
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

VOLUMEN I

Enrique César Valdez

UNAM
Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica
Departamento de Ingeniería Sanitaria



ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE



FACULTAD INGENIERIA

Enrique César Valdez

Ingeniero Civil egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Profesor de Carrera del Departamento de Ingeniería Sanitaria, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Edición en computadora
Ing. Miguel Angel González López

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita del autor.

D.R. © 1990 UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA.

Av. Insurgentes Sur y Copilco
Delegación Coyoacán
04510 México, D.F.

Primera edición: noviembre de 1990
Primera reimpresión: enero de 1991
Segunda edición: julio de 1991
Tercera edición: octubre de 1992
Cuarta edición: enero de 1994

CONTENIDO

Prefacio

1 Introducción

1.1 Evaluación de la necesidad y disponibilidad del agua en México en la época moderna

1.1.2 Situación de los servicios

1.1.3 El abastecimiento de agua potable y su relación con la salud pública

1.2 Dependencias relacionadas con la planeación, proyecto, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable

2 Descripción general de los sistemas de abastecimiento de agua potable

2.1 Fuentes de abastecimiento

2.2 Captación

2.3 Conducción

2.4 Tratamiento

2.5 Almacenamiento y regularización

2.6 Distribución

Problemas

3 Estudios básicos para realizar el proyecto

3.1 Generalidades

3.2 Estudios básicos de proyecto

3.3 Información previa

3.4 Investigación directa

3.5 Estudios auxiliares complementarios

3.6 Elaboración integral del estudio

1
1
3
6
7
9
9
13
15
15
18
18
20
21
21
24
25
26
27
30

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

| | |
|---|------------|
| Problemas | 30 |
| 4 Datos básicos de proyecto | 31 |
| 4.1 Vida útil de las obras y periodo de diseño | 31 |
| 4.2 Población de proyecto | 34 |
| 4.3 Usos del agua | 48 |
| 4.4 Gastos de diseño | 52 |
| Problemas | 57 |
| 5 Obras de captación | 61 |
| 5.1 Reconocimiento sanitario | 63 |
| 5.2 Captación de aguas superficiales | 64 |
| 5.2.1 Captación directa por gravedad o por bombeo | 68 |
| 5.2.2 Captación por medio de vertedor lateral | 72 |
| 5.2.3 Captación por medio de caja central ubicada por debajo del vertedor de rebose | 76 |
| 5.3 Obras de captación para agua subterránea | 77 |
| 5.3.1 Manantiales | 77 |
| 5.3.2 Pozos | 79 |
| 5.3.3 Nociones de Geohidrología | 83 |
| 5.3.4 Métodos de perforación de pozos | 94 |
| 5.3.5 Captación de aguas por medio de galerías de infiltración | 94 |
| 5.4 Evaluación del Impacto Ambiental | 102 |
| Problemas | 102 |
| 6 Conducción | 107 |
| 6.1 Tuberías usadas en sistemas de abastecimiento de agua potable | 107 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6.2 | Piezas especiales y dispositivos de control y protección de bombas y tuberías | 118 |
| 6.3 | Proyecto de líneas de conducción de agua potable | 130 |
| 6.3.1 | Factores por considerar | 130 |
| 6.3.2 | Metodología de diseño | 131 |
| 6.3.3 | Fórmulas para el cálculo de la resistencia por fricción o superficial en tuberías | 134 |
| 6.3.4 | Conducciones por gravedad | 138 |
| 6.3.5 | Conducción por bombeo | 144 |
| 6.4 | Instalación de tuberías | 158 |
| 6.4.1 | Silletas | 160 |
| 6.4.2 | Atraques | 163 |
| | Problemas | 167 |
| 7 | Regularización | 171 |
| 7.1 | Tipos de tanques y su funcionamiento | 171 |
| 7.1.1 | Tanques superficiales | 171 |
| 7.1.2 | Columnas reguladoras | 175 |
| 7.1.3 | Tanques elevados | 176 |
| 7.2 | Cálculo del volumen del tanque de regularización | 179 |
| 7.2.1 | Cálculo analítico | 179 |
| 7.2.2 | Cálculo gráfico | 184 |
| | Problemas | 202 |
| 8 | Distribución | 203 |
| 8.1 | Generalidades | 203 |
| 8.2 | Componentes del sistema de distribución | 205 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 8.3 | Presiones requeridas y velocidad de flujo en la red | 207 |
| 8.4 | Diseño de sistemas de distribución ramificados | 207 |
| 8.5 | Diseño de sistemas de distribución en malla | 207 |
| 8.6 | Análisis hidráulico de sistemas de distribución en malla | 221 |
| 8.6.1 | Método de relajación (Método de Hardy Cross) | 222 |
| 8.6.2 | Método de la tubería equivalente | 237 |
| 8.6.3 | Método de secciones | 241 |
| 8.6.4 | Método del círculo | 247 |
| 8.6.5 | Análisis con computadora | 248 |
| 8.6.6 | Analogía eléctrica | 248 |
| | Problemas | 248 |

Anexo A

| | | |
|--|--|-----|
| | Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 | |
| | Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano | |
| | Límites permisibles de calidad y tratamientos a que | |
| | debe someterse el agua para su potabilización | 251 |

| | | |
|--|---------------------|-----|
| | Bibliografía | 257 |
|--|---------------------|-----|

PREFACIO

INTRODUCCION

Los ingenieros civiles tradicionalmente han participado en la realización de obras de abastecimiento de agua y para la eliminación del agua residual. Esto se debe a que la ingeniería sanitaria constituye una de las actividades más intensas de la ingeniería civil.

Estos apuntes, cuya primera edición apareció en 1990, fueron preparados con el principal objetivo de servir de texto elemental en los temas correspondientes a la materia de Abastecimiento de Agua Potable que cursan los estudiantes de la carrera de ingeniería civil que se imparte en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, y para ampliar las lecciones y ejercicios dados durante la clase. En los años siguientes, el texto ha pasado por tres revisiones y ampliaciones incluyendo la que dio origen a esta nueva y cuarta edición, en la cual se han considerado los Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de la Comisión Nacional del Agua, de reciente publicación (1993).

Las limitaciones impuestas a la cantidad y extensión de los temas están marcadas por el tiempo disponible para ser cubiertos en un semestre académico; por esta razón desde la primera edición de estos apuntes el contenido se ha referido principalmente a los aspectos de planeación y diseño de los elementos del sistema de abastecimiento de agua potable. La necesidad de abarcar las otras etapas del proyecto, esto es, la construcción y operación del sistema, dio lugar a la elaboración del complemento de estos apuntes, la cual se hizo durante 1993, y como resultado se produjeron los apuntes de Abastecimiento de Agua Potable subtítulos Recomendaciones de Construcción (Volumen II) y Administración, Operación, Mantenimiento y Financiamiento de los Sistemas (Volumen III); estos apuntes fueron coeditados por la Facultad de Ingeniería y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. De esta manera, la presente versión corresponde al Volumen I de la edición en conjunto.

Estoy afectuosamente agradecido con el Ing. Rafael López Ruiz, profesor de la materia, por el interés mostrado en este material, así como con los ingenieros Ernesto Acosta Ortiz, Gastón Mendoza Gamez y Carlos M. Menéndez Martínez, por sus amables y alentadores conceptos con respecto a estos apuntes. Agradezco las sugerencias y comentarios que me ofrecieron de la edición anterior los ingenieros Renato Flores Soto Flores, Enrique Heras Herrera y Fernando Ruíz Arriaga; en la medida de lo posible hemos incorporado sus sugerencias en esta edición. Debo especial gratitud a mi esposa, la Ing. Alba Vázquez González, por sus invaluable consejos, apoyo moral y sugerencias editoriales.

Obviamente, el trabajo que ha supuesto la realización de esta nueva edición no podría haberlo realizado una sola persona. Por tanto, quiero agradecer la colaboración del Ing. Miguel Ángel González López y expresar mi reconocimiento por el concienzudo trabajo de edición realizado así como por su ayuda en la revisión general del material.

Por último, deseo dedicar este sencillo trabajo al ilustre Ing. José Ansberto Monobe Galván, maestro entrañable, ejemplo de honestidad y dedicación, con infinito aprecio.

Enrique César Valdez

Ciudad Universitaria, D.F. a 30 de noviembre de 1994

INTRODUCCION

La concentración de la población en núcleos cada vez mayores trae consigo innegables ventajas como son el mejoramiento económico, social y cultural. Sin embargo, también es cierto que por esta causa han surgido múltiples problemas de tipo ambiental como la contaminación atmosférica, el transporte y disposición de desechos líquidos y sólidos y el abastecimiento de agua para usos municipales.

El agua es indispensable para la vida y por ello el hombre, en muchos casos ha buscado para su establecimiento los lugares que le ofrecen mayores comodidades y facilidades para el desarrollo de sus múltiples actividades, procurando tener cerca una fuente de abastecimiento de agua, pero no siempre ha podido conseguirlo por razones diversas teniendo que establecerse en sitios que quizá no fueron los mejores para su desenvolvimiento. Así surgió la necesidad de conducir el agua a lugares apartados, pero las grandes ventajas de tener agua donde se necesita justifican los trabajos para captarla y conducirla. El conjunto de las diversas obras que tienen por objeto suministrar agua a una población en cantidad suficiente, calidad adecuada, presión necesaria y en forma continua constituye un **sistema de abastecimiento de agua potable**.

El problema del agua potable no tiene solución permanente, por lo que en este aspecto siempre se debe estar buscando nuevas fuentes de aprovisionamiento, realizando estudios hidrológicos o geohidrológicos para tener a la mano forma de ampliar los sistemas. El aumento de la población y el ascenso de su nivel cultural y social hacen insuficiente en poco tiempo las obras proyectadas, imposibilitándose de esa manera que con las existentes se pueda seguir el ritmo de crecimiento que las necesidades

exigen y complicando cada vez más la obtención de nuevos caudales, pues las fuentes actuales van haciéndose incapaces y es necesario utilizar las que están situadas a mayor distancia, u otras cuyas aguas requieren tratamientos más elaborados para hacerlas adecuadas para el consumo.

Para desempeñar un papel activo en la solución a tales problemas, el Ingeniero Civil debe comprender claramente los fundamentos en que se basan. Por tanto, la finalidad de estos apuntes es delinear los principios fundamentales de ingeniería implicados en las obras que constituyen el sistema de abastecimiento de agua potable e ilustrar su aplicación al proyecto.

1.1 EVOLUCION DE LA NECESIDAD Y DISPONIBILIDAD DEL AGUA EN MEXICO EN LA EPOCA MODERNA

1.1.1 Población y disponibilidad del agua

México ha tenido índices de crecimiento poblacional de los más altos del mundo: 3.1% anual en los años cincuenta; 3.8% en los sesenta y sólo 2.9% en los setenta. La población de México, comparada con la cifra de 1970 creció en las dos últimas décadas (1970 a 1990) a una tasa media anual de 2.6 %. Es interesante observar la dinámica del crecimiento demográfico de nuestro país (Cuadro 1.1) desde 1790 hasta los resultados obtenidos en el XI Censo General de Población y Vivienda, 1990. Podemos ver que la población, aún cuando no siempre con la misma rapidez, ha ido continuamente en aumento, excepción hecha de 1921, en que la población disminuye con respecto a la registrada en el censo de 1910, año en que se inició la Revolución.

Cuadro 1.1

| POBLACION TOTAL. 1970 - 1990 | | |
|---------------------------------|-----------|--|
| AÑO | POBLACION | FUENTE |
| 1790 | 4636074 | 1. Censo de Revillagigedo |
| 1803 | 5764731 | 2. Tribunal del consulado |
| 1810 | 6122354 | 3. Fernando Navarro y Noriega |
| 1820 | 6204000 | 4. 1er Congreso Mexicano |
| 1827 | 8000000 | 5. H.G. Ward |
| 1830 | 7996000 | 6. Burkhardt |
| 1831 | 6382284 | 7. A.J. Valdés |
| 1834 | 7734292 | 8. Mariano Galván |
| 1836 | 7843132 | 9. Noticia de los Estados y territorios de la Unión Mexicana de 1836 |
| 1838 | 7004140 | 10. Instituto Nacional de Geografía y Estadística de la República Mexicana |
| 1842 | 7015509 | 11. Estimación gubernamental en Brantz Mayer |
| 1846 | 7000000 | 12. Thomas J. Farnham |
| 1850 | 7500000 | 13. N.A., México |
| 1852 | 7661919 | 14. Juan N. Almonte |
| 1854 | 7853395 | 15. Manuel Orozco y Berra |
| 1856 | 7859564 | 16. Lerdo de Tejada |
| 1857 | 8247050 | 17. Jesús Hermosa |
| 1858 | 8604000 | 18. J.M. Pérez Hernández |
| 1861 | 8174400 | 19. Antonio García Cubas |
| 1862 | 8396524 | 20. J.M. Pérez Hernández |
| 1865 | 8200000 | 21. M.E. Guillemín Tarayre |
| 1869 | 8812650 | 22. H.W. Bates |
| 1870 | 8782198 | 23. Jesús Hermosa |
| 1871 | 9176082 | 24. Antonio García Cubas |
| 1872 | 9141661 | 25. Antonio García Cubas |
| 1874 | 8743614 | 26. M. Rivera Cambas |
| 1878 | 9169700 | 27. H.W. Bates |
| 1880 | 9000000 | 28. N. Wineburgh |
| 1882 | 10001884 | 29. Charles W. Zaremba |
| 1885 | 10879398 | 30. Memoria de Fomento |
| 1893 | 11994347 | 31. Memoria de Fomento |
| 1895 | 12632427 | 32. I Censo General de Población |
| 1900 | 13607272 | 33. II Censo General de Población |
| 1903 | 14074149 | 34. Memoria de Fomento |
| 1905 | 14331188 | 35. Memoria de Fomento |
| 1907 | 14222445 | 36. Memoria de Fomento |
| 1910 | 15160369 | 37. III Censo General de Población |
| 1921 | 14334780 | 38. IV Censo General de Población |
| 1930 | 16552722 | 39. V Censo General de Población |
| 1940 | 19653552 | 40. VI Censo General de Población |
| 1950 | 25791017 | 41. VII Censo General de Población |
| 1960 | 34923129 | 42. VIII Censo General de Población |
| 1970 | 48225238 | 43. IX Censo General de Población |
| 1974 | 58320335 | 44. INEGI |
| 1975 | 60153387 | 45. INEGI |
| 1976 | 61978684 | 46. INEGI |
| 1977 | 63812850 | 47. INEGI |
| 1978 | 65658312 | 48. INEGI |
| 1979 | 67517498 | 49. INEGI |
| 1980 | 68392835 | 50. INEGI |
| 1981 | 71249069 | 51. INEGI |
| 1982 | 73122895 | 52. INEGI |
| 1983 | 74980539 | 53. INEGI |
| 1984 | 76791819 | 54. INEGI |
| 1985 | 78524158 | 55. INEGI |
| 1990 | 81140922 | 56. INEGI |

FUENTE: CONAPO (Consejo Nacional de Población)

La mayor parte de esta disminución no obedece, como podría creerse, a la pérdida de vidas en los años de lucha armada, sino a la enorme mortalidad causada por la epidemia de gripe conocida como "influenza española" y a la emigración motivada por el movimiento armado.

El aumento y la expansión territorial de la población ejercen fuertes presiones sobre la disponibilidad de recursos del país y la capacidad del sistema para hacer frente a las demandas derivadas de este crecimiento poblacional es limitada. El país se encuentra dividido en 320 cuencas hidrológicas, con un escurrimiento medio anual de aproximadamente 410,000 millones de m³ en promedio, cifra que representa prácticamente el total disponible como recurso renovable. Sin embargo, el territorio nacional tiene una distribución heterogénea de los recursos hidráulicos, existiendo grandes extensiones con precipitaciones muy escasas, mientras que en algunas partes las lluvias son tan abundantes que provocan inundaciones frecuentes. Por otra parte, el 74% de los habitantes del país se concentra en altitudes mayores a 500 m; en contraste, el 85% de la disponibilidad de agua se localiza abajo de esta cota. Además existe una desproporción importante en la densidad poblacional de las diferentes entidades federativas con la particularidad de que los recursos humanos se han polarizado en la zona central del país, donde los recursos naturales son relativamente escasos, mientras que en otras regiones se registra el fenómeno inverso.

La Figura 1.1 muestra cómo la población de nuestro país presenta una muy marcada tendencia hacia la urbanización. La agudización de la concentración de habitantes por la inmigración proveniente de zonas rurales es alarmante, reviviendo en muchos casos problemas que ya se consideraban resueltos, sobre todo lo que toca a la dotación de servicios públicos.

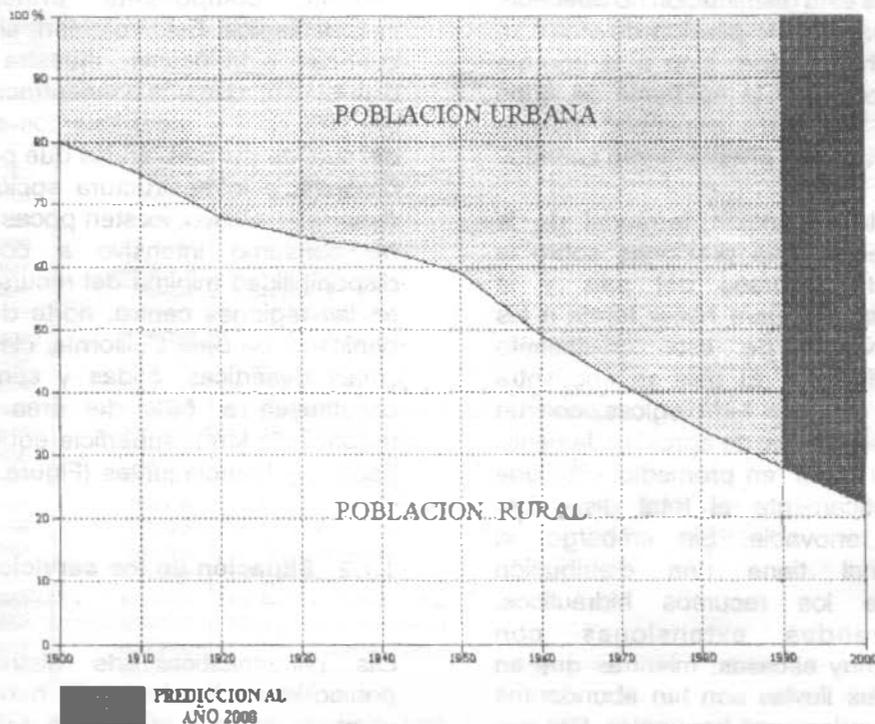
La precipitación media anual en el país se estima en 77.7 cm de lluvia, lo que equivale a 1.53 billones de metros cúbicos anuales, de los que tres cuartas partes se pierden por evaporación o infiltración en acuíferos, siendo el volumen

restante componente principal de los escurrimientos. Este volumen, si se analiza por cuencas hidrológicas, muestra una irregular distribución, con una concentración aproximada del 70% de los escurrimientos en las cuencas del sureste del país, en las que por causas de la orografía, e infraestructura socioeconómica de desarrollo relativo, existen pocas oportunidades de consumo intensivo a corto plazo. La disponibilidad mínima del recurso agua, ocurre en las regiones centro, norte del país y en la península de Baja California, clasificadas como zonas desérticas, áridas y semiáridas y que constituyen el 56% del área del país (1.1 millones de km²), superficie equivalente a la de España y Francia juntas (Figura 1.2).

1.1.2 Situación de los servicios

Las características de distribución de la población nacional que se han descrito en el apartado anterior, se reflejan en la cobertura de los servicios de abastecimiento de agua potable y alcantarillado en el país. Los avances logrados en este terreno por la multiplicación de las obras de infraestructura no han impedido que todavía en la actualidad sean numerosos los habitantes que carecen de por lo menos uno de estos servicios. Las cifras disponibles para 1994 indican que un 13% de la población total no cuenta con un sistema formal de abastecimiento de agua potable y que 30% no cuenta con alcantarillado (Fuente: Comisión Nacional del Agua).

La solución a la carencia de servicios en las colonias populares de las zonas urbanas, no debe limitarse a la introducción de redes de agua potable y alcantarillado, sino ligarse al problema global del abastecimiento a la ciudad, al de las redes principales de distribución, y al de los colectores principales del sistema de alcantarillado. Con frecuencia, la sola introducción de redes ha sido contraproducente, propiciando la justa irritación de la población que se encuentra con tomas sin agua o con un servicio deficiente y escaso.



Gráfica elaborada a partir de datos del INEGI y del Plan Nacional Hidráulico.

Figura 1.1. México: Población urbana y rural (1900 - 1985).

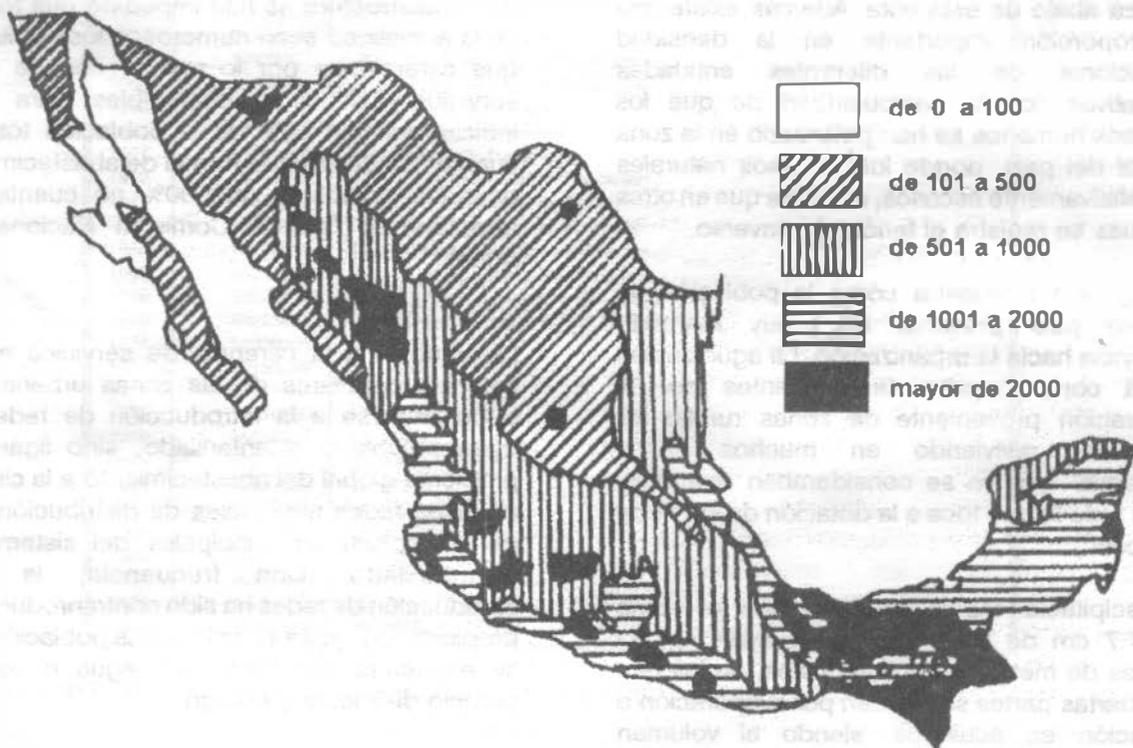
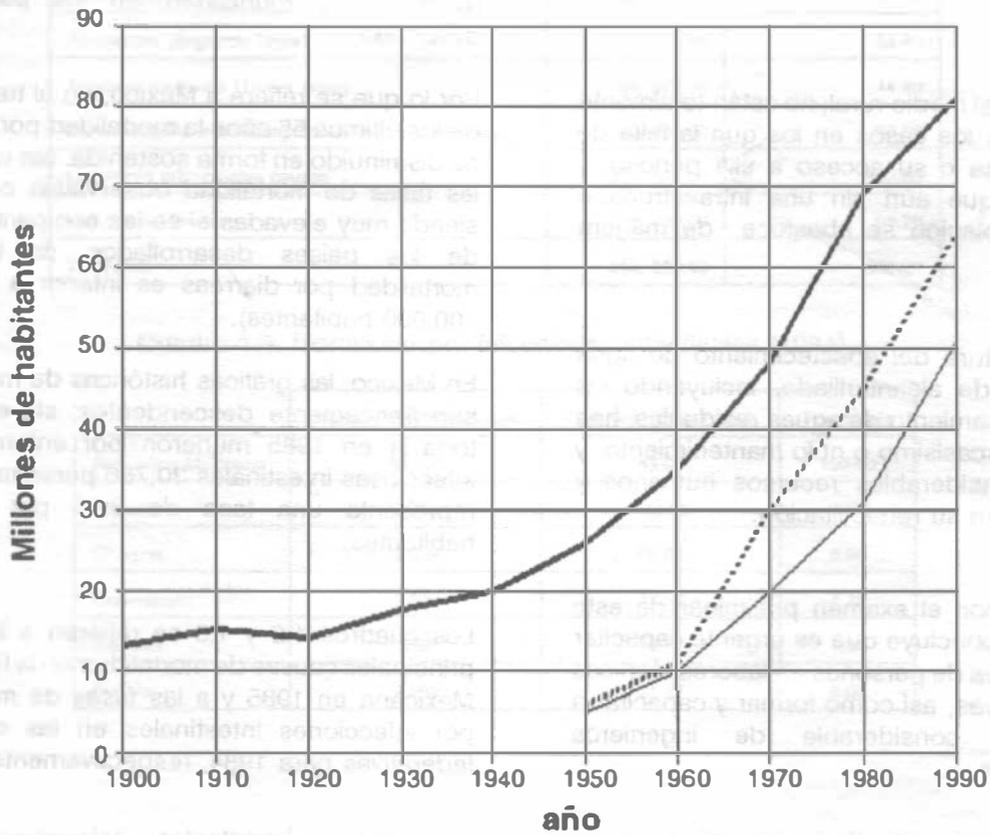


Figura 1.2. Precipitación media anual en mm.



| | |
|-------|---|
| — | Población total |
| | Población total servida con drenaje |
| — | Población total servida con agua entubada |

Figura 1.3. Población servida con agua potable y alcantarillado en la República Mexicana.

Los porcentajes de cobertura mencionados no revelan la calidad del servicio, el cual en muchos casos es intermitente y no se cuenta con datos sobre la calidad del agua, que generalmente no se desinfecta.

Con respecto al medio rural, no están totalmente caracterizados los casos en los que la falta de agua es aguda o su acceso a ella penoso, y aquellos en que aún sin una infraestructura formal, la población se abastece de manera aceptable.

La infraestructura del abastecimiento de agua potable y la de alcantarillado, incluyendo las plantas de tratamiento de aguas residuales, han recibido un escasísimo o nulo mantenimiento, y requieren considerables recursos humanos y materiales para su rehabilitación.

De acuerdo con el examen preliminar de este problema se concluye que es urgente capacitar a muchos miles de personas en labores técnicas y administrativas, así como formar y capacitar a un número considerable de ingenieros especializados.

1.1.3 El abastecimiento de agua potable y su relación con la salud pública.

Históricamente, a los servicios de agua potable y alcantarillado se les ha inscrito en el campo de la salud pública. La razón es que, siendo el agua fuente de vida, también es paradójicamente, vehículo para la transmisión de gérmenes patógenos, causantes de enfermedades tales como el cólera, la tifoidea, la disentería y las parasitosis intestinales. La salud humana depende no sólo de la cantidad de agua suministrada, sino principalmente de su calidad; según la Organización Mundial de la Salud (OMS), "casi la cuarta parte de las camas disponibles en todos los hospitales del mundo están ocupadas por enfermos cuyas dolencias se deben a la insalubridad del agua".

Los microorganismos patógenos transmitidos

directamente por ingestión o uso del agua en poblaciones que carecen de un sistema municipal de abastecimiento de agua potable, constituyen una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en los países en desarrollo.

Por lo que se refiere a México, en el transcurso de los últimos 55 años la mortalidad por diarreas ha disminuido en forma sostenida. Sin embargo, las tasas de mortalidad observadas continúan siendo muy elevadas si se les compara con las de los países desarrollados (la tasa de mortalidad por diarreas es inferior a uno por 100,000 habitantes).

En México, las gráficas históricas de mortalidad son francamente descendentes; sin embargo, todavía en 1985 murieron por enfermedades infecciosas intestinales 30,786 personas, lo que representa una tasa de 39,5 por 100,000 habitantes.

Los cuadros 1.2 y 1.3 se refieren a las veinte principales causas de mortalidad en la República Mexicana en 1985 y a las tasas de mortalidad por infecciones intestinales en las entidades federativas para 1984, respectivamente.

En el cuadro 1.2 se observa que las enfermedades infecciosas ocuparon el cuarto lugar de mortalidad con una tasa de 39.5 por 100,000 habitantes. En el cuadro 1.3 se muestra que las tasas más altas de mortalidad por infecciones intestinales en 1984, se registraron en los Estados de Oaxaca, Chiapas, Guanajuato, Tlaxcala y Puebla, con valores muy superiores al promedio nacional. En dichas entidades federativas las condiciones de saneamiento son deficientes.

Debe resaltarse que aunque los servicios sanitarios tienen un papel de primera importancia, otros factores influyen en la configuración del cuadro descrito, como son la inequitativa distribución del ingreso por regiones y sectores de la población, los deficientes niveles de nutrición y los bajos índices de educación.

Cuadro 1.2. Principales causas de mortalidad en la República Mexicana, (1985).

| | DEFUNCIONES | TASA/100.000 HAB. |
|---|-------------|-------------------|
| Enfermedades del corazón (Primer Lugar) | 52, 174.00 | 66.90 |
| Accidentes (Segundo lugar) | 45, 504.00 | 58.40 |
| Tumores maligno (Tercer lugar) | 34, 974.00 | 44.90 |
| Enfermedades infecciosas intestinale (Cuarto lugar) | 30, 786.00 | 39.50 |
| Las veinte principale cau | 337, 067.00 | 432.50 |
| Las demás causas | 78, 936.00 | 98.70 |
| TOTALES | 414, 003.00 | 531.20 |

Cuadro 1.3. Mortalidad por infecciones intestinales (1984).

| | Número de defunciones | Tasa por 100.000 hab. | Porcentaje |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|------------|
| República Mexicana | 33,533 | 43.67 | 100.00 |
| Oaxaca | 3,790 | 149.30 | 11.30 |
| Chiapas | 2,323 | 99.69 | 6.90 |
| Guanajuato | 2,608 | 77.58 | 7.70 |
| Tlaxcala | 459 | 74.77 | 1.30 |
| Puebla | 2,680 | 71.87 | 8.00 |

1.2 Dependencias relacionadas con la planeación, proyecto, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable.

En 1948, la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) asume la responsabilidad de administrar los servicios de abastecimiento de agua potable y alcantarillado a través de las Juntas Federales de Agua Potable; en ellas se alcanzó un cierto grado de descentralización y participación ciudadana por lo que la SRH intentó entonces la entrega de las obras a los usuarios.

A finales de 1976, las funciones y los recursos humanos de la SRH y de la Comisión Constructora de la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), abocada hasta entonces a la realización de las obras en el medio rural,

pasaron a la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), conservando la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) aquellas obras cuya magnitud y complejidad técnica requerían de su atención directa. Se creó así una división artificial entre lo que se llamó "obras de abastecimiento de agua en bloque" y el resto de las que componen un sistema de agua potable y alcantarillado.

En 1980, el Ejecutivo Federal por medio de la SAHOP, entregó la responsabilidad de la operación de los sistemas a los gobiernos estatales; éstos a su vez, en algunos casos la pasaron a los municipios. Con frecuencia, la carencia de recursos en los gobiernos municipales, propició utilizar en otras necesidades los fondos provenientes del cobro por el servicio de agua potable. La

descapitalización resultante y un manejo temeroso para establecer las tarifas, propiciaron que los sistemas de agua potable se convirtieran en demandantes de subsidios, incluso para la operación.

A partir de 1982, la responsabilidad de la intervención federal pasó a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), la cual descentralizó también la construcción de las obras, cumpliendo las funciones de agente técnico en las obras realizadas con créditos internacionales. La SARH continuó encargada de las obras de abastecimiento de agua en bloque cuando, acordado así con los gobiernos estatales, se considerase conveniente que los proyectos y obras fuesen ejecutados por el Gobierno Federal.

Desde 1983, las reformas y adiciones al Artículo 115 Constitucional establecen la responsabilidad de los municipios en la prestación de los servicios.

Como responsable a nivel nacional de la administración integral de los recursos hidráulicos y el cuidado de la conservación de su calidad, en enero de 1989 se creó la Comisión Nacional del Agua (CNA) como órgano administrativo desconcentrado de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). La CNA tiene además a su cargo las actividades de planeación y excepcionalmente construcción, operación y conservación de obras hidráulicas, así como fundamentalmente de apoyo técnico a las autoridades estatales, locales y organismos operadores de los sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado.

Esta Comisión se ha formado como instrumento para llevar a cabo el manejo integral del gasto, el financiamiento y el ingreso; es por eso que, en materia de infraestructura hidráulica urbana e industrial, resaltan dentro de sus atribuciones: a) definir, establecer y vigilar las políticas y la normatividad en materia de agua potable, alcantarillado y saneamiento; y b) intervenir en la

dotación de agua a los centros de población, industriales y turísticos.

A nivel regional se han establecido seis gerencias de la CNA que abarcan todo el territorio nacional, las cuales ejercen en su ámbito las atribuciones similares a las unidades administrativas a nivel central, delegando funciones en las Gerencias Estatales residenciadas en cada capital de las Entidades Federativas.

Por su parte, la Secretaría de Salud como dependencia responsable de la salud de los mexicanos, ejerce una coordinación con dependencias federales y estatales en materia de sanidad. De acuerdo con la legislación nacional, corresponde a la Secretaría de Salud emitir las normas técnicas para el tratamiento del agua, establecer criterios sanitarios para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales. Finalmente, corresponde a la Secretaría de Desarrollo Social (antes SEDUE) entre otras atribuciones, formular y conducir la política de saneamiento ambiental, y regular el alojamiento, la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas residuales.

Estas tres dependencias están coordinadas a nivel federal y estatal por sus respectivos titulares.

DESCRIPCION GENERAL DE LOS SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Generalidades

Se considera agua potable o agua apta para consumo humano, toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud. Se considera que no causa efectos nocivos a la salud cuando se encuentra libre de gérmenes patógenos y de sustancias tóxicas, y cumpla además con los requisitos que se señalan en el Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios y en la Norma Oficial Mexicana correspondiente. Las descargas de excreta de enfermos o portadores contienen los agentes biológicos que son responsables de que la enfermedad se extienda por medio del agua; el portador puede no darse cuenta de que está infectado. Por estas razones es muy importante tomar precauciones con el agua desde que se extrae del medio natural, hasta que se le descarga de nueva cuenta ya usada en el ambiente. La Figura 2.1 muestra la configuración de un sistema hidráulico urbano, que tiene por objeto evitar la propagación de enfermedades infecciosas mediante el adecuado tratamiento y disposición de los desechos humanos y con la potabilización de los suministros de agua.

En la Figura 2.1 se observa que las partes de que consta un sistema hidráulico urbano son las siguientes: fuente, captación, conducción, tratamiento de potabilización, conducción, regularización, distribución, recolección, conducción, tratamiento del agua residual y disposición. El sistema de abastecimiento de agua potable es un subsistema del sistema

hidráulico urbano y está integrado por los siguientes elementos (Figura 2.2): fuente, captación, conducción, tratamiento de potabilización, regularización y distribución. A continuación se describe la función de cada uno de los componentes del sistema de abastecimiento de agua potable.

2.1 FUENTES DE ABASTECIMIENTO

El origen de las fuentes de que se sirve el hombre para su desenvolvimiento cotidiano es el Ciclo Hidrológico, o sea, los pasos del agua circulando durante el transcurso del tiempo a través de distintos medios (Fig. 2.3). Tomando como punto de partida la evaporación del agua en la superficie del océano, el agua en estado gaseoso circula con la atmósfera presentando desplazamientos vertical y horizontal. En la atmósfera se condensa y se precipita nuevamente a la superficie: tres cuartas partes al mismo océano y un poco menos de la cuarta parte a la superficie continental. En el océano y en el continente inicia nuevamente el paso de evaporación y en la superficie continental llena lagos, se infiltra en el terreno y circula dentro de él para aflorar en áreas de menor elevación o hasta volver subterráneamente al mar, se retiene en la vegetación y finalmente escurre superficialmente y forma cauces desembocando en lagos o vasos de almacenamiento artificiales para su regulación a fin de usarla, o controlar los caudales de escurrimiento para su uso; de la superficie del terreno se produce la evaporación de agua que transporta la atmósfera junto con la que transpiran los organismos animales y vegetales y el resto vuelve al mar.

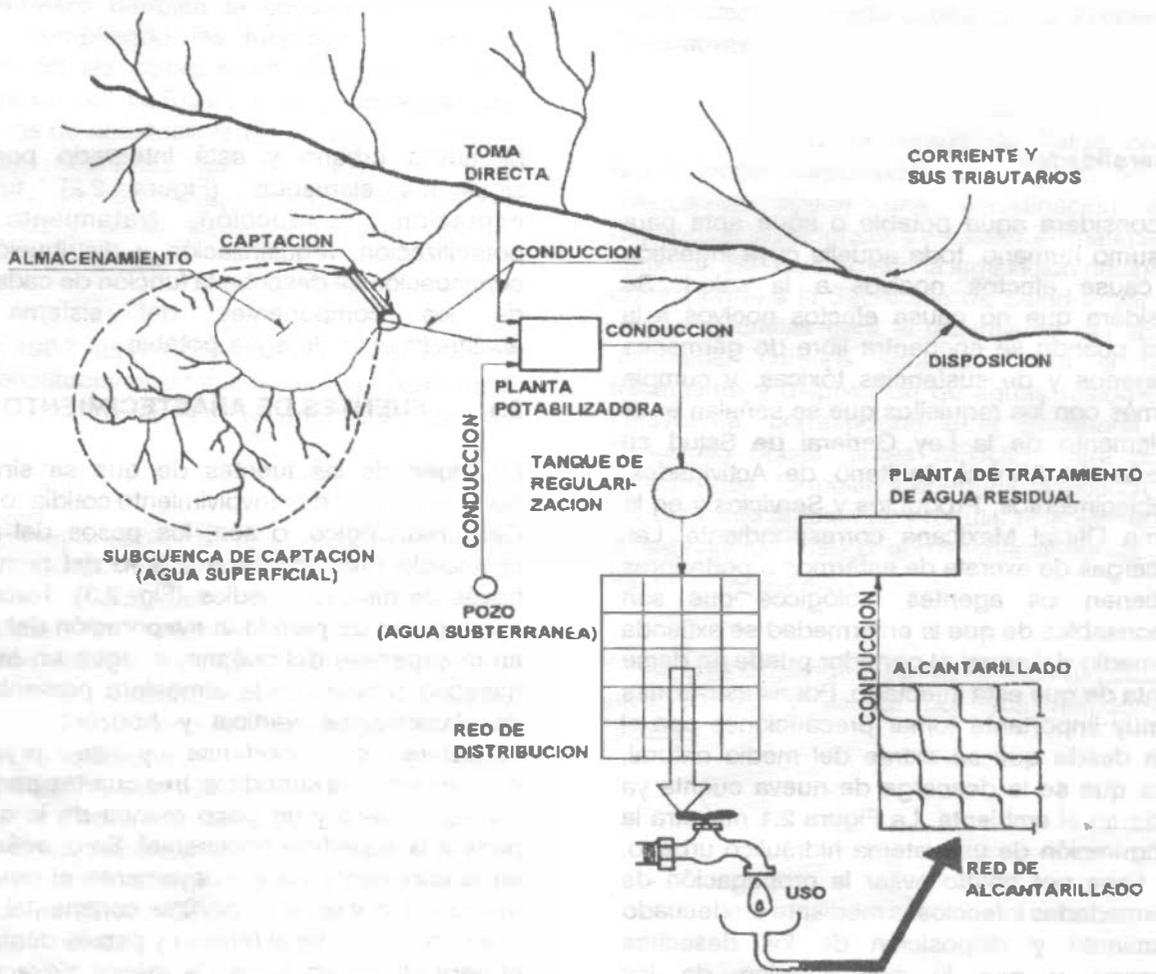


Figura 2.1. Configuración general de un sistema hidráulico urbano.

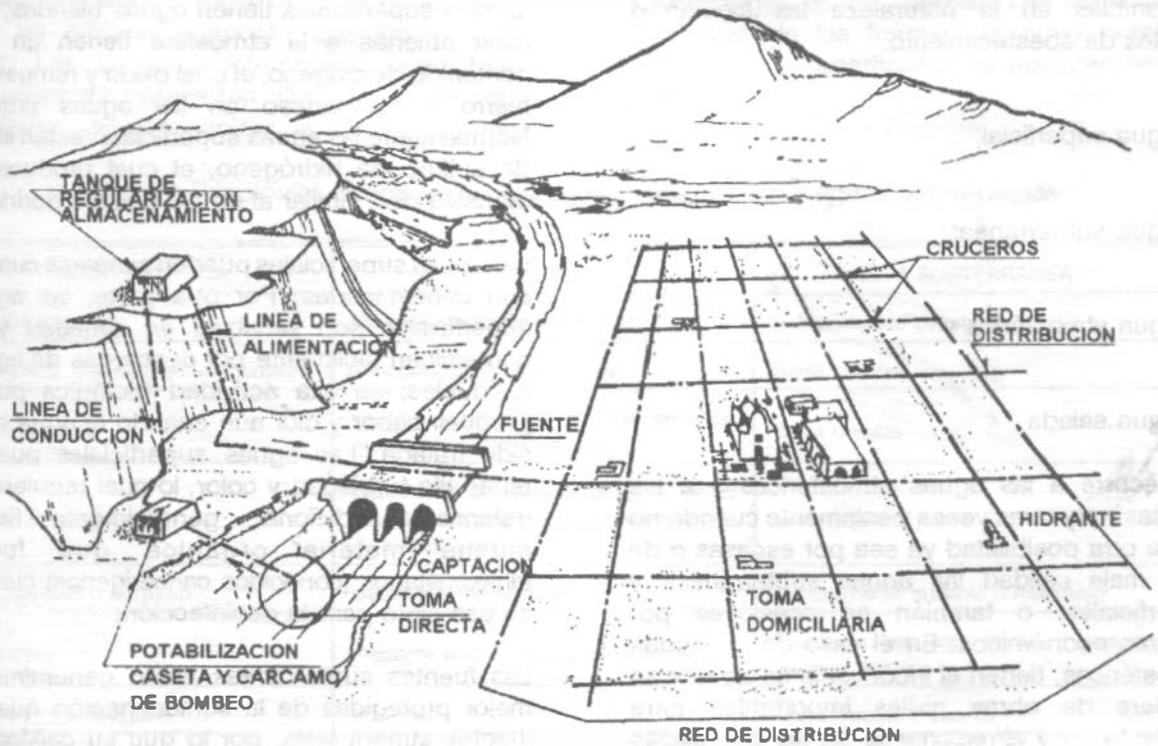


Figura 2.2. Esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable.



Figura 2.3. Ciclo hidrológico.

Así, gracias al ciclo hidrológico, se encuentran disponibles en la naturaleza las siguientes fuentes de abastecimiento:

- a) Agua superficial;
- b) Agua subterránea;
- c) Agua atmosférica y
- d) Agua salada

Se recurre a las aguas atmosféricas y a las saladas muy raras veces y solamente cuando no existe otra posibilidad ya sea por escasas o de muy mala calidad las aguas subterráneas y superficiales, o también en ocasiones por factores económicos. En el caso de las aguas atmosféricas, tienen el inconveniente de que se requiere de obras civiles importantes para recolectarlas y almacenarlas en las cantidades requeridas, por lo que sólo podrán emplearse en poblaciones muy pequeñas. Para las aguas saladas, la Ingeniería Sanitaria ha desarrollado nuevas tecnologías que permiten desalarla para ser utilizada como fuente de abastecimiento de agua potable, pero por su alto costo de inversión, operación y mantenimiento, tales tecnologías resultan prohibitivas en nuestro medio y solo se aplican en casos excepcionales.

Por lo tanto, hay dos grandes fuentes de abastecimiento de agua potable: las aguas superficiales y las aguas subterráneas. Cada una de ellas tienen diferentes características que pueden verse en el Cuadro 2.1. Es importante destacar que el abastecimiento de agua potable no depende solamente de qué fuente esté disponible, sino también de la cantidad y calidad del agua.

Las aguas superficiales incluyen ríos, lagos y acuíferos superficiales que no estén confinados. Algunas ventajas obvias de las aguas superficiales son su disponibilidad y que están visibles; son fácilmente alcanzadas para el abastecimiento y su contaminación puede ser

removida con relativa facilidad. Generalmente las fuentes superficiales tienen aguas blandas; por estar abiertas a la atmósfera tienen un alto contenido de oxígeno, el cual oxida y remueve el hierro y manganeso en las aguas crudas. Normalmente las aguas superficiales están libres de sulfuro de hidrógeno, el cual produce un ofensivo olor, similar al de los huevos podridos.

Las aguas superficiales pueden sanearse cuando son contaminadas. Por otra parte, las aguas superficiales son variables en cantidad y se contaminan fácilmente por descargas de aguas residuales; su alta actividad biológica puede producir sabor y olor aún cuando el agua haya sido tratada. Las aguas superficiales pueden tener alta turbiedad y color, lo cual requiere un tratamiento adicional; generalmente tienen mucha materia orgánica que forma trihalometanos (conocidos cancerígenos) cuando se usa cloro para la desinfección.

Las fuentes subterráneas están generalmente mejor protegidas de la contaminación que las fuentes superficiales, por lo que su calidad es más uniforme. El color natural y la materia orgánica son más bajos en las aguas subterráneas que en las superficiales, de allí que el tratamiento para remoción de color no lo requieren; esto al mismo tiempo significa que los trihalometanos son bajos en las aguas tratadas producidas a partir de aguas subterráneas. Es menos probable que las aguas subterráneas tengan sabor y olor, contaminación producida por actividad biológica. Las aguas subterráneas no son corrosivas porque el bajo contenido de oxígeno disuelto en ellas, reduce la posibilidad de que entre en juego la media reacción química necesaria a la corrosión.

Las desventajas del agua subterránea incluyen la comparativa inaccesibilidad de estas fuentes; las concentraciones de sulfuro de hidrógeno son producidas en un ambiente de bajo oxígeno y estas son las condiciones típicas encontradas en las aguas subterráneas. Las características reductoras de estas aguas, solubilizan al hierro y manganeso, los cuales al entrar en contacto con el oxígeno durante el consumo del agua, forman precipitados que tienden a manchar la superficie de los muebles sanitarios.

Una vez que los acuíferos se contaminan, no existe un método conocido que los pueda limpiar. Las aguas subterráneas presentan frecuentemente dureza tan alta que deben ser ablandadas para minimizar la formación de

incrustaciones en las tuberías. Las ventajas y desventajas de las fuentes de agua potable subterráneas y superficiales se resumen en el Cuadro 2.2.

Cuadro 2.1 Principales diferencias entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

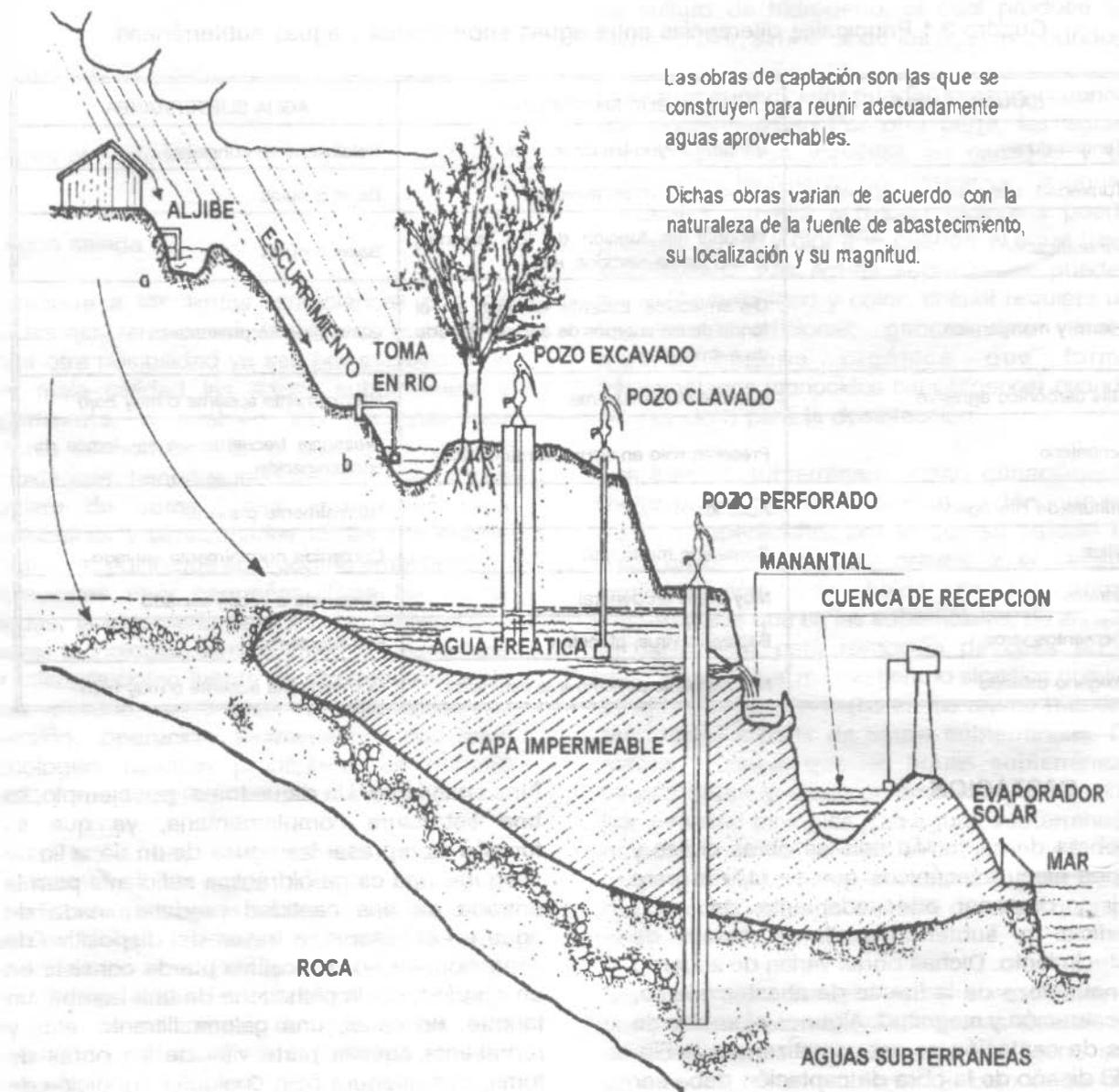
| CARACTERÍSTICA | AGUA SUPERFICIAL | AGUA SUBTERRÁNEA |
|------------------------------------|--|---|
| Temperatura | Variable según las estaciones | Relativamente constante |
| Turbiedad, materias en suspensión. | Variabes, a veces elevadas | Bajas o nulas |
| Mineralización | Variable en función de los terrenos, precipitación, vertidos, etc. | Bajas o nulas |
| Hierro y manganeso | Generalmente ausente excepto en el fondo de los cuerpos de agua en estado de eutroficación | Generalmente presentes. |
| Gas carbónico agresivo | Generalmente ausente | Normalmente ausente o muy bajo |
| Amoniaco | Presente sólo en aguas contaminadas | Presencia frecuente sin ser índice de contaminación |
| Sulfuro de Hidrógeno | Ausente | Normalmente presente |
| Silice | Contenido moderado | Contenido normalmente elevado |
| Nitros | Muy bajos en general | Contenido a veces elevado |
| Elementos vivos | Bacterias, virus, plancton | Ferobacterias |
| Oxígeno disuelto | Normalmente próximo a la saturación | Normalmente ausente o muy bajo |

2.2 CAPTACION

Las obras de captación son las obras civiles y equipos electromecánicos que se utilizan para reunir y disponer adecuadamente del agua superficial o subterránea de la fuente de abastecimiento. Dichas obras varían de acuerdo a la naturaleza de la fuente de abastecimiento, su localización y magnitud. Algunos ejemplos de obras de captación se esquematizan en la Fig. 2.4. El diseño de la obra de captación debe ser tal que se prevean las posibilidades de contaminación del agua, para evitarlas.

