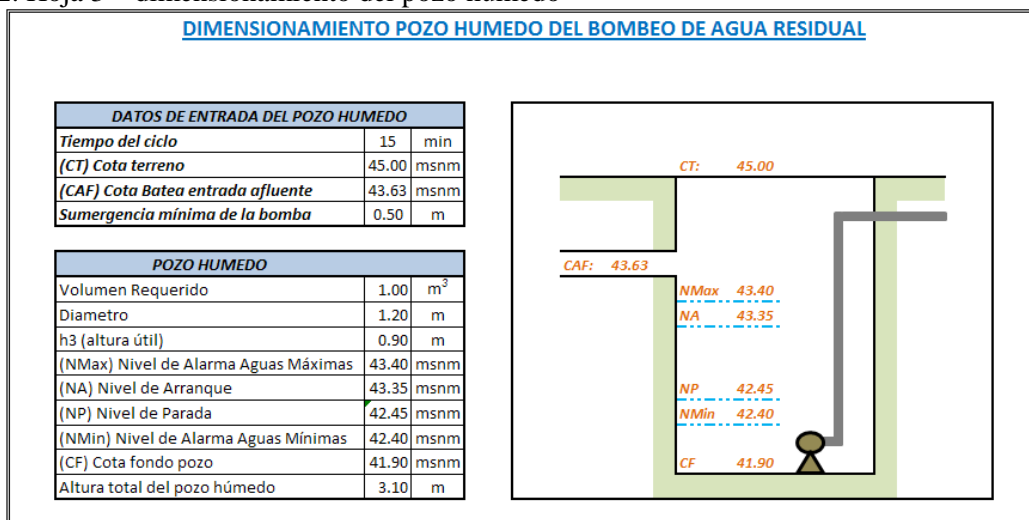
4.3.3. Dimensionamiento del pozo húmedo

Otro aspecto importante que se presenta dentro de la hoja de cálculo, es el dimensionamiento del pozo húmedo. Para ello se tomaron los valores de las cotas del terreno y la tubería afluente y las características del líquido que ingresa el usuario. Además, se involucra la sumergencia mínima que tiene la bomba, siendo el menor valor 0.50m, como lo especifica la norma.

Con el tiempo del ciclo, se determina el volumen requerido del pozo como se especificó anteriormente. Con ello se determina el menor diámetro con el que se puede construir el pozo húmedo y la altura útil del mismo. Se aclara que esta altura útil no debe superar 1.0m por cuestiones constructivas.

Con los anteriores valores determinados, se determinan las cotas de los diferentes componentes del pozo húmedo como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Hoja 3 – dimensionamiento del pozo húmedo



5. Modelo de Optimización

Dentro del alcance de este proyecto, se contempló un modelo de optimización para determinar la composición de la línea de impulsión y escoger la bomba optima del proyecto a diseñar. Este modelo de optimización contempla inicialmente las restricciones definidas en el numeral 4.1 del presente documento.

5.1. Componentes del modelo de optimización

Un modelo matemático de optimización está compuesto por ecuaciones algebraicas que a su vez están compuestas por variables conocidas (*parámetros*) y variables desconocidas (*variables de decisión*). Además, los modelos matemáticos describen el sistema que está siendo analizado y las condiciones que éste debe satisfacer (*restricciones*). Por lo tanto un modelo de optimización se crea con el principal objetivo de conocer o encontrar los mejores valores de las variables de decisión las cuales definen bajo una función los costos o beneficios del sistema analizado (*función objetivo*) con las restricciones dadas por el mismo. (Loucks, 2005)

Con lo anterior y en base en el objetivo expuesto en este proyecto, se identificaron 3 componentes en el modelo de optimización del diseño de la EBAR los cuales se describen a continuación:

5.1.1. Variables de decisión

Como se explico anteriormente, se propone un modelo de optimización para encontrar la geometría y material de las líneas de impulsión y la bomba optima para un proyecto dado. Por lo tanto, las variables de decisión determinadas son: i) diámetro de la línea de impulsión 1, ii) material de la línea de impulsión 1, iii) diámetro de la línea de impulsión 2, iv) material de la línea de impulsión 2, y v) bomba sumergible.