Es necesario desglosar al término general de "obras de captación" en el dispositivo de captación propiamente dicho y las estructuras complementarias que hacen posible su buen

funcionamiento. Un dique toma, por ejemplo, es una estructura complementaria, ya que su función es represar las aguas de un río, a fin de asegurar una carga hidráulica suficiente para la entrada de una cantidad determinada de agua en el sistema, a través del dispositivo de captación. Dicho dispositivo puede consistir en un simple tubo, la pichancha de una bomba, un tanque, un canal, una galería filtrante, etc., y representa aquella parte vital de las obras de toma, que asegura bajo cualquier condición de régimen, la captación de las aguas en la cantidad y calidad previstas. Mientras los requisitos primordiales del dique son la estabilidad y durabilidad, el mérito principal de los dispositivos de captación radica en su buen funcionamiento hidráulico.



Las obras de captación son las que se construyen para reunir adecuadamente aguas aprovechables.

Dichas obras varían de acuerdo con la naturaleza de la fuente de abastecimiento, su localización y su magnitud.

Figura 2.4. Obras de captación.

2.3 CONDUCCION

Se denomina "línea de conducción" a la parte del sistema constituida por el conjunto de conductos, obras de arte y accesorios destinados a transportar el agua procedente de la fuente de abastecimiento, desde el lugar de la captación hasta un punto que puede ser un tanque de regularización, a un cárcamo para una segunda conducción, o a una planta potabilizadora.

Fue precisamente la necesidad de conducir el agua a lugares apartados, lo que dió lugar a los acueductos de tipo romano. La imposibilidad, en aquellos tiempos lejanos, de conducir el agua a presión, obligó a realizar obras de ingeniería, verdaderas obras de arte, para conducir el agua por gravedad con pendientes hidráulicas muy pequeñas, en forma de canal cerrado o abierto. El suministro de agua para la antigua Roma llegaba a la ciudad por diferentes acueductos, ya en el año 100 de nuestra era. Hace más de 1800 años, los romanos tenían más de 430 kilómetros de sistemas de conducción de agua que abastecían a toda la ciudad.

Estos acueductos conducían el agua a través de túneles en las montañas y estaban soportados por enormes arcos de piedra en los valles. Uno de los últimos acueductos romanos, construido alrededor del año 700 tiene cerca de 100 metros de altura. Los romanos también construían acueductos en los países que conquistaban. Uno de ellos, construido en Segovia, España, el año 109 de nuestra era, todavía suministra agua a buena parte de la ciudad.

En México son clásicos tres ejemplos de obras de conducción de gran magnitud recientes: el acueducto para la conducción de las aguas del Sistema Lerma (60.117 km); el acueducto "Linares-Monterrey" y las obras del Sistema Cutzamala. La etapa del acueducto "Linares-Monterrey" que empezó a funcionar en 1984, está compuesta por una línea de conducción de tubería de 2.10 m de diámetro y 135 km de longitud, más una conexión a la Presa de la Boca de 5 km, 113 km de esta conducción son de tubería de concreto; incluidas

una serie de estructuras especiales de cruce con los ríos, arroyos y vías de comunicación, se instalaron 25 km de tubería de acero.

Por su parte, el Sistema Cutzamala, cuyo caudal es conducido hasta el área metropolitana de la Ciudad de México, cuenta con 6 plantas de bombeo, 2 acueductos paralelos de 100 km cada uno, 2 tunéles con longitud de 19 km y un canal cubierto de 7.5 km de longitud.

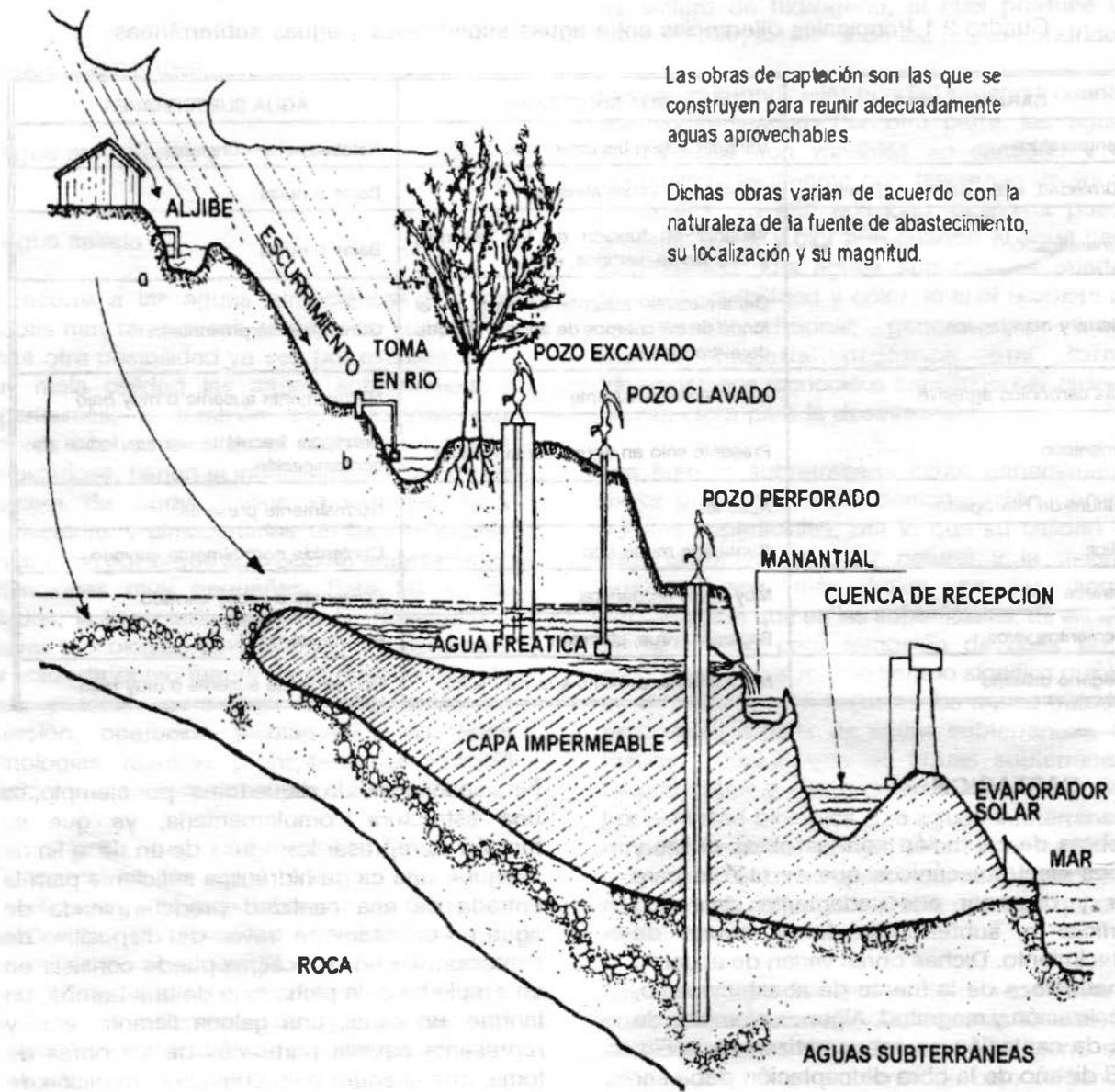
2.4 TRATAMIENTO

El término "tratamiento", se refiere a todos aquellos procesos que de una u otra manera sean capaces de alterar favorablemente las condiciones de un agua. El tratamiento no está, en general, constituido por un sólo proceso, sino que será necesario, de acuerdo con las características propias del agua cruda, integrar un "tren de procesos" esto es, una serie de procesos capaz de proporcionar al agua las distintas características de calidad que sea necesario para hacerla apta para su utilización. Cuando el tratamiento que se le da al agua es con el fin de hacerla apta para la bebida, se le llama "potabilización" a este tratamiento y "planta potabilizadora" a la obra de ingeniería civil en la que se construyen las unidades necesarias para producir el agua potable.

Son tres los objetivos principales de una planta potabilizadora; proporcionar agua:

1. Segura para consumo humano
2. Estéticamente aceptable y
3. Económica.

En grado significativo, cuanto más sea protegida la fuente, será menor el tratamiento requerido; así, dicha protección juega un papel primordial en la consecución de los objetivos anteriores.



Las obras de captación son las que se construyen para reunir adecuadamente aguas aprovechables.

Dichas obras varían de acuerdo con la naturaleza de la fuente de abastecimiento, su localización y su magnitud.

Figura 2.4. Obras de captación.

2.3 CONDUCCION

Se denomina "línea de conducción" a la parte del sistema constituida por el conjunto de conductos, obras de arte y accesorios destinados a transportar el agua procedente de la fuente de abastecimiento, desde el lugar de la captación hasta un punto que puede ser un tanque de regularización, a un cárcamo para una segunda conducción, o a una planta potabilizadora.

Fue precisamente la necesidad de conducir el agua a lugares apartados, lo que dió lugar a los acueductos de tipo romano. La imposibilidad, en aquellos tiempos lejanos, de conducir el agua a presión, obligó a realizar obras de ingeniería, verdaderas obras de arte, para conducir el agua por gravedad con pendientes hidráulicas muy pequeñas, en forma de canal cerrado o abierto. El suministro de agua para la antigua Roma llegaba a la ciudad por diferentes acueductos, ya en el año 100 de nuestra era. Hace más de 1800 años, los romanos tenían más de 430 kilómetros de sistemas de conducción de agua que abastecían a toda la ciudad.

Estos acueductos conducían el agua a través de túneles en las montañas y estaban soportados por enormes arcos de piedra en los valles. Uno de los últimos acueductos romanos, construido alrededor del año 700 tiene cerca de 100 metros de altura. Los romanos también construían acueductos en los países que conquistaban. Uno de ellos, construido en Segovia, España, el año 109 de nuestra era, todavía suministra agua a buena parte de la ciudad.

En México son clásicos tres ejemplos de obras de conducción de gran magnitud recientes: el acueducto para la conducción de las aguas del Sistema Lerma (60.117 km); el acueducto "Linares-Monterrey" y las obras del Sistema Cutzamala. La etapa del acueducto "Linares-Monterrey" que empezó a funcionar en 1984, está compuesta por una línea de conducción de tubería de 2.10 m de diámetro y 135 km de longitud, más una conexión a la Presa de la Boca de 5 km, 113 km de esta conducción son de tubería de concreto; incluidas

una serie de estructuras especiales de cruce con los ríos, arroyos y vías de comunicación, se instalaron 25 km de tubería de acero.

Por su parte, el Sistema Cutzamala, cuyo caudal es conducido hasta el área metropolitana de la Ciudad de México, cuenta con 6 plantas de bombeo, 2 acueductos paralelos de 100 km cada uno, 2 túneles con longitud de 19 km y un canal cubierto de 7.5 km de longitud.

2.4 TRATAMIENTO

El término "tratamiento", se refiere a todos aquellos procesos que de una u otra manera sean capaces de alterar favorablemente las condiciones de un agua. El tratamiento no está, en general, constituido por un sólo proceso, sino que será necesario, de acuerdo con las características propias del agua cruda, integrar un "tren de procesos" esto es, una serie de procesos capaz de proporcionar al agua las distintas características de calidad que sea necesario para hacerla apta para su utilización. Cuando el tratamiento que se le da al agua es con el fin de hacerla apta para la bebida, se le llama "potabilización" a este tratamiento y "planta potabilizadora" a la obra de ingeniería civil en la que se construyen las unidades necesarias para producir el agua potable.

Son tres los objetivos principales de una planta potabilizadora; proporcionar agua:

1. Segura para consumo humano
2. Estéticamente aceptable y
3. Económica.

En grado significativo, cuanto más sea protegida la fuente, será menor el tratamiento requerido; así, dicha protección juega un papel primordial en la consecución de los objetivos anteriores.

La planta potabilizadora puede ser diseñada para tratar agua cruda de cualquier tipo de fuente. Dependiendo de la calidad del agua cruda y de la calidad final deseada para el agua tratada, serán necesarios uno o más procesos. En la Figura 2.5 se presenta un diagrama de flujo de planta de tratamiento convencional para agua potable que incluye la siguiente secuencia de pasos o "tren de procesos": mezclado, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Básicamente, la idea del tratamiento es coagular las partículas suspendidas que causan turbiedad, sabor, olor y color para que puedan ser removidas por sedimentación y filtración (ver Figura 2.5).

En el mezclado rápido, un coagulante tal como el sulfato de aluminio se agrega al agua cruda y se mezcla vigorosamente por un corto lapso. El coagulante envuelve las partículas coloidales, las cuales aumentan de tamaño cuando entran en contacto por efecto del turbulento mezclado; a estas partículas coloidales unidas por fuerzas químicas se les denomina micro- flóculos, o núcleos de flóculo. Resulta esencial en esta etapa obtener una dispersión rápida y uniforme del coagulante para asegurar una reacción completa.

En el tanque de floculación, el agua que proviene del mezclado rápido se agita lentamente por un período prolongado propiciando que las partículas coaguladas submicroscópicas (micro-flóculos) se unan entre sí para constituir aglomerados plenamente visibles. Estas partículas llamadas flóculos son suficientemente pesadas para sedimentarse a una velocidad rápida o pueden ser removidas de la suspensión por filtración. A los fenómenos que se suceden en las etapas de mezclado rápido y floculación se les denomina "coagulación".

Del floculador, el agua se pasa a un Tanque de Sedimentación, donde se retiene por un tiempo de 2 a 4 horas. Aquí los grandes flóculos se sedimentan bajo la acción de la gravedad, para que, posteriormente sean recolectados como lodo y puedan ser tratados y dispuestos fuera del tanque. El efluente del tanque de

sedimentación se dirige entonces a la unidad de filtración.

La unidad de filtración comúnmente usada es denominada Filtro Rápido de Arena, el cual consiste en un estrato de arena cuidadosamente tamizada, de 60 a 76 centímetros de espesor que se coloca sobre una cama de grava graduada de 30 a 45 centímetros de espesor. Los intersticios del estrato de arena son frecuentemente más pequeños que las partículas de flóculos que tienen que ser removidas.

Cuando el filtro reduce su eficiencia por obstrucción de los intersticios se le efectúa un retrolavado para su limpieza en un lapso de 2 a 3 minutos.

Durante la coagulación, sedimentación y filtración, prácticamente todos los sólidos suspendidos, la mayor parte del color y aproximadamente 98% de las bacterias son removidas. Por seguridad, el efluente debe ser desinfectado, usualmente por cloración. La desinfección es el paso final en el tratamiento del agua antes de ser almacenada y distribuida. La cloración es particularmente efectiva contra las bacterias patógenas pero su capacidad para destruir amibas y virus es cuestionable.

Pueden verse en el diagrama de la fig. 2.5 operaciones previas que dependen de la fuente de suministro; así para el agua de río se requiere eliminar sólidos arrastrados por la corriente, mediante sedimentación; para el agua de lagos es necesario remover sólidos arrastrados del fondo del lago por medio de cribado; y por último, para el agua subterránea es necesario en ocasiones eliminar gases disueltos, como el bióxido de carbono por medio de aeración.

El diseño de una planta potabilizadora requiere de un análisis minucioso de la calidad de las aguas y de los procesos, lo cual constituye por sí mismo un curso que escapa a los alcances de estos apuntes.

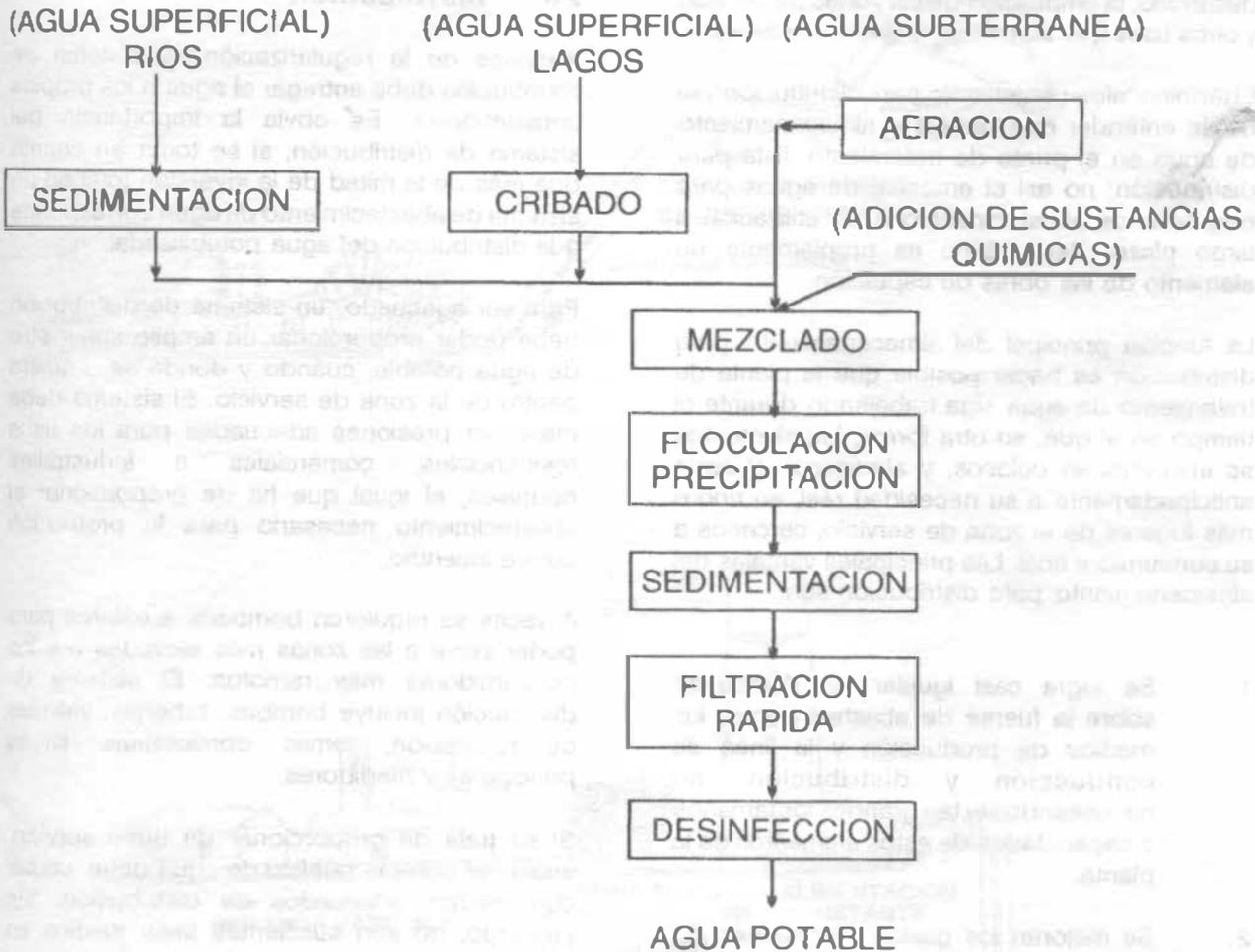


Figura 2.5. Diagrama de flujo de una planta de tratamiento convencional para agua potable.

2.5 ALMACENAMIENTO Y REGULARIZACION

Probablemente, la génesis de los sistemas primitivos de abastecimiento de agua fue la necesidad de almacenarla para contar con un abastecimiento disponible cuando fuera necesario. El almacenamiento es un elemento esencial de cualquier sistema de agua y está adquiriendo mayor importancia al continuar el desarrollo, la ampliación de las zonas de servicio y otros usos que aumentan la demanda de agua.

El término "almacenamiento para distribución", se ha de entender que incluye el almacenamiento de agua en el punto de tratamiento, lista para distribución; no así el embalse de aguas para propósito de abastecimiento o de utilización a largo plazo. Este último es propiamente un elemento de las obras de captación.

La función principal del almacenamiento para distribución es hacer posible que la planta de tratamiento de agua siga trabajando durante el tiempo en el que, en otra forma, los elementos se encontrarían ociosos, y almacenar el agua anticipadamente a su necesidad real, en uno o más lugares de la zona de servicio, cercanos a su consumidor final. Las principales ventajas del almacenamiento para distribución son:

1. Se logra casi igualar las demandas sobre la fuente de abastecimiento, los medios de producción y la línea de conducción y distribución, no necesitando ser tan grandes los tamaños o capacidades de estos elementos de la planta.
2. Se mejoran los gastos y presiones del sistema y se estabilizan mejor para servir a los consumidores en toda la zona de servicios.
3. Se dispone de abastecimiento de reserva en el sistema de distribución para el caso de contingencias tales como la lucha contra incendios y las fallas de la corriente eléctrica.

Por otra parte, la regularización tiene por objeto transformar el régimen de alimentación de agua proveniente de la fuente que generalmente es constante en régimen de demanda que es variable en todos los casos, ya que la población consume agua en forma variada, incrementándose su consumo por la mañana y por la noche, descendiendo en el mediodía y en la madrugada (Figura 2.6).

2.6 DISTRIBUCION

Después de la regularización, el sistema de distribución debe entregar el agua a los propios consumidores. Es obvia la importancia del sistema de distribución, si se toma en cuenta que más de la mitad de la inversión total en un sistema de abastecimiento de agua corresponde a la distribución del agua potabilizada.

Para ser adecuado, un sistema de distribución debe poder proporcionar un amplio suministro de agua potable, cuándo y dónde se requiera dentro de la zona de servicio. El sistema debe mantener presiones adecuadas para los usos residenciales, comerciales e industriales normales, al igual que ha de proporcionar el abastecimiento necesario para la protección contra incendio.

A veces se requieren bombeos auxiliares para poder servir a las zonas más elevadas o a los consumidores más remotos. El sistema de distribución incluye bombas, tuberías, válvulas de regulación, tomas domiciliarias, líneas principales y medidores.

Si se trata de proporcionar un buen servicio, cualquier sistema público de agua debe contar con medios adecuados de distribución. Sin embargo, no son suficientes tales medios en forma aislada; la persona o personas responsables de la distribución deben estar familiarizados con los medios y métodos para su diseño, construcción y mantenimiento, temas que serán tratados en los próximos capítulos.

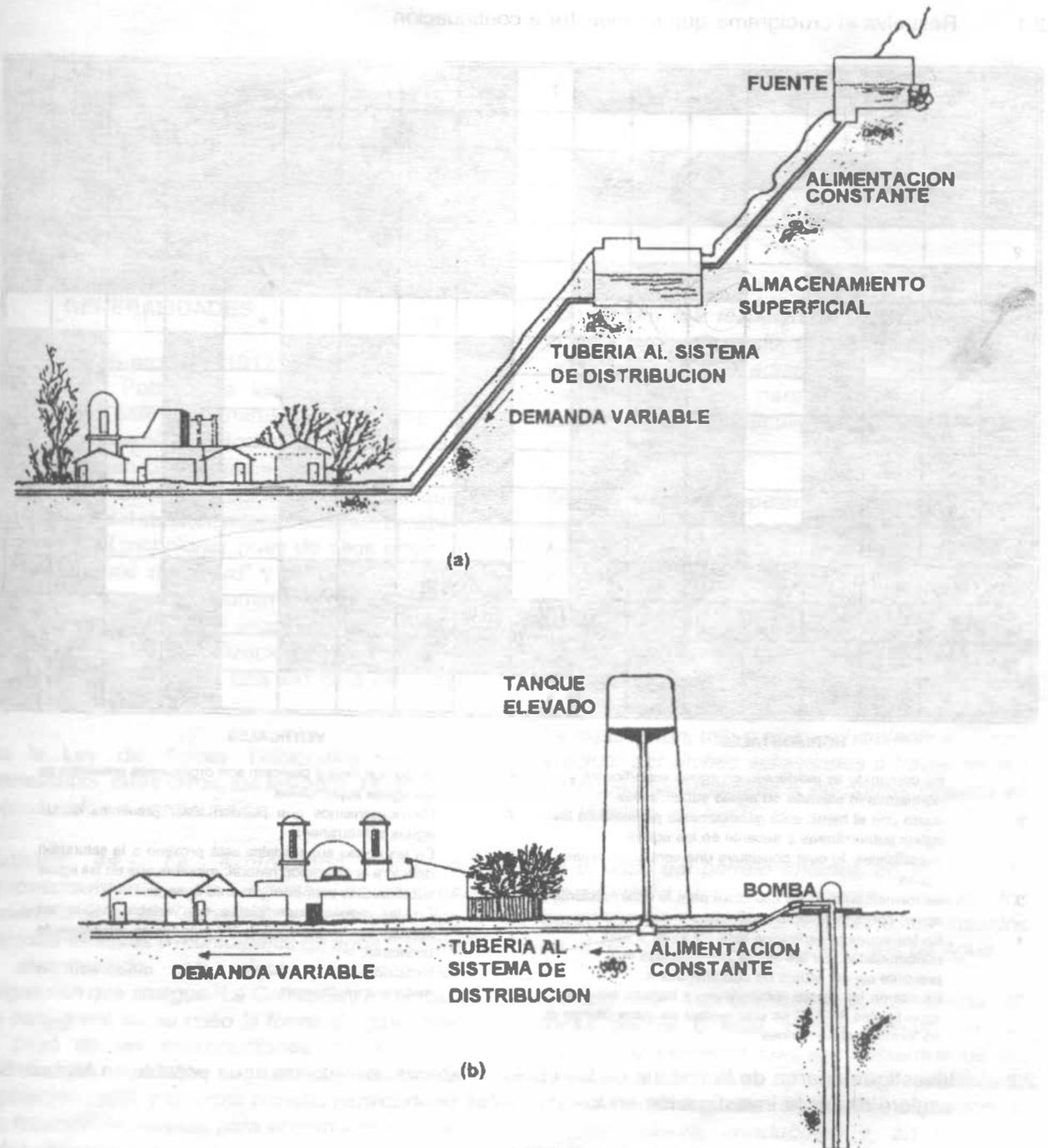
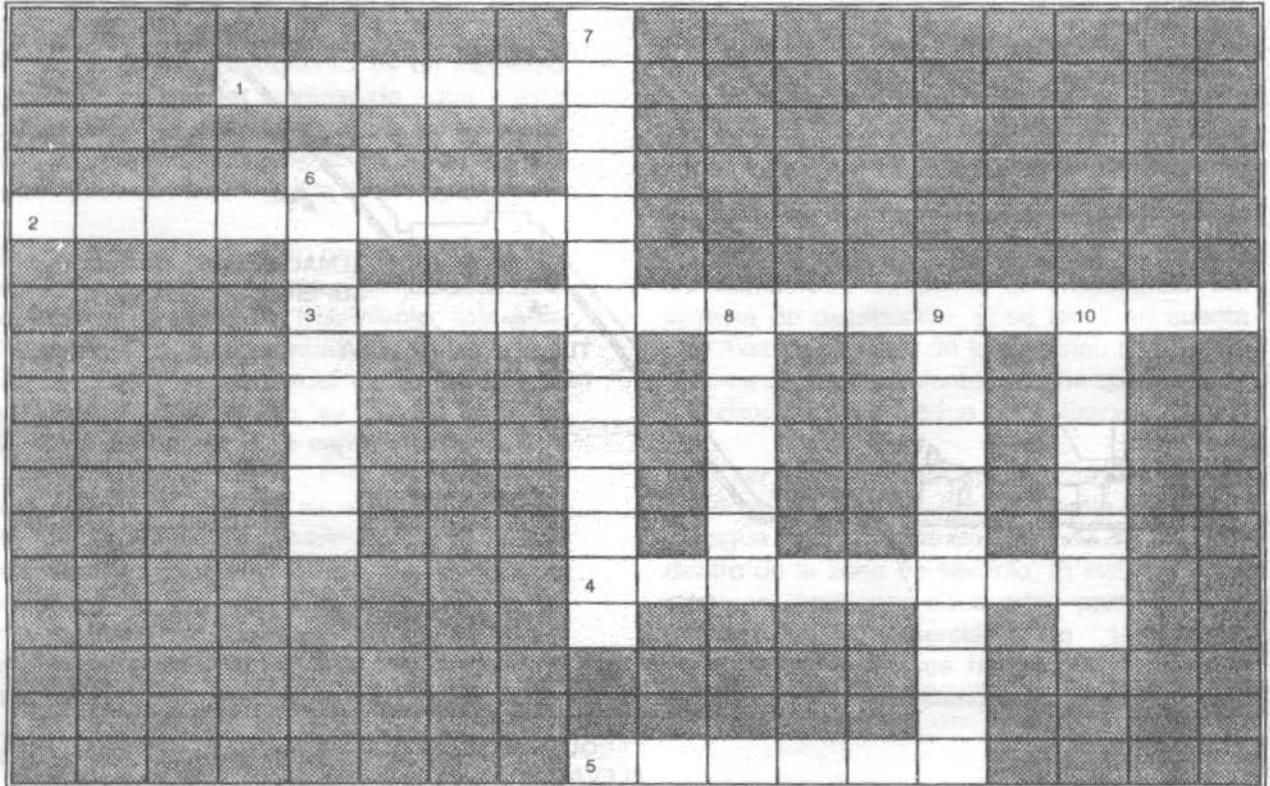


Figura 2.6. a) Depósito Superficial, b) Depósito elevado.

Problemas

2.1 Resuelva el crucigrama que se muestra a continuación.



HORIZONTALES

VERTICALES

- | | |
|---|--|
| <p>1. Su contenido es moderado en aguas superficiales y normalmente elevado en aguas subterráneas.</p> <p>2. Junto con el hierro está generalmente presente en las aguas subterráneas y ausente en las aguas superficiales, lo cual constituye una ventaja de estas aguas.</p> <p>3. Se forman cuando se usa cloro para la desinfección en aguas con alta materia orgánica; son cancerígenas.</p> <p>4. En las aguas superficiales está presente si está contaminadas. En las aguas subterráneas está presente sin ser índice de contaminación.</p> <p>5. Es alta en las aguas subterráneas y baja en las aguas superficiales, lo cual es una ventaja de estas últimas al no formar incrustaciones.</p> | <p>6. Junto con virus y plancton son organismos presentes en las aguas superficiales.</p> <p>7. Microorganismos que pueden estar presentes en las aguas subterráneas.</p> <p>8. En las aguas superficiales está próximo a la saturación debido a la aereación natural, mientras que en las aguas subterráneas está normalmente ausente.</p> <p>9. En las aguas superficiales es variable según las estaciones. En las aguas subterráneas es relativamente constante.</p> <p>10. Producen el síndrome del niño azul o metahemoglobinemia.</p> |
|---|--|

2.2 Investigue acerca de la historia de las obras de abastecimiento de agua potable en México. Se sugiere dividir la investigación en los siguientes periodos:

- a. Epoca prehispánica (antes de 1521)
- b. Epoca colonial (1521-1821)
- c. Epoca independiente. Primer periodo (1821-1868)
- c. Epoca independiente. Segundo periodo (1868-1911)
- d. Epoca revolucionaria

ESTUDIOS BASICOS PARA REALIZAR EL PROYECTO

3.1 GENERALIDADES

El 5 de febrero de 1917 se promulgó la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; este ordenamiento contiene la esencia y el espíritu de todas las leyes que del mismo emanan o que gracias a él existen. Los artículos 4 y 27 Constitucionales son los que, para el caso del abastecimiento de agua potable, se estima útil mencionar pues de ellos emanan la "Ley General de Salud" y la "Ley de Aguas Nacionales", respectivamente, las cuales contienen las bases legales que deben considerarse para la realización de un proyecto. El cuadro 3.1 presenta una sinopsis de estas leyes.

De la Ley de Aguas Nacionales resultan interesantes, entre otros, los artículos 44, 45 y 46 reproducidos a continuación:

Artículo 44.- La explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales superficiales o del subsuelo por parte de los sistemas estatales o municipales de agua potable y alcantarillado, se efectuarán mediante asignación que otorgue "La Comisión", en la cual se consignará en su caso la forma de garantizar el pago de las contribuciones, productos y aprovechamientos que se establecen en la legislación fiscal, y la forma prevista para generar los recursos necesarios para el cumplimiento de estas obligaciones.

Las asignaciones de aguas nacionales a centros de población que se hubieran otorgado a los ayuntamientos o a las entidades federativas que

administren los respectivos sistemas de agua potable y alcantarillado, subsistirán aun cuando estos sistemas sean administrados por entidades paraestatales o paramunicipales, o se concesionen a particulares por la autoridad competente.

Artículo 45.- Es competencia de las autoridades municipales, con el concurso de los gobiernos de los estados en los términos de la ley, la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales que se les hubieran asignado, incluyendo las residuales, desde el punto de su extracción o de su entrega por parte de "La Comisión" hasta el sitio de su descarga a cuerpos receptores que sean bienes nacionales. La explotación, uso o aprovechamiento se podrá efectuar por dichas autoridades a través de sus entidades paraestatales o de concesionarios en los términos de ley.

En el caso del párrafo anterior, en el reuso de aguas residuales, se deberán respetar los derechos que sobre las mismas estén inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua.

Artículo 46.- "La Comisión" podrá realizar en forma parcial o total, previa celebración del acuerdo o convenio con los gobiernos de las entidades federativas y de los municipios correspondientes, las obras de captación o almacenamiento, conducción y, en su caso, tratamiento o potabilización para el abastecimiento de agua, con los fondos pertenecientes al erario federal o con fondos obtenidos con aval o mediante cualquier otra forma de garantía otorgada por la Federación,

siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos:

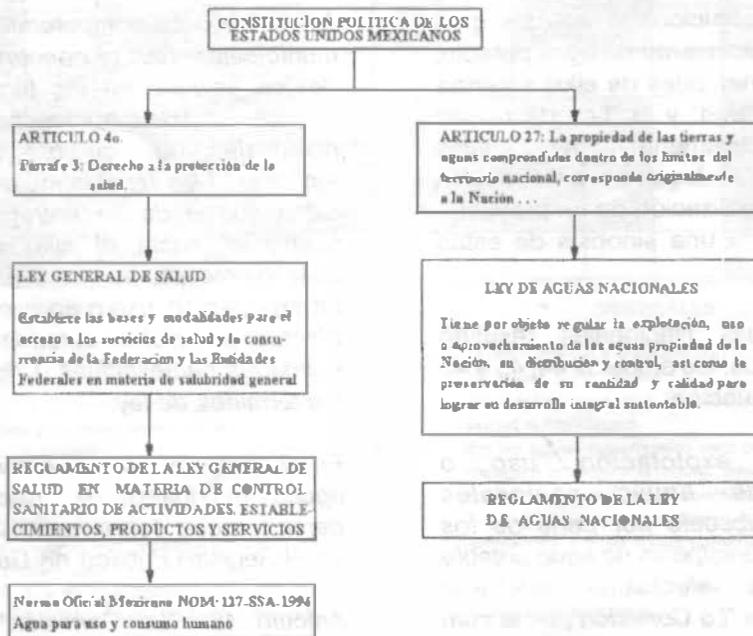
- I. Que las obras se localicen en más de una entidad federativa, o que tengan usos múltiples de agua, o que sean solicitadas expresamente por los interesados;
- II. Que los gobiernos de las entidades federativas y los municipios respectivos participen, en su caso, con fondos e inversiones en la obra a construir, y que se obtenga el financiamiento necesario;
- III. Que se garantice la recuperación de la inversión, de conformidad con la legislación fiscal aplicable, y que el

usuario o sistema de usuarios se comprometa a hacer una administración eficiente de los sistemas de agua y a cuidar la calidad de la misma; y

- IV. Que en su caso las respectivas entidades federativas y municipios, y en sus entidades paraestatales o paramunicipales, o personas morales que al efecto contraten, asuman el compromiso de operar, conservar, mantener y rehabilitar la infraestructura hidráulica.

En los acuerdos o convenios respectivos se establecerán los compromisos relativos."

Cuadro 3.1



NOTAS:

Le y General de Salud: Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 7 de febrero de 1984 y puesta en vigor a partir del 1o de julio, derogó el Código Sanitario del 26 de febrero de 1973.

Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios: Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 18 de enero de 1988

Ley de Aguas Nacionales: Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 1o de diciembre de 1992. Derogó la Ley Federal de Aguas.

Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales: Publicado en el Diario Oficial de la Federación del 12 de enero de 1994

La salud humana depende no sólo de la cantidad, sino también de la calidad del agua que se utiliza. En México, como se ha indicado en el Capítulo 1, la autoridad encargada para la emisión de normas y criterios de calidad de agua para consumo humano es la Secretaría de Salud. A esta dependencia se debe la elaboración del Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios (ver cuadro 3.1), que entró en vigor el 19 de enero de 1988. En el Título Tercero, Capítulo I del Reglamento mencionado, se define como agua potable toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud; en el cuadro 3.2 se transcriben los artículos más significativos correspondientes a la calidad del agua potable. Al respecto, en el anexo A se reproduce íntegramente la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, referente al agua para uso y consumo humano, que establece los límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. Las sustancias que se enlistan en

el Anexo A pueden modificar considerablemente las propiedades, efectos y usos de la misma. Así por ejemplo, el exceso de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio produce incrustaciones en tuberías y causan la dureza en el agua que, entre otros inconvenientes, obliga a consumos elevados de jabón.

El exceso de sales (cloruro y sulfatos) produce sabor desagradable y limita su uso. Sin embargo, hay poblaciones que consumen agua con 2000 mg/litro, que actuarían como laxante en personas no acostumbradas a ingerir tales cantidades.

El hierro colorea el agua, le da un sabor desagradable y se incrusta en las tuberías.

Los nitratos, arriba de 50 mg/litro, pueden producir alteraciones de la sangre en niños de corta edad (metahemoglobinemia o síndrome del niño azul).

Cuadro 3.2. "REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SALUD EN MATERIA DE CONTROL SANITARIO DE ACTIVIDADES, ESTABLECIMIENTOS, PRODUCTOS Y SERVICIOS" (EXTRACTO)

| TITULO TERCERO | |
|--|--|
| <i>Agua y hielo para uso y consumo humano y para refrigerar.</i> | |
| CAPITULO I | |
| Agua | |
| Artículo 209.- | Se considera agua potable o agua apta para consumo humano, toda aquella cuya ingestión no cause efectos nocivos a la salud. Se considera que no causa efectos nocivos a la salud, cuando se encuentra libre de gérmenes patógenos y de sustancias tóxicas, y cumpla, además con los requisitos que se señalan en este Título y en la norma correspondiente. |
| Artículo 210.- | Para considerar que el agua es potable, la investigación bacteriológica se realizará de acuerdo a las normas respectivas y deberá dar como resultado lo siguiente: I. El número de organismos coliformes totales, deberá ser, como máximo, de dos organismos en 100 ml, según las técnicas del número más probable (NMP) o de la de filtro de membrana, y II. No contendrá organismos fecales. Aparte de lo anterior, se podrán realizar, a satisfacción de las autoridades sanitarias todas las pruebas que se consideren necesarias, a fin de identificar otros riesgos a la salud. |
| Artículo 211.- | Los requisitos organolépticos y físicos, se establecerán atendiendo a las siguientes características: aspecto, pH, sabor, olor, color, turbiedad del agua y en su caso, los demás que señale la norma. |

* Actualmente en lo relativo al hielo potable y hielo purificado, se tiene la Norma Oficial Mexicana NOM-042-SSA1-1993

En cuanto a los niveles máximos de contaminación por sustancias inorgánicas, se han incluido el Bario, Cadmio y Mercurio. En cuanto al Bario, causa serios efectos tóxicos sobre el corazón, vasos sanguíneos y nervios; la dosis fatal de esta sustancia está entre 550 a 660 mg. Se encuentra presente en forma natural en manantiales minerales como sales de carbonato y artificialmente en veneno para ratas. No se han hecho estudios de las cantidades que pueden tolerarse en agua de bebida. La NOM-127 contempla 0.7 mg/l como límite permisible.

El cadmio es altamente tóxico; 13 a 15 mg/l en alimentos causan enfermedad, pues se acumula en los tejidos provocando alteraciones en el metabolismo y anemia. En altas dosis afecta las arterias renales. Personas que han bebido agua con un contenido promedio de 0.047 mg/l por un largo período no han mostrado efectos de enfermedad. Se origina en las descargas sin control de las plantas de galvanoplastia o por operaciones de galvanizado; también la corrosión de tuberías galvanizadas puede aportarlo. La NOM-127 establece un límite de 0.005 mg/l.

Los fluoruros arriba de 1.5 mg/l suelen provocar la aparición de manchas oscuras en los dientes, y su ausencia predispone la caries dental.

La turbiedad es objetable por su apariencia y también porque las sustancias que la producen crean problemas en el lavado de ropa, en la fabricación de hielo y de refrescos o en otros usos, además de que reducen la efectividad del desinfectante, durante el tratamiento. La NOM-127 establece 5 unidades de turbiedad nefelométricas como límite permisible.

Sustancias como el Plomo, el Arsénico o el Cromo pueden ser tóxicas.

Por estas razones, la Secretaría de Salud ha fijado las cantidades máximas aceptables de las sustancias que puede contener el agua para ser considerada potable.

3.2 ESTUDIOS BASICOS DE PROYECTO

En el presente capítulo se analizarán los diferentes puntos que debe contener un estudio para preparar la ejecución de un proyecto.

Un estudio debe ser encauzado hacia dos finalidades específicas: 1) realizar un buen proyecto y, 2) ejecutar económicamente obras de abastecimiento de agua potable. El alcanzar estas metas es algo que depende de las limitaciones que imponga la disponibilidad real de tiempo y el tipo de la localidad que se estudia; de esta manera, el proyecto posiblemente contendrá los siguientes aspectos:

- 1o. La mejor solución del problema;
- 2o. Ciertas alternativas que se propongan y que servirán para seleccionar:
 - a) Las obras de construcción urgente;
 - b) Las de construcción inmediata;
 - c) Las de construcción futura;
 - d) Las ampliaciones previstas y solicitadas;
 - e) Las de mejoramiento del sistema y
 - f) Aquellas obras que por razones económicas y sociales convenga construir en etapas.
- 3o. La certeza en el proyecto, apoyado en un estudio completo.
- 4o. La seguridad para planear la ejecución de las obras.
- 5o. Datos suficientes para señalar en forma legal, apropiada y conveniente, el proceso de los financiamientos.
- 6o. Información suficiente para elaborar los programas de construcción de las obras.

7o. Se conocerá la realidad económica y social de los habitantes de la localidad que se estudia.

8o. Existirá una preparación moral y cívica de los que promueven la obra y sus moradores.

Un estudio debe ser completo, procurando que contenga la información técnica y estadística justa, verídica y suficiente para el diseño de un proyecto apropiado, conveniente y económico. El concepto de un "estudio" es:

LA INFORMACION QUE SE ADQUIERE PARA PREPARAR LA EJECUCION DE UN PROYECTO.

En algunos casos la información obtenida puede ser tan insignificante y los datos que se suministren tan escasos, que con ellos no se logrará desarrollar ni un anteproyecto; en otras situaciones, el estudio puede contener un exceso de datos, al grado de resultar la información abrumadora, con muchísimo material no todo útil, entonces, el proyectista se coloca en una posición difícil para decidir cuáles datos son dignos de aceptar y los que forzosamente sea prudente eliminar, para resolver el problema que le ha sido planteado. Por esta razón, un estudio debe ser claro, preciso, verídico; que contenga la información estadística necesaria, con los datos técnicos completos para la elaboración del proyecto específico que se pretenda desarrollar, y en el que se apoye con seguridad la construcción.

A continuación se detallan los diversos pasos que deben seguirse para lograr un estudio que realmente sea útil y que contenga los datos básicos tanto locales como regionales, divididos en dos aspectos:

Primero. Antecedentes relacionados con el problema que se trata de resolver y en los que se reúnan los datos específicos hasta el momento en que se está procediendo a la investigación.

Segundo. Contar con estudios complementarios, que serán encomendados a técnicos especializados en cada materia.

Se sugiere desarrollar el estudio en las cuatro etapas generales siguientes:

- I. Información previa.
- II. Investigación directa.
- III. Estudios auxiliares complementarios.
- IV. Elaboración integral del estudio.

Las etapas de un estudio, como se acaban de enlistar, serán descritas a continuación.

3.3 INFORMACION PREVIA

Antecedentes. Finalidades

De ser posible, es conveniente saber previamente de quién proviene la iniciativa de promoción para realizar las obras y al mismo tiempo, es indispensable que se conozca con precisión la clase de obra que se ordena estudiar, para ser proyectada y construida.

Información general y datos preliminares
Obtención de:

Cartas geográficas de la región.

Aerofotografías.

Planos de la localidad.

Planos fotogramétricos.

Planos geológicos.

Datos estadísticos:

Censos de población.

Morbilidad.

Mortalidad.

Climatológicos.

Hidrológicos.

Geohidrológicos.

Geológicos.

Comunicaciones.

Transportes.

Económicos.

Culturales.

Históricos.

Políticos.

Sociales.

Datos sobre recursos naturales, como:

Aguas superficiales.

Aguas subterráneas.

Agrícolas.

Ganaderos.

Forestales.

Mineros.

La información anterior, se puede obtener generalmente antes de proceder a la investigación directa en la población que se pretende estudiar.

3.4 INVESTIGACION DIRECTA

Esta labor de investigación se practica después de la obtención de los datos previos, y directamente en la población que se halla en proceso de estudio.

Se presentan varios aspectos para el desempeño de esta actividad, los cuales conducirán a la finalidad deseada, en la forma

siguiente:

1o. Investigación Urbana

Debe realizarse esta actividad precisamente en la localidad propuesta, en las etapas siguientes:

- a) Comprobación de los datos estadísticos obtenidos con la INFORMACION PREVIA; ratificación en la misma localidad del número de habitantes efectivos y la realidad de los predios urbanos existentes para determinar con exactitud el verdadero número de tomas domiciliarias, industriales, o de cualquiera otra clasificación.
- b) Durante este proceso de investigación directa, se recabarán datos de la misma localidad, como: edificios, escuelas, industrias, casas habitación, ferrocarriles, carreteras, clase de pavimentos, zonas residenciales, obreras, etc.
- c) También se obtendrá información económica, costo de la vida, salarios, sueldos, precio de materiales, tarifas de energía eléctrica y los servicios de agua potable, etc.

2o. Investigación en el campo

- a) La investigación fuera de la población se refiere a la localización de las fuentes de aprovisionamiento; para lo cual se necesita la calidad, la cantidad y la disponibilidad física del agua; que puede ser de manantial, de río, de lago, de alguna presa de almacenamiento, de galería filtrante, o subterránea extraída por medio de pozo profundo, obras todas ellas, que se estudian en el Capítulo 5 de estos apuntes.
- b) Localizada la fuente de abastecimiento y definida la posibilidad de utilizarla, serán determinados los caudales y la calidad; procediéndose a continuación a resolver la forma de conducirla, ya sea por gravedad o por bombeo; para lo cual se necesita explorar la faja de terreno por la

que se puede llevar la tubería de conducción, hasta cierto lugar cuya elevación, a inmediaciones de la localidad, permita por su altura la construcción del respectivo tanque regulador o de una planta potabilizadora, en su caso.

- c) Ambas investigaciones directas, la urbana y la de campo, requieren forzosamente de sus correspondientes levantamientos topográficos, los cuales pueden alcanzar precisiones que deben determinarse de conformidad con el problema que se trata de resolver, así como de acuerdo con la importancia y magnitud de la futura obra.

Los levantamientos topográficos pueden efectuarse en poblaciones de reducida extensión superficial ejecutando las mediciones con procedimientos taquimétricos para que el costo no sea elevado. Con los datos recabados directamente por el técnico a quien se le encomienda esta labor, se construirá un plano con la información suficiente para proyectar las obras de captación, la línea de conducción, el tanque regulador y por último, la red de distribución de agua.

Cuando la localidad que se encuentra en proceso de estudio, tenga cierta importancia, que se presenten razones de carácter urgente, los cuales ameriten que el trabajo topográfico se deba realizar con mayor rapidez, es conveniente establecer o fijar controles terrestres y entonces proceder a efectuar un levantamiento aerofotográfico para elaborar un mosaico rectificado. Si requiere mayor detalle, se aumentarán los puntos de control para realizar una restitución detallada y dibujar un plano fotogramétrico a la escala conveniente. Hasta aquí, el proyectista contará con tres elementos valiosísimos:

- 1o Información estadística verídica y datos reales de la localidad, incluyéndose la situación económica de los vecinos de la localidad.

- 2o. Un plano topográfico configurado, un mosaico aerofotográfico, un mosaico rectificado, o un plano fotogramétrico. Con estos elementos, el proyectista se orientará para diseñar la obra de una manera más precisa, puesto que se apreciarán los núcleos de las construcciones existentes, las calles, las avenidas, las carreteras, las vías férreas, los arroyos, la vegetación, los terrenos de cultivo, los lomeríos y en general un conocimiento bastante real de la población.

- 3o. Se contará con un plano absolutamente seguro en su planimetría, para determinar en él las distancias con precisión, y con el relieve expuesto, la configuración topográfica. También se tendrán datos de altitudes en los cruceros, suficientemente exactos para proyectar obras de agua potable y alcantarillado.

3.5 ESTUDIOS AUXILIARES COMPLEMENTARIOS

Con este título se designa a aquellas actividades que corresponden a técnicos especializados, las cuales son de una enorme importancia, al grado de constituir un factor absolutamente indispensable para que el estudio de abastecimiento de agua potable adquiera un carácter integral.

Estos trabajos técnicos auxiliares, son los siguientes:

Geohidrológicos

Hidrométricos

Fotogramétricos

1o. Estudios Geohidrológicos

Esta investigación, en sí misma, comprende varios procesos, los cuales están relacionados con las circunstancias que se presenten debidas a las condiciones geológicas e hidrológicas de la

región que se estudia, así como la importancia de la población y la situación económica de sus habitantes.

Un problema de abastecimiento de agua potable se puede resolver, conociendo los caudales disponibles y aprovechables de un manantial o de un río, quedando por resolverse el tratamiento de las aguas, si es necesario. También es conveniente estudiar el sitio en donde afloran, para diseñar su forma de captación.

Enseguida trazar la línea de conducción hasta el tanque regulador y luego la red de distribución a la localidad.

En el caso de no contar con fuentes de abastecimiento, como las indicadas anteriormente de una manera general; se procederá a investigar la posibilidad de obtener aguas subterráneas, de preferencia cercanas, y a continuación, reconocer otras fuentes que resuelvan el problema, aún cuando se hallen distantes.

Para la localización de las aguas subterráneas, se practicará primero una exploración general de carácter geohidrológico, y el técnico especializado indicará el sitio apropiado para la perforación de un pozo profundo en donde existan las posibilidades para obtener las aguas del subsuelo.

Cuando se presente cierta inseguridad en la determinación de la profundidad más conveniente de la perforación o que sea necesario explorar una zona más amplia, para lograr que la obra resulte de mayor confianza, se utilizarán los procedimientos geofísicos, los cuales pueden efectuarse con la técnica geoelectrica cuando la extensión por investigar no sea demasiado grande. Cuando la superficie terrestre por explorar alcance valores del orden de los kilómetros cuadrados, entonces se tendrá que proceder a la técnica geosísmica, a fin de cubrir rápidamente grandes extensiones, y una vez señalados los puntos más probables para las perforaciones, se procederá a detallar el sitio de la perforación con el método geofisicoeléctrico.

Dada la localización con los sondeos eléctricos, se practicará la perforación hasta la profundidad que previamente se haya determinado; se conocerá entonces la estratigrafía, la profundidad de la roca basal y la situación de los acuíferos explotables.

Practicada la perforación con cualquiera de las técnicas que se explicarán en el capítulo 4, se proyectará y construirá debidamente el pozo, previo el registro eléctrico. A continuación se efectuará una investigación hidrogeológica, con la cual se podrá determinar la potencialidad de los acuíferos, la permeabilidad y la cantidad de aguas subterráneas almacenadas en la zona explorada, con lo cual se puede programar para el futuro la máxima cantidad posible de explotación del subsuelo.

Este último procedimiento de investigación requiere primero la perforación de pozos de prueba para estudio, y luego la construcción definitiva de los pozos de explotación. De esta manera, conociendo la disponibilidad y los caudales que se puedan extraer, así como las necesidades de la población por servir, se podrá diseñar el equipo de bombeo necesario, indispensable y útil, con lo cual se obtendrán verdaderas economías en la obra; puesto que, cuando se determinen varias localizaciones de posible explotación, se deberá elegir aquella que satisfaga las condiciones económicas siguientes: menor distancia, para que la línea de conducción no resulte costosa; contar también con la posibilidad de obtener energía eléctrica cercana a la estación de bombeo y situar el pozo en un lugar en donde se cuente con caminos de acceso para facilitar la conservación y la operación de los equipos.

2o. Determinaciones hidrométricas

Esta labor es otra de las investigaciones auxiliares complementarias, indispensable para que el estudio de la población sea realmente integral en todos sus aspectos. Se requiere estudiar y cuantificar las fuentes posibles de aprovechar, para el abastecimiento a la localidad.

La investigación hidrométrica se refiere a dos

tipos de determinaciones; la primera consiste en aforar en distintas épocas del año la fuente de aprovisionamiento o deducir su valor utilizando los datos hidrológicos correspondientes, de acuerdo con las precipitaciones pluviales de la región y otros fenómenos meteorológicos correlativos para determinar el caudal mínimo disponible.

El aspecto hidrométrico que se menciona, también se halla íntimamente relacionado con los estudios hidrogeológicos, puesto que éstos necesitan pruebas de bombeo, aforos y determinaciones del comportamiento de los acuíferos, capacidad y posibilidad de explotabilidad para que el abastecimiento a la población sea el conveniente y apropiado.

Otro aspecto importante que tiene la hidrometría, es en los sistemas de abastecimiento de agua que se hallan en operación y necesitan mejoramiento o ampliaciones en sus líneas de conducción o en sus redes de distribución, precisamente cuando la localidad haya crecido a tal grado que su dotación se encuentre muy reducida y que tenga zonas urbanas que no cuenten con el servicio de agua potable. Presentándose esta situación que es una de las más frecuentes, es indispensable investigar desde el punto de vista hidrométrico, las redes de distribución y la línea de conducción; aprovechar el proceso para revisar el estado en que se encuentren las tuberías, las cuales, por el tiempo en que han estado en servicio y por la calidad de las aguas, pueden hallarse incrustadas o tener efectos corrosivos que permitan frecuentes deterioros, roturas en las tuberías del sistema y fugas de agua lamentables.

Los resultados de las observaciones servirán al proyectista para conocer los gastos dentro de la red, los sentidos del flujo, diámetros efectivos de las tuberías, estado en que se encuentran y la realidad completa de los caudales de agua desde la fuente de aprovisionamiento hasta el último punto de las redes; incluyéndose invariablemente las determinaciones con observaciones directas de los niveles piezométricos en el sistema, con lo que se podrá conocer la verdadera dotación a los habitantes

de la localidad.

3o. Fotogrametría

Aún cuando ya fue mencionado el tema de los levantamientos fotogramétricos, es conveniente detallarlos un poco más, considerándolos dentro del capítulo de los trabajos técnicos complementarios de un estudio integral para proyectar obras de abastecimiento de agua potable.

Los planos fotogramétricos son auxiliares muy importantes de un estudio; sustituyen con creces cualquier levantamiento topográfico terrestre realizado con tránsito y nivel; puesto que, contando con la aerofotografía aparecen todos los detalles de la zona: vegetación, terrenos cultivados, caminos, veredas, aspectos orográficos e hidrográficos; así como la población en estudio con su verdadero perímetro urbano, con sus calles, construcciones, pavimentos, y muchísimos más detalles que es imposible hacer que se dibujen en un plano topográfico levantado con los procedimientos clásicos terrestres directos.

Se debe tener presente que la topografía y la fotogrametría están íntimamente relacionadas. Los levantamientos aerofotográficos se apoyan en puntos situados en forma directa, los cuales tienen previamente conocidas sus coordenadas; por esta razón, se les designa con el nombre de controles terrestres. A partir de estos puntos de apoyo, se procederá a la elaboración de los siguientes planos:

Mosaicos aerofotográficos

Mosaicos rectificadas

Planos fotogramétricos

Indudablemente que de acuerdo con las necesidades del problema que se trate de resolver, o la obra que se pretenda realizar, el proyecto se ejecutará tomando en consideración todos los factores, especialmente los económicos. De aquí parte el tipo de plano que sea necesario preparar.

Por último, será muy conveniente tener la visión en el sentido de que cuando las necesidades técnicas lo ameriten, a través de las fotografías de contacto, pares estereoscópicos de la zona en estudio o en proceso de investigación, se llevarán a cabo trabajos técnicos muy útiles de fotointerpretación, ya sea geológica, hidrológica, forestal, agrícola o urbana.

3.6 ELABORACION INTEGRAL DEL ESTUDIO

Cuando se cuente con la información previa, con la investigación directa y con los resultados de los estudios complementarios, geohidrológicos, hidrométricos y fotogramétricos, se podrá elaborar verdaderamente el estudio completo de la población. De esta manera, los proyectos que se realicen serán realmente seguros y se podrá

dilucidar la construcción más conveniente y económica que deba ejecutarse.

Cualquiera que sea la categoría de la población ya sea poblado, villa o ciudad, el estudio debe ser fundamentalmente completo.

Indudablemente que las investigaciones pueden ser más sencillas a medida que la localidad sea reducida, pero tiene tanta importancia para el problema humano y social llevar el agua a un núcleo habitado pequeño como a una gran ciudad. En ambos aspectos, los problemas son idénticos, lo único que varía es la magnitud de la obra, o la amplitud del estudio; en consecuencia, en los dos casos, el estudio debe ser terminantemente integral y lo más amplio posible.

Problemas

3.1. Instrucciones: Relacione los conceptos de la columna izquierda con los enunciados de la columna derecha (Ejemplo: 10-g).

| | | | |
|----|---------------------------------|----|--|
| 1. | NITRATOS | a. | Se incrusta en las tuberías, colorea el agua y le da un sabor desagradable. |
| 2. | HIERRO | b. | Da mala apariencia al agua y reduce la efectividad del desinfectante durante el tratamiento. |
| 3. | CADMIO | c. | Produce incrustaciones en las tuberías y causa la dureza del agua. |
| 4. | FLUORUROS | d. | Pueden producir metahemoglobinemia. |
| 5. | CARBONATOS DE CALCIO Y MAGNESIO | e. | Arriba de 1,5 mg/l producen manchas oscuras en los dientes. |
| 6. | ARSENICO | f. | Se acumula en los tejidos provocando alteraciones en el metabolismo y anemia. |
| 7. | ALUMINIO | | |

DATOS BASICOS DE PROYECTO

4.1 VIDA UTIL DE LAS OBRAS Y PERIODO DE DISEÑO

Los elementos del sistema de abastecimiento de agua potable se proyectan con capacidad prevista para dar servicio durante un lapso futuro después de su instalación que se denomina período de diseño. Este proceder es lógico ya que no siempre se proyectan sistemas en áreas urbanas estáticas sino que están sujetas a la dinámica del cambio de población con el transcurso del tiempo.

Se entiende por Período de Diseño el número de años durante el cual el sistema que se proponga será adecuado para satisfacer las necesidades de una comunidad. El período de diseño en general es menor que la Vida Útil o sea el tiempo que razonablemente se espera que la obra sirva a los propósitos sin tener gastos de operación y mantenimiento elevados que hagan antieconómico su uso o que requieran ser eliminadas por insuficientes. Rebasado el período de diseño, la obra continuará funcionando hasta cumplir su vida útil en términos de una eficiencia cada vez menor.

La vida útil de las obras depende de múltiples factores, entre los cuales los más importantes son los siguientes:

- a) Calidad de la construcción y de los materiales utilizados en la ejecución de la obra.
- b) Calidad de los equipos electromecánicos y de control.

- c) Calidad del agua a manejar.
- d) Diseño del sistema.
- e) Operación y mantenimiento.

A continuación se explica brevemente a qué se refiere cada uno de estos factores.

- a) Calidad de la construcción y de los materiales utilizados en la ejecución de la obra.

La obra civil dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable juega un papel muy importante, ya que ésta es la base para la instalación de equipos y controles, así como para el almacenamiento del agua; por ello, es muy importante realizar una construcción de buena calidad, asegurando y prolongando de esta manera la vida útil de los equipos que alberga y, por ende, la del sistema.

La obra civil generalmente tiene una duración muy superior a la obra electromecánica y de control, por lo que, en la estimación de la vida útil la que predomina es esta última.

- b) Calidad de los equipos electromecánicos y de control.

Como se mencionó, este equipo es el que en forma conjunta con las tuberías define el período de vida útil de la obra ya que su costo representa el mayor porcentaje del sistema. Es conveniente aclarar que las tuberías tienen una vida mucho mayor que los equipos, pero no

tienen la flexibilidad de éstos que se pueden cambiar o modificar resolviendo el problema económico que esto implica, mientras que sustituir tuberías implica rehacer el sistema.

c) La calidad de agua a manejar.

La calidad del agua es un factor definitivo en la duración de los equipos y materiales. Como ejemplo puede citarse el siguiente: Si el agua es dura, las paredes de los tubos se incrustarán, pudiendo reducir su vida útil hasta un 90%, mientras que si es corrosiva reduce su vida en un tiempo que está en función de las características del agua.

d) El diseño del sistema.

La optimización que se haya realizado en el diseño del sistema, influirá directamente en la calidad del servicio que se prestará y en la duración de éste, ya que un mal diseño hará que el sistema trabaje en condiciones desfavorables, lo que requerirá de un esfuerzo adicional para realizar su función. Este punto es más importante que los anteriores, ya que si el diseño por alguna razón quedó escaso, la vida útil se disminuirá tanto como el mismo error; siendo en ocasiones este periodo más corto que el de los propios equipos, por lo que queda obsoleto antes de cumplir con su cometido.

e) La operación y el mantenimiento.

Este factor es el más importante de todos ya que, dependiendo de la forma como se efectúe la operación y el mantenimiento del sistema, se acortará o prolongará el período de trabajo de cada uno de sus componentes.

En nuestro país este factor es uno de los principales problemas en el manejo de sistemas, pues debido a la escasez de recursos y falta de preparación de los operadores y técnicos no se les da el mantenimiento preventivo que se requiere, sino que se les da del tipo correctivo, el cual casi siempre se efectúa en forma provisional; esto aunado a que el personal en general es improvisado, termina por reducir el sistema a su más mínima expresión, dejando en

operación lo indispensable nada más para que funcione, lo que hace trabajar al sistema en condiciones desfavorables.

Por lo mencionado anteriormente es necesario tomar en cuenta los imponderables de cada proyecto en particular para definir en forma realista el período de vida útil estimado de cada una de las partes que componen el sistema de agua potable.

Con el fin de dar una idea de la vida útil de los diversos elementos, en el cuadro 4.1 se proporcionan algunos valores estimados, partiendo del entendido de que tendrán un mantenimiento adecuado y trabajarán en condiciones bajo las cuales fueron diseñadas.

Por otra parte, para definir en forma adecuada el periodo de diseño, es necesario considerar los siguientes factores:

1. La vida útil de las estructuras y equipos, tomando en cuenta el estado en que se encuentran y lo obsoleto que lleguen a ser.
2. La facilidad o dificultad para ampliar las obras existentes o planeadas.
3. Previsión de los crecimientos urbanos, comerciales o industriales.
4. Tasas de interés sobre los adeudos.
5. Las condiciones propias del crédito en cuanto a la duración del mismo.
6. Comportamiento de las obras durante los primeros años, cuando no estarán operando a toda su capacidad.

Cuadro 4.1. Vida útil de diversos elementos de un sistema de Abastecimiento de Agua Potable.

| ELEMENTOS | | VIDA UTIL (años) |
|-----------|---|------------------|
| 1. | Pozos excavados | 30 |
| 2. | Pozo perforado sin pantalla (filtro) | 20 |
| 3. | Pozo perforado con pantalla (filtro) | 10 |
| 4. | Motor diesel rápido (a) | 10 |
| 5. | Motor diesel lento (a) | 15 |
| 6. | Bomba tipo pozo profundo (b, c) | 15 |
| 7. | Bomba centrífuga, horizontal (b, c) | 18 |
| 8. | Bomba de pistón (b, c) | 20 |
| 9. | Bomba sumergible (b, c) | 8 |
| 10. | Edificio permanente | 40 |
| 11. | Tanques de almacenamiento de: concreto o mampostería, tubería de concreto pre-esforzada; canales de concreto reforzado. | 40 |
| 12. | Líneas y tuberías de acero recubiertas y tuberías de concreto reforzado | 25 (d) |
| 13. | Líneas y tuberías de acero sin recubrir | 20 (d) |
| 14. | Tubería de asbesto-cemento, P.V.C. | 20 (e) |
| 15. | Tuberías de fierro fundido secundarias | 15 (e) |
| 16. | Equipo de filtración, ablandamiento y desinfección (f) | 15 |
| 17. | Válvulas de: compuerta, globo, etc. | 15 |
| 18. | Medidores de agua, instrumentos de medición y accesorios. | 8 |
| 19. | Motor eléctrico (b) | 20 |
| 20. | Arancador eléctrico | 15 |
| 21. | Tanque de almacenamiento de acero y cobre | 20 |

Notas:

- a) Los motores diesel deben considerarse rápidos, si el número de revoluciones por minuto es mayor de 750.
- b) Los valores están basados en 3,000 horas de trabajo anual se deben corregir si el número de horas de trabajo es diferente
- c) En caso de: pozos no verticales, aguas corrosivas o materiales abrasivos contenidos en el agua, supervisión insuficiente, etc., la vida útil se debe reducir.
- d) La vida útil debe reducirse por cinco años aproximadamente en caso de aguas o suelos corrosivos. En cada caso se determinarán por medio de análisis las características corrosivas del agua.
- e) La vida útil debe reducirse de 5 a 10 años aproximadamente en caso de aguas duras. Este tiempo se definirá en base a las características del agua.
- f) Los valores dados son para maquinaria, la vida del concreto y de los edificios debe ser calculada de acuerdo con el tipo de obra.

Se ha usado fijar el período de diseño con un criterio estándar que depende de la población. Las recomendaciones en este sentido son las que se presentan en el cuadro 4.2.

CUADRO 4.2
PERIODO DE DISEÑO PARA
DIFERENTES POBLACIONES

| LOCALIDADES | PERIODO DE DISEÑO |
|--------------------------------|-------------------|
| 1. De hasta 4000 habitantes | 5 años |
| 2. De 4000 a 15000 habitantes | 10 años |
| 3. De 15000 a 70000 habitantes | 15 años |
| 4. De más de 70000 habitantes | 20 años |

En caso de ser posible, el diseño de las obras es conveniente hacerlo por módulos con el fin de diferir las inversiones el mayor tiempo posible, al mismo tiempo que se logra disponer de infraestructura con bajos niveles de capacidad ociosa en el corto plazo. De acuerdo con este criterio, se recomienda diseñar los componentes del sistema para periodos de 5 años o más.

4.2 POBLACION DE PROYECTO

En general, el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable, se basa en una estimación de la población futura a la que servirá, denominada población de proyecto; este número de habitantes corresponde al que se tendrá al último día del período de diseño que se fijó.

Es indiscutible que de la mayor o menor aproximación que se logre en la predicción de la población dependerá que la obra cumpla su cometido futuro, y que efectivamente al reducirse el grado de incertidumbre en el diseño pueda ser más económica.

Los factores básicos del cambio en la población son dos: a) el aumento natural, o sea el exceso de los nacimientos sobre las muertes; y b) la migración neta, o sea, el exceso o pérdida de población que resulten del movimiento de las familias hacia adentro y hacia afuera de un área

determinada.

Desgraciadamente, las tasas de natalidad y muerte no se mantienen constantes a través del tiempo; es decir, que aún el hacer estimaciones de población de un año a otro encierra cierta incertidumbre e inexactitudes.

La interrelación de los dos factores del cambio en la población, puede señalarse diciendo que, generalmente, mientras mayor sea la base de la población con que se trabaje, el crecimiento natural tendrá más peso en el aumento de la población que la migración neta.

Es importante señalar además, que las condiciones socioeconómicas tienen una influencia decisiva sobre los factores de crecimiento de la población, tanto en el aumento natural como en la migración neta. De esto se desprende que el análisis de las condiciones socioeconómicas es importante en la mecánica de la predicción del crecimiento de las poblaciones. No importa el área para la cual se haga la estimación, deberán tenerse en cuenta, tanto las fuerzas socioeconómicas internas como las externas. Así como las condiciones mundiales afectan a la nación, las condiciones de las áreas metropolitanas influyen sobre las comunidades suburbanas.

Los atractivos de una comunidad (agua, alcantarillado, calles pavimentadas, comercios, zonas de recreación), tanto como lugar para vivir, como lugar para trabajar, son también factores importantes en el crecimiento de su población.

Es importante destacar que deben tomarse determinadas precauciones y tener en cuenta algunos factores limitantes para hacer una buena predicción. Por ejemplo, debe hacerse una estimación de la capacidad que puede admitir el terreno disponible para saber si una predicción determinada resulta o no razonable. Así, hay lugares congestionados de construcciones que tienen poco espacio para más personas: en ellos, no importa cuáles hayan sido las tendencias del pasado, las personas no pueden habitar por no existir más espacio para ellas. Es decir, que estas poblaciones están saturadas y

por consiguiente no se puede suponer que tengan crecimiento futuro a la hora de estudiar el espacio disponible.

La mejor base para estimar las tendencias de la población futura de una comunidad es su pasado desarrollo, y la fuente de información más importante sobre el mismo en México son los censos levantados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática cada diez años. Los datos de los censos de población pueden adaptarse a un modelo matemático, como son el aritmético, geométrico, parabólico, etc. Estos y otros modelos se explican a continuación.

Modelo Aritmético.

El modelo aritmético tiene como característica un incremento de población constante para incrementos de tiempo iguales y, en consecuencia la velocidad de crecimiento, o sea la relación del incremento de habitantes con respecto al período de tiempo es una constante; expresado como ecuación, se tiene

$$\frac{dp}{dt} = K_a \quad \text{o bien:}$$

$$dP = K_a dt \quad (4.1)$$

donde P es la población; t el tiempo y K_a una constante que significa el incremento de población en la unidad de tiempo (año, decenio, etc.). Integrando (4.1)

$$\int_1^2 dP = K_a \int_1^2 dt$$

$$P_2 - P_1 = K_a (t_2 - t_1) \quad (4.2)$$

de la ec. (4.2) se obtiene K_a :

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad (4.3)$$

Para un tiempo T cualquiera se tiene la ecuación lineal

$$P = P_2 + K_a (T - t_2) \quad (4.4)$$

donde el índice "2" se considera para los datos iniciales (P_2 , población inicial en el tiempo t_2).

Ejemplo 4.1

| DATOS CENSALES | |
|----------------|-----------|
| AÑO | POBLACION |
| 1970 | 19290 |
| 1980 | 22762 |
| 1990 | 27314 |

Calcular la población para 2010 con el modelo aritmético.

Solución.

Se recomienda usar como datos a sustituir en la ec. 4.4 los últimos dos censos, ya que representan la tendencia más reciente del crecimiento de la población.

De la ec. (4.3):

$$K_{a \ 80-90} = \frac{27314 - 22762}{1990 - 1980} = 455.2$$

De la ec. (4.4):

$$\begin{aligned} P_{2010} &= P_{1990} + K_{a \ 80-90} (2010 - 1990) \\ &= 27314 + 455.2 (2010 - 1990) \\ &= 36418 \text{ hab} \end{aligned}$$

Modelo Geométrico

El modelo geométrico de crecimiento de población se caracteriza por tener una velocidad de crecimiento directamente proporcional al valor de la población en cada instante de tiempo, o sea

$$\frac{dP}{dt} = K_G P$$

ó

$$\frac{dP}{P} = K_G dt \quad (4.5)$$

donde K_G es la velocidad de crecimiento cuando la población P es la unidad.

Integrando la ecuación (4.5) se obtiene

$$\int \frac{dP}{P} = K_G \int dt$$

$$\ln P_2 - \ln P_1 = K_G (t_2 - t_1) \quad (4.6)$$

y de la ec. (4.6)

$$K_G = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad (4.7)$$

Para un tiempo T cualquiera:

$$\ln P = \ln P_2 + K_G (T - t_2) \quad (4.8)$$

Ejemplo 4.2

A partir de los datos censales del ejemplo 4.1, calcular la población para 2010 con el modelo geométrico.

Solución

Nuevamente se toman los dos últimos censos como datos a sustituir en la ec. (4.7):

$$K_{G_{80-90}} = \frac{\ln 27314 - \ln 22762}{1990 - 1980} = 0.01823$$

y de la ec. (4.8)

$$\ln P_{2010} = \ln P_{1990} + K_G (2010 - 1990)$$

$$\begin{aligned} \ln P_{2010} &= \ln 27314 + 0.01823 (2010 - 1990) \\ &= 10.57975 \end{aligned}$$

$$P_{2010} = e^{10.57975} = 39\ 330 \text{ hab.}$$

Cuando se supone un crecimiento en progresión geométrica, los valores que se obtienen para la población futura son mayores que los que se obtendrían si se supone un crecimiento en

progresión aritmética.

La expresión (4.8) puede escribirse:

$$\ln P = \ln P_0 + K_G t \quad (4.8')$$

donde P_0 es la población cuando $t = 0$. Tomando antilogaritmos a (4.8') se obtiene:

$$P = P_0 e^{K_G t} \quad (4.9)$$

La ecuación (4.9) es la conocida como de capitalización con interés compuesto, es decir, el interés periódico se capitaliza aumentando el capital anterior y usualmente e^{K_G} se representa como $(1+i)$, donde i es la tasa de interés y la expresión de P quedará

$$P = P_0 (1 + i)^t \quad (4.10)$$

Ambas expresiones, la (4.8) y la (4.10) corresponden al modelo geométrico de crecimiento, aunque comúnmente se ha aceptado el referirse a la expresión (4.10) como **método de interés compuesto**.

Ejemplo 4.3

Calcular la población al año 2010 con la ecuación del interés compuesto considerando los siguientes datos censales

| DATOS CENSALES | |
|----------------|-----------|
| AÑO | POBLACION |
| 1970 | 172000 |
| 1980 | 249000 |
| 1990 | 292000 |

Solución.

A partir de la ec. (4.10), podemos obtener una expresión para la tasa de interés por simple despeje:

$$i = \sqrt[t]{\frac{P}{P_0}} - 1$$

Sustituyendo los datos proporcionados:

$$i_{70-80} = \sqrt[10]{\frac{249000}{172000}} - 1 = 0.03768$$

esto es, 3.768 % anual

Para el siguiente periodo

$$i_{80-90} = \sqrt[10]{\frac{292000}{249000}} - 1 = 0.0160$$

ó 1.60 % anual

Una tasa promedio anual será:

$$i_{\text{anual}} = \frac{3.768 + 1.60}{2} = 2.684 \%$$

Con estas tasas, se obtiene la población para 2010

$$P_{2010} = 292000(1 + 0.02684)^{(2010-1990)}$$

$$P_{2010} = 495951 \text{ hab.}$$

Modelo Geométrico Decreciente

Cuando la población tiende a un valor máximo denominado "de saturación", es conveniente estimar la población futura con los parámetros de la ley de crecimiento que puede considerarse geométrica decreciente.

La población puede llegar a ese valor máximo de saturación, a causa de limitaciones de sus recursos económicos, naturales, o del área urbanizable, por ejemplo. La velocidad de crecimiento sería directamente proporcional a la población faltante de saturación, es decir:

$$\frac{dP}{dt} = K_0 (L - P) \quad (4.11)$$

donde L es la población máxima o de saturación. La función de población se obtiene integrando la expresión (4.11):

$$\int \frac{dP}{L - P} = K_0 \int dt$$

$$-\ln(L - P) \Big|_1^2 = K_0 (t_2 - t_1)$$

$$-\ln \frac{(L - P_2)}{(L - P_1)} = K_0 (t_2 - t_1)$$

de donde

$$K_0 = \frac{-\ln \frac{(L - P_2)}{(L - P_1)}}{t_2 - t_1} \quad (4.12)$$

Para una población P a un tiempo futuro T, tomando como datos iniciales P₂ al tiempo t₂, se tiene:

$$-\ln \frac{(L - P)}{(L - P_2)} = K_0 (T - t_2), \text{ o bien}$$

$$\ln \frac{L - P}{L - P_2} = -K_0 (T - t_2)$$

$$\frac{L - P}{L - P_2} = e^{-K_0 (T - t_2)}$$

$$L - P = (L - P_2) e^{-K_0 (T - t_2)}$$

$$-P = -L + (L - P_2) e^{-K_0 (T - t_2)}$$

$$P = L - (L - P_2) e^{-K_0 (T - t_2)}$$

Restando P₂ a ambos lados de la igualdad

$$P - P_2 = (L - P_2) - (L - P_2) e^{-K_0 (T - t_2)}$$

Asociando

$$P - P_2 = (L - P_2) (1 - e^{-K_0 (T - t_2)})$$

$$P = P_2 + (L - P_2) (1 - e^{-K_0 (T - t_2)}) \quad (4.13)$$

Ejemplo 4.4

Suponiendo una población de saturación $L = 70\,000$ habitantes, estimar la población para 2010 aplicando el modelo geométrico decreciente, con los siguientes datos censales:

| AÑO | POBLACION |
|------|-----------|
| 1970 | 19290 |
| 1980 | 22762 |
| 1990 | 27314 |

Solución

$$K_{D\ 70-80} = \frac{-\ln\left(\frac{70000 - 22762}{70000 - 19290}\right)}{1980 - 1970} = 0.007092$$

$$K_{D\ 80-90} = \frac{-\ln\left(\frac{70000 - 27314}{70000 - 22762}\right)}{1990 - 1980} = 0.010132$$

y un valor medio:

$$K_0 = \frac{0.007092 + 0.010132}{2} = 0.008611$$

$$P_{2010} = P_{1990} + (70000 - P_{1990})(1 - e^{-0.1722})$$

$$P_{2010} = 27314 + (70000 - 27314)(1 - e^{-0.1722})$$

$$P_{2010} = 34067 \text{ habitantes}$$

Modelo Logístico o Biológico

Este modelo se usa para planeaciones a largo plazo con recursos fijos en vías de desarrollo, en consecuencia tiende a una población máxima limitada, generalmente para grandes ciudades o países. La concepción del modelo corresponde al crecimiento que tienen las moscas o cualquier otro insecto en un espacio fijo y con alimentación limitada, en donde al inicio la velocidad de crecimiento aumenta hasta un cierto valor a partir del cual decrece tendiendo al valor nulo por disminución de alimento y contaminación del medio. La teoría para la población la formuló P.F. Verhuist en 1844 y la aplicó R. Pearl en 1924 a los estudios demográficos. La curva de crecimiento de población tiene forma de S (fig. 4.1). Se le denomina comúnmente como el "Método de la S logística".



Figura 4.1. Curva logística de crecimiento.

Por supuesto, a lo largo del tiempo las condiciones de desarrollo de una ciudad cambian y cualquier punto de la curva puede ser el arranque de otra nueva para otros factores de crecimiento, tales como desarrollos turísticos, recursos naturales por explotar (bosques, tierras de cultivo, etc.), afectaciones que se sufren por desarrollos cercanos o regionales, políticas demográficas o ejecución de obras de infraestructura.

El modelo matemático se plantea con la ecuación diferencial

$$\frac{dP}{dt} = K_0 P (L - P) \quad (4.14)$$

donde L es la población límite. La ecuación (4.14) expresa que la velocidad de crecimiento es proporcional a la población y al faltante de población para llegar al límite. Separando variables para integrar se tiene

$$\frac{dP}{P(L-P)} = K_0 dt \quad (4.15)$$

haciendo cambio de variable $P = \frac{1}{z}$

y entonces

$$dP = -\frac{dz}{z^2}$$

Sustituyendo

$$\frac{-\frac{dz}{z^2}}{\frac{1}{z}(L - \frac{1}{z})} = K_0 dt$$

$$-\frac{dz}{z(L - \frac{1}{z})} = K_0 dt$$

$$-\frac{dz}{(Lz - 1)} = K_0 dt \quad (4.16)$$

La integración de (4.16) es directa:

$$-\frac{1}{L} \ln(Lz - 1) = K_0 t + A$$

Donde A es una constante de integración. Volviendo a sustituir

$$P = \frac{1}{z}$$

$$-\frac{1}{L} \ln\left(\frac{L}{P} - 1\right) = K_0 t + A$$

La constante de integración A se determina para las siguientes condiciones iniciales: en $t = 0$,

$P = P_0$, así

$$A = -\frac{1}{L} \ln\left(\frac{L}{P_0} - 1\right)$$

Sustituyendo este valor de A queda

$$\frac{1}{L} \ln \frac{\frac{L}{P_0} - 1}{\frac{L}{P} - 1} = K_0 t$$

$$\frac{\frac{L}{P_0} - 1}{\frac{L}{P} - 1} = e^{K_0 L t} \quad (4.17)$$

despejando P de (4.17)

$$P = \frac{L}{1 + \left(\frac{L}{P_0} - 1\right) e^{K_0 L t}} \quad (4.18)$$

Si se hace $m = \frac{L}{P_0} - 1$ y

$a = -K_0 L$, la expresión (4.18) queda

$$P = \frac{L}{(1 + m e^{at})} \quad (4.19)$$

La ecuación (4.19) se denomina "ecuación logística de Verhulst-Pearl".

La determinación de los parámetros L, a y m es fácil si se conocen tres puntos de ordenadas equidistantes; por ejemplo $(P_0, 0)$; $(P_1, \Delta t)$ y $(P_2, 2\Delta t)$, o sea que la equidistancia es " Δt ". Sustituyendo estas coordenadas en la expresión logística se obtienen tres ecuaciones para la determinación de los tres parámetros:

$$L = \frac{2 P_0 P_1 P_2^2 - P_1^2 (P_0 + P_2)}{P_0 P_2 - P_1^2} \quad (4.20)$$

$$m = \frac{L - P_0}{P_0} \quad (4.21)$$

$$a = \frac{1}{\Delta t} \ln \left[\frac{P_0 (L - P_1)}{P_1 (L - P_0)} \right] \quad (4.22)$$

Al aplicar estas ecuaciones a una serie de datos, se requiere seleccionar o deducir tres puntos que sean de la curva logística lo cual no siempre se logra y aún se pierde tiempo en la determinación cuando la serie no se ajusta al modelo como antes se advirtió que puede suceder.

Ejemplo 4.5

Aplicando el modelo logístico, calcule la población para 2010 con los siguientes datos:

| DATOS CENSALES | |
|----------------|-----------|
| AÑO | POBLACION |
| 1970 | 172000 |
| 1980 | 249000 |
| 1990 | 292000 |

Solución:

Aplicando (4.20):

$$L = \frac{2 (172000) (249000) (292000)}{(172000) (292000) - (249000)^2} - \frac{249000^2 (172000 + 292000)}{(172000) (292000) - (249000)^2}$$

$$L = \frac{- 3.7569 \times 10^{15}}{- 1.1777 \times 10^{10}} = 319004$$

Calculando la ec. (4.21):

$$m = \frac{319004 - 172000}{172000} = 0.8546$$

Calculando la ec. (4.22):

$$a = \frac{1}{10} \ln \frac{172000(319004 - 249000)}{249000 (319004 - 172000)} = - 0.11112$$

obsérvese que $\Delta t = 10$ años (equidistancia entre datos)

Finalmente, aplicando (4.19)

$$P_{2010} = \frac{319004}{(1 + 0,8546 e^{-0,11112 (2010 - 1970)})} = 315845$$

$$P_{2010} = 315\ 845 \text{ habitantes}$$

Obsérvese que en la ecuación (4.19)

$$t = t_2 - t_0 = 2010 - 1970$$

El lector puede comprobar que la siguiente serie de datos no se ajusta al modelo logístico:

| AÑO | POBLACION |
|------|-----------|
| 1970 | 19290 |
| 1980 | 22762 |
| 1990 | 27314 |

Método de Incrementos Diferenciales

Este método consiste en considerar, que la segunda diferencia entre los datos de población es constante lo cual equivale a ajustar los datos a los de una parábola de segundo grado. Se requiere que los datos sean equidistantes para la aplicación del método.

Ejemplo 4.6

Dados los datos censales siguientes, calcular la población para los años 1980, 1990 y 2000

| AÑO | POBLACION |
|------|-----------|
| 1870 | 7734 |
| 1880 | 8430 |
| 1890 | 9189 |
| 1900 | 10200 |
| 1910 | 11526 |
| 1920 | 12909 |
| 1930 | 14587 |
| 1940 | 16629 |
| 1950 | 19290 |
| 1960 | 22762 |
| 1970 | 27314 |

Solución

| AÑO | POBLACION | PRIMERA DIFERENCIA | SEGUNDA DIFERENCIA |
|---------------------|-----------|--------------------|--------------------|
| 1870 | 7734 | | |
| 1880 | 8430 | 696 | |
| 1890 | 9189 | 759 | 63 |
| 1900 | 10200 | 1011 | 252 |
| 1910 | 11526 | 1326 | 315 |
| 1920 | 12909 | 1383 | 57 |
| 1930 | 14587 | 1676 | 295 |
| 1940 | 16629 | 2042 | 364 |
| 1950 | 19290 | 2601 | 519 |
| 1960 | 22762 | 3472 | 811 |
| 1970 | 27314 | 4552 | 1080 |
| SUMAS | | 19580 | 3856 |
| No. de datos | | 10 | 9 |
| PROMEDIO | | 1958 | 428 |

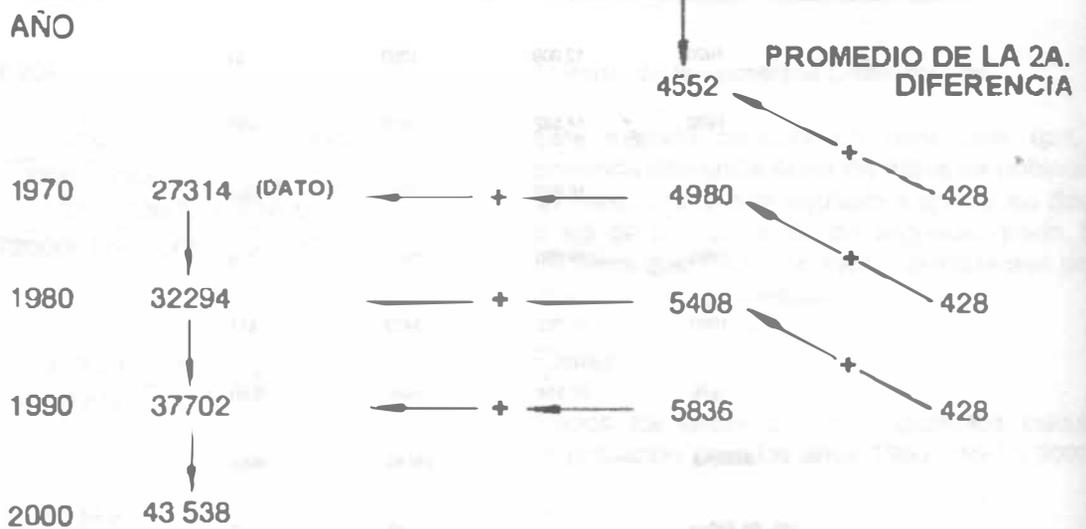
ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

En el método original, el promedio de la segunda diferencia permanece constante y se suma sucesivamente al promedio de la primera diferencia:



Una variante de este método más ajustada a la realidad consiste en no obtener promedio de la primera diferencia, y el promedio de la segunda diferencia sumarlo al resultado de la última primera diferencia calculada en la tabla según se ilustra a continuación.

1A. DIFERENCIA CALCULADA DEL PERIODO 1970 - 1960



Modelo de la parábola cúbica.

Este método considera que la curva de crecimiento se aproxima a la de una parábola cúbica del tipo:

$$P = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (4.23)$$

en donde x = año.

Para aplicar este método se requiere contar con al menos cuatro datos.

Ejemplo 4.7

Calcular la población para el año 2010 por el método de la parábola cúbica con los siguientes datos:

| AÑO | POBLACION | X |
|------|-----------|---|
| 1960 | 16629 | 0 |
| 1970 | 19290 | 1 |
| 1980 | 22762 | 2 |
| 1990 | 27314 | 3 |

Se cumple que:

$$(X=0)$$

$$P = 16629 = a + b(0) + c(0)^2 + d(0)^3$$

$$a = 16629$$

$$(X=1)$$

$$P = 19290 = 16629 + b(1) + c(1)^2 + d(1)^3$$

$$(X=2)$$

$$P = 22762 = 16629 + b(2) + c(2)^2 + d(2)^3$$

$$(X=3)$$

$$P = 27314 = 16629 + b(3) + c(3)^2 + d(3)^3$$

Quedando un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas.

$$b + c + d = 2661$$

$$2b + 4c + 8d = 6133$$

$$3b + 9c + 27d = 10685$$

Resolviendo el sistema queda:

$$b = 2345.16$$

$$c = 271$$

$$d = 44.83$$

Finalmente se tendrá, aplicando la ec. (4.23):

$$P = 16629 + 2345.16 X + 271 X^2 + 44.83 X^3$$

$$\text{Para 2010 } (X = 5)$$

$$P \approx 16629 + 2345.16(5) + 271(5)^2 + 44.83(5)^3$$

$$P = 50139 \text{ habitantes.}$$

$$\text{Para 2020 } (X = 6)$$

$$P = 16629 + 2345.16(6) + 271(6)^2 + 44.83(6)^3$$

$$P \approx 45299 \text{ habitantes.}$$

Método de extensión de la curva a ojo.

Este método consiste en graficar los datos de población en papel milimétrico. Se forma un par de ejes coordenados: el de las ordenadas para los datos de población y el de las abscisas para las fechas a que corresponden dichos datos.

Una vez que se tienen los puntos localizados, se unen por medio de una línea que será la curva representativa de la población. Esta curva se prolonga siguiendo la tendencia anterior, hasta el tiempo futuro deseado, encontrando así la población en el eje de las ordenadas.

Ejemplo 4.8

Estimar la población para los años 1990, 1995 y 2000 de la población "A" con el método de extensión de la curva a ojo. Los datos censales son los siguientes:

| POBLACION "A" | |
|---------------|------------|
| AÑOS | HABITANTES |
| 1910 | 10 290 |
| 1920 | 11 526 |
| 1930 | 12 909 |
| 1940 | 14 587 |
| 1950 | 16 629 |
| 1960 | 19 290 |
| 1970 | 22 762 |
| 1980 | 27 314 |

Solución:

De la Figura 4.2 se obtiene

| AÑOS | POBLACION |
|------|-----------|
| 1990 | 32 230 |
| 1995 | 35 000 |
| 2000 | 37 600 |

Método de comparación con otras poblaciones.

En este método es necesario investigar otras poblaciones semejantes en costumbres, actividades, desarrollo, clima y situación geográfica, a la población en estudio y suponer que ésta tendrá un desarrollo similar. Las poblaciones comparadas deberán tener una población superior a la estudiada en el momento que se haga el proyecto.

Para la solución de un problema por este método se dibuja una gráfica semejante al método anterior, sólo que ahora se graficará en papel con rayado semilogarítmico. El eje de las abscisas, en escala natural, representará los tiempos y el eje de las ordenadas, en escala logarítmica, la población. Una vez graficada la

población en estudio y las semejantes a ésta se tomarán todas las curvas a partir del último registro de la población en estudio y se pasarán paralelas, haciendo coincidir la parte inicial de éstas con la parte final de la estudiada. A través de estas líneas se traza una intermedia que sea representativa de la población futura.

Ejemplo 4.9

Determinar la población para los años 1990, 1995 y 2000 de la población "A" del ejemplo 4.8 por el método de comparación con otras poblaciones.

Solución.

Se encontraron tres poblaciones semejantes a la estudiada. Los datos censales se presentan en el cuadro 4.3.

De la figura 4.3, se obtienen los siguientes resultados:

| AÑO | HABITANTES |
|------|------------|
| 1990 | 34 000 |
| 1995 | 35 000 |
| 2000 | 37 500 |

Predicción con series cronológicas.

En los cálculos realizados anteriormente se utilizaron sólo dos datos para los métodos aritmético y geométrico. En el método de las predicciones con series cronológicas se utiliza toda la información disponible que se considera representativa y adecuada (información seleccionada).

La tendencia de una serie cronológica puede ser descrita por una recta si en cada intervalo de tiempo la serie aumenta o disminuye en una cantidad constante. Para determinar la recta que se apega a la estudiada, se utiliza el método de los mínimos cuadrados.

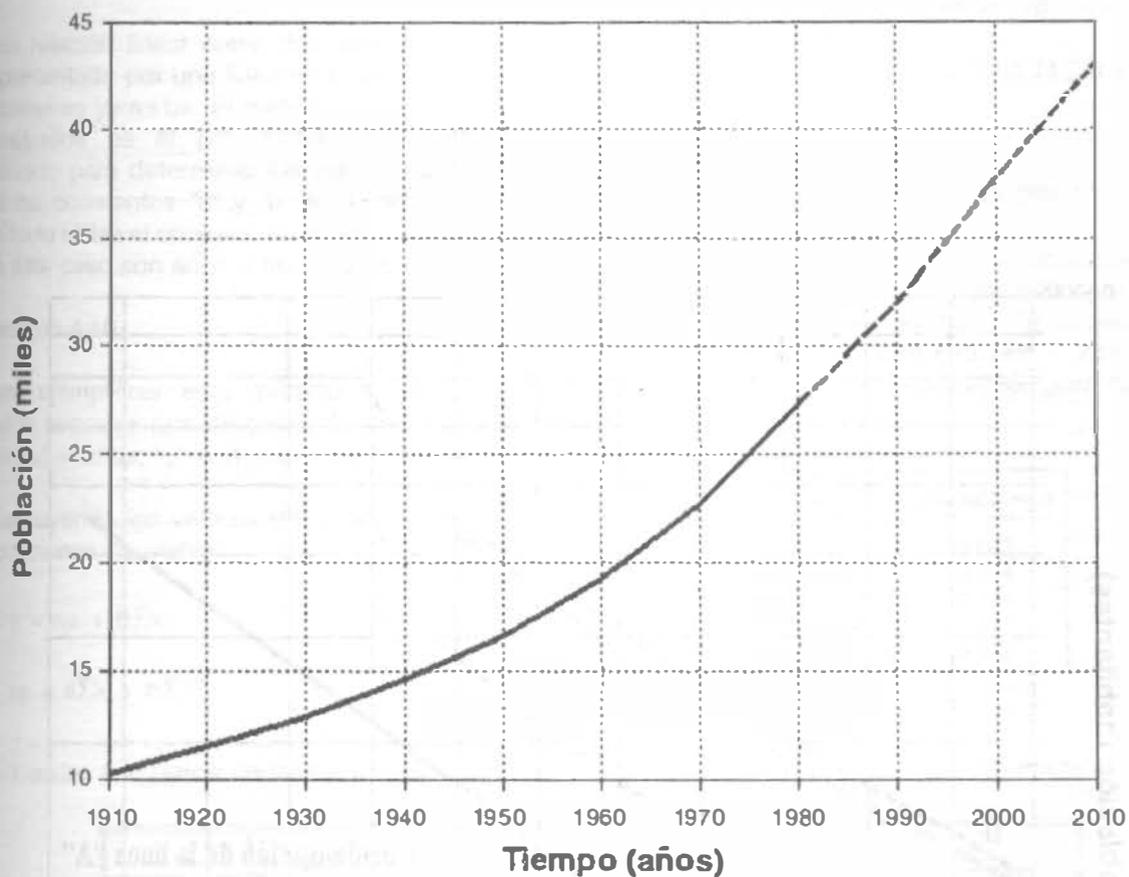


Figura 4.2.

Cuadro 4.3. Poblaciones semejantes a la población "A" del ejemplo 4.8.

| AÑO | POBLACION B | POBLACION C | POBLACION D |
|------|-------------|-------------|-------------|
| 1910 | 14,800 | 20,107 | 20,824 |
| 1920 | 16,724 | 22,681 | 23,739 |
| 1930 | 18,563 | 25,312 | 26,739 |
| 1940 | 20,791 | 28,709 | 30,310 |
| 1950 | 23,701 | 32,619 | 35,159 |
| 1960 | 27,020 | 38,008 | 40,784 |
| 1970 | 31,613 | 45,693 | 48,126 |
| 1980 | 37,936 | 52,889 | 54,270 |

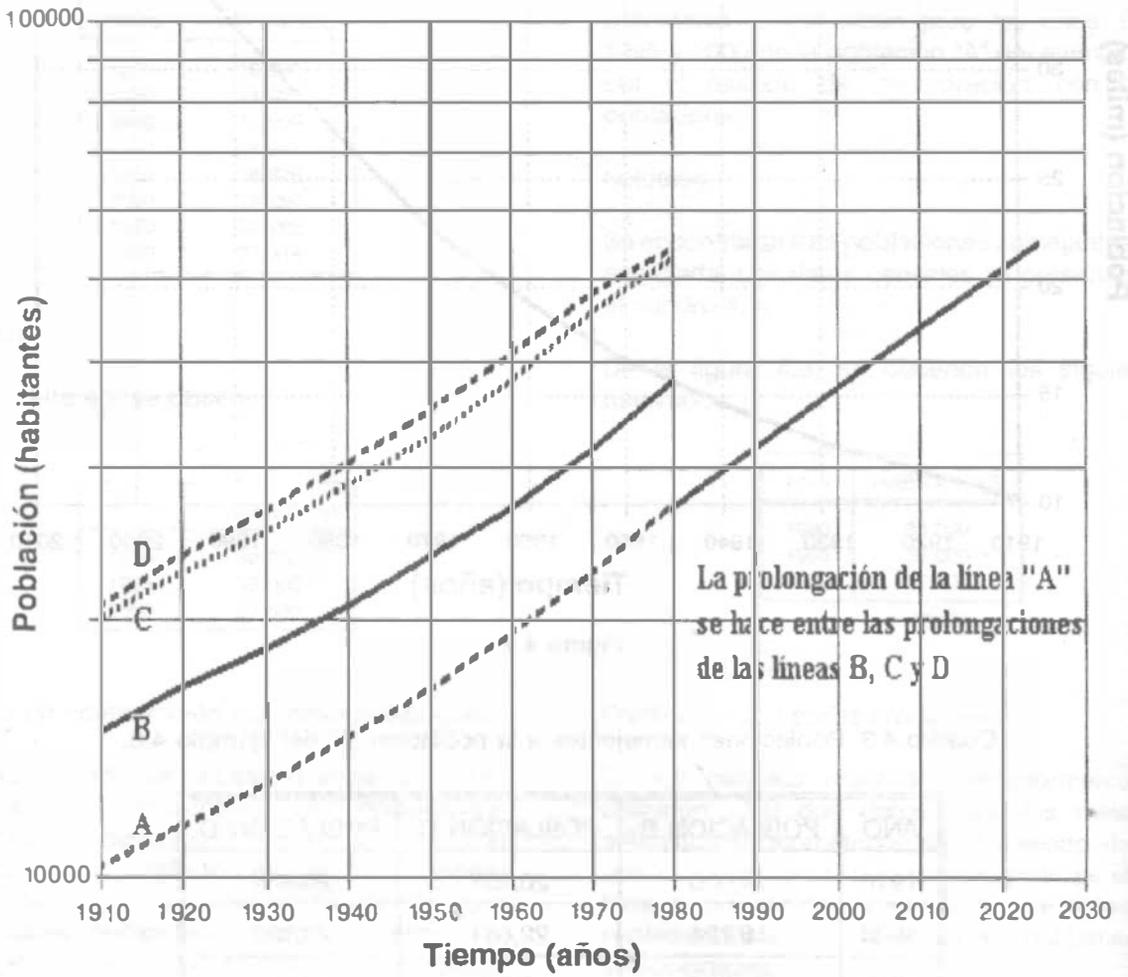


Figura 4.3

Método de los mínimos cuadrados.