5.1.2. Función objetivo

El objetivo en el diseño de la estación de bombeo es el de conseguir el costo más económico para el proyecto. Este costo esta dado por los costos de construcción y los costos de operación.

Los costos de construcción incluyen los que el proyecto incurrirá para poder ponerse en marcha, por ende se tienen en cuenta los costos de instalación y suministros de las tuberías, accesorios y bomba requeridos para la estación de bombeo. Consecuentemente, se debe contar con información de los costos unitarios de las tuberías y accesorios de diferentes diámetros y materiales y las bombas.

Por otro lado, los costos de operación corresponden a los de energía de la operación de la estación de bombeo durante el periodo de funcionamiento de ésta. Loucks (2005) enuncia que para los proyectos que involucran series de tiempo es conveniente expresar estas series de tiempo como un solo valor equivalente a lo que vale hoy en día. Por lo tanto estos costos requieren realizar el cálculo del valor presente neto (VPN) del costo de energía asociado a la duración de

trabajo de la bomba. Para este caso, se debe contar con el incremento del costo anual de energía y con la tasa de descuento anual del mercado. Por lo tanto, el VPN se determina mediante la ecuación:

$$VPN = C_o + \sum_{i=0}^t \frac{C_o(1 + T_{ae})^i}{(1 + T_d)^i}$$

Donde:

VPN : Valor presente neto [\$]

C_o : Costo de energía año inicial [\$/año]

T_{ae} : Tasa de aumento del costo energético

T_d : Tasa de descuento

t : Periodo total de funcionamiento de la EBAR [año]

5.1.3. Restricciones

Las restricciones dadas en este modelo de optimización son, en primer lugar las ecuaciones fundamentales de la hidráulica de las estaciones de bombeo presentadas en los capítulos iniciales y luego las correspondientes a las descritas en el numeral 4.1: velocidades máximas y mínimas permisibles, los materiales y diámetros posibles para las líneas de impulsión y las características de las bombas disponibles para el proyecto definido.

5.2. Descripción del modelo de optimización

Luego de definidos teóricamente los componentes del modelo de optimización, se presentan las ecuaciones del mismo como se presenta a continuación:

Minimizar: $C_{total} = C_{cons} + C_{oper}$

$$C_{cons} = Sum_{imp1} + inst_{imp1} + Sum_{imp2} + inst_{imp2}$$

$$C_{oper} = VPN_{bombeo}$$

C_{total} :	Costo total
C_{cons} :	Costo de construcción
C_{oper} :	Costo de operación
sum_{imp1} :	Suministro línea de impulsión 1
$inst_{imp1}$:	Instalación línea de impulsión 1
sum_{imp2} :	Suministro línea de impulsión 2
$inst_{imp2}$:	Instalación línea de impulsión 2
VPN_{bombeo} :	Valor presente neto por bombeo

Restricciones:

Bombas:

Características dadas en la base de datos

$$Q_{proy} = Q_{bomb}$$

$$H_{proy} = H_{bomb} \pm 1 \text{ metro}$$

Q_{proy} :	Caudal del proyecto
Q_{bomb} :	Capacidad de la bomba
H_{proy} :	Altura total del proyecto
H_{bomb} :	Altura de trabajo de la bomba

Línea de impulsión 1:

Material = Hierro dúctil (HD) o Acero.

Diámetro = diámetro comercial.

Velocidad mínima = 1.6m/s.

Velocidad máxima = 2.4 m/s.

Línea de impulsión 2:

Material = PVC, Hierro ductil (HD), Acero, Concreto (CCP), polietileno (PEAD) y Poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP).

Diámetro = diámetro comercial.

Velocidad mínima = 1.1m/s.

Velocidad máxima = 2.4 m/s.