Una relación lineal entre dos variables queda representada por una línea recta cuya ecuación general es $y=a+bx$. El método de los mínimos cuadrados es el procedimiento matemático utilizado para determinar los valores numéricos de las constantes "a" y "b" en la ecuación. El método utiliza el conjunto de observaciones que en este caso son años y número de habitantes.

Ejemplo 4.10

Para ejemplificar este método se utilizan los datos censales que se presentan en el cuadro 4.4 ("x" = años; "y" = número de habitantes)

Sustituyendo los valores del cuadro 4.4 en las ecuaciones normales

$$\sum y = na + b\sum x \tag{4.24}$$

$$\sum xy = a\sum x + b\sum x^2 \tag{4.25}$$

donde n representa el número de pares de observaciones utilizadas en la regresión.

Sustituyendo en las ecuaciones (4.24) y (4.25), se tiene que

$$\begin{aligned} 135\ 217 &= 8a + 15\ 560b \\ 263\ 982\ 880 &= 15\ 560a + 30\ 268\ 400b \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene que $a = -439\ 623.742$ y $b = 234.71767$, por lo tanto la ecuación de regresión es $y = -439\ 623.742 + 234.7167x$, que permite calcular la población para cualquier año:

| AÑO: X | POBLACION: Y |
|--------|--------------|
| 1971 | 23 005 |
| 1975 | 23 944 |
| 1990 | 27 484 |
| 1995 | 28 638 |
| 2000 | 29 812 |

Cuadro 4.4. Datos censales y operaciones del método de mínimos cuadrados del ejemplo 4.10.

| x | y | x ² | y ² | xy |
|------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1910 | 10200 | 3648100 | 104040000 | 19482000 |
| 1920 | 1156 | 3686400 | 132848676 | 2129920 |
| 1930 | 12909 | 3724900 | 166642281 | 24914370 |
| 1940 | 14587 | 3763600 | 212780569 | 28298780 |
| 1950 | 16629 | 3602500 | 76523641 | 32426550 |
| 1960 | 19290 | 3841600 | 372104100 | 37808400 |
| 1970 | 2762 | 3880900 | 51810864 | 44841140 |
| 1980 | 27314 | 3920400 | 746054596 | 54081720 |
| $\sum x = 15560$ | $\sum y = 135217$ | $\sum x^2 = 30\ 268\ 400$ | $\sum y^2 = 2\ 529\ 102\ 507$ | $\sum xy = 263\ 982\ 880$ |

Quando la serie de datos no se ajusta a una recta, por quedar los puntos muy dispersos en el plano, puede intentarse el ajuste a una curva logarítmica o exponencial. En forma similar al método anterior la ecuación está representada por:

$$\text{Log } y' = a + bx \tag{4.26}$$

donde las constantes de regresión a y b se calculan por el método de mínimos cuadrados. En este método la población debe estar en forma logarítmica, como se observa en el cuadro 4.5.

Cuadro 4.5. Operaciones del método de mínimos cuadrados del ejemplo 4.10 ajustando a una curva logarítmica.

| AÑO | HABITANTES | | | |
|---------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| x | log y | x ² | 2(log y) | x log y |
| 1910 | 4.0086 | 10200 | 16.0689 | 7656.43 |
| 1920 | 4.0617 | 11526 | 16.4974 | 7798.46 |
| 1930 | 4.1109 | 12909 | 16.8995 | 7934.04 |
| 1940 | 4.1640 | 14587 | 17.3389 | 8078.16 |
| 1950 | 4.2209 | 16629 | 17.8160 | 82 0.76 |
| 1960 | 4.285 | 19290 | 18.363 | 88 99.19 |
| 1970 | 4. 572 | 22762 | 18.9852 | 8583.68 |
| 1980 | 4.4 64 | 27314 | 19.6816 | 8784.07 |
| $\Sigma x = 15,560$ | $\Sigma y = 33.6450$ | $\Sigma x^2 = 30268400$ | $\Sigma y^2 = 141.6513$ | $\Sigma xy = 65, 464.79$ |

Sustituyendo los valores del cuadro 4.5 en las ecuaciones normales

$$\Sigma \text{Log } y = na + b\Sigma x \quad (4.27)$$

$$\Sigma \text{Log } y = na + b\Sigma x \quad (4.28)$$

Sustituyendo se tiene que:

$$33.645 = 8a + 15.560x$$

$$65\,466.70 = 15\,560a + 30\,268\,400b$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene que $a = -7.49261685$ y $b = 0.00601452$ por lo tanto la ecuación de regresión es $y = -7.4926 + 0.006014x$, a la que sacando su antilogaritmo permite calcular la población para cualquier año.

| AÑO 'X' | LOG Y | POB 'Y' |
|---------|---------|---------|
| 1971 | 4.36200 | 23015 |
| 1975 | 4.38606 | 24325 |
| 1990 | 4.47628 | 29942 |
| 1995 | 4.5064 | 32088 |
| 2000 | 4.5364 | 34389 |

4.3 USOS DEL AGUA

Generalmente, las aguas se clasifican, según el uso, en aguas de uso doméstico, comercial, industrial, público y para la agricultura (Figura 4.4). En las de uso doméstico se incluye toda el agua utilizada en las viviendas. La cantidad del consumo doméstico varía con el nivel de vida, pero es proporcional al número de habitantes. *En las de uso comercial* se incluye el agua empleada en los distritos o zonas comerciales o mercantiles, por personas que no habitan en ellas. El agua de uso comercial se utiliza en pequeñas manufacturas, y al mismo tiempo también en usos domésticos y, por consiguiente, el consumo no puede establecerse con arreglo al número de usuarios de la zona comercial. Tal gasto es mejor estimarlo con arreglo a la superficie del suelo de los edificios allí situados. El agua de uso industrial sirve para fines de fabricación y la cuantía de este uso no guarda relación alguna con la población o número de habitantes de una zona industrial. El agua de uso público o municipal sirve para limpiar calles y alcantarillas, riego de parques y jardines, combate de incendios, usos recreativos y de ornato así como para edificios públicos o sin "medidor". A veces se clasifican como de uso

público las pérdidas de agua por fugas en la red, las cuales representan frecuentemente una parte considerable del suministro total. El agua para la agricultura se utiliza para fines de riego

pero es preferible que a este uso no le dé servicio el sistema de abastecimiento de agua potable de la población.

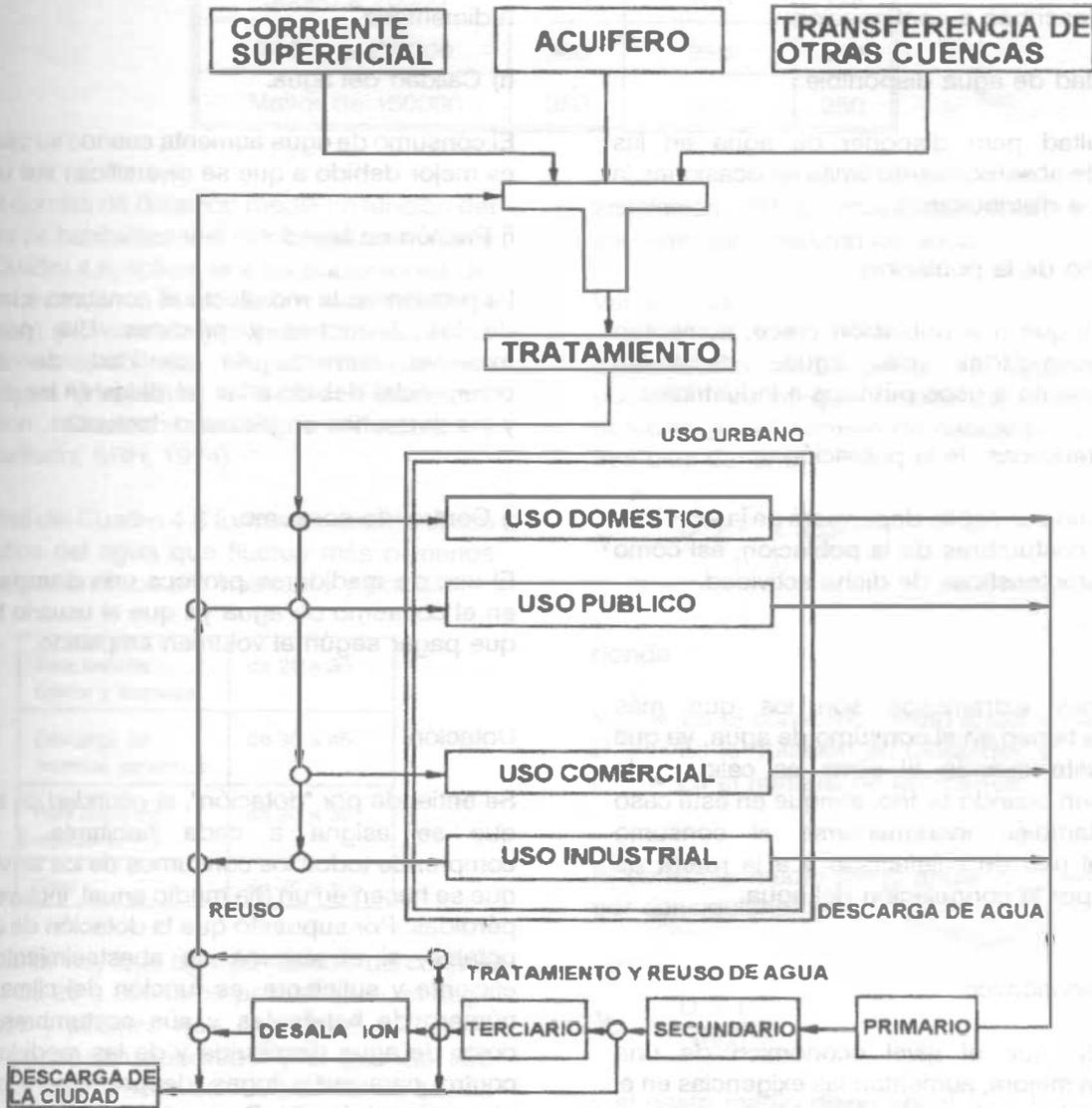


Figura 4.4. Usos del agua.

Consumos.

Los consumos de agua varían con los países e incluso con las regiones; así, en las ciudades se consume mayor cantidad que en las zonas rurales. En efecto, las condiciones climatológicas e hidrológicas de la región considerada, las costumbres locales y el género de actividad de los habitantes tiene una influencia directa en las cantidades de agua consumida. Específicamente, los factores que determinan el consumo son los que se describen a continuación:

a) Cantidad de agua disponible.

La dificultad para disponer de agua en las fuentes de abastecimiento limita en ocasiones la cantidad a distribuirse.

b) Tamaño de la población.

A medida que una población crece, aumentan sus necesidades de agua, destinada principalmente a usos públicos e industriales.

c) Características de la población.

El consumo per-cápita dependerá de la actividad básica y costumbres de la población, así como de las características de dicha actividad.

d) Clima.

Los climas extremos son los que más influencia tienen en el consumo de agua, ya que elevan éste cuando el clima es cálido y lo disminuyen cuando es frío, aunque en este caso puede también incrementarse el consumo debido al uso de calefacción y a la rotura de tuberías por la congelación del agua.

e) Nivel económico.

A medida que el nivel económico de una población mejora, aumentan las exigencias en el consumo de agua.

f) Existencia de alcantarillado.

Cuando una población cuenta con redes de

alcantarillado a través de las cuales los materiales de desecho son fácilmente eliminables, el consumo de agua es más elevado que en poblaciones donde no se cuenta con tal servicio.

g) Clase de abastecimiento.

El consumo en poblaciones que cuentan con un sistema público de abastecimiento es mayor que en aquellas que tienen sólo un sistema rudimentario.

h) Calidad del agua.

El consumo de agua aumenta cuando su calidad es mejor debido a que se diversifican sus usos.

i) Presión en la red.

La presión en la red afecta el consumo a través de los derroches y pérdidas. Una presión excesiva aumenta la cantidad de agua consumida, debido a las pérdidas en las juntas y los derroches en piezas defectuosas.

j) Control de consumo.

El uso de medidores provoca una disminución en el consumo de agua ya que el usuario tiene que pagar según el volumen empleado.

Dotación.

Se entiende por "dotación", la cantidad de agua que se asigna a cada habitante y que comprende todos los consumos de los servicios que se hacen en un día medio anual, incluyendo pérdidas. Por supuesto que la dotación de agua potable, si el sistema de abastecimiento es eficiente y suficiente, es función del clima, del número de habitantes y sus costumbres, del costo de agua distribuida y de las medidas de control para evitar fugas, desperdicios y hacer uso racional de ella. Se considera para fines de proyecto ya sea la aplicación de los datos experimentales que se recaben en la población en cuestión, los que se adapten de otras en condiciones similares o, a falta de éstos, se

Cuadro 4.6. Dotación de agua potable (l/hab/día).

| Número de habitantes | Clima | | |
|----------------------|--------|----------|------|
| | Cálido | Templado | Frio |
| 2500 a 15000 | 150 | 125 | 100 |
| 15000 a 30000 | 200 | 150 | 125 |
| 30000 a 70000 | 250 | 200 | 175 |
| 70000 a 150000 | 300 | 250 | 200 |
| Mayor de 150000 | 350 | 300 | 250 |

acaten normas de dotación media en función del número de habitantes y el clima, como se indica en el Cuadro 4.6, aplicable a las poblaciones del país, expresada en litros diarios por habitante (l/d x hab) (Normas de proyecto para obras de Aprovechamiento de Agua Potable en Localidades Urbanas de la República Mexicana. Dirección General de Agua Potable y Alcantarillado, SRH, 1974).

Las cifras del Cuadro 4.6 toman en cuenta el uso doméstico del agua que fluctúa más o menos como sigue en litros por habitante y por día:

| | |
|--------------------------------|-------------|
| Para bebida, cocina y limpieza | de 20 a 30 |
| Descarga de muebles sanitarios | de 30 a 45 |
| Para baño de regadera | de 20 a 30 |
| Total | de 70 a 105 |

a lo anterior hay que agregar lavado de coches a razón de 20 a 200 litros por vehículo, el riego de patios y jardines que usan de 1 a 7 litros diarios por metro cuadrado y el uso de aire acondicionado a razón de 100 a 500 litros diarios por habitante.

A falta de mediciones de consumo, son suficientes las dotaciones medias ya citadas, sin recurrir a teorizaciones para deducir cifras probables. Es importante anotar que la

instalación del alcantarillado repercute en el aumento de consumo de agua.

Variaciones.

El consumo medio anual de agua en una población es el que resulta de multiplicar la dotación por el número de habitantes y por los 365 días del año:

$$V_{ma} = \frac{D \times P \times 365}{1000} \tag{4.29}$$

donde:

- V_{ma} = Es el consumo medio anual en m³
- D = Es la dotación en l/hab/día, y
- P = Es el número de habitantes

El consumo medio diario anual (V_{md}) en m³, es por consiguiente:

$$V_{md} = \frac{D \times P}{1000} \tag{4.30}$$

y el gasto medio diario anual (Q_{md}) en litros por segundo es

$$Q_{md} = \frac{D \times P}{86400} \tag{4.31}$$

donde 86400 son los segundos que tiene un día.

El gasto medio diario es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio.

Las condiciones climáticas, los días de trabajo etcétera, tienden a causar amplias variaciones en el consumo de agua. Durante la semana, el lunes se producirá el mayor consumo y el domingo el más bajo. En algunos meses se observará un promedio diario de consumo más alto que el promedio anual. Especialmente el tiempo caluroso producirá una semana de máximo consumo y ciertos días superarán a otros en cuanto a su demanda. También se producen puntas de demanda durante el día. Habrá una punta por la mañana al empezar la actividad del día y un mínimo hacia las cuatro de la madrugada.

El gasto máximo diario alcanzará probablemente el 120% del diario medio anual y puede llegar hasta el 150%, es decir

$$Q_{MD} = Q_m \times CVD \quad (4.32)$$

donde:

Q_{MD} = Es el gasto máximo diario en litros por segundo.

Q_m = Es el gasto medio diario anual en litros por segundo y

CVD = Es el coeficiente de variación diaria.

El gasto máximo horario será probablemente de alrededor del 150% del promedio para aquel día y puede llegar hasta el 200%, o sea

$$Q_{MH} = Q_m \times CVD \times CVH \quad (4.33)$$

donde:

Q_{MH} = Es el gasto máximo horario en litros por segundo y

CVH = Es el coeficiente de variación horaria.

De acuerdo a los Lineamientos Técnicos de la CNA, se tienen los siguientes valores de los coeficientes de variación:

CVD 1.2 a 1.5

CVH 1.5 a 2

Los valores comúnmente usados para proyecto en la República Mexicana son:

CVD = 1.2

CVH = 1.5

4.4 GASTOS DE DISEÑO

Los gastos de diseño para los componentes de un sistema de abastecimiento de agua potable se indican en la figura 4.5.

Ejemplo 4.11

Determine el gasto medio, máximo diario y máximo horario que demandará una localidad con una población actual de 15 000 habitantes, que ha presentado una tasa de crecimiento de tipo geométrico del 4.5% anual. La localidad se ubica en una región de clima templado. El período de diseño es de 15 años.

Solución:

Pobl. actual = 15000 hab., de la ecuación 4.10, se tiene:

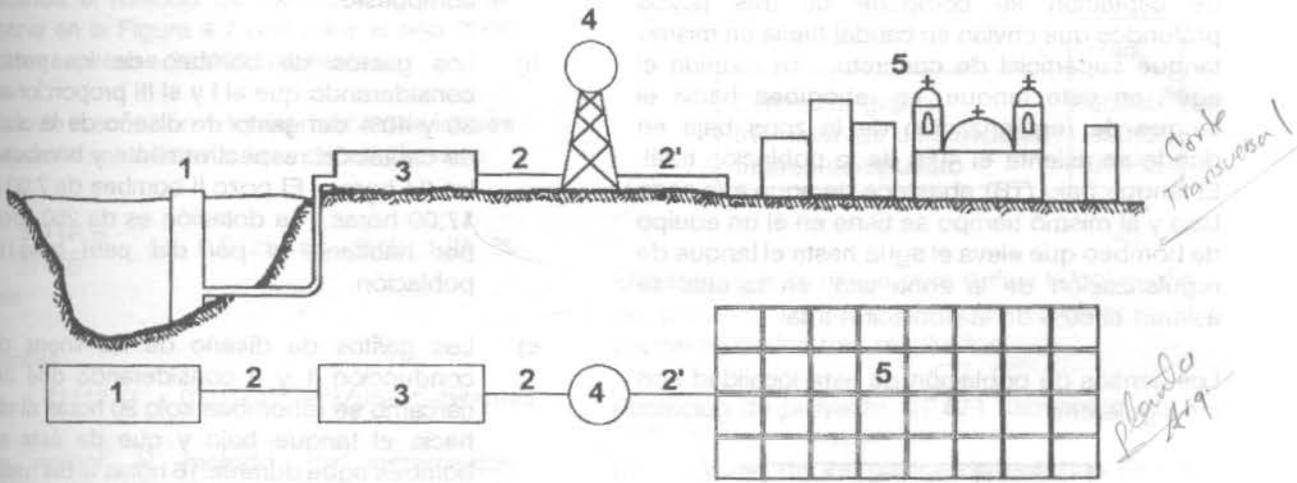
$$\text{Pobl. futura} = \text{Pobl. actual} \times (1+i)^t = 15000 (1+0.045)^{15} = 29029 \text{ hab.}$$

Población de proyecto = 29 029 hab.; dotación = 150 l/hab/día, que corresponde a un clima templado. A partir de las ecuaciones 4.31 a 4.33, se tiene:

$$Q_m = \frac{29029 \times 150}{86400} = 50.40 \text{ l/s}$$

$$QMD = 1.2 \times 50.40 = 60.48 \text{ l/s}$$

$$QMH = 1.2 \times 1.5 \times 50.40 = 90.72 \text{ l/s}$$



| COMPONENTE | GASTO DE DISEÑO |
|--|-----------------|
| 1. FUENTE Y OBRA DE CAPTACION | Q_{MD} |
| 2. CONDUCCION | Q_{MD} |
| 2'. CONDUCCION (ALIMENTACION A LA RED) | Q_{MD} |
| 3. POTABILIZADORA | * |
| 4. TANQUE DE REGULARIZACION | Q_{MD} |
| 5. RED DE DISTRIBUCION | Q_{MH} |

DONDE

Q_m = GASTO MEDIO

Q_{MD} = GASTO MAXIMO DIARIO

Q_{MH} = GASTO MAXIMO HORARIO

* Q_m ó Q_{MD} EN PROCESOS

Q_{MD} EN FUNCIONAMIENTO HIDRAULICO

Figura 4.5. Componentes del sistema de abastecimiento y sus gastos de diseño.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Ejemplo 4.12

En la figura 4.6 se muestra el diagrama del sistema de abastecimiento de agua potable que ha de proyectarse para cierta ciudad que de acuerdo a su topografía ha sido dividida en dos zonas denominadas "alta" y "baja". La fuente de abastecimiento es el agua subterránea y la obra de captación se compone de tres pozos profundos que envían su caudal hacia un mismo tanque superficial de concreto. Ya reunida el agua en este tanque, se rebombee hacia el tanque de regularización de la zona baja en donde se asienta el 40% de la población total. El tanque bajo (TB) abastece de agua a la zona baja y al mismo tiempo se tiene en él un equipo de bombeo que eleva el agua hasta el tanque de regularización de la zona alta, en la cual se asienta el 60% de la población total.

Los censos de población de esta localidad son los siguientes:

| Censo | No. de habitantes |
|-------|-------------------|
| 1921 | 5459 |
| 1930 | 6710 |
| 1940 | 7065 |
| 1950 | 10597 |
| 1960 | 16556 |
| 1970 | 21164 |
| 1980 | 27476 |
| 1990 | 31112 |

A partir del año actual (1991), calcule:

- La población de proyecto para un periodo de diseño de 15 años (ver cuadro 4.2) utilizando los métodos de incrementos diferenciales, extensión gráfica e interés compuesto.
- Los gastos de bombeo de los pozos considerando que el I y el III proporcionan 30 y 40% del gasto de diseño de la obra de captación respectivamente y bombean las 24 horas. El pozo II bombea de 7:00 a 17:00 horas. La dotación es de 250 litros por habitante y por día para toda la población.
- Los gastos de diseño de las líneas de conducción 1 y 2 considerando que del cárcamo se rebombee solo 20 horas al día hacia el tanque bajo y que de éste se bombea agua durante 16 horas al día hacia el tanque alto.

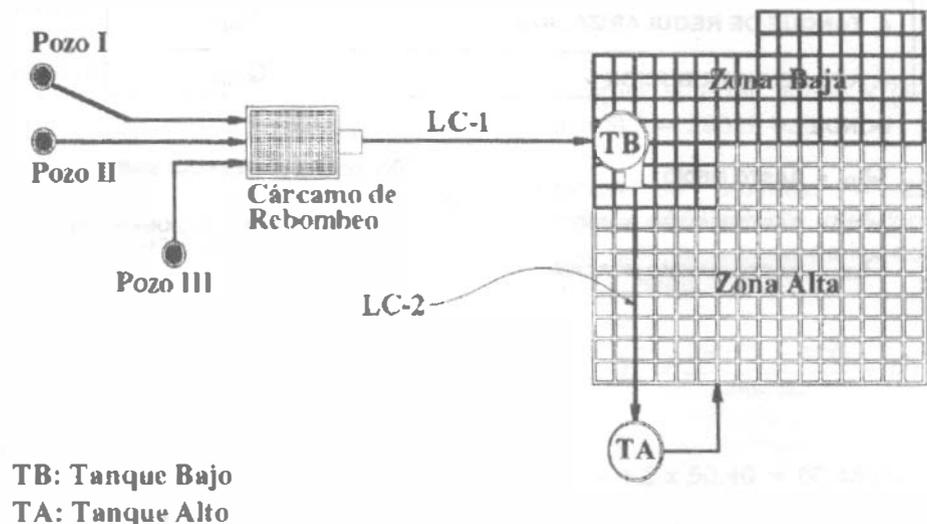


Figura 4.6. Esquema del problema 4.12.

Solución:

a) Cálculo de la población de proyecto:

El año al cual deberá estimarse la población es $1991 + 15 = 2006$

Aplicando el método de extensión gráfica se observa en la Figura 4.7 que para el año 2006 podrían esperarse 36 600 habitantes.

Utilizando la ecuación 4.10 del método de interés compuesto se obtiene la tasa de crecimiento.

$$i = \left(\frac{31112}{27476}\right)^{\frac{1}{10}} - 1 = 0.0125 \text{ es decir } 1.25 \% \text{ anual}$$

Entonces

$$P_{2006} = 31112 (1 + 0.0125)^{16} = 37953 \text{ habitantes.}$$

Para aplicar el método de incrementos diferenciales se descarta el primer dato por no constituir 10 años el periodo.

| AÑO | POBLACION | PRIMERA DIFERENCIA | SEGUNDA DIFERENCIA |
|----------|-----------|--------------------|--------------------|
| 1930 | 6710 | | |
| 1940 | 7065 | 355 | |
| 1950 | 10597 | 3532 | 3177 |
| 1960 | 16556 | 5959 | 2427 |
| 1970 | 21164 | 4608 | -1351 |
| 1980 | 27476 | 6312 | 1704 |
| 1990 | 31112 | 3636 | -2676 |
| SUMA | | 24402 | 3281 |
| n | | 6 | 5 |
| PROMEDIO | | 4067 | 656 |
| 1990 | 31112 | 4723 | 656 |
| 2000 | 35835 | 5379 | |
| 2010 | 41214 | | |

Interpolando se obtiene la población del año 2006

$$P_{2006} = \frac{41214 - 35835}{2010 - 2000} (2006 - 2000) + 35835$$

$$P_{2006} = 39\ 062 \text{ habitantes}$$

En resumen, se han obtenido los siguientes resultados:

| | Hab. |
|---------------------------|-------|
| Extensión gráfica | 36600 |
| Incrementos diferenciales | 39062 |
| Interés compuesto | 37953 |

El criterio que se aplica para definir la población de proyecto en este ejemplo es obtener el promedio de los tres resultados:

Población de proyecto: 37 871 habitantes.

b) Cálculo de los gastos de bombeo de los pozos.

El gasto de diseño de la obra de captación es el gasto máximo diario (Q_{MD}), como se indica en la Figura 4.5. En consecuencia, los tres pozos en conjunto deberán suministrar el volumen máximo diario.

$$V_{MD} = \frac{D \times P \times CVD}{1000} = \frac{250 \times 37871 \times 1.2}{1000}$$

$$V_{MD} = 11,361.3 \text{ m}^3$$

Como los pozos I y III deben satisfacer respectivamente el 30 y 40% del consumo máximo diario, al final del día habrán de producir los siguientes volúmenes:

Pozo I

$$V_I = 0.30 \times 11361.3 = 3408.39 \text{ m}^3 \text{ al día}$$

Pozo III

$$V_{III} = 0.40 \times 11361.3 = 4544.52 \text{ m}_3 \text{ al día}$$

De acuerdo con los datos, estos pozos habrán de bombear continuamente las 24 horas, por lo

Ejemplo 4.12

En la figura 4.6 se muestra el diagrama del sistema de abastecimiento de agua potable que ha de proyectarse para cierta ciudad que de acuerdo a su topografía ha sido dividida en dos zonas denominadas "alta" y "baja". La fuente de abastecimiento es el agua subterránea y la obra de captación se compone de tres pozos profundos que envían su caudal hacia un mismo tanque superficial de concreto. Ya reunida el agua en este tanque, se rebombeea hacia el tanque de regularización de la zona baja en donde se asienta el 40% de la población total. El tanque bajo (TB) abastece de agua a la zona baja y al mismo tiempo se tiene en él un equipo de bombeo que eleva el agua hasta el tanque de regularización de la zona alta, en la cual se asienta el 60% de la población total.

Los censos de población de esta localidad son los siguientes:

| Censo | No. de habitantes |
|-------|-------------------|
| 1921 | 5459 |
| 1930 | 6710 |
| 1940 | 7065 |
| 1950 | 10597 |
| 1960 | 16556 |
| 1970 | 21164 |
| 1980 | 27476 |
| 1990 | 31112 |

A partir del año actual (1991), calcule:

- La población de proyecto para un periodo de diseño de 15 años (ver cuadro 4.2) utilizando los métodos de incrementos diferenciales, extensión gráfica e interés compuesto.
- Los gastos de bombeo de los pozos considerando que el I y el III proporcionan 30 y 40% del gasto de diseño de la obra de captación respectivamente y bombean las 24 horas. El pozo II bombea de 7:00 a 17:00 horas. La dotación es de 250 litros por habitante y por día para toda la población.
- Los gastos de diseño de las líneas de conducción 1 y 2 considerando que del cárcamo se rebombeea solo 20 horas al día hacia el tanque bajo y que de éste se bombea agua durante 16 horas al día hacia el tanque alto.

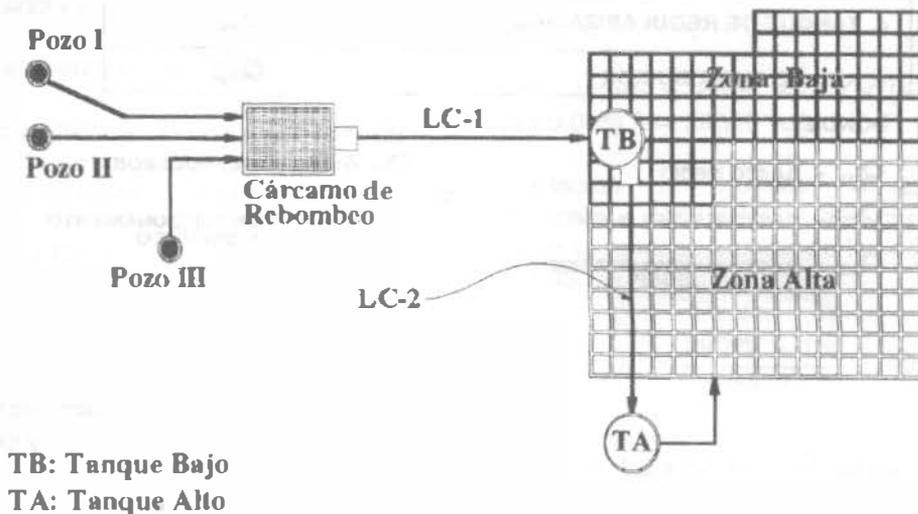


Figura 4.6. Esquema del problema 4.12.

Solución:

a) Cálculo de la población de proyecto:

El año al cual deberá estimarse la población es $1991 + 15 = 2006$

Aplicando el método de extensión gráfica se observa en la Figura 4.7 que para el año 2006 podrían esperarse 36 600 habitantes.

Utilizando la ecuación 4.10 del método de interés compuesto se obtiene la tasa de crecimiento.

$$i = \left(\frac{31112}{27476} \right)^{\frac{1}{10}} - 1 = 0.0125 \text{ es decir } 1.25 \% \text{ anual}$$

Entonces

$$P_{2006} = 31112 (1 + 0.0125)^{16} = 37953 \text{ habitantes.}$$

Para aplicar el método de incrementos diferenciales se descarta el primer dato por no constituir 10 años el periodo.

| AÑO | POBLACION | PRIMERA DIFERENCIA | SEGUNDA DIFERENCIA |
|----------|-----------|--------------------|--------------------|
| 1930 | 6710 | | |
| 1940 | 7065 | 355 | |
| 1950 | 10597 | 3532 | 3177 |
| 1960 | 18556 | 5959 | 2427 |
| 1970 | 21164 | 4608 | -1351 |
| 1980 | 27476 | 6312 | 1704 |
| 1990 | 31112 | 3636 | -2676 |
| SUMA | | 24402 | 3281 |
| n | | 6 | 5 |
| PROMEDIO | | 4067 | 656 |
| 1990 | 31112 | 4723 | 656 |
| 2000 | 35835 | 5379 | |
| 2010 | 41214 | | |

Interpolando se obtiene la población del año 2006

$$P_{2006} = \frac{41214 - 35835}{2010 - 2000} (2006 - 2000) + 35835$$

$$P_{2006} = 39\ 062 \text{ habitantes}$$

En resumen, se han obtenido los siguientes resultados:

| | Hab. |
|---------------------------|-------|
| Extensión gráfica | 36600 |
| Incrementos diferenciales | 39062 |
| Interés compuesto | 37953 |

El criterio que se aplica para definir la población de proyecto en este ejemplo es obtener el promedio de los tres resultados:

Población de proyecto: 37 871 habitantes.

b) Cálculo de los gastos de bombeo de los pozos.

El gasto de diseño de la obra de captación es el gasto máximo diario (Q_{MD}), como se indica en la Figura 4.5. En consecuencia, los tres pozos en conjunto deberán suministrar el volumen máximo diario.

$$V_{MD} = \frac{D \times P \times CVD}{1000} = \frac{250 \times 37871 \times 1.2}{1000}$$

$$V_{MD} = 11,361.3 \text{ m}^3$$

Como los pozos I y III deben satisfacer respectivamente el 30 y 40% del consumo máximo diario, al final del día habrán de producir los siguientes volúmenes:

Pozo I

$$V_I = 0.30 \times 11361.3 = 3408.39 \text{ m}^3 \text{ al día}$$

Pozo III

$$V_{III} = 0.40 \times 11361.3 = 4544.52 \text{ m}_3 \text{ al día}$$

De acuerdo con los datos, estos pozos habrán de bombear continuamente las 24 horas, por lo

que sus gastos de bombeo respectivos serán:

$$Q_B = \frac{\text{VOLUMEN}}{\text{TIEMPO DE BOMBEO}}$$

Pozo I

$$Q_{B-I} = \frac{3408.39}{24 \times 60 \times 60} \times 1000 = 39.45 \frac{l}{s}$$

Pozo III

$$Q_{B-III} = \frac{4544.52}{24 \times 60 \times 60} \times 1000 = 52.60 \frac{l}{s}$$

El 30% del volumen medio diario restante deberá ser producido por el pozo II, esto es

Pozo II

$$V_{II} = 0.30 \times 11361.3 = 3408.39 \text{ m}^3 \text{ al día}$$

Por este pozo sólo bombeará 10 horas continuas (de 7:00 a 17:00 hrs), por lo que el gasto de bombeo será

Pozo II

$$Q_{B-II} = \frac{3408.39}{10 \times 60 \times 60} \times 1000 = 94.68 \frac{l}{s}$$

c) Gastos de diseño de las líneas de conducción.

De acuerdo con la Figura 4.5, el gasto de diseño de una línea de conducción es el gasto máximo diario (Q_{MD}), pero en este caso debe afectarse por el lapso de bombeo, ya que este no es continuo las 24 horas del día.

Del cárcamo de rebombeo al tanque bajo (TB): 20 horas de bombeo.

$$Q_{LC-1} = \frac{24}{20} Q_{MD} = \frac{24}{20} \times \frac{250 \times 37871}{86400} \times 1.2$$

$$Q_{LC-1} = 157.8 \text{ l/s}$$

Del tanque bajo al tanque alto: 16 horas de bombeo.

$$Q_{LC-2} = \frac{24}{16} \times 0.6 Q_{MD}$$

$$Q_{LC-2} = \frac{24}{16} \times 0.6 \times \frac{250 \times 37871}{86400} \times 1.2$$

$$Q_{LC-2} = 118.35 \text{ l/s}$$

Obsérvese que en el caso de la línea de conducción LC-2, el gasto máximo diario se ha multiplicado por 0,6 debido al hecho de que el 40% de dicho gasto se consume en la zona baja por lo que sólo tiene que bombearse al tanque alto el 60% restante.

En conclusión, no importa cuantas horas se bombee, el hecho es que siempre deberá tenerse al final del día un volumen igual al consumo máximo diario, por lo que el gasto máximo diario deberá ser incrementado con un factor de 24/(horas de bombeo) para satisfacer las necesidades de la población.

| Linea | Longitud (m) | Diámetro (mm) | Material | Costo (COP) |
|-------|--------------|---------------|----------|-------------|
| LC-1 | 1000 | 150 | Acero | 15000000 |
| LC-2 | 1000 | 150 | Acero | 15000000 |
| TB | 1000 | 150 | Acero | 15000000 |
| TA | 1000 | 150 | Acero | 15000000 |
| ... | ... | ... | ... | ... |

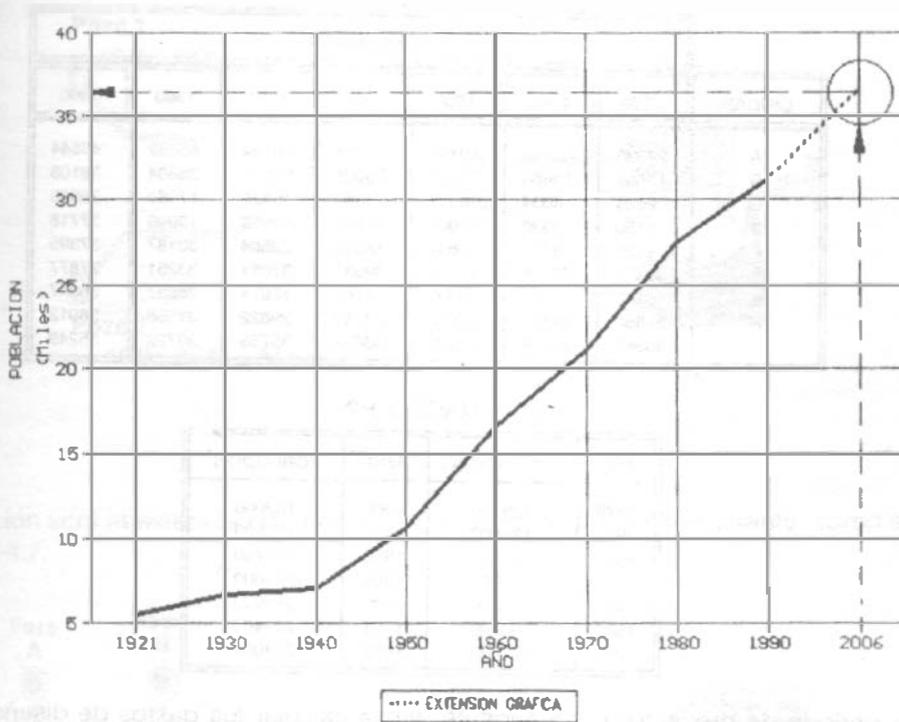


Figura 4.7. Aplicación del método de extensión gráfica para el cálculo de la población futura del problema 4.12.

Problemas

- 4.1. Los datos de población de nueve ciudades diferentes que en 1990 eran del mismo tamaño, se dan en el Cuadro P1.
 - a) Representar estos datos sobre una hoja de papel milimétrico.
 - b) Indique el método o métodos de previsión de población que les serían aplicables a cada una de dichas ciudades.
- 4.2. Predíjase la población de la localidad cuyos datos se presentan en el Cuadro P2, para el año 2000 utilizando proyecciones aritméticas y geométricas.
- 4.3. Si la población de saturación de la ciudad D del problema 1 se fija en 180,000 habitantes, calcúlese su población en 2005 según el modelo geométrico decreciente.

CUADRO P1

| CIUDAD | POBLACION | | | | | | |
|--------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1930 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 |
| A | 24336 | 33484 | 40120 | 48424 | 46784 | 45982 | 43544 |
| B | 13884 | 18650 | 22561 | 25086 | 25537 | 28884 | 36108 |
| C | 2024 | 4034 | 9241 | 13842 | 16379 | 17389 | 36585 |
| D | 6150 | 9539 | 11006 | 11223 | 12958 | 19999 | 37718 |
| E | 1690 | 3721 | 6841 | 16598 | 22584 | 30187 | 37395 |
| F | 30470 | 39165 | 41611 | 39532 | 37081 | 33251 | 27877 |
| G | 6185 | 8925 | 10303 | 14766 | 18071 | 28837 | 36047 |
| H | 21850 | 24803 | 25978 | 28749 | 29822 | 31558 | 38912 |
| I | 30345 | 34668 | 36192 | 36652 | 35753 | 36722 | 35249 |

CUADRO P2

| AÑO | POBLACION | AÑO | POBLACION |
|------|-----------|------|-----------|
| 1979 | 126700 | 1986 | 182000 |
| 1980 | 132400 | 1987 | 195200 |
| 1981 | 139200 | 1988 | 208700 |
| 1982 | 146000 | 1989 | 223600 |
| 1983 | 152600 | 1990 | 245900 |
| 1984 | 160700 | 1991 | 281400 |
| 1985 | 170600 | 1992 | 314000 |

- 4.4 Para un periodo de proyecto de 15 años se desea calcular los gastos de diseño medio, máximo diario y máximo horario de agua potable para el sistema de abastecimiento que se está proyectando para una ciudad que actualmente tiene 45,000 habitantes. Según estimaciones del INEGI el crecimiento esperado será de tipo geométrico con una tasa del 1.8% anual; la dotación actual es de 250 l/hab/día y se propone incrementarla aritmeticamente a razón del 0.5% anual. Considere los coeficientes de variación frecuentemente usados en México.
- 4.5 Resuelva el Ejemplo 4.12, considerando una localidad para la cual se tienen los siguientes datos censales:

| AÑO | POBLACION |
|------|-----------|
| 1930 | 12,115 |
| 1940 | 13,493 |
| 1950 | 12,369 |
| 1960 | 17,843 |
| 1970 | 24,337 |
| 1980 | 34,863 |
| 1990 | 48,674 |

- 4.6 El tanque de regularización mostrado en la Figura P-4.6 es alimentado por dos pozos en las horas de bombeo indicadas. Además cuenta con dos salidas: una que da servicio a las demandas de la población A y otra que abastece a una industria, según las horas indicadas en la figura. La dotación es de 200 l/hab/día y los coeficientes de variación diaria y horaria son 1.2 y 1.5, respectivamente.
- Calcular el gasto de la línea de alimentación a la red de distribución.
 - Calcular la población teórica que atiende actualmente el sistema.
 - Calcular el déficit que tendrá el sistema en el año 2000, en l/s suponiendo un crecimiento de tipo geométrico con una tasa del 2.5% anual.

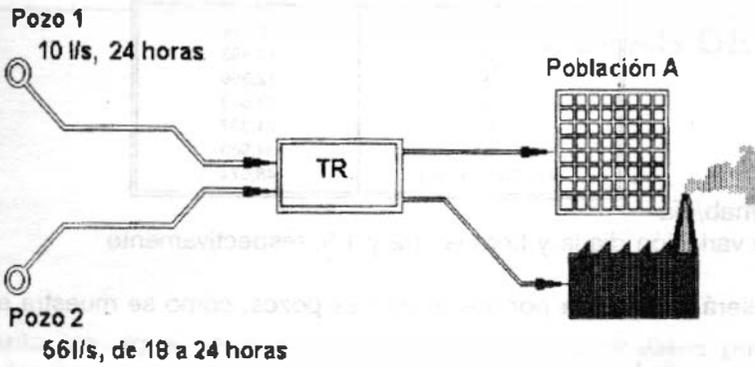


Figura P-4.6

4.7 Una población será abastecida por medio de dos pozos y una galería filtrante, como se muestra en la Figura P-4.7.

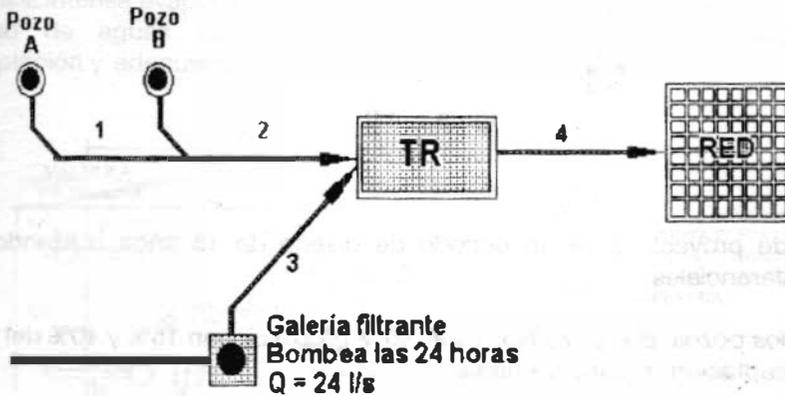


Figura P-4.7

Calcule:

- La población de proyecto para un periodo de diseño de 15 años utilizando el método de incrementos diferenciales.
- Si el pozo A proporciona un gasto igual al 65% del gasto del pozo B y los dos funcionan únicamente durante 12 horas, ¿cuál será el gasto que debe producir cada pozo?
- ¿Cuáles serán los gastos de diseño de las líneas de conducción 1, 2, 3 y 4.

Los datos censales son los siguientes:

| AÑO | POBLACION |
|------------------|-----------|
| 1 | 12,115 |
| 2 | 13,493 |
| 3 | 12,369 |
| 4 | 17,843 |
| 5 | 24,337 |
| 6 | 34,963 |
| 7 (último censo) | 48,674 |

Dotación: 300 l/hab/día

Coefficientes de variación diaria y horaria: 1.2 y 1.5, respectivamente.

4.8 Una población será abastecida por medio de tres pozos, como se muestra en la Figura P-4.8.

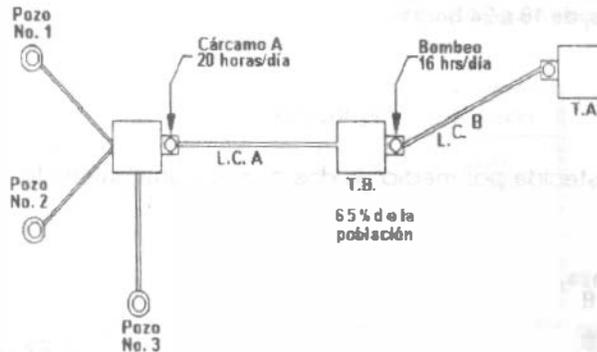


Figura P-4.8.

Calcule:

- La población de proyecto para un período de diseño de 15 años utilizando el método de incrementos diferenciales.
- Los gastos de los pozos, si el pozo No. 1 y el No. 2 proporcionan 15% y 40% del gasto de diseño de la obra de captación, respectivamente.
- Los gastos de diseño d_r de las líneas de conducción A y B, considerando que: el cárcamo A bombea sólo 20 horas al día hacia el tanque bajo (TB) y el tanque bajo dará servicio al 65% de la población y de ahí se bombea agua durante 16 horas al día hacia el tanque alto.

| AÑO | POBLACION |
|------------------|-----------|
| 1 | 24,679 |
| 2 | 28,894 |
| 3 | 23,999 |
| 4 | 54,396 |
| 5 | 91,156 |
| 6 (último censo) | 151,805 |

Dotación: 300 l/hab/día

Coefficientes de variación diaria y horaria: 1.15 y 1.4, respectivamente.

OBRAS DE CAPTACION

Para el abastecimiento de agua se cuenta principalmente con las aguas fluviales y las subterráneas. Además se utiliza el agua de los manantiales, lagos y embalses. En pequeña escala, también se almacena agua de lluvia en cisternas, pero no es fácil cuando se trata de abastecer poblaciones importantes. Sin embargo, regiones en donde los enormes estiajes, unidos a la intensa evaporación, agotan la disponibilidad de aguas superficiales y profundas, la captación y adecuado almacenaje

de las aguas de lluvia puede salvar la crítica situación. La captación de estas aguas puede hacerse en los tejados o en áreas especiales debidamente dispuestas. Pero en estas condiciones el agua arrastra las impurezas de dichas superficies, por lo que para hacerla potable es preciso filtrarla. La filtración se consigue mediante la adecuada instalación de un filtro en la misma cisterna. Un dispositivo de este tipo se ilustra en la Figura 5.1.

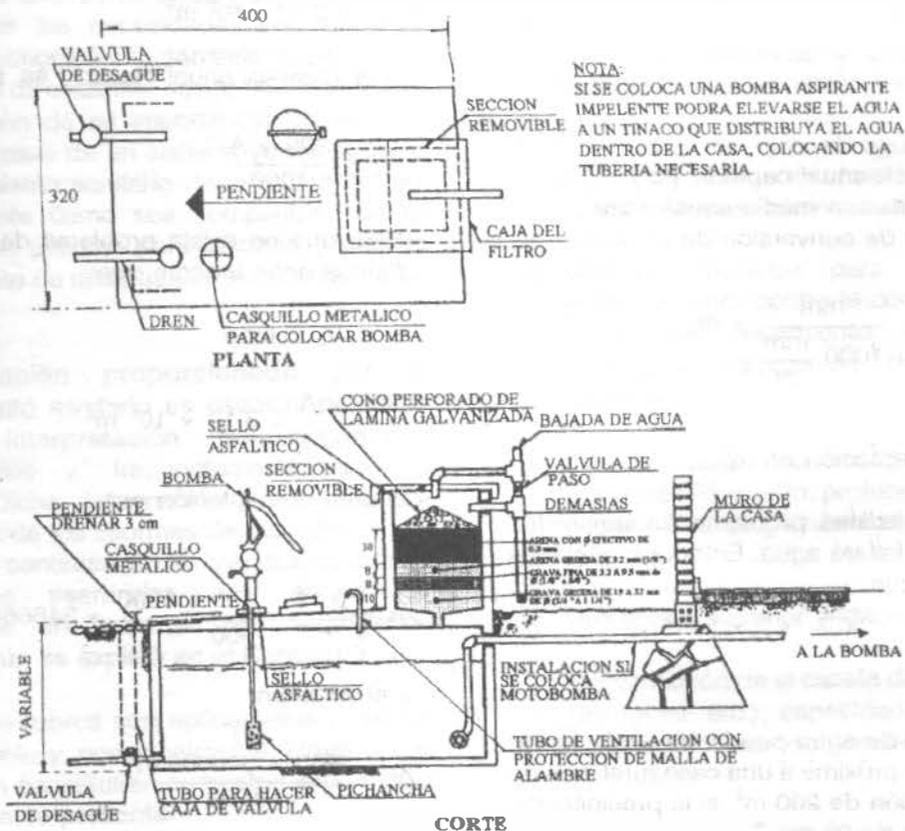


Figura 5.1. Captación de agua pluvial.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

El volumen de la cisterna puede calcularse de la forma siguiente:

$$V_s = D \times 30 \times (12 - t) \times 1.3 \times h \quad (5.1)$$

donde:

V_s = Volumen necesario para el consumo en época de secas; [litros].

D = Dotación en [l/hab/día]

30 = Días del mes

$(12-t)$ = Número de meses secos; t es el número de meses con lluvia

1.3 = 30% más por seguridad

h = Número de habitantes (usuarios).

Por otra parte:

$$V_c = \frac{P \times A}{1000} \quad (5.2)$$

donde:

V_c = Volumen anual captado [m³]

P = Precipitación media anual (mm)

1000 = Factor de conversión de unidades

$$\frac{\text{mm}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} = \text{m}$$

A = Área de captación en m²

Si $V_s < V_c$ no existirá problema de suministro, pero si $V_s > V_c$ faltará agua. Entonces, al menos debe tenerse que

$$V_s = V_c$$

Ejemplo 5.1

¿Qué volumen de agua puede ser almacenado en una cisterna próxima a una casa rural, con un área de captación de 200 m², si la precipitación media anual es de 90 cm ?

Solución:

$$V_c = 90 \text{ cm} \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) (200 \text{ m}^2) = 180 \text{ m}^3$$

Ejemplo 5.2

Calcular el volumen de agua que se debe almacenar en una cisterna para una población de 5000 habitantes si se les asigna una dotación de 200 l/hab/día. La precipitación media anual es de 90 cm, y la época de lluvias dura 4 meses.

Solución.

El volumen necesario para el consumo en época de secas es de acuerdo con la ec. 5.1

$$V_s = 200 \frac{\text{l}}{\text{hab día}} \times 30 \text{ días} \times (12 - 4) \times 1.3 \times 5000 \text{ hab} = 3.12 \times 10^5 \text{ l}$$

$$V_s = 3.12 \times 10^5 \text{ m}^3$$

y el volumen anual captado es, por la ec. (5.2):

$$V_c = \frac{900 \times A}{1000}$$

Para que no exista problema de suministro, al menos debe tenerse que:

$$V_c = V_s \text{ o bien}$$

$$\frac{900 \times A}{1000} = 3.12 \times 10^5 \text{ m}^3$$

El área de captación es:

$$A = \frac{3.12 \times 10^5 \times 1000}{900} = 346666.67 \text{ m}^2$$

y el volumen

$$V_c = \frac{900 \times 346666.67}{1000}$$

$$V_c = 312000 \text{ m}^3$$

En conclusión, no es factible para una población como la de este ejemplo, la construcción de obras tan grandes para la recolección y almacenamiento de agua pluvial, y no debe depender de ésta para el suministro, pero tampoco debería desaprovecharla.

La planeación de un sistema de abastecimiento de agua requiere que se determinen la calidad y cantidad de aquella y las fuentes con que se cuente para su utilización. Estos factores pueden conocerse mediante un reconocimiento sanitario.

5.1 RECONOCIMIENTO SANITARIO

La importancia que tiene un reconocimiento sanitario de las fuentes de agua no debe menospreciarse. En el caso de un nuevo sistema de abastecimiento, el reconocimiento sanitario debe realizarse conjuntamente con la recolección de los datos iniciales desde el punto de vista de la ingeniería, cubriendo la explotación de una fuente dada y su capacidad para satisfacer las necesidades presentes y futuras. El reconocimiento sanitario debe incluir la localización de cualquier riesgo contra la salud y la evaluación de su importancia presente y futura. En el caso de un sistema ya construido, el reconocimiento sanitario debe realizarse tan frecuentemente como sea compatible con el control de los peligros para la salud y para el mantenimiento de una buena situación sanitaria.

La información proporcionada por el reconocimiento sanitario es esencial para una completa interpretación de los datos bacteriológicos y, frecuentemente, de los químicos. Dicha información debe siempre formar parte de los informes de laboratorio. Las guías que a continuación se mencionan cubren los factores esenciales que deben ser considerados en la etapa de Investigación Directa, según se explicó en el Capítulo 3.

No todos los rubros son aplicables a cualquier abastecimiento y, ocasionalmente, algunos que no aparecen constituirán aumentos importantes a la lista que se presenta.

Abastecimiento con agua subterránea.

- a) Características geológicas locales; pendientes del terreno superficial.
- b) Naturaleza de los suelos y de los estratos porosos inferiores, ya sean arcilla, arena, grava, roca (especialmente calizas porosas); granulometría de la arena y grava; espesor de los estratos que contienen agua; profundidad del nivel freático, localización y registro de pozos locales ya sea que estén en uso o abandonados.
- c) Pendiente del manto freático de preferencia determinada de la observación de pozos existentes o de pozos de prueba, o estimándola por la pendiente del terreno superficial, sin la exactitud que este procedimiento implica.
- d) Extensión de la superficie de escurrimientos que puede aportar agua para el abastecimiento.
- e) Naturaleza, distancia y dirección de las fuentes de contaminación locales.
- f) Posibilidad de que el agua de desagüe superficial penetre en el sistema y de que los pozos se inunden; métodos de protección.
- g) Métodos utilizados para protección del abastecimiento contra la contaminación, por medio del tratamiento de las aguas residuales, disposición de desechos y similares.
- h) Características constructivas del pozo: materiales, diámetro, profundidad del ademe; profundidad de pichanchas o cedazos y su longitud.
- i) Protección superior y lateral del pozo.
- j) Construcción de la caseta de bombeo (pisos, desagües, etc.); capacidad de las bombas; abatimiento cuando las bombas están en operación.
- k) Disponibilidad de un abastecimiento

peligroso, que pueda utilizarse en sustitución del abastecimiento normal, ocasionando peligros para la salud pública.

- l) Desinfección: equipos, supervisión, estuches para pruebas u otros tipos de control de laboratorio.

Abastecimiento con agua superficial.

- a) Naturaleza geológica de la superficie; características de los suelos y de las rocas.
- b) Características de la vegetación; bosques; tierra cultivada e irrigación, incluyendo salinidad, efecto en el agua de riego, etc.
- c) Población y población con alcantarillado por kilómetro cuadrado de superficie de captación.
- d) Métodos para la disposición de las aguas residuales, ya sea por medio de su desviación de la cuenca o por tratamiento.
- e) Características y eficiencia de las plantas de tratamiento de las aguas residuales en el interior de la cuenca.
- f) Proximidad de fuentes de contaminación fecal en la toma de abastecimiento del agua.
- g) Proximidad, fuentes y características de los desechos industriales, salmueras de campos petroleros, aguas ácidas de origen minero, etc.
- h) Características del abastecimiento en cuanto a cantidad.
- i) Para abastecimientos de lagos o represas; datos de dirección y velocidad de los vientos; acarreo de contaminantes; datos relativos a luz solar (algas).
- j) Características y calidad del agua cruda; organismos coliformes (NMP), algas, turbiedad, color, constituyentes minerales objetables.

- k) Período nominal de retención en la represa o en el depósito de almacenamiento.

- l) Tiempo mínimo probable que requiere el agua para escurrir desde las fuentes de contaminación hasta la represa y al través de la obra de toma en la represa.

- m) Forma de la represa, haciendo referencia a posibles corrientes de agua inducidas, ya sea por el viento o descarga de la represa, desde la bocatoma hasta la admisión al sistema.

- n) Medidas de protección en relación con la utilización de la cuenca colectora para el control de pesca, utilización de botes, acuatizaje de aeroplanos, natación, vadeo, corte de hielo, tolerancia de animales ya sea en las zonas marginales, sobre o en el interior de las aguas, etc.

- o) Eficiencia y constancia de las actividades de vigilancia.

- p) Potabilización del agua: clase y condiciones adecuadas de los equipos; existencia de refacciones; efectividad de los procesos de potabilización; evaluación de la supervisión y realización de pruebas; tiempo de contacto después de la desinfección; determinación del cloro libre residual.

- q) Instalaciones de bombeo; caseta de bombeo, capacidad de bombas y de unidades de repuesto, instalaciones para almacenamiento.

5.2 CAPTACION DE AGUAS SUPERFICIALES

Para el diseño de obras de captación superficiales se requiere obtener, además de la información del apartado 5.1, la siguiente:

a) Datos Hidrológicos

- o Gastos medio, máximo y mínimo
- o Niveles de agua normal, extraordinario y mínimo
- o Características de la cuenca; erosión y sedimentación

o Estudio de inundaciones y arrastre de cuerpos flotantes

b) Aspectos Económicos

o Generación de alternativas y elección de la más económica que cumpla con los requerimientos técnicos

o Menores costos de construcción, operación y mantenimiento

o Costo de las obras de protección

o Tipo de tenencia del terreno

Etc.

Dependiendo de las características hidrológicas de la corriente, las obras de captación pueden agruparse en los cuatro tipos generales siguientes:

1. Para grandes variaciones en los niveles de la superficie libre

1.a) Torres para captar el agua a diferentes niveles, en las márgenes o en el punto más profundo del río, Figura 5.2.

1.b) Estaciones de bombeo flotantes. También pueden usarse en lagos o embalses. Figura 5.3.

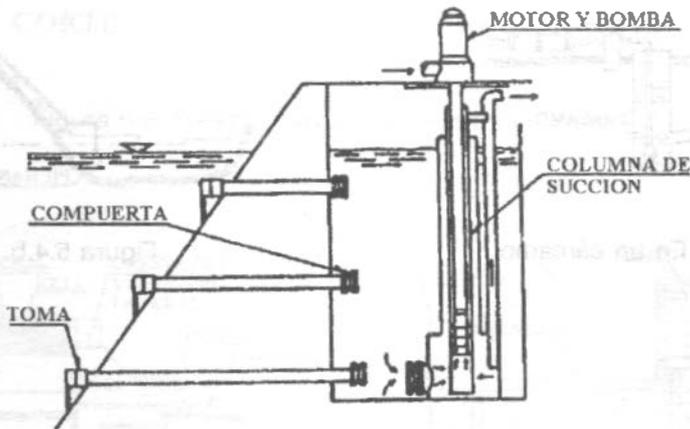


Figura 5.2

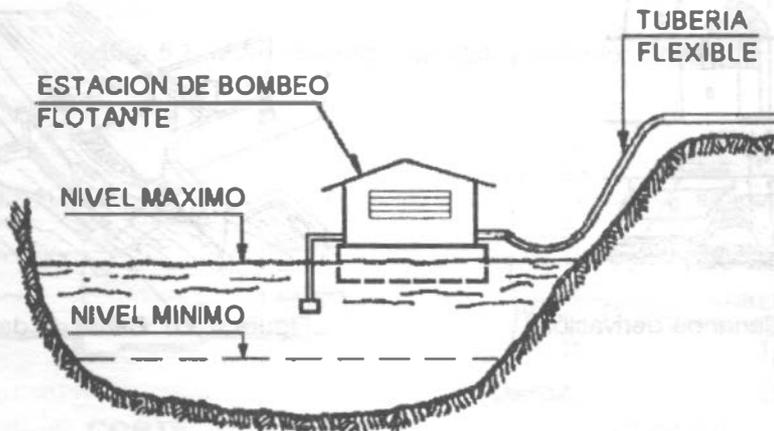


Figura 5.3. Estación flotante.

2. Para pequeñas oscilaciones en los niveles de la superficie libre.

2.a) Estaciones de bombeo fijas, con toma directa en el río o en un cárcamo. Figura 5.4.

2.b) Canales de derivación con, o sin, desarenadores. Una estructura de este tipo comprende esencialmente:

- Un muro equipado corrientemente de una compuerta en prevención de las crecidas; (V_1).

- Una incisión de la margen provista de compuertas que permitan detener las aguas en exceso y cerrar la toma; (V_2).

- Un canal (c) que, partiendo de la incisión, lleve en su origen un vertedor (D) que permita el retorno del agua sobrante al río y

- Una compuerta (V_3) que permita cerrar completamente el canal. Figura 5.5.

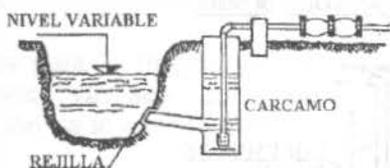


Figura 5.4.a. En un cárcamo



Figura 5.4.b. En río

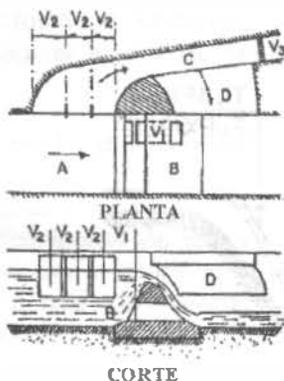


Figura 5.5.a. Canal de derivación.

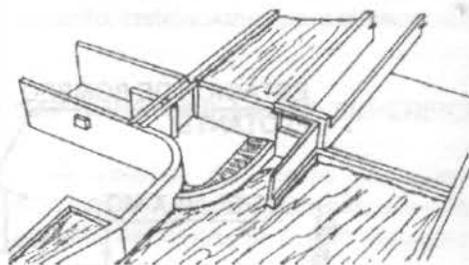
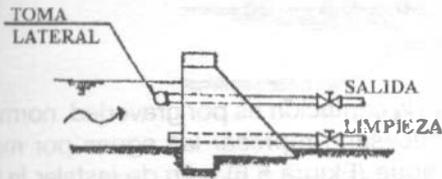


Figura 5.5.b. Canal de derivación.

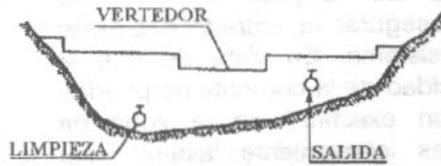
- 3. Para escurrimientos con pequeños tirantes.
- 3.a) Presas derivadoras o diques con toma directa, Figura 5.6.

El proyecto estructural de la cortina estará sujeto a las Normas de Proyecto y aprobación de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

- 3.b) Dique con caja y vertedor lateral, Figura 5.7.
- 3.c) Dique con vertedor y caja central, Figura 5.8.

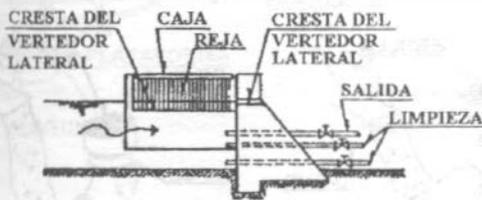


CORTE

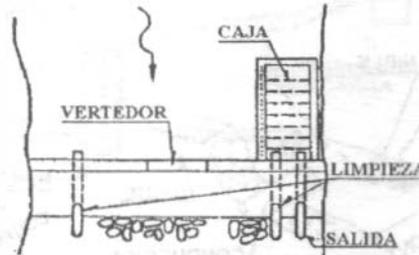


ELEVACION

Figura 5.6. Presas derivadoras con toma directa.

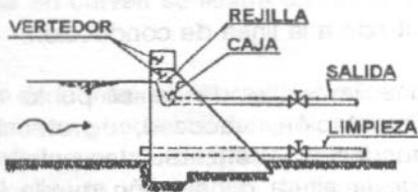


CORTE

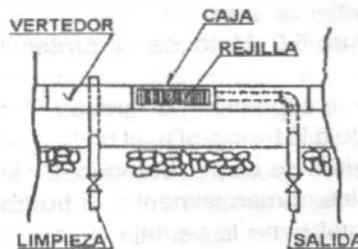


PLANTA

Figura 5.7. Muro vertedor con caja y vertedor lateral.



CORTE



PLANTA

Figura 5.8. Muro vertedor con caja central y toma.

5.2.1 Captación directa por gravedad o por bombeo.

Cuando las aguas de un río están relativamente libres de materiales de arrastre en toda época del año, el dispositivo de captación más sencillo es un tubo sumergido. Es conveniente orientar la entrada del tubo en forma tal que no quede enfrente de la dirección de la corriente, y protegerla con malla metálica contra el paso de objetos flotantes. (Figura 5.9).

La sumergencia del dispositivo debe ser suficiente para asegurar la entrada del gasto previsto en el sistema. En vista de que la dirección y velocidad de la corriente no pueden determinarse con exactitud en la zona de acercamiento, es conveniente asumir una pérdida por entrada de $V^2/2g$, siendo V la velocidad de flujo en el tubo para el diámetro y gasto dados y g la aceleración de la gravedad.

Esa pérdida se aumenta considerablemente si la entrada está protegida con rejillas y su valor puede estimarse tomando en cuenta el área libre de penetración y el coeficiente de contracción del flujo a través de la rejilla. Si por ejemplo una rejilla reduce el área libre del tubo en un 40% y el coeficiente de contracción es del orden de 0.5, la pérdida por entrada será de

$$\frac{1}{0.6 \times 0.5} \times \frac{V^2}{2g} \tag{5.3}$$

Si la captación es por gravedad, normalmente es necesario represar las aguas por medio de un dique (Figura 5.6) a fin de instalar la tubería por encima del nivel de la máxima crecida.

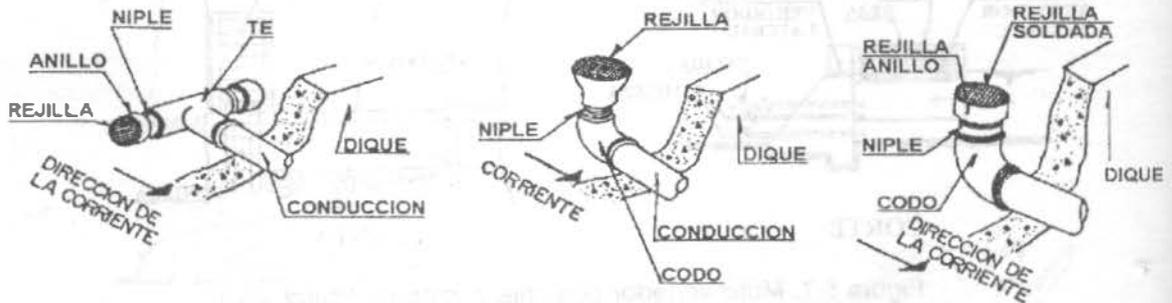


Figura 5.9. Métodos de protección de la entrada a la línea de conducción.

En el caso en que la captación por gravedad no sea factible, debido a la topografía, el método de captación recomendable es por bombeo. De las bombas disponibles comercialmente, la bomba centrífuga horizontal tiene la ventaja de que la ubicación del equipo de bombeo y el punto de captación pueden ser distintos, o sea que la estación de bombeo puede construirse en el sitio

más favorable desde el punto de vista de cimentación, acceso, protección contra inundaciones, etc. Su desventaja principal es que la altura de succión queda limitada y el desnivel máximo permisible entre la bomba y el nivel de bombeo, es relativamente pequeño (Figura 5.10).

La bomba centrífuga vertical (tipo pozo profundo) tiene mayor eficiencia que la horizontal, pero el costo inicial del equipo es mayor y la estación de bombeo tiene que

ubicarse directamente por encima del punto de captación. Esta condición a veces representa problemas graves de cimentación, resultando obras de costo sumamente elevado, Figura 5.11.

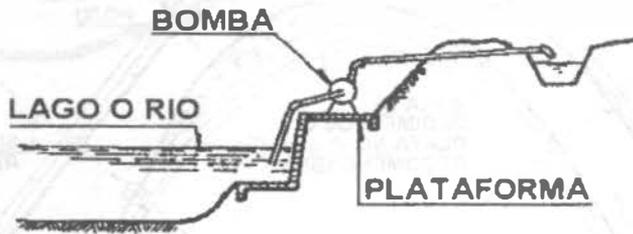


Figura 5.10. Captación directa con bomba centrífuga horizontal.

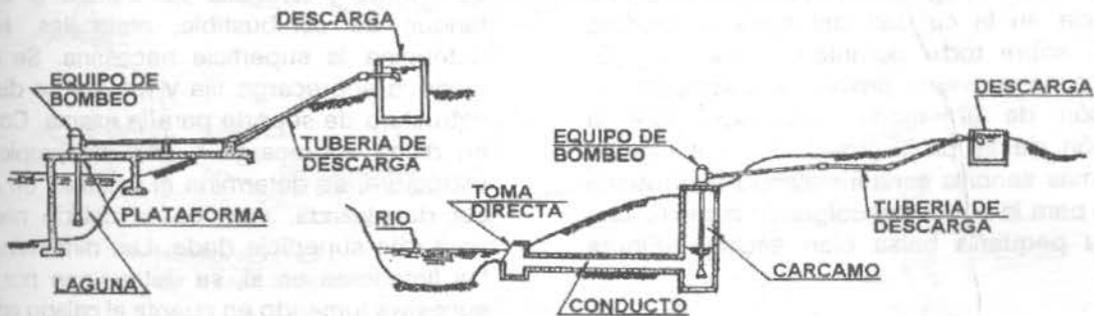


Figura 5.11. Captación directa con bomba centrífuga vertical.

Se puede afirmar que cuando se trata de la captación directa de las aguas superficiales, el tipo de bomba más comúnmente empleada es la centrífuga horizontal. Su localización recomendable en curvas se ilustra en la Figura 5.12.

Dependiendo de la máxima altura de succión, el equipo de bombeo puede instalarse fijo; en una estructura móvil que se desplaza sobre una plataforma inclinada, siguiendo la variación horizontal y vertical del río, o bien sobre estructuras flotantes.

Estación de bombeo fija.

En caso de que la altura de succión no sobrepase los 4 a 6 m (a alturas moderadas sobre el nivel del mar), la estación de bombeo se ubica en terreno firme, con suelo de cimentación adecuado, en sitio accesible y protegido contra inundaciones. Si se trata de ríos pequeños, las aguas normalmente se represan por medio de un dique, a fin de asegurar la profundidad mínima necesaria para la captación del gasto requerido. Si el curso de agua es suficientemente profundo, la succión simplemente se proyecta por debajo del nivel mínimo, con la sumergencia necesaria.

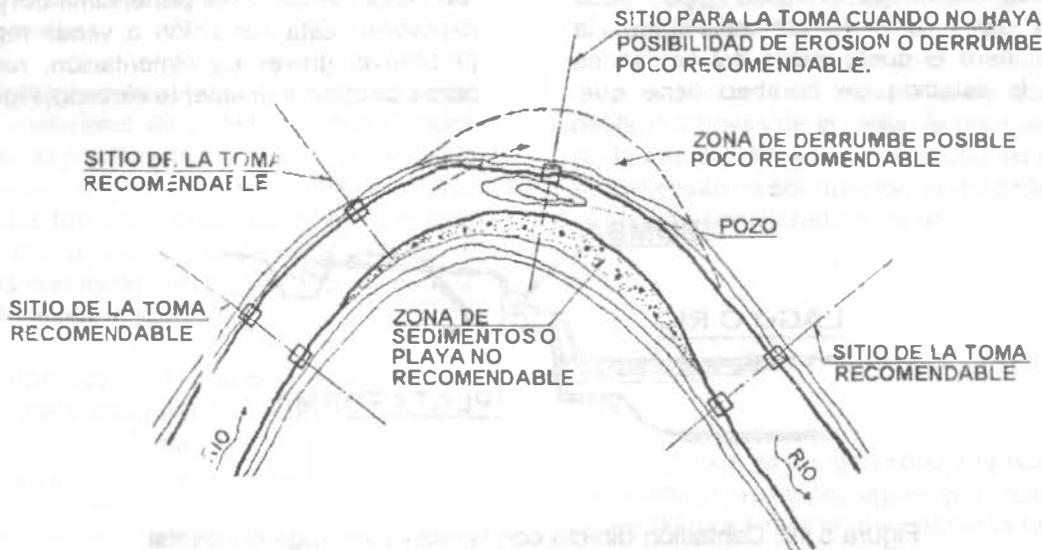


Figura 5.12. Localización recomendable de la toma directa en curvas.

En algunos ríos grandes hay una marcada diferencia en la calidad del agua a distintos niveles, sobre todo durante las crecidas. En estos casos conviene proveer al dispositivo de captación de un medio adecuado para la selección de la profundidad de captación. La forma más sencilla sería instalando una tubería flexible para la succión y colgando la pichancho de una pequeña balsa bien anclada (Figura 5.13).

Estación de bombeo flotante

Cuando la variación entre el nivel máximo y mínimo de un río es mayor que la altura máxima de succión, las aguas del mismo no pueden ser captadas por una bomba centrífuga horizontal instalada a una cota fija, y a menos que la construcción de estructuras de soporte costosas quede plenamente justificada por la importancia y magnitud de las obras, el método indicado para la captación de las aguas es por medio de bombas centrífugas horizontales, instaladas sobre plataforma flotante o balsa según se esquematiza en la Figura 5.3.

Las dimensiones de las balsas estarán en función del tamaño y peso del equipo de bombeo. Con base en el espacio requerido para el equipo de bombeo, acceso y circulación,

cloradores y tanquilla de mezcla si los hay, tanque de combustible, malacates, etc., se determina la superficie necesaria. Se calcula luego la sobrecarga fija y móvil y se diseña la estructura de soporte para la misma. Con base en dicha sobrecarga y el peso propio de la estructura, se determina el volumen de agua a ser desplazada, esto es, el calado necesario para una superficie dada. Las dimensiones de los flotadores en sí, se determinan por tanteo sucesivo, tomando en cuenta el calado adicional por concepto del peso propio de dichos flotadores, y el bordo libre necesario.

Estación de bombeo sobre plataforma móvil

En algunos casos la construcción de una estación de bombeo flotante presenta problemas, debido a corrientes fuertes que la ponen en peligro, fondo inestable que dificulta el anclaje firme, orilla del río vertical con acceso difícil durante el nivel de estiaje, tráfico fluvial intenso, etc. En estas circunstancias puede idearse un medio adecuado para seguir las variaciones del nivel del río, con el equipo de bombeo instalado en tierra firme, pero sobre una plataforma móvil. La figura 5.14 muestra una solución de este tipo.



Figura 5.13.

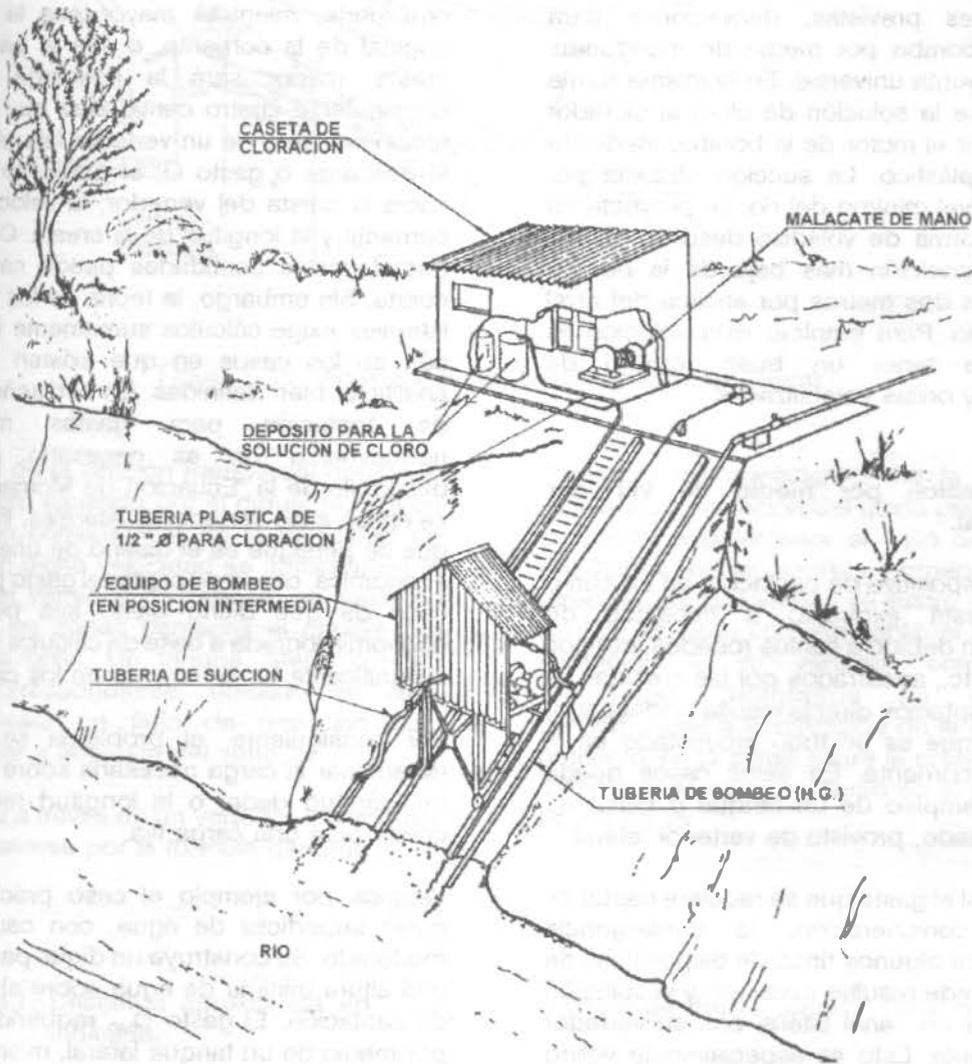


Figura 5.14. Estación de bombeo móvil, instalada en una plataforma desplazable sobre rieles.

La orilla casi vertical del río se excava en un ángulo de 45 grados aproximadamente, y se construye una placa de concreto armado con dos rieles de acero a todo lo largo. La placa se ancla convenientemente y sirve de cimentación a los rieles. El equipo de bombeo, consistente de una bomba centrífuga y motor diesel, se instala sobre una plataforma móvil que rueda sobre los rieles a posiciones predeterminadas, en las cuales puede fijarse a dichos rieles por medio de tornillos. Un malacate de transmisión facilita el cambio de posición de la plataforma. Las tuberías de succión y de descarga se instalan en ambos lados del equipo, dejando en las posiciones previstas, derivaciones para conectar la bomba por medio de mangueras flexibles con junta universal. En la misma forma puede llevarse la solución de cloro al clorador impulsado por el motor de la bomba, mediante tuberías de plástico. La succión ubicada por debajo del nivel mínimo del río, se proyecta en el agua en forma de voladizo desde el último soporte. La posición más baja de la bomba queda a unos dos metros por encima del nivel mínimo del río. Para emplear esta solución es indispensable tener un buen terreno de cimentación y orillas estabilizadas.

5.2.2 Captación por medio de vertedor lateral.

Cuando el dispositivo de captación en un curso superficial está expuesto a impactos de consideración debido a cantos rodados, troncos de árboles, etc., arrastrados por las crecidas, el método de captación directa resulta inadecuado, por lo frágil que es un tubo proyectado en el paso de la corriente. En estos casos puede recurrirse al empleo de un tanque o canal de concreto armado, provisto de vertedor lateral.

Igualmente, si el gasto que se requiere captar es de cierta consideración, la sumergencia requerida para algunos tipos de dispositivos de captación puede resultar excesiva, y la solución alternativa es un canal lateral con su vertedor correspondiente. Esto es especialmente válido en el caso de algunos ríos que traen mucha arena durante las crecidas violentas, y el material depositado puede cubrir el dispositivo de

captación en corto tiempo.

De acuerdo con la definición que se emplea en la hidráulica, el vertedor lateral es un dispositivo que permite el paso del agua por encima de una cresta, orientada en sentido paralelo a la dirección principal de la corriente. Mediante la ubicación de la cresta por debajo del nivel normal de las aguas, se produce un gradiente hidráulico hacia la misma, y parte del flujo cambia su dirección original en sentido aproximadamente ortogonal. Mientras mayor sea el gradiente hidráulico y la longitud de la cresta, mayor será la descarga a través del vertedor. Por otra parte, mientras mayor sea la velocidad original de la corriente, o sea la paralela a la cresta, menor será la descarga. Hay por consiguiente cuatro cantidades que definen el funcionamiento de un vertedor lateral, que son: la descarga o gasto Q ; el gradiente hidráulico hacia la cresta del vertedor; la velocidad de la corriente y la longitud de la cresta. Conociendo tres de estas cantidades puede calcularse la cuarta. Sin embargo, la teoría de los vertedores laterales exige cálculos sumamente laboriosos, aún en los casos en que existen soluciones analíticas bien definidas. En el diseño de obras de captación para gastos moderados, normalmente no es necesario recurrir al desarrollo de la "Ecuación de Momentum", que se aplica a los vertedores laterales. El propósito que se persigue es el diseño de una estructura económica, capaz de captar el gasto previsto; en caso de que dicho gasto sea pequeño, la economía lograda a base de cálculos exactos, es insignificante en la mayoría de los casos.

Por consiguiente, el problema se reduce a determinar la carga necesaria sobre una cresta de longitud dada, o la longitud requerida de cresta para una carga fija.

Veamos por ejemplo el caso práctico de un curso superficial de agua, con caudal medio moderado. Se construye un dique para asegurar una altura mínima de agua sobre el dispositivo de captación. El gasto Q_{MD} requerido se capta por medio de un tanque lateral, mientras que el exceso sigue su curso normal a través del vertedor de rebose del dique (Figura 5.15).

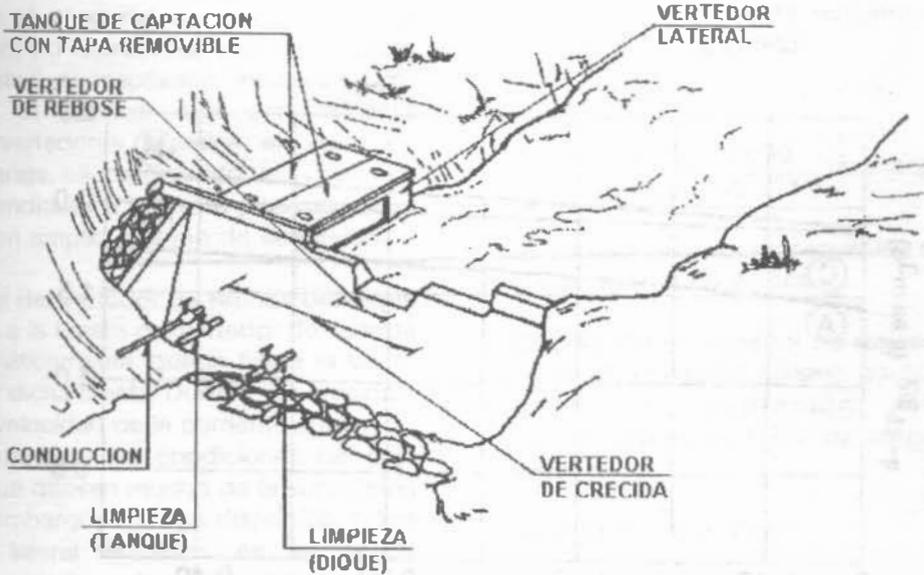


Figura 5.15. Dique-toma con tanque y vertedor lateral.

El aumento de la sección transversal debido al represamiento causado por el dique, resulta en la reducción considerable de la velocidad de flujo. Si bien dicha velocidad se aumenta en la cercanía del vertedor de rebose, su valor es mínimo en las zonas cercanas al anclaje del dique en la orilla. Un tanque lateral con su vertedor correspondiente, ubicado en esas zonas, causará un flujo de dirección casi perpendicular a la cresta del vertedor.

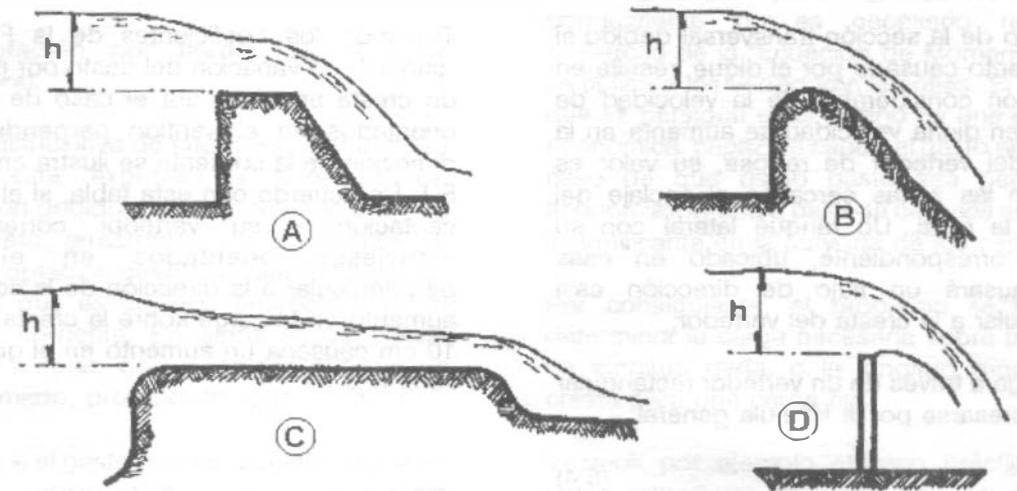
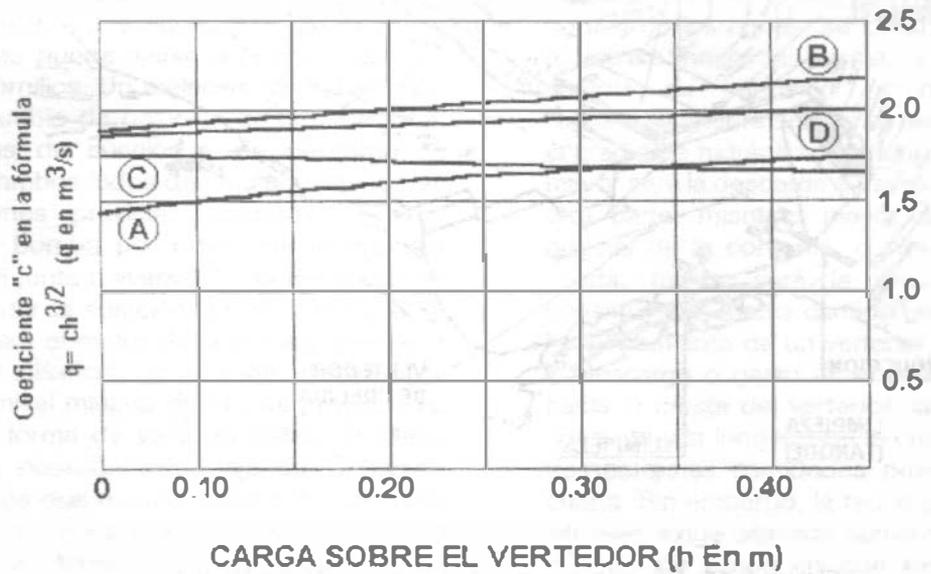
La descarga a través de un vertedor rectangular puede expresarse por la fórmula general

$$Q = CLh^{3/2} \quad (5.4)$$

Tomando los coeficientes de la Figura 5.16 (curva A), la variación del gasto por metro lineal de cresta angular para el caso de vertedores orientados en el sentido perpendicular a la dirección de la corriente se ilustra en el Cuadro 5.1. De acuerdo con esta tabla, si el tanque de captación y su vertedor correspondiente estuviesen orientados en el sentido perpendicular a la dirección de la corriente, un aumento en la carga sobre la cresta de 3 cm a 10 cm causaría un aumento en el gasto de 7.4 l/s a 47.5 l/s.

Cuadro 5.1. Descarga aproximada en l/s por metro lineal de cresta angular para la carga h indicada.

| | | | | | |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| h = 1 cm q = 1.4 l/s | h = 3 cm q = 7.4 l/s | h = 5 cm q = 15.8 l/s | h = 10 cm q = 47.5 l/s | h = 15 cm q = 86.2 l/s | h = 20 cm q = 138.0 l/s |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|



TIPOS DE VERTEDORES

Figura 5.16. Características de los vertedores de caída libre.

En otras palabras, si en lugar de 3 cm de carga, necesarios para un gasto de 7.4 l/s aseguramos una carga de 10 cm, tenemos un factor de seguridad de $47.5/7.4 = 6.4$ en el gasto. Es evidente que el asegurar esa carga adicional sobre la cresta no representa exceso de costo para los gastos de captación indicados. Por consiguiente, la manera más sencilla para diseñar los vertedores laterales en caso de gastos pequeños, es suponiendo una dirección de flujo perpendicular a la cresta y calculando el dispositivo con amplio margen de seguridad.

Al fijar el nivel del vertedor de rebose del dique con respecto a la cresta del vertedor del tanque lateral, automáticamente queda fijada la carga mínima sobre dicha cresta. Durante las crecidas, el gasto y la velocidad de la corriente aumentan considerablemente y las condiciones del flujo hacia el tanque difieren mucho de la suposición original. Sin embargo, la carga disponible sobre el vertedor lateral aumenta en la misma proporción que la altura de agua sobre el rebose del dique. Por consiguiente, el factor de seguridad en el gasto de captación aumentará también, ya que dicho gasto permanece constante. En esta forma el vertedor lateral calculado para las condiciones del caudal mínimo del río trabajará correctamente durante las crecidas también, siempre y cuando el tanque de captación quede retirado del rebose del dique. En el caso extremo en que el vertedor de rebose del dique ocupe todo el ancho del río, debe tomarse en cuenta la influencia de la velocidad de corriente, en la descarga a través del vertedor lateral. La cresta del vertedor del tanque lateral de captación se fija en relación con la cota de rebose del dique, previendo amplio margen de seguridad para la descarga del gasto de captación.

Ejemplo 5.3

El ancho de un río en el sitio escogido para el dique toma es de 8 m. Su caudal medio es de 100 l/s, siendo el gasto de crecida de 1500 l/s y el caudal de estiaje de 50 l/s. Se quiere captar un gasto fijo de 30 l/s por medio de una tanque y vertedor lateral. La longitud del tanque de captación no debe sobrepasar los 2.0 m debido a la topografía de la zona de acercamiento.

Solución.

Haciendo referencia a la Figura 5.17, la cresta libre del vertedor es de 1.70 m. Para el gasto de captación de 30 l/s se requiere una carga de 5.3 cm. Sobre la cresta:

$$Q = CLh^{3/2};$$

$$h = \left(\frac{Q}{CL}\right)^{2/3} = \left(\frac{0.030}{1.45 \times 1.7}\right)^{2/3} = 0.053 \text{ m}$$

Aplicando un factor de seguridad de 4, fijamos la carga mínima en 20 cm.

Empleando un vertedor de rebose de 1.5 m de longitud, el caudal mínimo de 50 l/s menos el gasto de captación resultará en aproximadamente 5 cm de carga sobre dicho rebose:

$$q = ch^{3/2}; \quad Q = CLh^{3/2}$$

$$h = \left(\frac{Q}{CL}\right)^{2/3} = \left(\frac{0.05 - 0.03}{1.45 \times 1.5}\right)^{2/3}$$

$$h = 0.044 \text{ m} \approx 5 \text{ cm}$$

En consecuencia, la diferencia de altura entre la cresta del vertedor lateral y el nivel de rebose debe ser de $20 - 5 = 15 \text{ cm}$.

El caudal medio del río es de 100 l/s, por consiguiente el vertedor de rebose del dique deberá tener una capacidad de $100 - 30 = 70 \text{ l/s}$. Para el ancho escogido de 1.5 m este gasto resultará en 10 cm de carga:

$$h = \left(\frac{0.070}{1.5 \times 1.5}\right)^{2/3} = 0.10 \text{ m}$$

El caudal de crecida es de 1500 l/s. De acuerdo a la Figura 5.17, el ancho del vertedor de crecida es de 7.8 m. Una altura de agua de 25 cm admite aproximadamente un gasto de 1690 l/s.

$$Q = 1.54 \times 1.5 (0.10 + 0.25)^{3/2} + 1.53 (7.80 - 1.5) (0.25)^{3/2}$$

$$Q = 0.480 + 1.210 = 1.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

Las dimensiones adoptadas se señalan en la Figura 5.17.

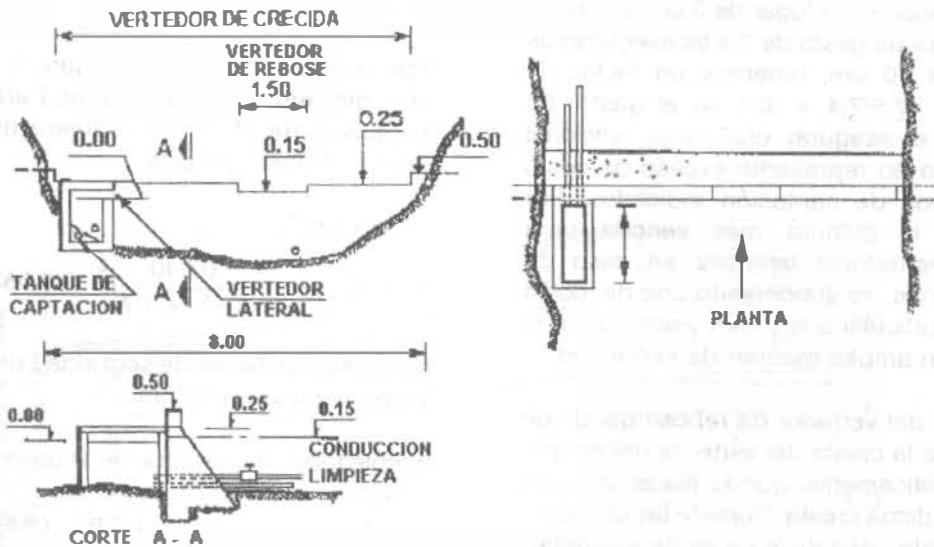


Figura 5.17

5.2.3 Captación por medio de caja central ubicada por debajo del vertedor de rebose.

Un dispositivo de este tipo tiene la ventaja sobre los anteriores de que no se ve afectado por la cantidad de sedimentos depositados por el río; éste es que cumple sus propósitos aun en el caso extremo en el cual el pequeño embalse

formado por el dique se llene por completo de material de arrastre. El dispositivo en cuestión consiste en un tanque, caja central o canal, ubicado en el mismo cuerpo del dique-toma, por debajo del vertedor de rebose del mismo, ocupando todo el ancho de dicho vertedor. Haciendo referencia a la Figura 5.18, el funcionamiento del dispositivo es como sigue:

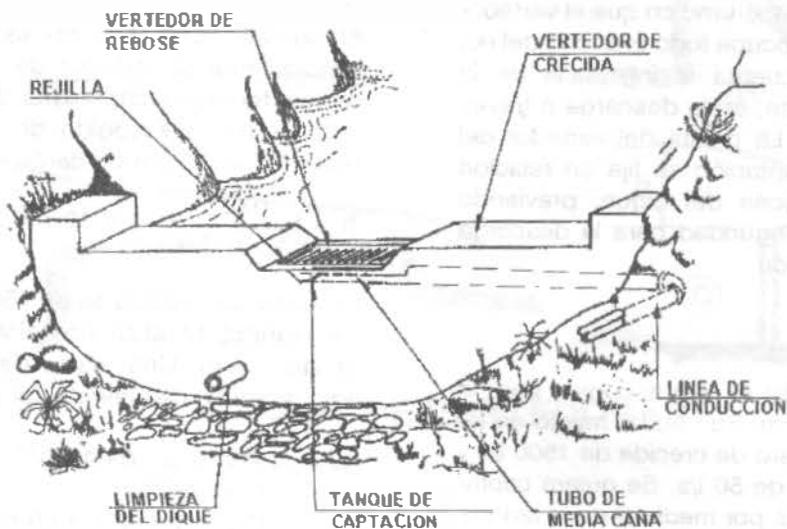


Figura 5.18. Dique-toma con tanque de captación por debajo del vertedor de rebose.

El caudal medio del río pasa a través del vertedor de rebose del dique. Una parte de dicho caudal cae en el canal ubicado por debajo del vertedor, y es conducido por un tubo hasta cerca del anclaje lateral del dique, de donde arranca la "línea de aducción o toma". La entrada al canal está protegida contra el paso de material grueso de arrastre o materia flotante, por medio de una rejilla, cuyas barras están orientadas paralelas a la dirección de la corriente.

Por la alta velocidad del flujo, no puede ocurrir sedimentación en esa zona, y en el tanque o canal entrarán solamente aquellas partículas en suspensión que ningún dispositivo de captación directa puede eliminar.

Este dispositivo de captación tiene sin embargo el inconveniente de permitir la inclusión de gran cantidad de aire a la línea de conducción, debido a la turbulencia que se produce en la rejilla. El aire en las tuberías supone una condición altamente perjudicial según se verá en el Capítulo 6.