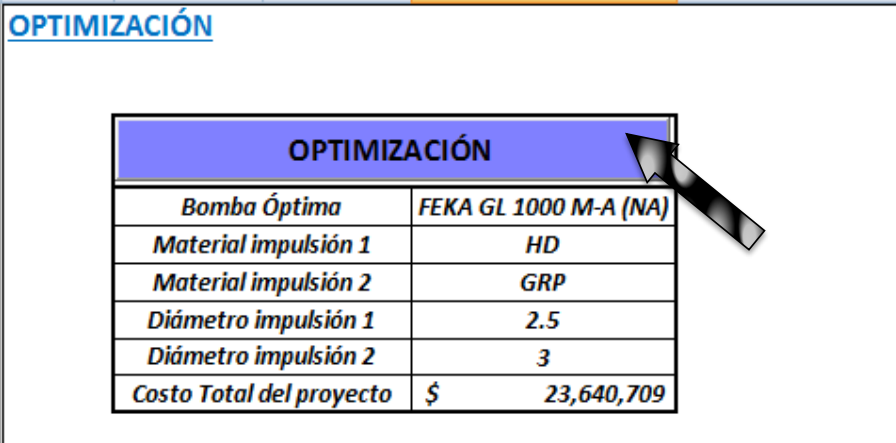
5.2.1. Modelo de optimización dentro de la hoja de cálculo

Debido a la complejidad de las variables y de la hoja de cálculo en sí, se decidió realizar una optimización haciendo una búsqueda exhaustiva, de tal manera que se evaluaran todos los posibles escenarios del proyecto y se determinara cuál de estos es el de menor costo.

Para ello inicialmente se determinan, con los datos de entrada, cuales bombas cumplen con los criterios de entrada y cuáles son los posibles diámetros que se pueden tener en las tuberías de impulsión para cumplir con las restricciones de velocidad. Luego, y por medio de código de programación realizado en Visual Basic, se evalúa el sistema con una primera combinación de las variables de decisión, es decir, con la primera bomba escogida combinada con uno de los diámetros posibles de cada línea de impulsión y uno de los materiales que se pueden instalar en cada una de estas. Con ello se determina el costo del proyecto para esta combinación u alternativa y si este costo es de menor valor al que se tiene inicialmente guardado en una variable auxiliar, el programa guardará mediante otras variables auxiliares, los datos de esta combinación. Este procedimiento se repite para todas las alternativas posibles de diseño y, al finalizar, el programa arroja los datos de las variables de decisión junto con el costo del proyecto óptimo.

Para realizar este procedimiento, el usuario deberá picar en el botón activeX “OPTIMIZACIÓN” que se encuentra en la hoja llamada con el mismo nombre, no sin antes haber realizado la selección de las bombas óptimas del proyecto como se explicó anteriormente. En la Figura 23 se muestra el botón activeX que ejecuta el marco del programa anteriormente mencionado y, debajo de este, se presentan los datos de las variables de decisión de la alternativa óptima encontrada para el proyecto junto con el costo total del proyecto (función objetivo).

Figura 23. Hoja 4 – Optimización de la EBAR



OPTIMIZACIÓN	
<i>Bomba Óptima</i>	<i>FEKA GL 1000 M-A (NA)</i>
<i>Material impulsión 1</i>	<i>HD</i>
<i>Material impulsión 2</i>	<i>GRP</i>
<i>Diámetro impulsión 1</i>	<i>2.5</i>
<i>Diámetro impulsión 2</i>	<i>3</i>
<i>Costo Total del proyecto</i>	<i>\$ 23,640,709</i>

Con estos datos encontrados, se muestran también los costos estimados o presupuesto preliminar con el cual se realizó la optimización del proyecto, es decir, el costo de construcción y de operación. Estos costos se dividen en costos de la bomba óptima, en el cual se tiene en cuenta los costos de la energía por el tiempo total del proyecto (VPN) y el costo de adquisición de ésta, y los costos de las tuberías óptimas en los cuales se tiene en cuenta los costos de instalación y suministro de cada línea de impulsión compuesta por las tuberías y los accesorios. Esto se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Hoja 4 – Presupuesto preliminar