5.3 OBRAS DE CAPTACION PARA AGUA SUBTERRANEA

Las aguas subterráneas constituyen importantes fuentes de abastecimiento de agua. Tienen, como ya se ha mencionado en el capítulo 3, muchas ventajas. En general, el agua no requiere un tratamiento complicado y las cantidades de agua disponible son más seguras. En algunos casos, el descenso de los niveles de agua en los pozos ha causado su abandono; pero en la actualidad, los modernos métodos de investigación que permiten una aproximación muy segura de los recursos de agua subterránea para una prolongada producción. Las posibles obras de captación para este tipo de agua son:

- a) Cajas de Manantial;
- b) Pozos; y
- c) Galerías filtrantes

5.3.1 Manantiales

Las aguas de manantial generalmente fluyen desde un estrato acuífero de arena y grava, y afloran a la superficie debido a la presencia de un estrato de material impermeable, tal como arcilla o roca, que les impide fluir e infiltrarse. Los mejores lugares para buscar manantiales son las laderas de montañas. La vegetación verde en un cierto punto de un área seca puede indicar la presencia de un manantial, o puede encontrarse alguno si se sigue una corriente hacia aguas arriba. Los habitantes de la zona son los mejores guías, y probablemente conocen los manantiales del área.

El agua de manantial es generalmente potable, pero puede contaminarse si aflora en un estanque o al fluir sobre el terreno. Por esta razón el manantial debe protegerse con mampostería de tabique o piedra, de manera que el agua fluya directamente hacia una tubería, evitando así que pueda ser contaminada.

Para proteger el manantial debe excavar la ladera donde el agua está aflorando y construirse un tanque o "caja de manantial", como se muestra en la Figura 5.19. Debe tenerse el cuidado de no excavar demasiado en el estrato impermeable, ya que puede provocarse que el manantial desaparezca o aflore en otro sitio.

Antes de construir el muro de la caja de manantial adyacente a la ladera, es conveniente apilar rocas sin juntar contra el "ojo del manantial". Esto es con el fin construir una cimentación adecuada del muro posterior de la caja por una parte, y por otra para evitar que al salir el agua deslave el material del acuifero hacia afuera. Debe tenerse presente que después de una lluvia el agua puede fluir más rápidamente por lo que las rocas deben quedar firmemente colocadas. Esto puede requerir rocas de gran tamaño, quizá con algunas rocas pequeñas, grava e incluso arena para llenar los espacios entre ellas.

La tubería de salida debe estar colocada a cuando menos 10 cm sobre el fondo de la caja del manantial, y bajo el nivel donde aflora el

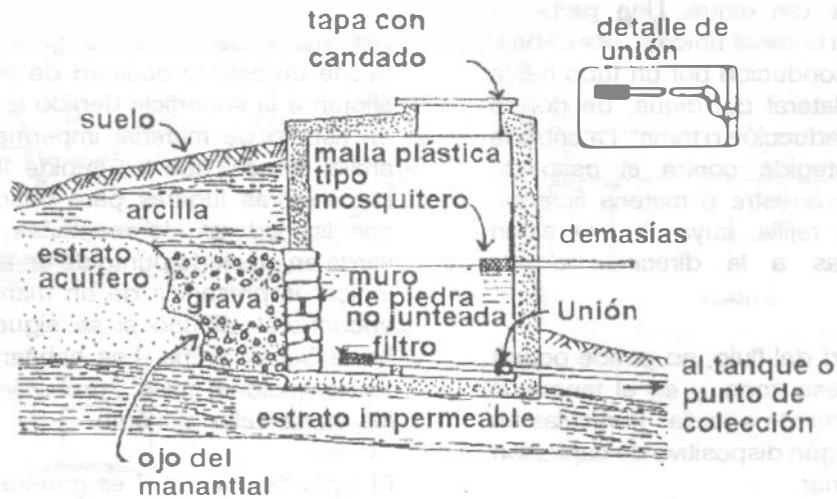


Figura 5.19. Caja de manantial. El detalle muestra la unión de la tubería con dos codos a 90°, con el fin de permitir que el filtro sea levantado sobre el nivel del agua para su limpieza.

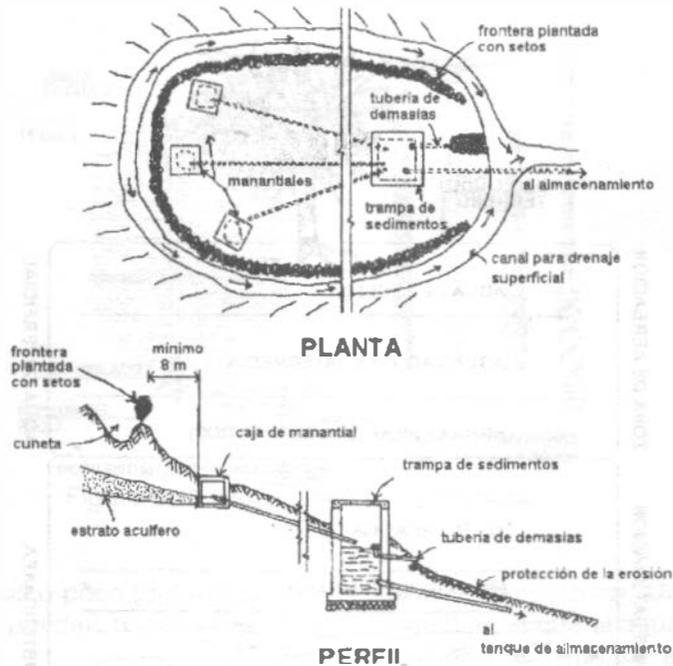
agua, si es posible. Si el nivel del agua en la caja del manantial fuera muy alto, los sedimentos podrían bloquear el afloramiento del agua. En el extremo de la tubería de salida localizado en el interior de la caja, debe instalarse un filtro para evitar que piedras, ranas u otros objetos obstruyan la tubería. Una manera de hacer este filtro es con un tramo corto de tubería de polietileno, taponado en un extremo y con pequeñas perforaciones a su alrededor. También debe instalarse una tubería de desmasías de diámetro suficiente para desaguar el gasto máximo del manantial en época de lluvias. Esta tubería también debe estar bajo el nivel de afloramiento del agua. El extremo de la tubería de desmasías localizado en el interior de la caja debe quedar cubierto con un filtro adecuado para mantener fuera a los mosquitos y a las ranas, que pueden bloquear las tuberías. La losa de la caja debe quedar al menos 30 cm arriba del nivel del terreno para evitar que el agua de lluvia entre a la caja. También con esta finalidad el registro que se construya en el techo de la caja debe tener un reborde de 10 cm. La tapa del registro debe quedar asegurada con bisagras y candado. Una tercera tubería localizada en el fondo de la caja se instala con la finalidad de extraer los sedimentos. Esta tubería debe tener en su extremo un tapón que no pueda retirar

cualquier persona sin herramientas.

Si no es posible hacer una excavación suficiente para que el fondo de la caja del manantial esté 10 cm por debajo de la tubería de salida, entonces puede usarse una tubería de 5 cm de diámetro y conducir el agua a otra caja localizada a una distancia no mayor de 50 m, a la cual se le llama "trampa de sedimentos" (Figura 5.20). Esta caja también debe tener losa, tubería de desmasías a prueba de mosquitos y tubería de salida a 10 cm del fondo con filtro. Si el manantial tiene un rendimiento menor a 5 litros por minuto, la caja del manantial puede ser bastante pequeña, pero no obstante debe tener registro con tapa y tubería de desmasías. El agua de varios manantiales puede ser colectada en una misma trampa de sedimentos, como lo muestra la Figura 5.20. Un aspecto importante que debe considerarse cuando se tienen tuberías de varios manantiales es el peligro de que la presión de una de ellas pueda detener el flujo de otra. Para evitarlo, las tuberías de varios manantiales separados deben tener diferente nivel de entrada sobre el nivel del agua en el depósito o caja de sedimentos.



FACULTAD INGENIERIA



G.

Figura 5.20. Tres manantiales protegidos conectados a una trampa de sedimentos.

Cuando se haya concluido la caja del manantial, el espacio que resulte detrás de ella debe rellenarse con suelo.

Finalmente, debe hacerse una cuneta a cuando menos 8 m hacia arriba de la ladera y alrededor de la caja del manantial para captar los escurrimientos superficiales y evitar la contaminación del agua del manantial. Debe construirse una cerca para evitar el acceso a personas y animales.

Las cajas de manantial y las trampas de sedimentos deben limpiarse una vez al año.

En los manantiales con grandes gastos (mayores a 10 l/s), resulta muy difícil construir la caja de manantial. En estos casos se recomienda la construcción de una galería filtrante.

5.3.2 Pozos

Un pozo es una perforación vertical, en general de forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad. El agua penetra a lo largo de las paredes creando un flujo de tipo radial. Se acostumbra clasificar a los pozos en "poco

profundos o someros" y "profundos". Los pozos someros "excavados" son aquellos que permiten la explotación del agua freática y o subálvea, (Figura 5.21). Se construyen con picos y palas; tienen diámetros mínimos de 1.5 metros y no más de 15 metros de profundidad. Para permitir el paso del agua a través de las paredes del pozo se dejan perforaciones de 25 mm de diámetro con espaciamiento entre 15 y 25 cm centro a centro. Si las paredes del pozo son de mampostería de piedra o tabique, se dejan espacios sin juntear en el estrato permeable para permitir el paso del agua. (Figura 5.22).

Los pozos poco profundos pueden también construirse por perforación o entubado. En la Figura 5.23 se ilustra un pozo entubado, el que consiste en un tubo forrado, que tiene en su extremo un taladro de diámetro ligeramente superior al del revestimiento. Encima del taladro se disponen orificios, o una rejilla, a través de los cuales penetra el agua en el revestimiento. La hincia se efectúa por medio de un mazo o por la caída de un peso. Los pozos entubados tienen un diámetro de 25 a 75 mm y pueden emplearse sólo en terrenos que no estén muy consolidados.



Figura 5.21

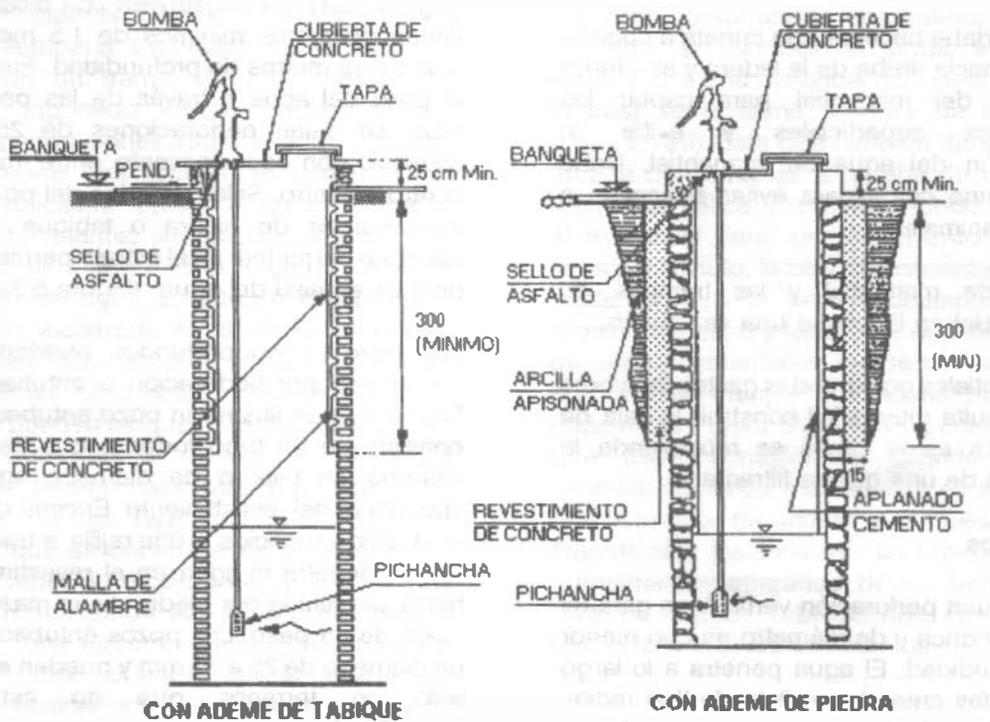


Figura 5.22. Pozos someros.

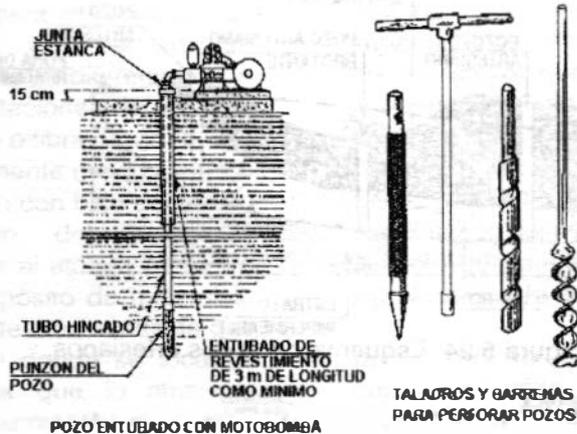


Figura 5.23. Pozo hincado o entubado.

Al uso de los pozos someros o poco profundos para suministros públicos pueden hacerse las siguientes objeciones:

1. Dan un rendimiento incierto porque el nivel freático fluctúa con facilidad y considerablemente.
2. La calidad sanitaria del agua es probable que sea deficiente. Por las razones anteriores, las poblaciones que consumen agua subterránea disponen ordinariamente de pozos profundos. Los pozos profundos tienen la ventaja de perforar capas acuíferas profundas y extensas, circunstancias que evitan rápidas fluctuaciones en el nivel de la superficie piezométrica y dan por resultado un rendimiento uniforme y considerable. El agua profunda es adecuada para obtener una buena calidad sanitaria, a menos que esté contaminada por infiltraciones en la capa acuífera, por cavernas o fisuras en las rocas que la recubren. Los inconvenientes son el gran costo de los pozos y el hecho de que el largo recorrido subterráneo del agua puede dar lugar a que se disuelvan materias minerales que pueden hacerla dura, corrosiva o inadecuada. En el "pozo ordinario o de capa libre", el agua se eleva a la altura del material saturado que le rodea, y no se halla sometida en el acuífero a otra presión más

que la atmosférica. Un "pozo artesiano" es aquel en el que el agua se eleva por encima del nivel en que se encuentra el acuífero, debido a la presión del agua aprisionada o bloqueada en el acuífero. (Figura 5.24). Haciendo referencia a la Figura 5.25, los componentes de los pozos son:

- a) Ademe del pozo. Es una tubería, generalmente de acero, colocada con holgura dentro de la perforación. Este componente proporciona una conexión directa entre la superficie y el acuífero, y sella el pozo de las aguas indeseables superficiales o poco profundas; además, soporta las paredes del agujero de perforación.
- b) Cedazo, filtro o ademe ranurado. El cedazo es un tubo ranurado colocado a continuación del ademe, que tiene las siguientes funciones:
 1. Estabilizar las paredes de la perforación.
 2. Mantener la arena fuera del pozo.
 3. Facilitar la entrada de agua al interior del pozo.

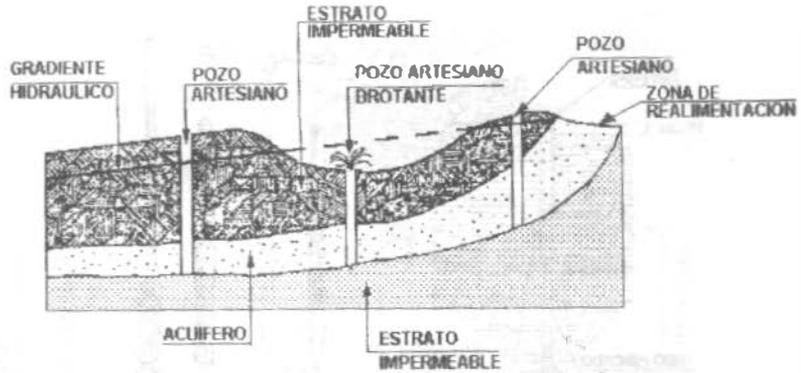


Figura 5.24. Esquema de pozos artesianos.

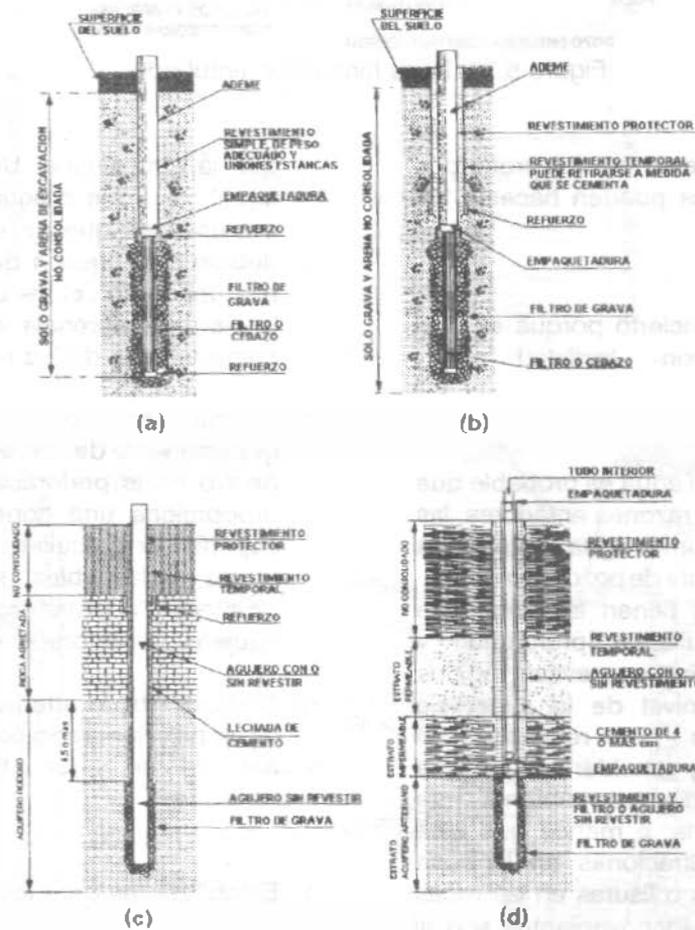


Figura 5.25. Algunos tipos de pozos. (a) Para terrenos no consolidados. (b) Como el tipo (a), pero cementado para protección contra la contaminación. (c) Pozo en terreno consolidado sustentado por roca agrietada. (d) Pozo artésiano, impide la pérdida de agua hacia el estrato impermeable. De producirse erosión se necesitará revestimiento y filtro en el acuífero. El tubo interior puede sustituirse si se corroe.

Si las ranuras o perforaciones del cedazo no son de la dimensión precisa para el acuífero, los pozos bombearán arena. Los cedazos se fabrican en tubo de metales diferentes con protección o sin ella, en aleaciones de plástico, concreto, asbesto-cemento o fibra de vidrio. Los más económicos y comúnmente usados son los fabricados en tubo de acero con bajo contenido de carbón. El cedazo del pozo es particularmente susceptible al ataque corrosivo y a la incrustación por depósito de minerales, debido a la gran cantidad de área expuesta que presenta al medio poroso donde se localiza, además de que el agua que lo atraviesa constantemente, trae un suministro de sólidos disueltos que pueden reaccionar con el material del cedazo o entre sí.

c) Empaque de grava.

Las funciones principales del empaque de grava son:

1. Estabilizar el acuífero y minimizar el bombeo de arena.
2. Permitir el uso del cedazo con la mayor área abierta posible.
3. Proporcionar una zona anular de alta permeabilidad, aumentando el radio efectivo del pozo y su gasto de explotación.

d) Cimentación de bombas.

Las bombas montadas superficialmente se soportan mediante cimentaciones capaces de resistir todas las cargas que obren sobre ellas. No se deben apoyar las bombas directamente sobre el ademe del pozo.

5.3.3 Nociones de Geohidrología

Definiciones.

UN ACUIFERO es un estrato del subsuelo que contiene volúmenes de agua dulce en cantidades tales que su extracción constituye un aprovechamiento hidráulico.

UN ACUIFERO CONFINADO es aquel que está limitado superior e inferiormente por estratos impermeables y que contiene agua a una presión mayor que la atmosférica. Los estratos impermeables ofrecen mucha resistencia al flujo del agua.

UN ACUIFERO SEMICONFINADO es aquel que está limitado por estratos menos permeables que él, pero que puede recibir o ceder cantidades significativas de agua.

UN ACUIFERO LIBRE es aquel cuyo límite superior coincide con el nivel freático, esto es, la superficie del agua que está a la presión atmosférica.

LA POROSIDAD es la relación del volumen de intersticios (espacios abiertos) en el suelo a su volumen total. Es una medida de la cantidad de agua que, puede ser almacenada en los espacios entre partículas. No indica qué cantidad de agua está disponible para desarrollo. Algunos valores típicos se dan en el Cuadro 5.2.

RENDIMIENTO ESPECIFICO es el porcentaje de agua que está libre para drenar del acuífero bajo la influencia de la gravedad. El rendimiento específico no es igual a la porosidad debido a que las fuerzas de tensión superficial y molecular en los espacios abiertos mantienen algo de agua. El rendimiento específico refleja la cantidad de agua disponible para desarrollo. Algunos valores promedio se muestran en el Cuadro 5.2.

$$\text{Rendimiento específico} = \frac{\text{Vol. de agua}}{\text{Vol. de suelo}} \times 100$$

EL COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO en un acuífero confinado S , es la cantidad de agua liberada por una columna de área horizontal unitaria y de altura igual al espesor saturado del acuífero, cuando la superficie piezométrica desciende una unidad. Los valores de S varían de 1×10^{-5} a 1×10^{-2} (adimensional).

GRADIENTE HIDRAULICO es la pendiente de la superficie piezométrica. La diferencia en

elevación de un punto a otro a lo largo del gradiente hidráulico es una medida de presión. Esta diferencia de elevación es llamada "carga". LA PERMEABILIDAD P , es una medida de la facilidad de movimiento del agua subterránea a través de una roca. Esta propiedad depende de la porosidad y, principalmente, de la interconexión de los intersticios. Sus

dimensiones son $[L \cdot T^{-1}]$; algunos valores típicos se muestran en el Cuadro 5.2.

LA TRANSMISIBILIDAD, T , es la capacidad de un acuífero para transmitir el agua a través de todo su espesor y es igual al producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado del acuífero $T = P \cdot b$ $[L^2 T^{-1}]$.

Cuadro 5.2. Valores típicos de parámetros del acuífero.

| Material acuífero | Porosidad % | Rendimiento específico % | Permeabilidad m/s |
|-------------------|-------------|--------------------------|-----------------------|
| No consolidado | | | |
| Arcilla | 55 | 3 | 1.2×10^{-6} |
| Marga | 35 | 5 | 6.4×10^{-6} |
| Arena fina | 45 | 10 | 3.5×10^{-5} |
| Arena media | 37 | 25 | 1.5×10^{-4} |
| Arena gruesa | 30 | 25 | 6.9×10^{-4} |
| Arena y grava | 20 | 16 | 6.1×10^{-4} |
| Grava | 25 | 22 | 6.4×10^{-3} |
| Consolidados | | | |
| Esquisto | < 5 | 3 | 1.2×10^{-12} |
| Granito | < 1 | 0 | 1.2×10^{-16} |
| Roca fracturada | 5 | 2 | 5.8×10^{-5} |

Hidráulica del agua subterránea.

Las investigaciones de Darcy indican que la velocidad de flujo en un medio poroso es directamente proporcional a la pérdida de carga debida al gradiente hidráulico. Sus conclusiones pueden expresarse por la ecuación.

$$V = K \frac{dh}{dl} \quad \text{o} \quad V = K i \quad (5.5)$$

en la cual V es la velocidad del agua, h la diferencia de cargas entre dos puntos separados por una distancia igual a l , i es el gradiente hidráulico y K una constante que depende de las características del acuífero y que debe determinarse experimentalmente para cada tipo de material. Sin embargo, debe reconocerse que las fórmulas originadas por muchos investigadores para la evaluación de K sólo son

aplicables a arenas relativamente uniformes, y no a los materiales que normalmente se encuentran en los acuíferos.

La permeabilidad, expresada por el coeficiente P , se ha determinado en el laboratorio para varios materiales, pero la toma de muestras y la reproducción de las condiciones del terreno conlleva grandes errores.

Al efectuarse la extracción del agua de un pozo con equipo de bombeo, ocurre un abatimiento de la superficie libre del agua dentro del ademe, deteniéndose hasta que ocurra el equilibrio con la aportación de los mantos acuíferos. En el subsuelo que rodea al pozo, debido al escurrimiento del agua hacia el mismo se provoca una depresión cónica denominada "Cono de Abatimiento", cuya influencia se deja sentir según el caudal extraído y la clase de material que rodea al pozo (Figura 5.26).

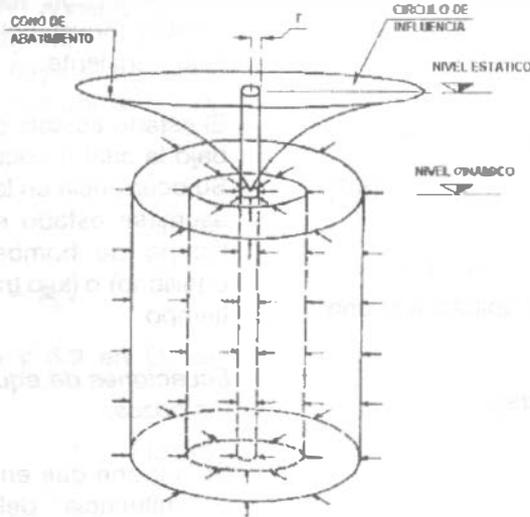


Figura 5.26. Cono de abatimiento.

Thiem, un hidrólogo alemán que estudió la permeabilidad de los materiales, propuso una determinación de la permeabilidad sobre el terreno. Consiste en perforar "pozos de observación" en el cono de abatimiento de un pozo en explotación, observando los descensos del cono por medio de sondeos.

En la que P es el coeficiente de permeabilidad, Q es el gasto producido por el pozo de explotación en m^3/min , r_1 y r_2 son las distancias a los pozos de observación, h_1 y h_2 son sus respectivas cargas hidráulicas y b es el espesor medio del acuífero, todo ello expresado en metros. (Figura 5.27).

La fórmula de Thiem es

$$P = \frac{527.7 Q \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{b (h_2 - h_1)} \quad (5.6)$$

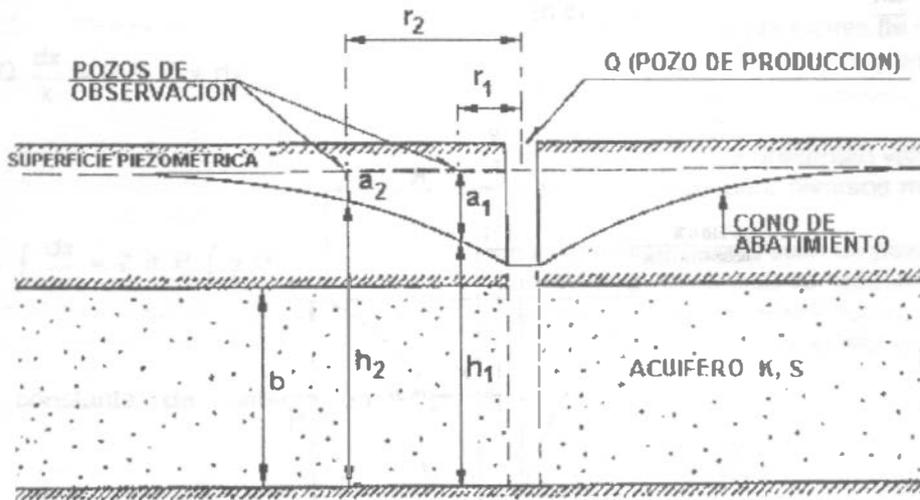


Figura 5.27.

Alternativamente, la ecuación (5.6) puede escribirse

$$P = \frac{527.7 Q \log_{10} \left(\frac{r_2}{r_1} \right)}{b (a_1 - a_2)} \quad (5.7)$$

El valor de P así obtenido será aplicable a una gran parte del acuífero;

La ley de Darcy puede expresarse:

$$V = P \frac{dh}{dl}$$

donde:

V = velocidad, m/s

P = permeabilidad, m/s

$\frac{dh}{dl}$ = pendiente del gradiente hidráulico (m/m)

La descarga bruta de agua es el producto de la velocidad de flujo (V) y del área (A) a través de la cual fluye

$$Q = V A = P A \frac{dh}{dl} \quad (5.8)$$

Esta ecuación ha sido resuelta para estado estable (equilibrio) e inestable (no equilibrio) o flujo transiente.

El estado estable o de equilibrio es la condición bajo la cual no ocurren cambios con el tiempo. Su ocurrencia en la práctica es rara, pero puede asumirse estado estable después de un largo tiempo de bombeo. El estado inestable (no equilibrio) o flujo transiente sí considera el factor tiempo.

Ecuaciones de equilibrio del caudal de agua en los pozos.

Se supone que en la circunferencia del "círculo de influencia" del cono de abatimiento hay equilibrio; no habrá más descenso y toda el agua que pase a través del cilindro cuya base es justamente el círculo de influencia, será extraída del pozo. La fórmula para el caudal del pozo se obtiene suponiendo que toda el agua elevada por el mismo pasa a través de una sucesión de cilindros con diámetros que varían desde r, radio del pozo, hasta R, radio del círculo de influencia, con alturas que varían desde h hasta H (véase la Figura 5.28).

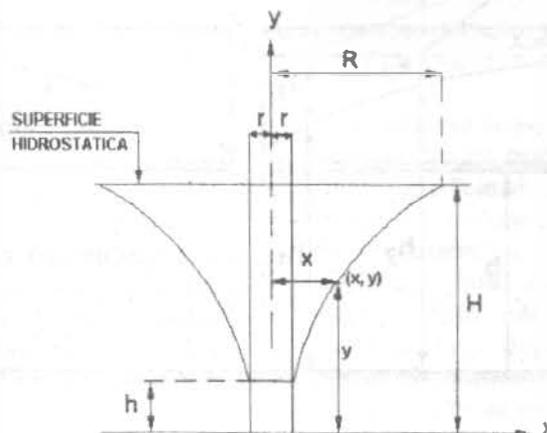


Figura 5.28. Acuífero no confinado para la deducción de la fórmula de Dupuit.

A partir de la Ley de Darcy, se obtiene la fórmula de los pozos para acuíferos no confinados de acuerdo al "método de equilibrio". En el subsuelo, el área por donde fluye el agua es sólo la libre (A_L), es decir, por los poros, o sea que

$$A_L = A_n \quad (5.9)$$

y por la ecuación del gasto $Q = A_L V$

Sustituyendo la ecuación 5.8 y 5.9 en Q , se obtiene

$$Q = A \pi i \quad (5.10)$$

Haciendo referencia a la Figura 5.28, tomamos un punto (x, y) cualquiera del cono de abatimiento y el área de aportación resulta $A = 2 \pi x y$.

Así

$$Q = 2 \pi x y P \frac{dy}{dx}$$

$$\text{donde } i = \frac{dy}{dx}$$

$$Q \frac{dx}{x} = 2 \pi P y dy$$

Integrando:

$$Q = \int \frac{dx}{x} = 2 \pi P \int y dy$$

Valuando la constante de integración, si $x = R$, $y = H$

$$C = Q \ln R - \pi P H^2$$

entonces:

$$Q \ln x - \pi P y^2 = Q \ln R - \pi P H^2$$

$$\pi P H^2 - \pi P y^2 = Q \ln R - Q \ln x$$

$$\pi P (H^2 - y^2) = Q (\ln R - \ln x)$$

$$Q = \pi P \frac{H^2 - y^2}{\ln \frac{R}{x}}$$

Y si $y = h$ y $x = r$, queda

$$Q = \pi P \frac{H^2 - h^2}{\ln \frac{R}{r}} \quad (5.10a)$$

o con logaritmos decimales

$$Q = \frac{\pi P}{2.31} \frac{H^2 - h^2}{\log \left(\frac{R}{r} \right)} \quad (5.10b)$$

La ecuación 5.10 es la expresión de Dupuit para acuíferos no confinados suponiendo estado estable (equilibrio).

En el cuadro 5.2 se presentan valores típicos de la permeabilidad para diversos materiales.

La fórmula del gasto para un pozo perforado en un acuífero confinado se deduce de un modo semejante. Para las condiciones ilustradas en la Figura 5.29, donde b es el espesor del acuífero,

$$Q = 2 \pi P x b \frac{dy}{dx} \quad (5.11)$$

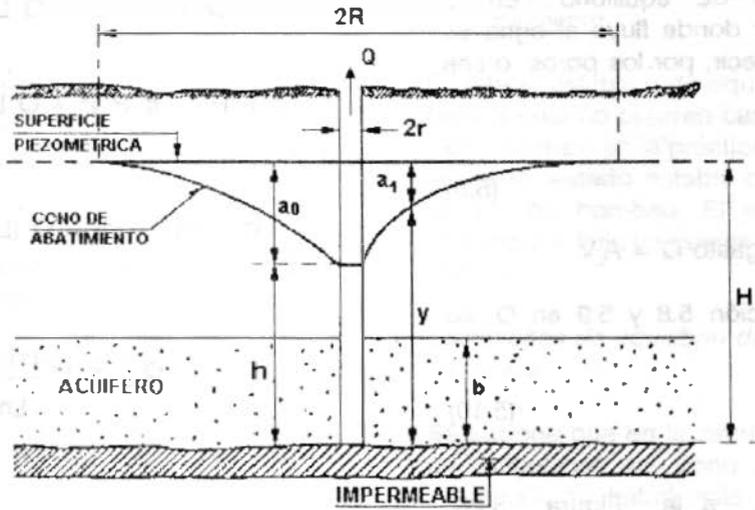


Figura 5.29. Pozo en acuífero confinado con flujo radial estable (equilibrio) desde un límite circular concéntrico

Integrando entre límites $x = r$ para $y = h$ y $x = R$ para $y = H$,

$$Q = \frac{2 \pi P b (H - h)}{\ln \left(\frac{R}{r} \right)} = \frac{2 \pi P b a_0}{\ln \left(\frac{R}{r} \right)} \quad (5.12)$$

Obsérvese que la descarga es proporcional al abatimiento $H - h = a_0$

La ecuación (5.12) puede escribirse

$$a_0 = \frac{Q \ln \left(\frac{R}{r} \right)}{2 \pi P b} \quad (5.13)$$

El radio de influencia R depende de las características del acuífero y en realidad es ligeramente creciente con el tiempo transcurrido desde el comienzo del bombeo. Para tiempos muy largos es constante a efectos prácticos. Para acuíferos confinados su valor suele variar entre 200 y 10 000 m. Los errores en su estimación afectan de forma menos sensible al valor del descenso ya que está afectado del

signo logarítmico.

En efecto:

$$\ln 200 = 5.3 \text{ y } \ln 10,000 = 9.2$$

Es decir, para un valor de R cincuenta veces mayor, el logaritmo solo se multiplica por 1.7.

En un acuífero no confinado los valores de R son inferiores y suelen oscilar entre 10 y 500 m.

Ejemplo 5.4

En un acuífero confinado, con $1000 \text{ m}^2/\text{día}$ de transmisibilidad y en el que el radio de influencia puede admitirse que vale 1000 m, se extraen $50 \text{ m}^3/\text{hora}$ de un pozo de 500 mm de diámetro. Calcular el descenso teórico en el pozo de bombeo y en pozos de observación situados a 10, 100 y 500 m de distancia.

Solución

Por tratarse de un pozo en un acuífero confinado, aplicamos la ecuación 5.13

$$a_p = \frac{Q \operatorname{Ln} \left(\frac{R}{r} \right)}{2 \pi P b}$$

El producto Pb es la transmisibilidad (véase apartado 5.3.3, Definiciones), en consecuencia

$$a_p = \frac{Q \operatorname{Ln} \left(\frac{R}{r} \right)}{2 \pi T}$$

a) Descenso o abatimiento en el pozo.

$$a_p = \frac{50 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/día}}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \text{ m}^2/\text{día}} \operatorname{Ln} \frac{1000}{0.25 \text{ m}}$$

$$a_p = 1.58 \text{ m}$$

b) Abatimiento a 10, 100 y 500 m del pozo para $r = 10 \text{ m}$

$$a = \frac{50 \times 24}{2 \pi (1000)} \operatorname{Ln} \frac{1000}{10} = 0.88 \text{ m}$$

para $r = 100 \text{ m}$

$$a = \frac{50 \times 24}{2 \pi (1000)} \operatorname{Ln} \frac{1000}{100} = 0.44 \text{ m}$$

para $r = 500 \text{ m}$

$$a = \frac{50 \times 24}{2 \pi (1000)} \operatorname{Ln} \frac{1000}{500} = 0.13 \text{ m}$$

Sin embargo, el nivel freático o la superficie piezométrica rara vez son horizontales, como supone la teoría del equilibrio, y el flujo es estable en contadas ocasiones. El valor de R es también muy inseguro, puesto que el círculo de influencia no es nunca un círculo.

Análisis del no-equilibrio

La exposición hecha para el caso anterior supone que el equilibrio se dará cuando el agua

que fluye por un cono de abatimiento fijo y medible se halla en equilibrio con el agua elevada por el pozo. En 1935 Theis desarrolló un procedimiento que actualmente se emplea para las investigaciones subterráneas encaminadas a la predicción de los rendimientos a largo plazo de los acuíferos. La fórmula del abatimiento se basa en las siguientes hipótesis:

1. El acuífero es homogéneo e isótropo.
2. El espesor saturado del acuífero es constante.
3. El acuífero tiene extensión lateral infinita.
4. El gasto bombeado procede del almacenamiento del acuífero.
5. El pozo es totalmente penetrante, y
6. El acuífero libera el agua instantáneamente al abatirse la superficie piezométrica.

Usando la teoría del flujo de calor como una analogía, Theis obtuvo la siguiente expresión matemática para un pozo de diámetro infinitesimalmente pequeño con flujo radial:

$$a = \frac{Q}{4 \pi T} \int_{\mu}^{\alpha} \left(\frac{e^{-\mu}}{\mu} \right) d\mu \quad (5.14)$$

en la cual:

a es el abatimiento registrado a la distancia r del pozo de bombeo, en m

Q es el gasto de extracción, en m^3/s

T es la transmisibilidad, en m^2/s

μ es el argumento de la función de pozo

$$\mu = \frac{r^2 S}{4 T t} \quad (5.15)$$

S es el coeficiente de almacenamiento adimensional

t es el tiempo de explotación del pozo en segundos

La integral de la ecuación (5.14) es llamada función de pozo y se evalúa mediante la expansión de la serie:

$$\omega(\mu) = -0.577216 - \ln \mu + \mu - \frac{\mu^2}{2 \cdot 2!} + \frac{\mu^3}{3 \cdot 3!} - \dots \quad (5.16)$$

El procedimiento para obtener T y S a partir de pruebas practicadas en campo, es el siguiente:

1. Trazar la gráfica abatimiento vs. tiempo del pozo de observación, en papel idéntico al de la curva tipo (Figura 5.30). Los tiempos en que deberán medirse los abatimientos son: inmediatamente antes de empezar el bombeo, 15", 30", 1', 2', 4', 8', 15', 50', 1h, 2h, 4h, 8h, 16h, 24h, 32h, 40h, 48h.

2. Sobreponer la gráfica construida en 1 en la curva tipo (Figura 5.30) manteniendo los ejes paralelos y buscar la coincidencia de la curva de campo y de la curva tipo.
3. Seleccionar un punto de ajuste arbitrario (incluso puede ser fuera de la curva) y obtener sus coordenadas en los cuatro ejes.
4. Sustituir los valores de las coordenadas en las ecuaciones 5.14 y 5.15, despejando los valores de T y S.

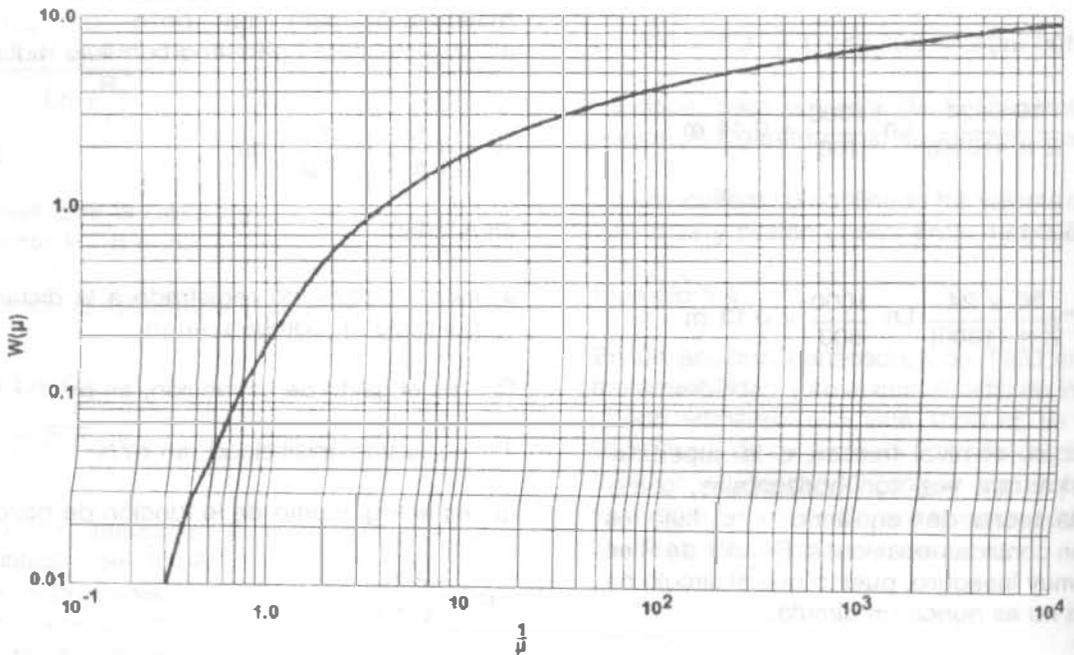


Figura 5.30. Acuíferos confinados, función de pozo $\omega(\mu)$ contra $\frac{1}{\mu}$

Acuíferos semiconfinados

Cuando se tienen estratos de granulometría variada, se puede tener un acuífero semiconfinado. Esto es, cuando un estrato de material permeable queda limitado verticalmente por materiales, también saturados, de menor permeabilidad, se tiene un acuífero semiconfinado (Figura 5.31).

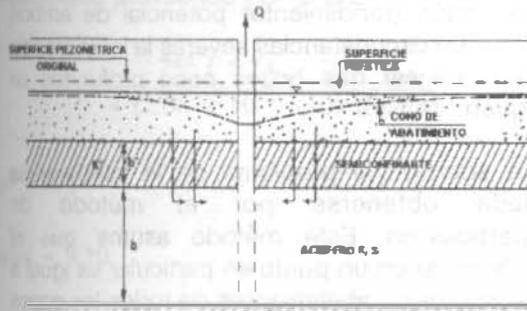


Figura 5.31. Acuífero semiconfinado

La solución correspondiente a estos acuíferos es:

$$a = \frac{Q}{4 \pi T} \omega(\mu, r/B) \tag{5.17}$$

siendo

$$B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}} \tag{5.18}$$

donde k' y b' son la permeabilidad vertical y el espesor del estrato semiconfinante, respectivamente. Las curvas tipo correspondientes a esta solución, se presentan en la Figura 5.32.

La interpretación de las pruebas de bombeo para este caso, es similar al procedimiento para acuíferos confinados, sólo que se busca la coincidencia de la curva de campo con alguna de las curvas tipo. Mediante las ecuaciones 5.17 y 5.18, se obtienen T y S .

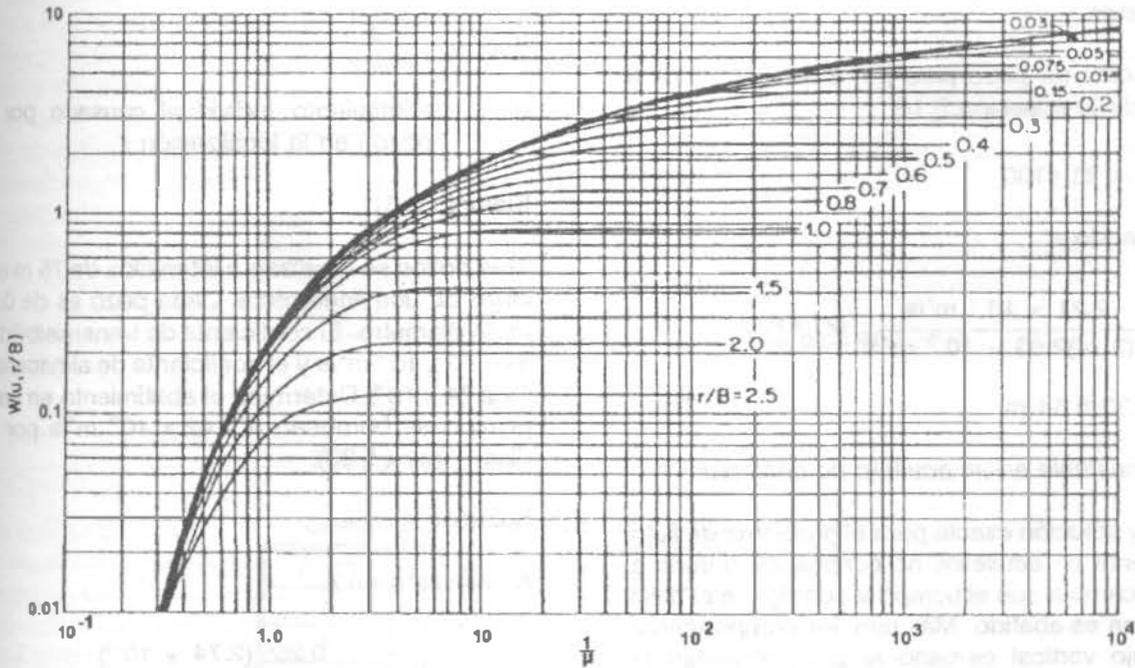


Figura 5.32. Acuíferos semiconfinados curvas tipo $w(\mu, \frac{r}{B})$ contra $\frac{1}{\mu}$

Ejemplo 5.5:

Si el coeficiente de almacenaje es 2.74×10^{-4} y la transmisibilidad es $2.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, calcular el abatimiento que resultará al final de 100 días de bombeo de un pozo de 0.61 m de diámetro con gasto a una tasa de $2.21 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$.

Solución:

Se comienza por calcular μ . El radio es

$$r = \frac{0.61}{2} = 0.305 \text{ m}$$

y

$$\mu = \frac{(0.305 \text{ m})^2 (2.74 \times 10^{-4})}{4(2.63 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}})(100 \text{ d})(86,400 \frac{\text{s}}{\text{d}})}$$

$$\mu = 2.80 \times 10^{-10}$$

El factor 86400 es para convertir días a segundos.

La función de pozo para $\mu = 2.80 \times 10^{-10}$ es a partir de la ecuación 5.16:

$$\omega(\mu t) = 21.4190$$

Calculando s:

$$s = \frac{2.21 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}}{4(3.14)2.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}} (21.4190)$$

$$s = 14.33 \text{ ó } 14 \text{ m}$$

Flujo inestable en un acuífero no confinado

No hay solución exacta para el problema de flujo transiente en acuíferos no confinados debido a que T cambia con el tiempo y r conforme el nivel del agua es abatido. Más aún, las componentes del flujo vertical cercano al pozo invalidan la suposición de flujo radial que se requiere para obtener una solución analítica. Si el acuífero no confinado es muy profundo en comparación con el abatimiento, la solución del flujo transiente de un acuífero confinado puede usarse como una

solución aproximada. En general, sin embargo, los métodos numéricos dan soluciones más satisfactorias.

Cálculo de interferencia

Como se mencionó, los conos de depresión de pozos localizados muy juntos pueden sobreponerse; esta interferencia reduciría la producción (rendimiento) potencial de ambos pozos. En circunstancias severas la interferencia puede causar que pozos poco profundos se sequen.

Una solución al problema de la interferencia puede obtenerse por el método de superposición. Este método asume que el abatimiento en un punto en particular es igual a la suma de los abatimientos de todos los pozos de influencia. Matemáticamente esto puede representarse como sigue:

$$a = \sum_{i=1}^n a_i \tag{5.19}$$

donde

a_i = abatimiento individual causado por el pozo i en la localización r.

Ejemplo 5.6

Tres pozos se localizan a intervalos de 75 m a lo largo de una línea recta. Cada pozo es de 0.50 m de diámetro. El coeficiente de transmisibilidad es $2.63 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y el coeficiente de almacenaje es 2.74×10^{-4} . Determine el abatimiento en cada pozo si se bombean a $4.42 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ por 10 días (Figura 5.33).

Solución:

Abatimiento en A

$$\mu = \frac{0.25^2 (2.74 \times 10^{-4})}{4(2.63 \times 10^{-3})(10)(86400)}$$

$$\mu = 1.88 \times 10^{-9}$$

$$\omega(\mu) = 19.51$$

$$a_b = 10.85 \text{ m}$$

$$a_a = \frac{4.42 \times 10^{-2}}{4 \pi (2.63 \times 10^{-3})} (19.51)$$

Abatimiento provocado por el pozo A en C

$$\mu = \frac{150^2 (2.74 \times 10^{-4})}{4(2.63 \times 10^{-3})(10)(86400)}$$

$$a_a = 26.09 \text{ m}$$

$$\mu = 6.78 \times 10^{-4};$$

Abatimiento provocado por el pozo A en B

$$\mu = \frac{75^2 (2.74 \times 10^{-4})}{4 (2.63 \times 10^{-3}) (10) (86400)}$$

$$\omega(\mu) = 6.719$$

$$\mu = 1.695$$

$$a = 8.98$$

$$\omega(\mu) = 8.10$$

$$a_b = \frac{4.42 \times 10^{-2}}{4 \pi (2.63 \times 10^{-3})} (8.10)$$

En virtud de la simetría de los pozos, pueden obviarse las operaciones restantes con ayuda del Cuadro 5.3, en el cual se muestran los resultados del problema.

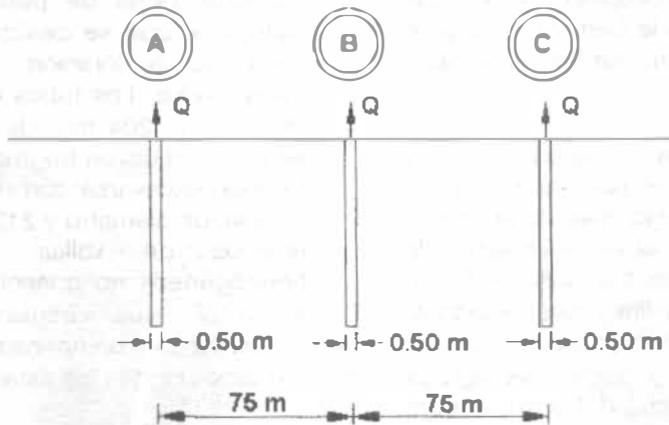


Figura 5.33. Esquema del ejemplo 5.6.