PRESUPUESTO PRELIMINAR						
Nota: El presente presupuesto es una base para determinar el costo del proyecto óptimo por lo cual no tiene en cuenta los costos de excavación, demoliciones o reparaciones y por lo tanto no se debe tomar como presupuesto final del proyecto.						
COSTOS DE LA BOMBA OPTIMA						
MODELO	EFICIENCIA	POTENCIA	COSTO ENERGÍA	COSTO ENERGÍA (VPN)	COSTO DE ADQUISICIÓN	
	[%]	kW	\$/año	\$/periodo	\$	
FEKA GL 1000 M-A (NA)	80.675	0.48	\$ 1,686,098	\$ 20,020,924	\$ 3,300,000	
COSTOS DE LAS TUBERÍAS OPTIMAS						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO SUMINISTROS	VALOR UNITARIO INSTALACIÓN	VALOR UNITARIO TOTAL	VALOR TOTAL
IMPULSIÓN 1						
Tubería 2.5"	ml	3.4	\$ 6,003	\$ 6,003	\$ 12,006	\$ 40,820
Codo 90 radio corto 2.5"	un	0	\$ 6,009	\$ 6,009	\$ 12,018	\$ -
Codo 90 radio medio 2.5"	un	0	\$ 6,015	\$ 6,015	\$ 12,030	\$ -
Codo 90 gran radio 2.5"	un	1	\$ 6,021	\$ 6,021	\$ 12,042	\$ 12,042
Codo 45 2.5"	un	0	\$ 6,027	\$ 6,027	\$ 12,054	\$ -
Tee 2.5"	un	2	\$ 6,033	\$ 6,033	\$ 12,066	\$ 24,132
Uniones 2.5"	un	1	\$ 6,039	\$ 6,039	\$ 12,078	\$ 12,078
Yee 2.5"	un	0	\$ 6,045	\$ 6,045	\$ 12,090	\$ -
Válvula de globo 2.5"	un	0	\$ 1,003	\$ 2,003	\$ 3,006	\$ -
Válvula de mariposa 2.5"	un	0	\$ 1,009	\$ 2,009	\$ 3,018	\$ -
Válvula de Cheque 2.5"	un	1	\$ 1,015	\$ 2,015	\$ 3,030	\$ 3,030
Válvula de compuerta 2.5"	un	1	\$ 1,021	\$ 2,021	\$ 3,042	\$ 3,042
TOTAL IMPULSIÓN 1						\$ 95,144
IMPULSIÓN 2						
Tubería 3"	ml	50	\$ 2,004	\$ 2,004	\$ 4,008	\$ 200,400
Codo 90 radio corto 3"	un	3	\$ 2,010	\$ 2,010	\$ 4,020	\$ 12,060
Codo 90 radio medio 3"	un	0	\$ 2,016	\$ 2,016	\$ 4,032	\$ -
Codo 90 gran radio 3"	un	0	\$ 2,022	\$ 2,022	\$ 4,044	\$ -
Codo 45 3"	un	2	\$ 2,028	\$ 2,028	\$ 4,056	\$ 8,112
Tee 3"	un	1	\$ 2,034	\$ 2,034	\$ 4,068	\$ 4,068
Uniones 3"	un	0	\$ 2,040	\$ 2,040	\$ 4,080	\$ -
Yee 3"	un	0	\$ 2,046	\$ 2,046	\$ 4,092	\$ -
Válvula de globo 3"	un	0	\$ 1,004	\$ 2,004	\$ 3,008	\$ -
Válvula de mariposa 3"	un	0	\$ 1,010	\$ 2,010	\$ 3,020	\$ -
Válvula de Cheque 3"	un	0	\$ 1,016	\$ 2,016	\$ 3,032	\$ -
Válvula de compuerta 3"	un	0	\$ 1,022	\$ 2,022	\$ 3,044	\$ -
TOTAL IMPULSIÓN 2						\$ 224,640

6. Conclusiones

Las estaciones de bombeo son muy importantes dentro del sistema de alcantarillado de las ciudades y además representan un gran costo tanto de inversión inicial (construcción y adquisición de equipos) como de futura (operación, mantenimiento, etc.), por lo cual su diseño debe basarse en una combinación óptima entre los materiales y diámetros de las tuberías de impulsión, y el equipo de bombeo.

Sin embargo, seleccionar la combinación óptima en muchos casos requiere de tiempo y puede ser complicado y lo cual conlleva a que el diseñador omita o no tenga en cuenta algunos equipos que pueden funcionar para su diseño. Esto en muchos casos ocasiona que los costos del proyecto no sean los menores posibles y que se asuman costos que se habrían podido evitar.