Cuadro 5.3. Resultados del ejemplo 5.6.

| POZO | A | B | C |
|--------------------|---------|---------|---------|
| A | 26.09 | 10.85 | 8.98 |
| B | 10.85 | 26.09 | 10.85 |
| C | 8.98 | 10.85 | 26.09 |
| $\sum_{i=1}^n a_i$ | 45.92 m | 47.79 m | 45.92 m |

5.3.4 Métodos de perforación de pozos.

Los pozos perforados se taladran, ya sea por percusión o por perforación rotativa. Generalmente se prefieren los siguientes métodos:

Perforación por percusión

Es común la perforación con herramienta de cable. Un grupo de herramientas incluye una barrena chata o con extremo de cincel, un vástago para barrena, percusores y una conexión para cable, todos ellos conectados mediante uniones roscadas cónicas. Un brazo excéntrico, polea recíprocante o viga de balancín hace subir o bajar las herramientas dentro del pozo húmedo. El cable de perforación debe sufrir una ligera elongación cuando la barrena golpea el fondo. El resorte de retorno en el cable evita que la barrena se trabe o que las herramientas se aplasten. Como su nombre lo indica, los percusores (dos uniones pesadas y flojas con aspecto de cadenas) ayudan a sacudir y a aflojar la barrena en su desplazamiento hacia arriba. El perforador gira la barrena y juzga el funcionamiento de las herramientas por el tacto del cable de perforación.

Se utilizan barrenas chatas en material suave, y extremos en forma de cincel, para roca dura. La punta para barrenar es algo más larga que el árbol empleado para dar el espaciamiento de trabajo. El material suelto es removido mediante una cubeta sujeta a una línea desarenadora. Cuando no existe suficiente flujo natural hacia el pozo para la perforación y baldeo, se agrega agua. En caso de derrumbe del pozo, deberá insertarse un revestimiento y continuarse la perforación con una barrena menor.

Perforación rotatoria.

En perforación rotatoria, se sujeta una punta de corte a una barrena de perforación hueca, que se hace girar rápidamente mediante una mesa rotatoria operada a motor. Se bombea hacia abajo, ya sea agua o una suspensión de arcilla coloidal a través del tubo de perforación, que fluye por las aberturas de la barrena y transporta el material desprendido a la superficie. Las

suspensiones de arcilla están diseñadas para reducir la pérdida de fluido de perforación hacia las formaciones permeables, lubricar el tubo rotatorio de perforación hacia las formaciones permeables, lubricar el tubo rotatorio de perforación, unir la pared para evitar derrumbamientos y suspender los materiales cortados. Al perforar para extraer agua, la espesa arcilla barrenada puede ser forzada hacia el interior del cuéfero y reducir el flujo al pozo. Los nuevos métodos de rimado y lavado han reducido grandemente las dificultades de esta clase. Donde el abastecimiento de agua es grande, la circulación inversa evita las dificultades de cavar sin sellar el acuífero. Para este fin, se vierte agua limpia dentro del anillo externo al tubo de perforación, mientras que una bomba crea succión dentro del tubo. Las velocidades altas de ascensión limpian el material grueso del hoyo del pozo.

Perforación por percusión con circulación inversa.

En esta forma de perforar, una barrena de percusión que se desliza sobre el exterior del tubo de perforación, rompe los guijarros encontrados. Los tubos de perforación pueden tener hasta 204 mm de diámetro. A través de ellos se remueven fragmentos grandes de roca. Pueden excavarse con rapidez hoyos hasta de 1.82 m. de diámetro y 213 m. de profundidad en rellenos de valles y otros materiales heterogéneos no consolidados. La adición de arena al agua circulante reducirá el agua requerida para compensar las pérdidas hacia las formaciones que se están perforando.

5.3.5 Captación de aguas por medio de galerías de infiltración.

La galería de infiltración en principio consiste en un tubo perforado o ranurado, rodeado de una capa de gránulo o piedra picada graduada, instalada en el acuífero subsuperficial, o en el caso de captación indirecta de aguas superficiales, en el estrato permeable que se comunica con dichas aguas.

En los extremos aguas arriba de la galería y a longitud aproximada de 50 m, normalmente se

coloca un pozo de visita. En el extremo aguas abajo se construye un tanque o pozo recolector, de donde se conducen las aguas por gravedad o por bombeo hacia el sistema de distribución. (Figura 5.34).

El tubo de recolección es normalmente de concreto o de fibro-cemento. Su diámetro es función del gasto de captación, siendo el mínimo recomendable del orden de 200 ó 250 mm.

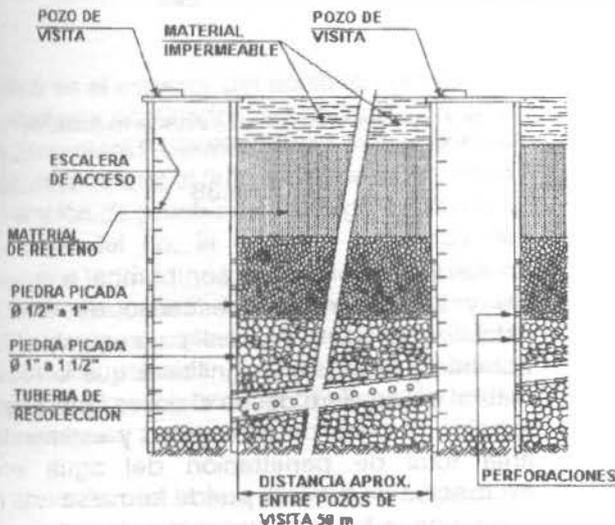
La galería de infiltración se orienta de acuerdo con la dirección predominante del flujo subterráneo.

Cuando la velocidad de un río es pequeña y existen estratos de alta permeabilidad que se conectan con el río, la galería de infiltración normalmente se instala paralela al eje del mismo. En este caso la dirección del flujo subterráneo es principalmente desde el río hacia la galería, aunque desde el lado opuesto de la misma también penetrará el agua, ya que todo el acuífero se encuentra saturado (Figura 5.35).

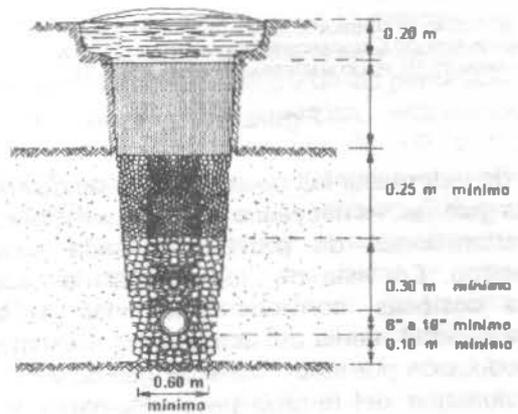
En caso de acuíferos de gran extensión que alimentan el río, el flujo predominante es normalmente desde el acuífero hacia el río y la instalación de la galería será análoga. (Figura 5.36).

En caso de cursos rápidos y estratos de baja permeabilidad, será necesario investigar la dirección del flujo subterráneo, a fin de interceptar el paso del mismo con la galería de infiltración. Normalmente unos ramales perpendiculares al eje del río dan los resultados deseados (Figura 5.37).

Cuando, con la excepción de unos bancos de arena o grava depositados por el río en un lecho limitado, no existen estratos permeables, la galería se instala por debajo del río, normal a su eje. La misma solución se emplea cuando el acuífero es de muy baja permeabilidad (Figura 5.38).

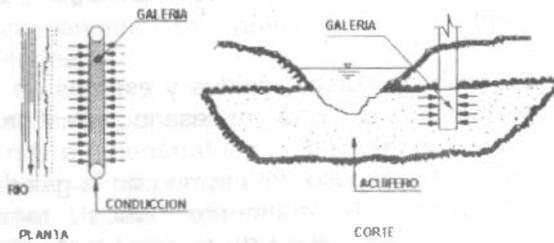


CORTE LONGITUDINAL



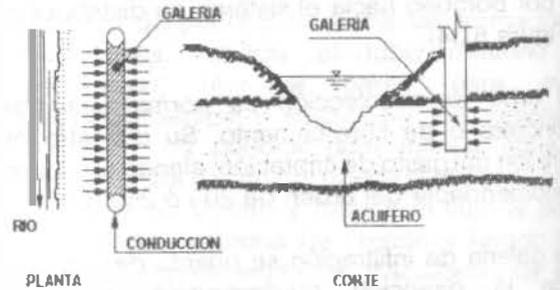
CORTE TRANSVERSAL

Figura 5.34. Detalle de una galería de infiltración.



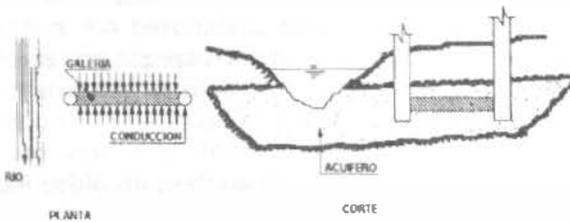
BAJA VELOCIDAD DE CORRIENTE, TERRENOS PLANOS, ACUIFERO DE ALTA PERMEABILIDAD, DIRECCION PREDOMINANTE DEL FLUJO SUBTERRANEO DESDE EL RIO HACIA LA GALERIA

Figura 5.35



BAJA VELOCIDAD DE CORRIENTE, ACUIFERO DE GRAN EXTENSION, DIRECCION PREDOMINANTE DEL FLUJO SUBTERRANEO, DESDE EL ACUIFERO HASTA EL RIO

Figura 5.36

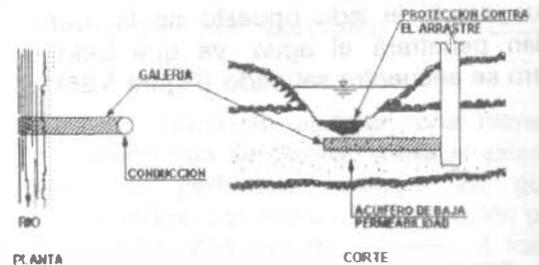


ALTA VELOCIDAD DE CORRIENTE, ACUIFERO DE PERMEABILIDAD MEDIA Y EXTENSION REDUCIDA, TERRENOS ACCIDENTADOS, DIRECCION PREDOMINANTE DEL FLUJO SUBTERRANEO, PARALELO AL RIO

Figura 5.37

A fin de determinar las características de diseño de las galerías, es necesario hacer excavaciones o perforaciones de prueba en cada caso específico. En vista de que las galerías son obras costosas, conviene determinar: 1) la permeabilidad media del acuífero, para estimar la producción por metro lineal de galería y 2) la granulometría del terreno para determinar las características de la grava de envoltura.

En caso de gastos pequeños, del orden de 3 a 5 l/s, normalmente basta una excavación de prueba hasta una profundidad conveniente por debajo del nivel estático del agua.



ACUIFERO DE BAJA PERMEABILIDAD, BAJA A MEDIANA VELOCIDAD DE CORRIENTE, GALERIA UBICADA EN EL FONDO DEL RIO

Figura 5.38

Se extrae luego el agua con bomba, a un gasto fijo y se observa el descenso de nivel. La estabilización de dicho nivel para un gasto fijo de bombeo prolongado, significará que la recarga natural del acuífero desde el río, es igual al gasto extraído. A base de este gasto y estimando el área total de penetración del agua en la excavación de prueba, puede formarse una idea acerca de la longitud necesaria de galería para el gasto de diseño.

En caso de gastos mayores, además de la excavación de prueba, será necesario perforar o excavar uno o varios pozos de observación, a fin de determinar el descenso del nivel de agua a

cierta distancia del punto donde se efectúa el bombeo de prueba (Figura 5.39).

El procedimiento para determinar la longitud necesaria de galería para el gasto de diseño, es como sigue:

- Se bombea a un gasto constante hasta que el nivel del agua se estabilice en la excavación de prueba.
- Se mide el nivel, tanto en la excavación de prueba como en el pozo de observación y se calculan los valores de h_1 y h_2 . Igualmente se miden las distancias r_1 y r_2 .
- Sustituyendo en la fórmula

$$Q = \frac{\pi}{2.31} P \frac{(h_2^2 - h_1^2)}{\log \frac{r_2}{r_1}}$$

para acuíferos no confinados, o

$$Q = \frac{2 \pi}{2.31} P b \frac{(h_2 - h_1)}{\log \frac{r_2}{r_1}}$$

(donde b es el espesor del acuífero confinado); para acuíferos confinados, se obtiene el valor P que representará la permeabilidad media. Nótese que en vista de que el flujo radial del agua hacia la excavación de prueba será desigual, debido a la cercanía del río, la posición del pozo de observación tendrá una influencia decisiva sobre el valor calculado de P . Tomando en cuenta que nuestro interés es determinar la permeabilidad media de los estratos porosos entre la futura galería y el río, el pozo de observación debe ubicarse en esa zona.

- De acuerdo con la Ley de Darcy, se tiene:

$$Q = \pi i A$$

En este caso Q es el gasto de diseño y P la permeabilidad media. El área de penetración queda definida por la grava de envoltura del

tubo de recolección y la longitud total del mismo. Para los efectos de captación indirecta de aguas superficiales, normalmente se toma el área de la cara hacia el río, dejando el flujo desde el lado opuesto como margen de seguridad. El gradiente hidráulico disponible es desde el nivel del agua en el río hasta la grava de envoltura. Por consiguiente $i = Z/L$ siendo Z la profundidad de la grava de envoltura con respecto al nivel estático de las aguas subterráneas y L , la distancia desde la orilla del río hasta la galería. Nótese que en esta forma se obtiene el gradiente mínimo, ya que para estratos de alta permeabilidad puede presentarse el caso, en que la depresión del nivel de las aguas subterráneas se inicie cerca a la galería, y la distancia L para el mismo valor de Z será mucho menor. Esta condición se reflejará en una producción superior a la estimada, por lo tanto se tendrá un factor de seguridad adicional. Es de observarse también que el nivel del río, así como el nivel estático de las aguas subterráneas, variará según la época del año. Evidentemente habrá que diseñar la galería, tomando como base el nivel mínimo estimado.

El diámetro y separación de las perforaciones de la tubería de recolección se calculan para obtener una velocidad de entrada tal, que se evite el arrastre de partículas finas desde el acuífero hasta dicha tubería. Esta velocidad puede fijarse de 5 a 10 cm/s, lográndose este valor sin dificultad alguna en la mayoría de los casos. La grava de envoltura será función de la granulometría del acuífero y de las perforaciones de la tubería de recolección, empleándose normalmente piedra picada de 1/2 a 1" de diámetro nominal cerca del acuífero y tamaños ligeramente mayores cerca del tubo. Nótese que debido a la baja velocidad de acercamiento del agua, el arrastre de arena hacia el tubo de recolección es poco probable. El arrastre de partículas muy finas en suspensión puede evitarse únicamente con un verdadero filtro de arena alrededor del tubo, filtro cuya construcción es sumamente difícil, además, debido a la imposibilidad de lavados periódicos y efectivos, es más bien contraproducente.

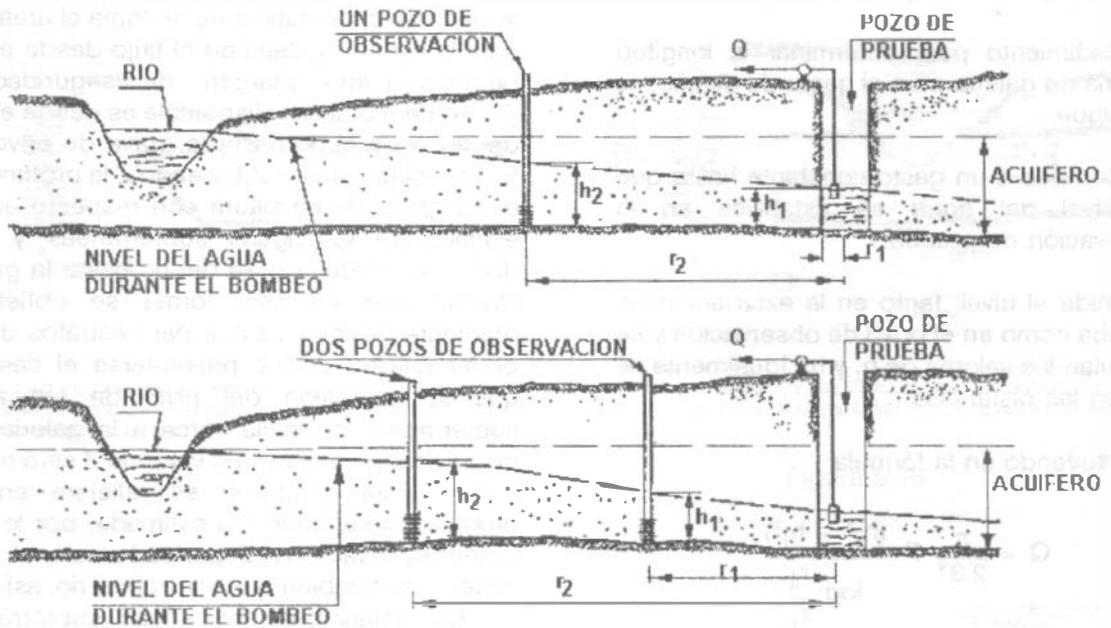


Figura 5.39. Método para determinar la permeabilidad media del acuífero.

Ejemplo 5.7:

Utilizando un río como fuente de abastecimiento, se quiere captar indirectamente por medio de galerías de infiltración 25 l/s. El nivel mínimo de las aguas del río se encuentra a una cota de 115.60 m A 50 m de distancia, perpendicular a la orilla del río y a una cota de 116.10, se hizo una excavación de prueba de 2 mts. de diámetro hasta la cota de 113.00 m y a 30 m de la orilla se ha clavado una puntera tipo "Well-point" para observar el descenso del nivel de agua (Figura 5.40).

Se bombeó el agua en la excavación de prueba a una tasa de 3 l/s, durante 6 horas, haciendo mediciones periódicas hasta la estabilización completa del nivel del agua, tanto en la excavación de prueba como en el pozo de observación, obteniéndose las cotas respectivas de 115.30 y 115.50 m. Se quiere determinar la longitud necesaria de galería de infiltración para el gasto de diseño. De acuerdo con las condiciones topográficas, zona de inundación

del río, etc., la galería debe ubicarse paralela al río, a una distancia de 50 m del mismo.

Solución.

El acuífero no es confinado, por consiguiente se emplea la fórmula:

$$Q = \frac{\pi}{2.31} P \frac{(h_2^2 - h_1^2)}{\log \frac{r_2}{r_1}}$$

$$P = \log \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{2.31 Q}{(h_2^2 - h_1^2)} \cdot \frac{1}{\pi} \tag{520}$$

siendo

$$r_2 = 20 \text{ m}$$

$$r_1 = 1 \text{ m}$$

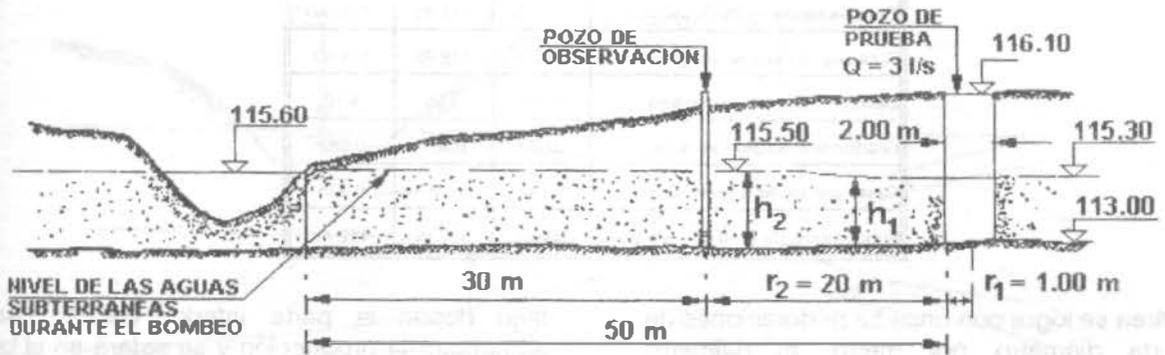


Figura 5.40. Ejemplo para el diseño de una galería.

$$Q = 0.003 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_2 = 2.50 \text{ m}$$

$$h_1 = 2.30 \text{ m}$$

$$P = \log \frac{20}{1} \cdot \frac{2.31 (0.003)}{(2.5^2 - 2.3^2)} \cdot \frac{1}{\pi}$$

$$P = 0.00302 \text{ m}^3/\text{s/m}^2$$

$$P = 3.02 \text{ lts/s/m}^2$$

Según la ecuación de Darcy, se tiene:

$$Q = PIA$$

El gradiente hidráulico mínimo es la diferencia de desnivel existente entre el nivel del agua en el río (115.6 m) y la envoltura de grava de la tubería de recolección. La profundidad óptima de dicha tubería queda determinada por el costo de excavación, por la producción del acuífero, y por factores de tipo sanitario, ya que se requiere cierta profundidad mínima para la protección adecuada contra la infiltración directa de aguas superficiales contaminadas.

Suponiendo una envoltura total de 0.9 m de altura y 0.80 m de ancho, se puede calcular la longitud requerida para la galería, en función de la profundidad de la excavación. Reservando el flujo desde el lado opuesto al río, como margen de seguridad, el área "A" en la fórmula de Darcy será de 0.9 m² por m. El gradiente hidráulico variará en función de la profundidad de la galería. Los valores calculados para diferentes profundidades de excavación se dan en el Cuadro 5.4.

De acuerdo con el costo de excavación a diferentes profundidades, y el de la tubería de recolección y grava de envoltura por metro lineal de galería, puede seleccionarse la solución más económica.

Suponiendo que se ha hecho ese estudio económico, se adopta la solución B, o sea 0.000182 m³/s por metro lineal. Para una velocidad de penetración de 0.05 m/s en la tubería, y tomando 0.55 como coeficiente de contracción por concepto de entrada por orificios, el área total de ranuras o perforaciones del tubo recolector deberá ser de 0.000182/0.55x0.05 = 0.00661 m² = 66.1 cm².

Cuadro 5.4

| PROFUNDIDAD | Solución A | Solución E | Solución C |
|-----------------------------------|------------|------------|------------|
| Profundidad de la excavación | 4.00 | 4.75 | 5.50 |
| Cota de fondo de la excavación | 112.10 | 111.35 | 110.60 |
| Cota sup. de la env. de grava | 113.0 | 112.25 | 111.50 |
| Desnivel entre río y envoltura | 2.60 | 3.35 | 4.10 |
| Gradiente hidráulico en 50 m | 0.052 | 0.067 | 0.082 |
| Gasto por ml de galería (Q = KIA) | 0.142 | 0.182 | 0.223 |
| Long. requerida para Q = 25 l/s | 208 m | 137 m | 112 m |

Esta área se logra con unas 52 perforaciones de 1/2" de diámetro por metro. El diámetro recomendable para la tubería de recolección en caso de gastos del orden de 20 a 30 l/s es de 200 a 300 mm.

Al despreciar el flujo subterráneo hacia la galería, desde el lado opuesto al río, se tiene un coeficiente de seguridad hasta de 2, ya que en caso de acuíferos de gran extensión, el flujo desde ambos lados es sensiblemente igual. Es de notar además que el gradiente hidráulico verdadero es mayor que el calculado, ya que la depresión del nivel de las aguas subterráneas durante el bombeo, no comienza inmediatamente en la orilla del río. En esta forma se tiene un margen de seguridad adicional, cosa que resulta muy útil, cuando la galería empieza a obstruirse con el tiempo.

Hay que notar también que si el pozo de prueba no llega hasta la profundidad completa del acuífero, el valor de la permeabilidad media, calculado a base de la fórmula 5.6 y 5.20 no es correcto, ya que dicha fórmula supone una variación de la superficie libre o la altura piezométrica de las aguas subterráneas, siendo el nivel del fondo constante. En caso de pozos excavados o perforados hasta una profundidad parcial del acuífero (Figura 5.41), variará tanto el contorno superior como el inferior del flujo hacia el pozo y la fórmula clásica no tendrá validez. Sin embargo en caso de gastos moderados, es posible usar el mismo método para tener una idea aproximada acerca de la producción probable de la galería de infiltración, ya que el

flujo desde la parte inferior de la misma aumentará la producción y se estará en el lado seguro. Evidentemente para gastos grandes habrá que hacer una investigación más detenida.

En todo caso, cuando se trata de longitudes o profundidades que impliquen costos considerables, conviene construir la galería por tramos, aforando la producción continuamente, con el objeto de rectificar la longitud proyectada de acuerdo con la producción obtenida. Cuando no se conoce con seguridad la dirección predominante del flujo subterráneo, conviene perforar o hincar tres o cuatro pozos de observación alrededor del pozo de prueba, de acuerdo con la Figura 5.42. En esta forma se obtendrán tres o cuatro valores para h^2 en la fórmula de la permeabilidad. Si dichos valores son iguales, se trata de un acuífero homogéneo, normalmente de gran extensión, cuyas aguas penetran en el pozo de prueba en forma pareja desde todas las direcciones. En este caso la orientación de la galería puede ser paralela o perpendicular al eje del río, de acuerdo con las condiciones topográficas. Si los valores de h^2 son distintos, pueden calcularse tres o cuatro valores para la permeabilidad media. La galería deberá orientarse con cara lateral hacia la zona de mayor permeabilidad.

Cuando el subsuelo es muy poco permeable, la galería tiene que ubicarse por debajo del lecho del río. La producción por metro lineal de galería dependerá del tipo de grava y arena utilizada para la envoltura; la carga hidrostática existente; la velocidad de corriente del río y del diámetro

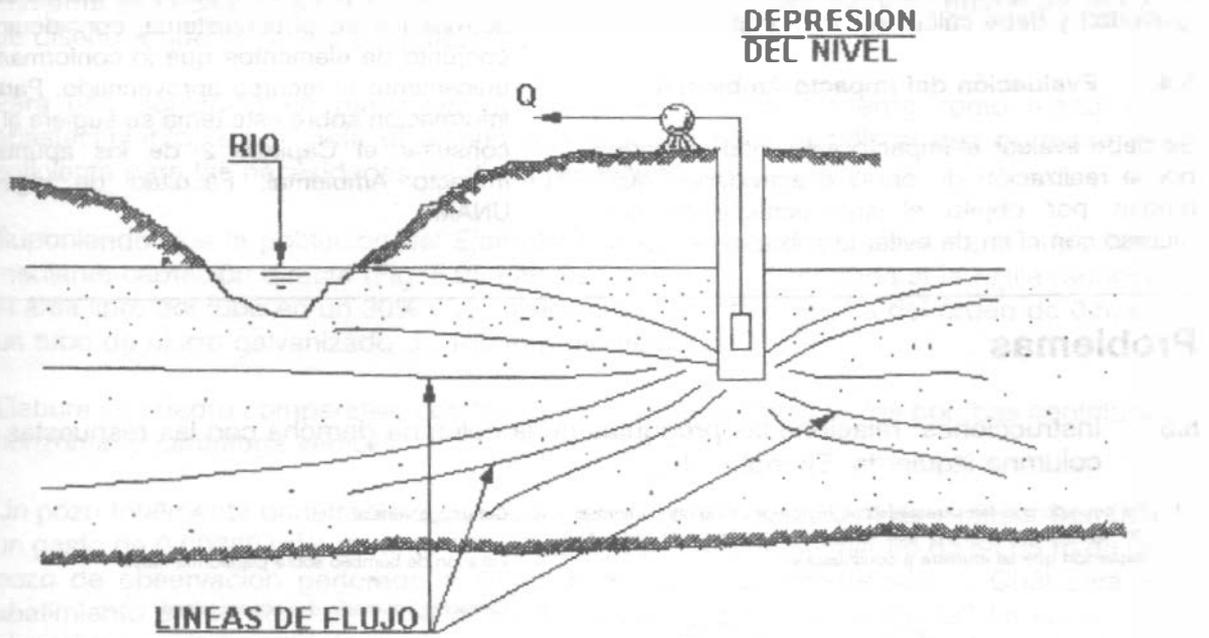


Figura 5.41. Flujo subterráneo en caso de que el pozo no llegue hasta el límite inferior del acuífero.

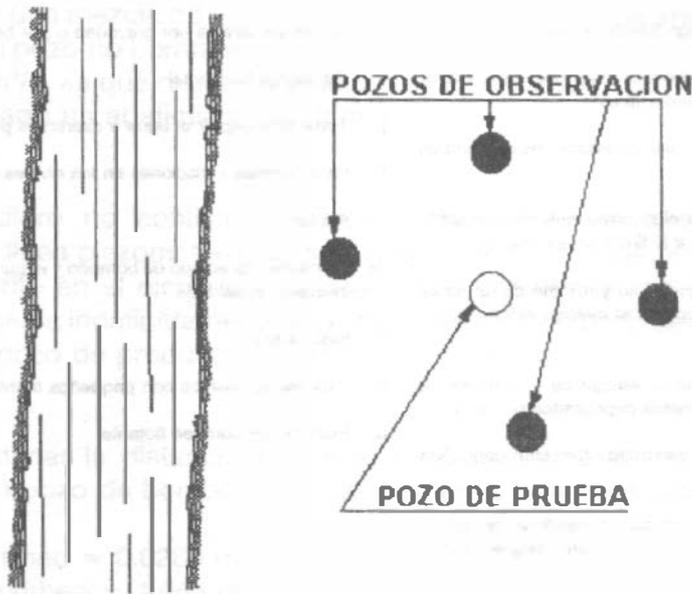


Figura 5.42. Ubicación de los pozos de observación en terrenos donde no se conoce la dirección aproximada del flujo subterráneo.

del tubo de recolección. En este caso el conjunto trabajará en forma similar a un filtro de gravedad y debe calcularse como tal.

5.4. Evaluación del Impacto Ambiental

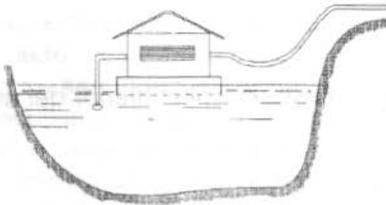
Se debe evaluar el impacto ambiental causado por la realización de obras o actividades que tengan por objeto el aprovechamiento del recurso con el fin de evitar la sobre-explotación

del acuífero y conflictos en el uso del agua y describir los posibles efectos de dichas obras o actividades en el ecosistema, considerando el conjunto de elementos que lo conforman y no únicamente el recurso aprovechado. Para más información sobre este tema se sugiere al lector consultar el Capítulo 2 de los apuntes de Impacto Ambiental, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Problemas

5.5 Instrucciones: relacione las preguntas de la columna derecha con las respuestas de la columna izquierda. Ejemplo: 15-z

- De acuerdo con las características hidrológicas de las corrientes de agua superficial, en qué caso se recomienda la obra de captación que se muestra a continuación.



- Las ventajas de la bomba centrífuga horizontal son:
- Cuando se trata de la captación directa de las aguas superficiales, el tipo de bomba comúnmente empleada es:
- La máxima altura de succión en el caso de estaciones de bombeo fijas es:
- Este dispositivo de captación tiene el inconveniente de permitir la intrusión de gran cantidad de aire a la línea de conducción:
- Cuando la variación entre el nivel máximo y mínimo de un río es mayor que la altura máxima de succión, el método indicado para la captación de las aguas es:
- Este dispositivo de captación tiene la ventaja de que no se ve afectado por la cantidad de sedimentos depositados por el río:
- Las obras recomendadas para escurrimientos con pequeños tirantes son:
- El dispositivo de captación más sencillo, tratándose de aguas relativamente libres de materiales de arrastre en cualquier época del año es:
- Qué obra de captación se recomienda en el caso de corrientes fuertes, fondo inestable, orillas del río con fuerte pendiente, acceso difícil durante el estiaje y tráfico fluvial intenso:

- Centrífuga vertical
- Estación de bombeo sobre plataforma móvil
- Captación por medio de vertedor lateral
- Estación de bombeo fija
- Mayor eficiencia, ubicación de la estación de bombeo directamente por encima del punto de captación.
- Para pequeñas oscilaciones en los niveles de la superficie libre
- Captación por medio de caja central
- Captación directa por gravedad o por bombeo
- Centrífuga horizontal
- Torre para captar el agua a diferentes profundidades
- Para grandes variaciones en los niveles de la superficie libre
- 4 a 6m
- Ubicación del equipo de bombeo y el punto de captación distintos; inversión inicial baja
- hasta 400 m.
- Para escurrimientos con pequeños tirantes
- Estación de bombeo flotante

- 5.2 Suponga que tiene que diseñar una obra de captación para agua superficial en una corriente de la cual no se tienen registros hidrológicos. ¿Cómo podría obtener los datos de diseño a que se refiere el apartado 5.2 ?
- 5.3 Para una población en particular, que va a utilizar una corriente como fuente de abastecimiento, ¿cuál sería el criterio que utilizaría para decidir si esa corriente es suficiente para las necesidades de dicha población?
- 5.4 Suponiendo que la población del Ejemplo 4.11 ha de abastecerse de agua superficial mediante captación directa (Fig. 5.9), calcule la pérdida por entrada si la rejilla reducirá el área libre del tubo en un 30% y el coeficiente de contracción es del orden de 0.5, en un tubo de hierro galvanizado de 100 mm de diámetro.
- 5.5 Elabore un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas de las bombas centrífuga horizontal y centrífuga vertical.
- 5.6 Un pozo totalmente penetrante en un acuífero confinado de 20.0 m de espesor bombea un gasto de $0.00380 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 1941 días y provoca un abatimiento de 64.05 m en un pozo de observación perforado a 48.00 m del pozo de producción. ¿Cuál será el abatimiento en un pozo de observación localizado a 68 m de distancia? La superficie piezométrica original estaba 94.05 m sobre el estrato confinante inferior. El material del acuífero tiene las siguientes características: porosidad 15%, rendimiento específico 5%, permeabilidad 5.8×10^{-7} .
- 5.7 Un acuífero confinado de 5 m de espesor con una superficie piezométrica a 65 m sobre el estrato confinante inferior está siendo bombeado por un pozo totalmente penetrante. El acuífero es una mezcla de grava y arena. Se observó un abatimiento de estado estable de 7 m en un pozo no bombeado localizado a 10 m de distancia. Si el gasto de bombeo es de $0.020 \text{ m}^3/\text{s}$, ¿a qué distancia se localiza un segundo pozo no bombeado, en el cual se ha observado un abatimiento de 2 m.
- 5.8 Para un acuífero no confinado, existe la posibilidad de que el abatimiento haga descender la línea piezométrica hasta el fondo del pozo y que el agua deje de fluir. Para el caso descrito en el ejemplo de clase, determine el máximo gasto de bombeo que puede sostenerse indefinidamente si el abatimiento en un pozo de observación localizado a 100 m del pozo de producción permanece constante.
- 5.9 Se desea estimar la distancia a la cual se espera un abatimiento de 4.81 m, con respecto a un pozo de bombeo con las siguientes características:
- Gasto de bombeo = $0.0280 \text{ m}^3/\text{s}$
 Tiempo de bombeo = 1,066 días
 Abatimiento en el pozo de observación = 9.52 m
 El pozo de observación se localiza a 10 m del pozo de bombeo
 Material del acuífero = arena media (porosidad 37%, rendimiento específico 25% y

permeabilidad 1.5×10^{-4})
 Espesor del acuífero = 14.05 m

Asuma que el pozo es totalmente penetrante en un acuífero no confinado.

- 5.10. Un pozo de 0.25 m de diámetro penetra totalmente en un acuífero no confinado de 20 m de espesor. El pozo tiene una descarga de $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ y un abatimiento de 8 m. Si el flujo es estable y la permeabilidad es 1.5×10^{-4} , ¿cuál es la altura de la superficie piezométrica sobre el estrato inferior en un sitio a 80 m del pozo?
- 5.11. Un acuífero produce los siguientes resultados al bombear un pozo de 0.61 m de diámetro con un gasto de $0.0303 \text{ m}^3/\text{s}$: abatimiento = 0.98 m en 8 minutos; abatimiento = 3.87 m en 24 h. Determine su transmisibilidad. Reporte el resultado con dos decimales.
- 5.12. Un acuífero experimenta un abatimiento de 1.04 m en un pozo de observación localizado a 96.93 m de un pozo que bombea un gasto de $0.0170 \text{ m}^3/\text{s}$ después de 80 minutos de bombeo. El tiempo virtual es de 0.6 min y la transmisibilidad es de $5.39 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Determine el coeficiente de almacenaje.
- 5.13. Si la transmisibilidad es de 2.51×10^{-3} y el coeficiente de almacenaje es 2.86×10^{-4} , calcule el abatimiento que resultará al fin de dos días de bombeo en un pozo de 0.5 m de diámetro con un gasto de $0.0194 \text{ m}^3/\text{s}$.
- 5.14. Dos pozos distantes 106.68 m entre sí están bombeando simultáneamente. El pozo A bombea a $0.0379 \text{ m}^3/\text{s}$ y el pozo B bombea a $0.0252 \text{ m}^3/\text{s}$. El diámetro de cada pozo es 0.460 m. La transmisibilidad es $4.35 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y el coeficiente de almacenaje es 4.1×10^{-5} . ¿Cuál es la interferencia del pozo A sobre el B después de 365 días de bombeo? Reporte el resultado con dos decimales.
- 5.15. Usando los datos del problema 5.14, encuentre el abatimiento total en el pozo B después de 365 días de bombeo.
- 5.16. Si dos pozos, No. 12 y No. 13, distantes 100 m entre sí, están bombeando un gasto de $0.0250 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.0300 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, ¿cuál es la interferencia del pozo No. 12 sobre el No. 13 después de 280 días de bombeo? El diámetro de cada pozo es de 0.500 m. La transmisibilidad es de $1.766 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ y el coeficiente de almacenaje es de 6.675×10^{-5} . Reporte el resultado con dos decimales.
- 5.17. Usando los datos del problema 5.16, calcule el abatimiento total en el pozo 13 después de 280 días de bombeo. Reporte el resultado con dos decimales.
- 5.18. Para el campo de pozos mostrado en la Figura P-5.18, determine el efecto de añadir un sexto pozo. ¿Podría provocar efectos adversos sobre el acuífero? Asuma que todos los pozos son bombeados por 80 días y que cada pozo es de 0.914 m de diámetro. Los datos de los pozos se dan en el Cuadro P-5.13.

Las características del acuífero son las siguientes:
 Coeficiente de almacenaje: 2.8×10^{-5} .

Transmisibilidad: $1.79 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$.

Nivel estático de bombeo: 7.60 m bajo el nivel del terreno.

Profundidad del estrato superior del acuífero confinado: 156.50 m

Cuadro P-5.18. Pozos del Campo No. 1

| POZO No. | GASTO m^3/s | PROFUNDIDAD DEL POZO (m) |
|--------------|-----------------------------|--------------------------|
| 1 | 0.0426 | 169.00 |
| 2 | 0.0473 | 170.00 |
| 3 | 0.0426 | 170.50 |
| 4 | 0.0404 | 168.84 |
| 5 | 0.0457 | 170.00 |
| 6(propuesto) | 0.0473 | 170.00 |

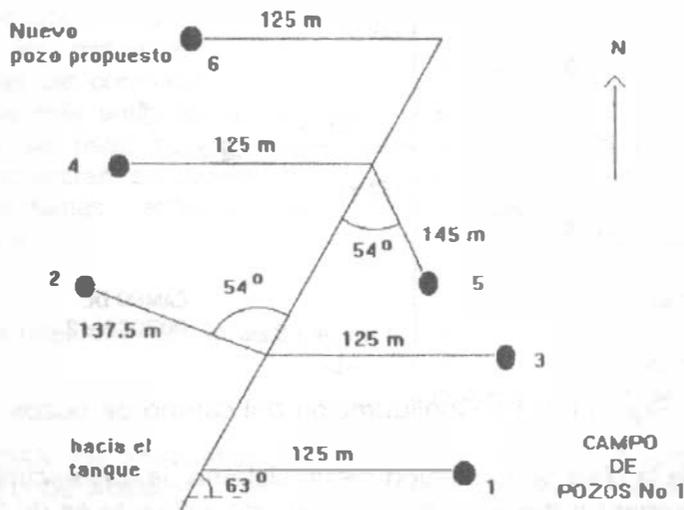


Figura P-5.18. Configuración del campo de pozos

5.19. Para el campo de pozos mostrado en la Figura P-5.19, determine el efecto de agregar un sexto pozo. ¿Podría ocasionar efectos adversos en el acuífero? Asuma que todos los pozos se bombean durante 100 días y que cada pozo es de 0.30 m de diámetro. Los datos del pozo se muestran en el Cuadro P-5.19. Las características del acuífero son las siguientes:

Coeficiente de almacenaje = 2.11×10^{-6} .

Transmisibilidad = $4.02 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Nivel estático a 9.50 m del nivel del terreno.

Profundidad del estrato superior del acuífero confinado, 50.1 m a partir del nivel del terreno.

Cuadro P-5.19. Pozos del Campo No. 2

| POZO | GASTO m ³ /s | PROFUNDIDAD DEL POZO (m) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|
| 1 | 0.020 | 105.7 |
| 2 | 0.035 | 112.8 |
| 3 | 0.020 | 111.2 |
| 4 | 0.015 | 108.6 |
| 5 | 0.030 | 113.3 |
| 6(propuesto) | 0.025 | 109.7 |

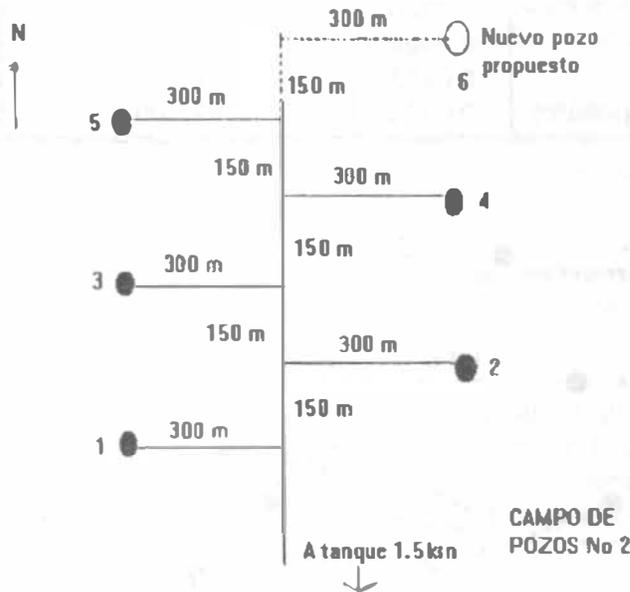


Figura P-5.19. Configuración del campo de pozos.

5.20 Como parte de la obra de captación de un sistema de abastecimiento de agua potable se requiere diseñar un desarenador. El gasto del influente es de 30 l/s y la temperatura mínima del agua es de 16 grados centígrados. Se requiere la remoción de partículas hasta de 7.5×10^{-3} cm de diámetro. La concentración de arena en el río que sirve de fuente llega a unos 4,500 mg/l durante las crecidas violentas y la máxima turbiedad persiste durante aproximadamente 1 día. Dicha concentración es del orden de 20 mg/l en la época de cauce normal.

Se tienen los siguientes datos:

- . Población del último censo: 11,182 habitantes
- . Población del penúltimo censo: 8,375 habitantes
- . Crecimiento demográfico del tipo geométrico
- . Periodo económico de diseño: 15 años
- . Clima templado
- . Coeficientes de variación diaria y horaria, 1.2 y 1.5, respectivamente

El agua se transporta desde la fuente a la comunidad en conductos abiertos o cerrados, suministrándose la energía necesaria por gravedad o a bombeo.

Las obras destinadas al transporte de agua potable reciben el nombre de "Líneas de Conducción". Es importante tener ciertos conocimientos sobre los materiales de uso frecuente en las líneas de conducción, pero incluso también de los más antiguos, porque algunos de los que se usan poco en la actualidad aún se encuentran en servicio en muchos de los sistemas antiguos de abastecimiento de agua.

A estos materiales nos referiremos en lo que sigue.

6.1 TUBERIAS USADAS EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE.

Una tubería se define como el conjunto formado por el tubo y su sistema de unión.

Para la fabricación de los tubos, se han utilizado diversos materiales, entre los cuales se puede mencionar la arcilla vitrificada, madera, plomo, cobre, hierro fundido, acero y concreto. A través del tiempo algunos de estos materiales han sido abandonados y en la actualidad los tubos más utilizados son fabricados a base de fibras de asbesto y cemento, acero, concreto reforzado y plástico (polietileno y PVC).

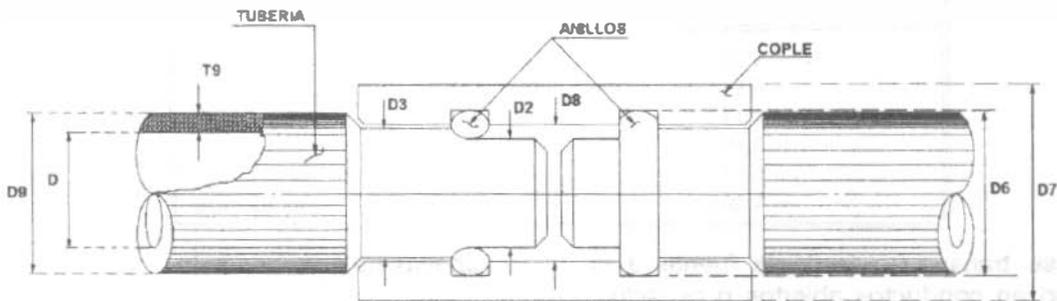
Tuberías de fibro-cemento.

Se entiende por tubos de presión de fibro-cemento los conductos de sección circular fabricados con una parte de asbesto y cemento tipo Portland o Portland Puzolánico, exentos de materia orgánica, con o sin adición de sílice.

La tubería de fibro-cemento sílice curada en autoclave, con vapor a presión, prácticamente no se oxida ni se corroe. Se fabrican aplicando sobre un mandril de acero pulido, una película obtenida con la mezcla íntima de fibras de asbesto de distintos tipos, cemento, sílice y agua, de tal manera que el enrollamiento de la película se traduce en una estructura multilaminar de óptima resistencia. La utilización del mandril, permite obtener una superficie tersa, para la que se tiene un coeficiente de rugosidad $n = 0.010$, según la fórmula de Manning que estudiaremos más adelante en este capítulo.

Los tubos de presión de fibro-cemento se fabrican para presiones internas de trabajo máximas, según la norma oficial mexicana NOM-C-12-2/2-1982, en las siguientes clases: A-5, A-7, A-10 y A-14, en donde los números 5, 7, 10 y 14 indican la presión interna de trabajo en kg/cm^2 que resisten los tubos. Actualmente existe en el mercado una denominación comercial de tubos de asbesto-cemento para conducción según la norma oficial mexicana NOM-C-12/1-1981 con base en la presión de trabajo expresada en metros de columna de agua; así se tiene: T-50, T-70, T-100, T-140 y T-200. La presión de prueba en fábrica para cada tubo y cada cople es de 3 veces la presión de trabajo para un tiempo de 5 segundos. Las tuberías tienen longitudes generalmente de 4 y 5 metros. (Cuadro 6.1).