Por lo tanto, tener una herramienta que facilite la búsqueda de las bombas que se puedan utilizar en el proyecto proporciona al diseñador una ayuda para realizar un mejor diseño y para contemplar más posibilidades de las conocidas inicialmente.

La optimización en los diseños de ingeniería cada día se hace más importante para disminuir los costos, por lo tanto es importante que en cada diseño se puedan plantear unos modelos de optimización que ayuden a reducir los costos del proyecto lo cual trae grandes beneficios para tanto para el diseñador como para el constructor.

7. Referencias

Empresas Públicas de Medellín E. S. P. (2009). *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de EPM*. Medellín.

Federal Highway Administration. (2001). *Highway stormwater pump station design*. USA.

Grundfos. (s.f.). *Manual de bombeo de aguas residuales*. Madrid.

Jones, G. M. (2004). *Pumping Station Design* (Tercera Edición ed.). USA.

Loucks, D. P. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management*. Holanda: UNESCO.

Metcalf & Eddy, INC. (1995). *Ingeniería de aguas residuales, redes de alcantarillado y bombeo*. Madrid: McGraw-Hill.

Ministerio de desarrollo económico. (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS-2000)*. Bogotá, Colombia.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos aplicada* (Sexta edición ed.). Mexico: Pearson.

Sulzer. (s.f.). *Afrontando los retos del futuro en el saneamiento de las aguas residuales*.

ANEXOS

ANEXO 1: Propiedades Físicas del Agua

Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N*s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9.805	999.9	1.98E+06	1.781E-03	1.785E-06	0.0765	0.61
5	9.807	1000.0	2.05E+06	1.518E-03	1.519E-06	0.0749	0.87
10	9.804	999.7	2.10E+06	1.307E-03	1.306E-06	0.0742	1.23
15	9.798	999.1	2.15E+06	1.139E-03	1.139E-06	0.0735	1.70
20	9.789	998.2	2.17E+06	1.002E-03	1.003E-06	0.0728	2.34
25	9.777	997.0	2.22E+06	8.900E-04	8.930E-07	0.0720	3.17
30	9.764	995.7	2.25E+06	7.980E-04	8.000E-07	0.0712	4.24
40	9.730	992.2	2.28E+06	6.530E-04	6.580E-07	0.0696	7.38
50	9.689	988.0	2.29E+06	5.470E-04	5.530E-07	0.0679	12.33
60	9.642	983.2	2.28E+06	4.660E-04	4.740E-07	0.0662	19.92
70	9.589	977.8	2.25E+06	4.040E-04	4.130E-07	0.0644	31.16
80	9.530	971.8	2.20E+06	3.540E-04	3.640E-07	0.0626	47.34
90	9.466	965.3	2.14E+06	3.150E-04	3.260E-07	0.0608	70.10
100	9.399	958.4	2.07E+06	2.820E-04	2.940E-07	0.0589	101.33

Fuente: Adaptado de Metcalf & Eddy, INC, 1995, Tabla A-1

ANEXO 2: Rugosidad Absoluta de Materiales

Material	Símbolo	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	PVC	0.0015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	GRP	0.03
Acero comercial	ACERO	0.45
Hierro Dúctil	HD	0.25
Concreto	CCP	0.12
Polietileno	PEAD	0.007

Fuente: Adaptado de Empresas Públicas de Medellín E. S. P, 2009, Tabla 9.5

ANEXO 3: Coeficientes de Pérdidas Menores

Accesorios	K
Válvula de globo	10.00
Válvula de mariposa	5.00
Válvula de Cheque	2.50
Válvula de compuerta	0.20
Codo 90 radio corto	0.90
Codo 90 radio medio	0.80
Codo 90 gran radio	0.60
Codo 45	0.40
Te, en sentido recto	0.30
Te, a través de la salida lateral	1.80
Uniones	0.30
ye de 45°, en sentido recto	0.30
ye de 45°, en sentido lateral	0.80
Entrada recta a tope	0.50
Entrada con boca acampanada	0.10
Entrada con tubo entrante	0.90
Salida tubería	1.00

Fuente: Adaptado de Ministerio de desarrollo económico, 2000, Tabla B.6.11.