Cuadro 6.1. Tubería de fibro-cemento, dimensiones generales y pesos.



| 0 | mm | 75 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | 750 | 900 |
|------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | pulg | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 30 | 36 |
| A-5 | D2 | 92 | 116 | 167 | 219 | 276 | 326 | 384 | 438 | 493 | 538 | 646 | 809 | 971 |
| | D8 | 96 | 120 | 171 | 223 | 280 | 330 | 388 | 442 | 497 | 542 | 650 | 813 | 975 |
| | D6 | 111 | 135 | 186 | 238 | 285 | 345 | 408 | 462 | 517 | 567 | 670 | 833 | 995 |
| | D7 | 131 | 155 | 206 | 267 | 325 | 375 | 438 | 496 | 555 | 609 | 726 | 903 | 1078 |
| | D9 | 97 | 122 | 173 | 225 | 282 | 332 | 390 | 444 | 499 | 546 | 655 | 818 | 980 |
| | T9 | 11.0 | 11.0 | 12.0 | 13.0 | 16.0 | 16.0 | 17.0 | 19.0 | 21.0 | 23.0 | 27.5 | 34.0 | 40.0 |
| | Peso kg/m | 6.0 | 7.7 | 12.1 | 17.3 | 24.7 | 31.8 | 39.8 | 50.7 | 63.1 | 75.6 | 108.4 | 164.5 | 236.2 |
| Peso cople | 2.2 | 2.7 | 3.9 | 5.3 | 6.6 | 10.0 | 14.9 | 18.2 | 24.3 | 30.8 | 41.7 | 66.7 | 91.3 | |
| A-7 | D2 | 95 | 118 | 170 | 224 | 281 | 332 | 395 | 450 | 506 | 549 | 660 | 825 | 991 |
| | D8 | 99 | 122 | 174 | 228 | 285 | 336 | 399 | 454 | 510 | 553 | 664 | 829 | 995 |
| | D6 | 114 | 137 | 189 | 243 | 300 | 351 | 419 | 474 | 530 | 573 | 684 | 849 | 1015 |
| | D7 | 137 | 160 | 214 | 272 | 335 | 387 | 460 | 519 | 581 | 634 | 757 | 938 | 1122 |
| | D9 | 101 | 124 | 176 | 230 | 287 | 338 | 401 | 456 | 512 | 557 | 669 | 834 | 1000 |
| | T9 | 12.5 | 12.0 | 13.5 | 15.5 | 18.5 | 19.0 | 22.5 | 25.0 | 27.5 | 28.5 | 34.5 | 42.0 | 50.0 |
| | Peso kg/m | 7.0 | 8.4 | 13.8 | 20.9 | 30.2 | 38.1 | 53.5 | 67.7 | 83.7 | 94.6 | 137.5 | 209.0 | 298.5 |
| Peso cople | 2.5 | 3.0 | 4.3 | 6.2 | 9.7 | 11.6 | 18.8 | 22.8 | 30.9 | 38.4 | 52.7 | 513.3 | 733.4 | |
| A-10 | D2 | 98 | 122 | 176 | 231 | 286 | 344 | 412 | 469 | 527 | 573 | 689 | 862 | 1035 |
| | D8 | 102 | 126 | 180 | 235 | 290 | 348 | 416 | 473 | 531 | 572 | 693 | 866 | 1039 |
| | D6 | 117 | 141 | 195 | 250 | 305 | 363 | 436 | 493 | 551 | 597 | 713 | 886 | 1059 |
| | D7 | 142 | 168 | 226 | 287 | 345 | 411 | 497 | 560 | 624 | 689 | 824 | 1023 | 1223 |
| | D9 | 104 | 128 | 182 | 237 | 292 | 350 | 418 | 475 | 533 | 581 | 698 | 871 | 1044 |
| | T9 | 14.0 | 14.0 | 16.5 | 19.0 | 21.0 | 25.0 | 31.0 | 34.5 | 38.0 | 40.5 | 49.0 | 60.5 | 72.0 |
| | Peso kg/m | 7.9 | 10.0 | 17.2 | 26.0 | 25.8 | 51.0 | 75.4 | 95.5 | 118.2 | 137.5 | 199.8 | 308.1 | 439.7 |
| Peso cople | 2.7 | 3.5 | 5.2 | 7.6 | 11.0 | 15.0 | 26.6 | 32.3 | 42.9 | 56.6 | 79.3 | 128.1 | 179.8 | |
| A-14 | D2 | 104 | 128 | 185 | 243 | 301 | 362 | 430 | 490 | 551 | 600 | 730 | 913 | 1096 |
| | D8 | 108 | 132 | 189 | 247 | 305 | 366 | 434 | 494 | 555 | 612 | 734 | 917 | 1100 |
| | D6 | 123 | 147 | 204 | 262 | 320 | 381 | 454 | 514 | 575 | 612 | 754 | 937 | 1120 |
| | D7 | 150 | 176 | 241 | 307 | 375 | 447 | 525 | 595 | 666 | 724 | 922 | 1146 | 1369 |
| | D9 | 110 | 134 | 191 | 249 | 307 | 368 | 436 | 496 | 557 | 616 | 739 | 922 | 1105 |
| | Peso kg/m | 17.0 | 17.0 | 21.0 | 25.0 | 28.5 | 34.0 | 40.0 | 45.0 | 50.0 | 58.0 | 69.5 | 86.0 | 102.5 |
| | Peso cople | 3.0 | 3.8 | 6.3 | 9.3 | 15.0 | 20.7 | 31.4 | 39.6 | 54.1 | 89.6 | 124.2 | 204.1 | 286.9 |

Descripción

D Diámetro interior nominal
 T9 Espesor de pared
 D9 Diámetro exterior
 D6 Diámetro de ranura de cople

D3 Diámetro intermedio
 D2 Diámetro de la sección de enchufe
 8 Diámetro interior del cople
 D7 Diámetro exterior del cople

La desventaja de los conductos de fibro-cemento es su baja resistencia mecánica. Debido a esto, al salir de la fábrica los tubos se degradan en su calidad por falta de cuidado en su transporte, manejo y almacenaje.

Tuberías de plástico: polietileno y cloruro de polivinilo (PVC).

De los plásticos, los termoplásticos son los que en la actualidad presentan mucho interés para su uso en los sistemas de abastecimiento de agua potable. Los dos termoplásticos de mayor importancia hasta la fecha son: el polietileno (PE) y el policloruro de vinilo (PVC).

El polietileno es un derivado del gas etileno, que es un componente del gas natural; también puede ser un derivado de la refinación del petróleo. Se tienen comercialmente tres tipos: de densidad baja, mediana y alta. Se fabrican con base en la Norma NOM-E-18-1969.

Desde el año de 1965, la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos utilizó con regularidad tuberías de polietileno de alta densidad o de alto peso molecular, en obras grandes y pequeñas, con éxito principalmente en tomas domiciliarias; sin embargo, en el caso de redes con fluctuaciones notables de presión y con defectos de instalación se han tenido serios problemas, como ha sucedido en la Ciudad de Monterrey.

Las ventajas de las tuberías de polietileno son: su gran flexibilidad, que permite su presentación en rollos; su ligereza, ya que pesa ocho veces menos que el acero y tres veces menos que el asbesto-cemento; y no presenta corrosión.

El PVC, (Cloruro de polivinilo) es un material termoplástico compuesto de polímeros de cloruro de vinilo; un sólido incoloro con alta resistencia al agua, alcoholes, ácidos y álcalis concentrados. Se obtiene en forma de gránulos, soluciones, líquidos y pastas.

En la Norma Oficial Mexicana de calidad vigente actualmente, (Sistema Inglés) para tubos y conexiones rígidas de policloruro de vinilo DGN-E/12-1968, se recomienda un esfuerzo de diseño de 140 kg/cm^2 , para PVC. 1114 (tipo I,

grado I, esfuerzo de diseño 140). En septiembre de 1977 se publicó la Norma Oficial Mexicana de Tubos y Conexiones de Policloruro de Vinilo (PVC) para abastecimiento de agua potable, NOM-E-22-1977 (Serie Métrica), para PVC 1114.

Por su parte, las tuberías de PVC presentan las ventajas y desventajas que se enlistan en el Cuadro 6.2.

La industria de tuberías plásticas fabrica dos líneas de tubos hidráulicos de PVC para el abastecimiento de agua potable: la línea métrica, tubos blancos, y la línea inglesa, tubos grises.

La línea métrica (color blanco), fue diseñada de acuerdo con el sistema internacional de unidades. La integran 13 diámetros (de 50 a 630 mm), y cinco espesores que permiten presiones máximas de trabajo de 5, 7, 10, 14 y 20 kg/cm^2 ; en función de cada presión se clasifican en clases. En el Cuadro 6.3 aparecen las clases de la línea métrica así como sus correspondientes espesores y diámetros interiores promedio. En dicho cuadro puede observarse también que el diámetro nominal del tubo es igual (para fines prácticos) a su diámetro exterior.

La unión entre tubos y conexiones se realiza mediante el sistema espiga-campana con anillo de hule. La longitud útil de cada tubo es de seis metros, pero también puede fabricarse en otras longitudes, según acuerdo entre cliente y fabricante.

La línea inglesa (color gris), fue diseñada con base en el sistema de unidades inglesas y se fabrica en 11 diámetros (de 13 a 200 mm). En función del cociente entre su diámetro exterior y su espesor mínimo de pared (RD relación de dimensiones), y las presiones máximas de trabajo, se clasifican en: RD-41 (7.1), RD-32.5 (8.7), RD-26 (11.2) y RD-13.5 (22.4 kg/cm^2). En el Cuadro 6.4 aparece la clasificación con sus respectivos espesores y diámetros interiores promedio. En este caso, el diámetro nominal del tubo no es igual al diámetro exterior ni al interior.

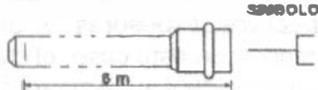
Cuadro 6.2. Ventajas y desventajas de las tuberías de PVC.

| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Resistencia a la corrosión y al ataque químico de ácidos, álcalis y soluciones salinas. - Instalación rápida, fácil y económica. - Debido a su grado de absorción permite la prueba hidrostática después de su llenado. - Su resistencia mecánica es superior a la de las tuberías de fibro-cemento. - Menor pérdida por fricción en comparación con las tuberías de fibro-cemento, concreto y acero. - Por su ligereza, el almacenamiento y transporte de la tubería se facilita notablemente. <p>Respecto a su costo de suministro en los diámetros de 50, 60, 75 y 100 mm es más barata que las tuberías de fibro-cemento.</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Alto costo en diámetros de 200 mm y mayores. - Las propiedades mecánicas de las tuberías de PVC se afectan si quedan expuestas a los rayos solares por un periodo de tiempo prolongado. - Los tubos de extremos lisos requieren mano de obra altamente especializada para su unión por el proceso de cementado. Debido a esto, en todos los proyectos de conducciones se especifica el uso de tuberías con campana y anillo de hule. La campana debe ser integral al tubo. |

Cuadro 6.3. Tubo hidráulico de PVC serie métrica, diámetros y espesores promedio.

| Diámetro Nominal (mm) | Diámetro Exterior (mm) | Espesores promedio (e) y Diámetros interiores promedio (d) en mm | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|--|-------|---------|-------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | | Clase 5 | | Clase 7 | | Clase 10 | | Clase 14 | | Clase 20 | |
| | | e | d | e | d | e | d | e | d | e | d |
| 50 | 50 | | | | | 2.0 | 46.1 | 2.6 | 44.9 | 3.7 | 42.7 |
| 63 | 63 | | | 1.7 | 59.7 | 2.4 | 58.3 | 3.3 | 56.5 | 4.5 | 54.1 |
| 80 | 80 | 1.7 | 76.8 | 2.2 | 75.8 | 3.1 | 74.0 | 4.1 | 72.0 | 5.8 | 68.6 |
| 100 | 100 | 2.0 | 96.2 | 2.7 | 94.8 | 3.8 | 92.6 | 5.2 | 89.8 | 7.2 | 85.8 |
| 160 | 160 | 3.1 | 154.0 | 4.2 | 151.8 | 5.9 | 148.4 | 8.1 | 144.0 | 11.4 | 137.4 |
| 200 | 200 | 3.8 | 192.6 | 5.3 | 189.6 | 7.4 | 185.4 | 10.1 | 180.0 | 14.1 | 172.0 |
| 250 | 250 | 4.7 | 240.9 | 6.5 | 237.3 | 9.2 | 231.9 | 12.6 | 225.1 | 17.7 | 214.9 |
| 315 | 315 | 6.0 | 303.3 | 8.2 | 298.9 | 11.8 | 292.1 | 15.9 | 283.5 | 22.3 | 270.7 |
| 355 | 355 | 6.6 | 342.4 | 9.3 | 337.0 | 12.9 | 329.8 | 17.9 | 319.8 | 25.0 | 305.6 |
| 400 | 400 | 7.5 | 385.6 | 10.4 | 379.8 | 14.6 | 371.4 | 20.1 | 360.4 | 28.1 | 344.4 |
| 450 | 450 | 8.4 | 433.9 | 11.7 | 427.3 | 16.4 | 417.9 | 22.6 | 405.5 | 31.6 | 387.5 |
| 500 | 500 | 9.4 | 482.0 | 12.9 | 475.0 | 18.2 | 464.4 | 25.1 | 450.6 | 35.1 | 430.6 |
| 630 | 630 | 11.8 | 607.4 | 16.3 | 598.4 | 22.9 | 585.2 | 31.8 | 567.8 | 44.1 | 542.8 |

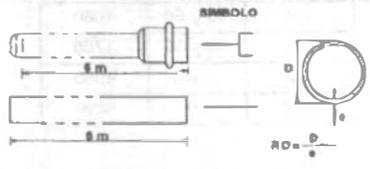
Los tubos se suministran con largo útil de 6 metros; con uno de sus extremos escampanados

| | | | | | | |
|---|---|---|---|----|----|----|
|  | Clase | 5 | 7 | 10 | 14 | 20 |
| | Presión máxima de trabajo (kg/cm ²) | 5 | 7 | 10 | 14 | 20 |

Cuadro 6.4. Tubo hidráulico de PVC serie inglesa, diámetros y espesores promedio.

| Diámetro Nominal (mm) | Diámetro Exterior Promedio (mm) | Espesores promedio (e) y Diámetros interiores promedio (d) en mm | | | | | | | |
|-----------------------|---------------------------------|--|-------|---------|-------|-------|-------|---------|------|
| | | RD-41 | | RD-32.5 | | RD 26 | | RD-13.5 | |
| | | e | d | e | d | e | d | e | d |
| 13 | 21.3 | | | | | | | 1.9 | 17.5 |
| 19 | 26.7 | | | | | | | 2.3 | 22.1 |
| 25 | 33.4 | | | | | 1.8 | 29.8 | 2.8 | 27.8 |
| 32 | 42.2 | | | | | 1.9 | 38.4 | 3.4 | 35.4 |
| 38 | 48.3 | | | 1.8 | 44.7 | 2.2 | 43.9 | 3.9 | 40.5 |
| 50 | 60.3 | 1.8 | 56.7 | 2.2 | 55.9 | 2.6 | 55.1 | 4.8 | 50.7 |
| 60 | 73.0 | 2.1 | 68.8 | 2.5 | 68.0 | 3.1 | 66.8 | | |
| 75 | 88.90 | 2.5 | 83.9 | 3.0 | 82.9 | 3.7 | 81.5 | | |
| 100 | 114.30 | 3.1 | 108.1 | 3.8 | 106.7 | 4.7 | 104.9 | | |
| 150 | 168.30 | 4.4 | 159.5 | 5.5 | 157.3 | 6.9 | 154.5 | | |
| 200 | 219.10 | 5.6 | 207.9 | 7.1 | 204.9 | 8.9 | 201.3 | | |

Los tubos se suministran en tramos con largo útil de 6 metros, con extremos lisos si el sistema es cementar y con una campana en uno de sus extremos si el sistema de unión es espiga campana.



| RD | Presión Máxima de Trabajo (kg/cm ²) |
|------|---|
| 41 | 7.1 |
| 32.5 | 8.7 |
| 26 | 11.2 |
| 13.5 | 22.4 |

En esta línea existe además del sistema de unión espiga-campana, el sistema cementado. La longitud útil del tubo es de seis metros pero también puede fabricarse en otras longitudes, previo acuerdo entre fabricante y comprador.

Las tuberías de polietileno se fabrican también en cuatro diferentes RD y son aptas para trabajar a las presiones especificadas en el cuadro 6.5; según las condiciones de operación de la tubería se aplicará un factor de seguridad igual a 3 ó 4 veces la presión de trabajo para llegar a la presión de ruptura. El factor 3 (F3) se aplica en líneas subterráneas en terreno estable y al factor 4(F4) se aplica en líneas expuestas a movimientos de terreno o tráfico pesado y líneas a intemperie.

En el cuadro 6.6 se presentan los diámetros de los tubos de polietileno.

Cuadro 6.5. Presión máxima de trabajo en kg/cm² para tubos de polietileno (S = 44.29 kg/cm²)*

| RD | F ₄ | F ₃ |
|------|----------------|----------------|
| 9 | 11.1 | 14.7 |
| 13.5 | 7.1 | 9.4 |
| 17 | 5.5 | 7.3 |
| 21 | 4.4 | 5.9 |

*S- esfuerzo de diseño o fuerza por unidad de área en la pared del tubo en corte transversal al eje del mismo.

$$S = \frac{P (d - e)}{2e}$$

d = diámetro exterior (mm); P = presión de trabajo en kg/cm²; e = espesor mínimo de pared (mm)

Cuadro 6.6. Dimensiones de los tubos de polietileno.

| Medida Nominal | | Diámetro Exterior mm | Espesor Pared mm | Largo rollo m | Peso GMS/M.L. |
|----------------|-------|-------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| mm | pulg | | | | |
| RD-9 | | | | | |
| 13 | 1/2 | 21.3 | 2.3 | 50 y 150 | 136 |
| 19 | 3/4 | 26.7 | 3.0 | 50 y 150 | 223 |
| 25 | 1 | 33.4 | 3.7 | 50 y 150 | 345 |
| RD-13.5 | | | | | |
| 32 | 1 1/4 | 42.2 | 3.1 | 50 y 150 | 382 |
| 38 | 1 1/2 | 48.3 | 3.6 | 50 y 150 | 506 |
| 50 | 2 | 60.3 | 4.5 | 50 y 150 | 790 |
| 75 | 3 | 88.9 | 6.6 | 10 y 50 | 1709 |
| 100 | 3 | 114.3 | 8.5 | 10 | 28 1 |
| 150 | 6 | 168.3 | 12.6 | 10 | 6175 |
| RD-17 | | | | | |
| 50 | 2 | 60.3 | 3.5 | 50 y 1 0 | 626 |
| 75 | 3 | 88.9 | 5.2 | 10 y 50 | 1371 |
| 100 | 4 | 114.3 | 6.7 | 10 | 2271 |
| 150 | 6 | 160.3 | 9.9 | 10 | 4940 |
| 200 | 8 | 219.1 | 12.9 | 10 | 8400 |
| RD-21 | | | | | |
| 75 | 3 | 88.9 | 4.2 | 10 y 50 | 1080 |
| 100 | 4 | 114.3 | 5.4 | 10 y 50 | 1765 |
| 150 | 6 | 160.3 | 8.0 | 10 | 4060 |
| 200 | 8 | 219.1 | 10.4 | 10 | 6890 |

Tuberías de hierro vaciado.

Las tuberías de hierro vaciado fueron utilizadas en la República Mexicana en la gran mayoría de las primeras obras de aprovisionamiento de agua potable construidas. Son muy resistentes a los esfuerzos mecánicos y de gran duración debido a su buena resistencia a la corrosión. En nuestro medio, las tuberías de hierro vaciado fueron fabricadas hasta 1967 por Altos Hornos de México, S.A., en Monclova, Coahuila. Se producían tuberías de extremos lisos y de macho campana para diámetros de 75 a 350 mm, pero fueron desplazadas del mercado nacional por las tuberías de fibro-cemento cuyo costo es menor.

Tuberías de acero.

En 1943, la Compañía Tubacero de Monterrey, N. L., inició la fabricación de tubos de acero formados por medio de roladoras y soldadura manual. Posteriormente fue sustituido este método utilizando prensa hidráulica y soldadura por arco sumergido. Actualmente se utilizan en

México dos métodos de fabricación: el proceso de soldadura (Tubacero, S.A.) y el proceso sin costura (TAMSA). La materia prima es el acero en placa o rollo, para el primero y lingotes y placas para el segundo.

Los tubos de acero se fabrican con diámetros desde 4.5 pulgadas (114.3 mm) hasta 48 pulgadas (1219 mm). Su producción está sujeta a un estricto control de calidad que toma en cuenta las normas DGN-B-177 y B-179-1978, e internacionales como las del American Petroleum Institute (API), máxima autoridad en el ramo.

Las tuberías de acero son recomendables para líneas de conducción cuando se tienen altas presiones de trabajo. Su utilización obliga a revestirlas contra la corrosión interior y exteriormente. Son muy durables, resistentes, flexibles y adaptables a las distintas condiciones de instalación que se tengan. En el cuadro 6.7 se presentan las características de los tubos de acero.

Cuadro 6.7
Tablas de características de las tuberías de acero

| DIAMETRO | | ESPESOR | | PESO Kg/m | Carga de trabajo en metros de columna de agua m/m $f_s = 2330 \text{ Kg/cm}^2$ $f_t = 3333 \text{ Kg/cm}^2$ $T = 0.6 f_s = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ | | | MÉTRICO | | ESPESOR | | PESO Kg/m | Carga de trabajo en metros de columna de agua m/m $f_s = 2330 \text{ Kg/cm}^2$ $f_t = 3333 \text{ Kg/cm}^2$ $T = 0.6 f_s = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ | | |
|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|--|-------|-----|--------------|-----------|--------------|-----------|--------------|--|-----|------|
| Pulg. (1) | mm (2) | Pulg. (3) | mm (4) | | (5) | (6) | (7) | Pulg. (1) | mm (2) | Pulg. (3) | mm (4) | | (8) | (9) | (10) |
| 4 | 102 | 14 Ga | 1.9 | 4 911 | 493 | 745 | 22 | 570 | 10 Ga | 3.4 | 50 598 | 154 | 243 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 6 846 | 665 | 1 059 | | | 3/16 | 4.8 | 69 945 | 215 | 343 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 8 631 | 855 | 1 333 | | | 1/4 | 6.3 | 93 756 | 288 | 451 | | |
| 4 1/2 | 114 | 14 Ga | 1.9 | 5 506 | 430 | 667 | 24 | 610 | 5/16 | 7.9 | 117 567 | 359 | 565 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 7 590 | 591 | 947 | | | 3/8 | 9.5 | 139 800 | 431 | 680 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 9 673 | 759 | 1 193 | | | 10 Ga | 3.4 | 55 063 | 142 | 223 | | |
| | | 3/10 | 4.8 | 12 017 | 1 053 | 1 684 | | | 3/16 | 4.8 | 75 808 | 197 | 315 | | |
| 6 | 152 | 14 Ga | 1.9 | 7 441 | 528 | 800 | 26 | 660 | 1/3 | 6.3 | 101 107 | 264 | 413 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 10 268 | 713 | 1 103 | | | 5/16 | 7.9 | 128 490 | 330 | 518 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 13 096 | 895 | 1 333 | | | 3/8 | 9.5 | 151 795 | 390 | 623 | | |
| 6 3/4 | 168 | 14 Ga | 1.9 | 8 185 | 598 | 895 | 28 | 711 | 7/16 | 11.1 | 175 606 | 462 | 728 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 11 310 | 802 | 1 193 | | | 1/2 | 12.7 | 200 900 | 528 | 833 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 14 435 | 989 | 1 443 | | | 3/16 | 4.8 | 83 339 | 182 | 291 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 19 346 | 1 333 | 2 000 | | | 1/4 | 6.3 | 111 814 | 243 | 382 | | |
| 8 | 203 | 14 Ga | 1.9 | 9 971 | 717 | 1 053 | 30 | 762 | 5/16 | 7.9 | 188 402 | 305 | 479 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 13 542 | 933 | 1 333 | | | 3/8 | 9.5 | 226 207 | 366 | 576 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 17 412 | 1 193 | 1 684 | | | 7/16 | 11.1 | 194 953 | 428 | 673 | | |
| 8 3/4 | 219 | 14 Ga | 1.9 | 10 715 | 802 | 1 193 | 32 | 813 | 1/2 | 12.7 | 221 740 | 487 | 770 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 14 584 | 1 053 | 1 443 | | | 3/16 | 4.8 | 89 291 | 169 | 270 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 18 603 | 1 333 | 1 841 | | | 1/4 | 6.3 | 119 055 | 226 | 354 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 25 894 | 1 684 | 2 443 | | | 5/16 | 7.9 | 148 810 | 283 | 444 | | |
| 10 | 254 | 12 Ga | 2.7 | 16 965 | 1 333 | 1 841 | 34 | 864 | 7/16 | 11.1 | 194 953 | 428 | 673 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 21 727 | 1 684 | 2 300 | | | 1/2 | 12.7 | 238 110 | 453 | 715 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 30 210 | 2 000 | 2 800 | | | 3/16 | 4.8 | 90 732 | 158 | 252 | | |
| 10 3/4 | 273 | 12 Ga | 2.7 | 18 156 | 1 443 | 1 951 | 36 | 914 | 1/4 | 6.3 | 129 472 | 211 | 331 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 23 364 | 1 841 | 2 443 | | | 5/16 | 7.9 | 160 724 | 264 | 415 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 32 442 | 2 240 | 3 040 | | | 3/8 | 9.5 | 193 465 | 317 | 499 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 21 281 | 1 684 | 2 300 | | | 7/16 | 11.1 | 226 207 | 369 | 583 | | |
| 12 | 305 | 10 Ga | 3.4 | 27 234 | 2 300 | 3 040 | 38 | 965 | 1/2 | 12.7 | 257 457 | 422 | 687 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 36 917 | 2 700 | 3 600 | | | 3/16 | 4.8 | 102 685 | 147 | 230 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 22 620 | 1 841 | 2 443 | | | 1/4 | 6.3 | 136 913 | 198 | 310 | | |
| 12 3/4 | 324 | 10 Ga | 3.4 | 27 829 | 2 600 | 3 400 | 40 | 1015 | 5/16 | 7.9 | 171 142 | 248 | 389 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 38 693 | 3 000 | 3 900 | | | 3/8 | 9.5 | 205 370 | 297 | 467 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 22 620 | 1 841 | 2 443 | | | 7/16 | 11.1 | 239 598 | 346 | 546 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 27 829 | 2 300 | 3 040 | | | 1/2 | 12.7 | 273 827 | 395 | 625 | | |
| 14 | 356 | 10 Ga | 3.4 | 32 740 | 2 700 | 3 600 | 42 | 1066 | 3/16 | 4.8 | 110 126 | 139 | 222 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 44 646 | 3 100 | 4 000 | | | 1/4 | 6.3 | 145 843 | 187 | 292 | | |
| | | 1/4 | 6.3 | 59 528 | 3 500 | 4 500 | | | 5/16 | 7.9 | 183 047 | 233 | 366 | | |
| | | 5/16 | 7.9 | 74 409 | 3 900 | 5 000 | | | 3/8 | 9.5 | 220 252 | 280 | 440 | | |
| | | 12 Ga | 2.7 | 22 620 | 1 841 | 2 443 | | | 7/16 | 11.1 | 255 069 | 328 | 514 | | |
| 16 | 40 | 3/8 | 9.5 | 102 685 | 594 | 837 | 44 | 1117 | 1/2 | 12.7 | 293 173 | 373 | 585 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 37 205 | 2 700 | 3 600 | | | 3/16 | 4.8 | 116 079 | 132 | 210 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 52 087 | 3 100 | 4 000 | | | 1/4 | 6.3 | 154 772 | 175 | 276 | | |
| | | 1/4 | 6.3 | 69 945 | 3 500 | 4 500 | | | 5/16 | 7.9 | 193 465 | 220 | 348 | | |
| | | 5/16 | 7.9 | 86 315 | 3 900 | 5 000 | | | 3/8 | 9.5 | 232 158 | 264 | 416 | | |
| 18 | 457 | 3/8 | 9.5 | 102 685 | 594 | 837 | 46 | 1168 | 7/16 | 11.1 | 270 851 | 307 | 486 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 41 669 | 3 100 | 4 000 | | | 1/2 | 12.7 | 309 543 | 352 | 558 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 58 039 | 3 500 | 4 500 | | | 9/16 | 14.3 | 348 748 | 396 | 628 | | |
| | | 1/4 | 6.3 | 77 386 | 3 900 | 5 000 | | | 5/8 | 15.9 | 385 441 | 440 | 698 | | |
| | | 5/16 | 7.9 | 96 732 | 4 300 | 5 600 | | | 3/16 | 4.8 | 122 031 | 125 | 199 | | |
| 20 | 508 | 3/8 | 9.5 | 134 591 | 828 | 1 133 | 48 | 1219 | 1/4 | 6.3 | 162 213 | 166 | 261 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 46 134 | 3 100 | 4 000 | | | 5/16 | 7.9 | 203 882 | 209 | 327 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 63 902 | 3 500 | 4 500 | | | 3/8 | 9.5 | 244 063 | 250 | 394 | | |
| | | 1/4 | 6.3 | 84 827 | 3 900 | 5 000 | | | 7/16 | 11.1 | 284 244 | 291 | 460 | | |
| | | 5/16 | 7.9 | 105 651 | 4 300 | 5 600 | | | 1/2 | 12.7 | 325 914 | 333 | 526 | | |
| 20 | 508 | 3/8 | 9.5 | 120 490 | 476 | 648 | 50 | 1270 | 9/16 | 14.3 | 366 095 | 375 | 593 | | |
| | | 10 Ga | 3.4 | 46 134 | 3 100 | 4 000 | | | 5/8 | 15.9 | 408 276 | 416 | 659 | | |
| | | 3/16 | 4.8 | 63 902 | 3 500 | 4 500 | | | | | | | | | |

Cuadro 6.7 (Continuación)
Tablas de características de las tuberías de acero

| DIAMETRO | | ESPESOR | | Carga de trabajo en metros de columna de agua para $f_s = 2550 \text{ Kg/cm}^2$, $f_c = 3333 \text{ Kg/cm}^2$, $F = 0.6 f_s = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ | | DIAMETRO | | ESPESOR | | Carga de trabajo en metros de columna de agua para $f_s = 2550 \text{ Kg/cm}^2$, $f_c = 3333 \text{ Kg/cm}^2$, $F = 0.6 f_s = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ | | | | |
|----------|-------|---------|------|---|-------|----------|-----------|---------|-----------|---|-----------|---------|------|-----|
| Pulg. | mm | Pulg. | mm | kg/cm | (a) | (b) | Pulg. | mm | Pulg. | mm | kg/cm | (c) | (d) | |
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) | (11) | (12) | (13) | (14) | |
| 40 | 1 016 | 3/16 | 4.8 | 129.472 | 119 | 18.0 | 60 | 1 524 | 1/2 | 12.7 | 501.085 | 211 | 333 | |
| | | 1/4 | 6.3 | 172.630 | 158 | 218 | | | 9/16 | 14.3 | 569.977 | 238 | 375 | |
| | | 5/16 | 7.9 | 215.787 | 198 | 311 | | | 5/8 | 15.9 | 632.481 | 263 | 417 | |
| | | 3/8 | 9.5 | 258.945 | 247 | 371 | | | 11/16 | 17.5 | 698.173 | 290 | 460 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 302.102 | 277 | 417 | | | 3/4 | 19.0 | 768.077 | 317 | 490 | |
| | | 1/2 | 12.7 | 345.259 | 317 | 500 | | | 1/4 | 6.3 | 284.898 | 101 | 158 | |
| | | 9/16 | 14.3 | 388.417 | 356 | 563 | | | | 5/16 | 7.9 | 330.378 | 126 | 198 |
| | | 5/8 | 15.9 | 431.575 | 396 | 626 | | | | 3/8 | 9.5 | 387.347 | 151 | 238 |
| 42 | 1 067 | 3/16 | 4.8 | 133.937 | 113 | 19.0 | 63 | 1 600 | | 7/16 | 11.1 | 464.315 | 175 | 278 |
| | | 1/4 | 6.3 | 178.583 | 151 | 236 | | | 1/2 | 12.7 | 529.796 | 201 | 318 | |
| | | 5/16 | 7.9 | 223.228 | 188 | 296 | | | 9/16 | 14.3 | 595.276 | 226 | 358 | |
| | | 3/8 | 9.5 | 267.874 | 226 | 356 | | | 5/8 | 15.9 | 662.244 | 252 | 398 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 312.520 | 263 | 416 | | | 11/16 | 17.5 | 729.213 | 277 | 438 | |
| | | 1/2 | 12.7 | 357.166 | 302 | 476 | | | 3/4 | 19.0 | 794.693 | 302 | 475 | |
| | | 9/16 | 14.3 | 401.811 | 339 | 536 | | | 1/4 | 6.3 | 278.291 | 96 | 150 | |
| | | 5/8 | 15.9 | 446.457 | 377 | 596 | | | | 5/10 | 7.9 | 348.236 | 120 | 189 |
| 45 | 1 143 | 3/16 | 4.8 | 141.378 | 107 | 168 | 66 | 1 676 | | 3/8 | 9.5 | 418.693 | 143 | 227 |
| | | 1/4 | 6.3 | 187.512 | 141 | 220 | | | | 7/16 | 11.1 | 486.038 | 168 | 265 |
| | | 5/16 | 7.9 | 235.134 | 175 | 276 | | | 1/2 | 12.7 | 556.583 | 191 | 303 | |
| | | 3/8 | 9.5 | 281.268 | 211 | 332 | | | 9/16 | 14.3 | 625.040 | 216 | 341 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 327.402 | 247 | 388 | | | 5/8 | 15.9 | 693.496 | 240 | 380 | |
| | | 1/2 | 12.7 | 375.024 | 281 | 444 | | | 11/16 | 17.5 | 763.441 | 264 | 418 | |
| | | 9/16 | 14.3 | 422.646 | 317 | 500 | | | 3/4 | 19.0 | 833.390 | 288 | 454 | |
| | | 5/8 | 15.9 | 468.780 | 352 | 556 | | | 13/16 | 20.6 | 903.331 | 312 | 492 | |
| 48 | 1 219 | 1/4 | 6.3 | 199.417 | 132 | 207 | 69 | 1 728 | 7/8 | 22.2 | 973.276 | 330 | 530 | |
| | | 5/10 | 7.9 | 248.528 | 164 | 259 | | | 15/16 | 23.8 | 1 043.221 | 360 | 568 | |
| | | 3/8 | 9.5 | 299.126 | 198 | 312 | | | 1 | 25.4 | 1 113.168 | 384 | 608 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 348.236 | 230 | 364 | | | 1/4 | 6.3 | 290.197 | 92 | 144 | |
| | | 1/2 | 12.7 | 398.835 | 264 | 417 | | | | 5/16 | 7.9 | 363.118 | 115 | 180 |
| | | 9/16 | 14.3 | 449.433 | 279 | 460 | | | | 3/8 | 9.5 | 434.551 | 139 | 217 |
| | | 5/8 | 15.9 | 498.544 | 300 | 522 | | | | 7/16 | 11.1 | 507.473 | 160 | 253 |
| | | 11/16 | 17.5 | 549.142 | 335 | 574 | | | 1/2 | 12.7 | 580.394 | 183 | 290 | |
| 3/4 | 19.0 | 598.252 | 390 | 623 | 9/16 | 14.3 | 653.315 | 207 | | 326 | | | | |
| 51 | 1 295 | 1/4 | 6.3 | 215.787 | 124 | 197 | 72 | 1 820 | | 5/8 | 15.9 | 726.237 | 230 | 363 |
| | | 5/16 | 7.9 | 267.850 | 155 | 244 | | | | 11/16 | 17.5 | 799.158 | 253 | 399 |
| | | 3/8 | 9.5 | 322.937 | 187 | 293 | | | 3/4 | 19.0 | 870.591 | 275 | 432 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 378.000 | 217 | 343 | | | 13/16 | 20.6 | 943.512 | 298 | 470 | |
| | | 1/2 | 12.7 | 431.575 | 248 | 392 | | | 7/8 | 22.2 | 1 014.945 | 321 | 607 | |
| | | 9/16 | 14.3 | 486.638 | 279 | 411 | | | 15/16 | 23.8 | 1 037.867 | 344 | 543 | |
| | | 5/8 | 15.9 | 540.213 | 311 | 491 | | | 1 | 25.4 | 1 107.788 | 368 | 580 | |
| | | 11/16 | 17.5 | 593.788 | 342 | 541 | | | 1/4 | 6.3 | 303.591 | 89 | 138 | |
| 3/4 | 19.0 | 647.363 | 373 | 587 | 5/10 | 7.9 | 379.488 | 110 | | 173 | | | | |
| 54 | 1 372 | 1/4 | 6.3 | 227.693 | 117 | 184 | 75 | 1 905 | | 3/8 | 9.5 | 455.386 | 132 | 209 |
| | | 5/16 | 7.9 | 284.244 | 147 | 220 | | | | 7/16 | 11.1 | 531.284 | 153 | 243 |
| | | 3/8 | 9.5 | 342.284 | 175 | 277 | | | 1/2 | 12.7 | 608.670 | 175 | 278 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 397.347 | 205 | 324 | | | 9/16 | 14.3 | 683.079 | 197 | 313 | |
| | | 1/2 | 12.7 | 455.386 | 235 | 370 | | | 5/8 | 15.9 | 758.977 | 220 | 348 | |
| | | 9/16 | 14.3 | 511.937 | 264 | 417 | | | 11/16 | 17.5 | 834.874 | 242 | 363 | |
| | | 5/8 | 15.9 | 568.488 | 293 | 463 | | | 3/4 | 19.0 | 910.772 | 264 | 415 | |
| | | 11/16 | 17.5 | 625.040 | 322 | 510 | | | 13/16 | 20.6 | 986.670 | 286 | 451 | |
| 3/4 | 19.0 | 683.079 | 352 | 554 | 7/8 | 22.2 | 1 064.058 | 308 | 485 | | | | | |
| 57 | 1 448 | 1/4 | 6.3 | 239.598 | 111 | 174 | 78 | 1 995 | 15/16 | 23.8 | 1 139.833 | 330 | 520 | |
| | | 5/10 | 7.9 | 300.614 | 139 | 218 | | | 1 | 25.4 | 1 217.939 | 352 | 565 | |
| | | 3/8 | 9.5 | 358.654 | 168 | 262 | | | 5/16 | 7.9 | 393.858 | 103 | 165 | |
| | | 7/16 | 11.1 | 419.669 | 194 | 300 | | | | 3/8 | 9.5 | 474.733 | 127 | 199 |
| | | 1/2 | 12.7 | 479.197 | 222 | 351 | | | | 7/16 | 11.1 | 553.607 | 147 | 233 |
| | | 9/16 | 14.3 | 538.725 | 250 | 395 | | | | 1/2 | 12.7 | 632.481 | 168 | 267 |
| | | 5/8 | 15.9 | 598.252 | 278 | 439 | | | 9/16 | 14.3 | 711.355 | 190 | 300 | |
| | | 11/16 | 17.5 | 657.780 | 305 | 483 | | | 5/8 | 15.9 | 790.229 | 211 | 334 | |
| 3/4 | 19.0 | 717.307 | 333 | 525 | 11/16 | 17.5 | 869.103 | 232 | 368 | | | | | |
| 60 | 1 524 | 1/4 | 6.3 | 252.992 | 106 | 165 | 3/4 | 19.0 | 947.977 | 233 | 399 | | | |
| | | 5/16 | 7.9 | 315.498 | 132 | 207 | 13/16 | 20.6 | 1 028.851 | 274 | 433 | | | |
| | | 3/8 | 9.5 | 379.488 | 158 | 249 | 7/8 | 22.2 | 1 107.213 | 295 | 466 | | | |
| | | 7/16 | 11.1 | 441.992 | 185 | 291 | 15/16 | 23.8 | 1 187.576 | 317 | 508 | | | |
| | | | | | | | 1 | 25.4 | 1 268.450 | 338 | 533 | | | |

Cuadro 6.7 (Continuación)
Tablas de características de las tuberías de acero

| DIAMETRO | | ESPESOR | | PESO Kg/m | Cargas de trabajo en metros de columna de agua para $f_s = 2530 \text{ Kg/cm}^2$ $f_t = 3333 \text{ Kg/cm}^2$ $T = 0.6 f_s = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ | | DIAMETRO | | PESO Kg/m | Cargas de trabajo en metros de columna de agua para $f_s = 2530 \text{ Kg/cm}^2$ $f_t = 3333 \text{ Kg/cm}^2$ $T = 0.6 f_s = 2000 \text{ Kg/cm}^2$ | | | | | |
|----------|-------|-----------|------|--------------|---|------|----------|-------|--------------|---|-----------|------|---------|-----|-----|
| Pulg. | mm | Pulg. | mm | | (1) | (2) | Pulg. | mm | | (3) | (4) | (5) | (6) | | |
| 78 | 1 081 | 5/16 | 7.9 | 410.740 | 101 | 139 | 87 | 2 210 | 11/16 | 17.5 | 1 016.434 | 200 | 317 | | |
| | | 3/8 | 9.5 | 484.079 | 121 | 162 | | | 3/4 | 19.0 | 1 103.701 | 218 | 344 | | |
| | | 7/16 | 11.1 | 575.929 | 142 | 234 | | | 13/16 | 20.6 | 1 200.969 | 230 | 373 | | |
| | | 1/2 | 12.7 | 657.760 | 162 | 256 | | | 7/8 | 22.2 | 1 293.237 | 254 | 402 | | |
| | | 9/16 | 14.3 | 739.630 | 182 | 289 | | | 15/16 | 23.8 | 1 385.505 | 272 | 431 | | |
| | | 5/8 | 15.9 | 821.481 | 202 | 321 | | | 1 | 25.4 | 1 479.261 | 290 | 460 | | |
| | | 11/16 | 17.5 | 903.331 | 223 | 353 | | | 90 | 2 286 | 5/16 | 7.9 | 470.268 | 88 | 138 |
| | | 3/4 | 19.0 | 986.870 | 243 | 384 | | | | | 3/8 | 9.5 | 564.024 | 103 | 166 |
| | | 13/16 | 20.6 | 1 068.520 | 263 | 416 | | | | | 7/16 | 11.1 | 654.804 | 123 | 194 |
| | | 7/8 | 22.2 | 1 151.659 | 284 | 448 | | | | | 1/2 | 12.7 | 750.048 | 141 | 222 |
| 15/16 | 23.8 | 1 235.198 | 304 | 480 | 9/16 | 14.3 | 843.804 | 158 | | | 250 | | | | |
| 1 | 25.4 | 1 317.048 | 324 | 513 | 5/8 | 15.9 | 937.560 | 176 | | | 278 | | | | |
| 81 | 2 057 | 5/16 | 7.9 | 430.057 | 98 | 154 | 11/16 | 17.5 | | | 1 031.316 | 194 | 306 | | |
| | | 3/8 | 9.5 | 516.402 | 117 | 185 | 3/4 | 19.0 | | | 1 125.072 | 211 | 332 | | |
| | | 7/16 | 11.1 | 602.717 | 137 | 216 | 13/16 | 20.6 | | | 1 218.829 | 229 | 360 | | |
| | | 1/2 | 12.7 | 689.032 | 156 | 247 | 7/8 | 22.2 | | | 1 312.583 | 247 | 388 | | |
| | | 9/16 | 14.3 | 775.347 | 176 | 278 | 15/16 | 23.8 | 1 406.339 | 264 | 417 | | | | |
| | | 5/8 | 15.9 | 861.662 | 196 | 309 | 1 | 25.4 | 1 500.095 | 282 | 445 | | | | |
| | | 11/16 | 17.5 | 947.977 | 215 | 340 | 93 | 2 362 | 5/16 | 7.9 | 469.862 | 84 | 134 | | |
| | | 3/4 | 19.0 | 1 034.292 | 234 | 370 | | | 3/8 | 9.5 | 560.894 | 102 | 161 | | |
| | | 13/16 | 20.6 | 1 120.607 | 254 | 400 | | | 7/16 | 11.1 | 677.126 | 119 | 188 | | |
| | | 7/8 | 22.2 | 1 206.922 | 273 | 432 | | | 1/2 | 12.7 | 773.659 | 136 | 215 | | |
| 15/16 | 23.8 | 1 293.237 | 293 | 463 | 9/16 | 14.3 | | | 870.591 | 153 | 242 | | | | |
| 1 | 25.4 | 1 379.054 | 312 | 494 | 5/8 | 15.9 | | | 967.323 | 170 | 269 | | | | |
| 84 | 2 134 | 5/16 | 7.9 | 446.457 | 84 | 138 | | | 11/16 | 17.5 | 1 064.056 | 187 | 290 | | |
| | | 3/8 | 9.5 | 535.748 | 113 | 178 | | | 3/4 | 19.0 | 1 160.788 | 204 | 322 | | |
| | | 7/16 | 11.1 | 625.040 | 132 | 209 | | | 13/16 | 20.6 | 1 257.520 | 222 | 349 | | |
| | | 1/2 | 12.7 | 714.331 | 150 | 238 | | | 7/8 | 22.2 | 1 354.253 | 239 | 376 | | |
| | | 9/16 | 14.3 | 803.623 | 169 | 268 | 15/16 | 23.8 | 1 450.985 | 256 | 403 | | | | |
| | | 5/8 | 15.9 | 892.914 | 188 | 298 | 1 | 25.4 | 1 547.718 | 273 | 430 | | | | |
| | | 11/16 | 17.5 | 982.205 | 207 | 328 | 96 | 2 438 | 5/16 | 7.9 | 497.055 | 81 | 130 | | |
| | | 3/4 | 19.0 | 1 071.497 | 225 | 356 | | | 3/8 | 9.5 | 598.252 | 98 | 156 | | |
| | | 13/16 | 20.6 | 1 160.788 | 244 | 386 | | | 7/16 | 11.1 | 696.473 | 114 | 182 | | |
| | | 7/8 | 22.2 | 1 250.090 | 263 | 416 | | | 1/2 | 12.7 | 797.670 | 131 | 208 | | |
| 15/16 | 23.8 | 1 339.371 | 281 | 445 | 9/16 | 14.3 | | | 898.867 | 147 | 235 | | | | |
| 1 | 25.4 | 1 428.652 | 300 | 476 | 5/8 | 15.9 | | | 997.037 | 164 | 261 | | | | |
| 87 | 2 210 | 5/16 | 7.9 | 462.827 | 91 | 143 | | | 11/16 | 17.5 | 1 098.244 | 180 | 287 | | |
| | | 3/8 | 9.5 | 555.095 | 109 | 172 | | | 3/4 | 19.0 | 1 196.505 | 197 | 312 | | |
| | | 7/16 | 11.1 | 647.363 | 127 | 200 | | | 13/16 | 20.6 | 1 296.213 | 213 | 338 | | |
| | | 1/2 | 12.7 | 739.630 | 145 | 230 | | | 7/8 | 22.2 | 1 395.922 | 230 | 364 | | |
| | | 9/16 | 14.3 | 831.898 | 163 | 259 | 15/16 | 23.8 | 1 495.631 | 248 | 391 | | | | |
| | | 5/8 | 15.9 | 924.166 | 181 | 288 | 1 | 25.4 | 1 595.340 | 263 | 417 | | | | |

En conducciones y redes de distribución de pequeñas localidades, principalmente rurales, se han utilizado en algunos casos tuberías de acero galvanizado. Estos conductos se fabrican en diámetros de 10, 13, 19, 25, 32, 38, 50, 64, 76 y 102 mm con longitud del tubo de 6.40 m.

Tuberías de concreto.

Las tuberías de concreto que se han usado con más frecuencia en las obras de conducción son:

- a) Tuberías de concreto reforzado con junta de hule y concreto (SP-16).
- b) Tuberías de concreto presforzado (SP12).
- c) Tuberías de concreto pretensado (Comecop).
- d) Tubos de concreto presforzado sin cilindro de acero.
- e) Tubos de concreto presforzado con cilindro de acero.

A continuación se describen sus características más importantes.

- a) Las tuberías de concreto reforzado con junta de hule y concreto están reforzadas con dos jaulas entrelazadas de varilla, calculadas para resistir la presión de trabajo a una fatiga máxima de 880 kg/cm², para el acero circunferencial; el esfuerzo longitudinal será el equivalente a varilla de 12.7 mm con un espaciamiento máximo de 76 cm centro a centro. La junta es de concreto moldeado y de sección tal, que los tubos se centran por sí solos; la junta queda sellada con empaque de hule. Se fabrican para presiones de trabajo de 1.8, 2.5, 3.2, 4.0 y 5 kg/cm². En campo se prueban a no más del 110% de la presión teórica de trabajo. Los tubos tienen una longitud efectiva de 2.33 m; su diámetro es de 76, 91, 107, 122, 137 y 138 cm, generalmente.

- b) Por su parte, las tuberías de concreto presforzado (SP-12) son conductos de concreto presforzado con cilindro de acero empotrado y junta de hule y acero. Su refuerzo consiste en un cilindro de acero empotrado en concreto y comprimido por alambón tipo tensilac de calibre 6 protegido por una capa de mortero. Se fabrican para presiones de trabajo de 6, 7.0, 8.0 y 10.0 kg/cm². Los diámetros son los mismos de las tuberías de SP-16.

- c) Las tuberías de concreto pretensado (Comecop) se fabrican por centrifugación y el pretensado longitudinal se obtiene mediante alambres de acero de alta resistencia, estirados entre las extremidades del molde. Se fabrican para diámetros de 100 a 500 cm y presión de servicio de 16.5, 15.5, 14.5, 10 y 6.5 kg/cm² de la serie normal.

- d) Los tubos de concreto presforzado sin cilindro de acero están formados por un tubo de acero primario o núcleo (que contiene el alambre de pretensado longitudinal) el cual una vez que ha alcanzado suficiente resistencia a la compresión, se le enrolla el alambre pretensado transversal y finalmente, se protege con un revestimiento de mortero de cemento o de concreto. La longitud de los tubos varía de 4.0 a 8.0 metros. El diámetro interno es de: 400, 500, 600, 750, 900, 1000, 1050, 1100, 1200, 1350, 1400, 1500, 1800, 2000, 2100, 2500, 3000, 3500, 4000 y 4500 y 5000 mm. Los tubos tienen juntas del tipo de espiga y campana, hechas de concreto y con un sello de hule. Los tubos de concreto presforzado sin cilindro de acero no deberán presentar fugas ni filtraciones al someterse a una presión hidrostática en fábrica igual al 150% de la presión de diseño. La presión de trabajo se estipula en los catálogos de los fabricantes.

- e) Finalmente, los tubos de concreto presforzado con cilindro de acero, están constituidos de un cilindro de lámina de acero con anillos soldados a éste en sus

extremos, el cual previamente se somete a presión hidrostática y se ahoga en concreto, formándose así el tubo primario o núcleo. El tubo presforzado se obtiene cuando al tubo primario, una vez que ha alcanzado suficiente resistencia a la compresión, se le enrolla alambre pretensado transversal y se protege con un revestimiento de concreto o de mortero de cemento. La longitud de los tubos varía de 4.0 a 8.0 metros. Los

diámetros internos son los mismos indicados para los tubos sin cilindro de acero. Las juntas de los tubos deben ser del tipo de espiga y/o campana de anillos de acero soldados al cilindro y con un sello de hule. Las características generales de tuberías más empleadas se resumen en el cuadro 6.8.

Cuadro 6.8. Características generales de tuberías que se utilizan en obras de abastecimiento de agua potable.

| Tipo de tubería y normas | Diámetro nominal en mm. | Longitud del tubo m. | Clase de tubería y presión de trabajo | Presión de prueba en fábrica y en obra Kg./cm ² | Fabricantes |
|---|--|----------------------|--|---|--|
| ASBESTO CEMENTO | | | | | |
| DCM C-12-1960 | 50,60,75,100,150,200, 250,300,350,400,450, 500,600 y 750 | 4 y 5 | A-5, A-7, A-10 y A-14 que corresponden respectivamente a 5,7,10 y 14 Kg./cm ² | En fábrica, 3.5 veces la de trabajo. En obra 1.5 veces | Asbestos de México, S.A. Productos Mesalit, S.A. Asbestos Monterrey, S.A. |
| ACERO | | | | | |
| a) Liso soldado DCM B-184-1973 API, ASTM-120-53 | 114.3, 168.3, 219.1, 273, 323.8, 355.6, 406.4, 457.3, 508, 558.8, 609.6, 660.4, 711.2, 812.8, 863.6, 914.4, 1067 y 1219. | 4.88 a 7 | Grado B, X-42 y X-52 que corresponden a presiones de diseño de 1476, 1722 y 2193 Kg./cm ² , respectivamente | En fábrica de acuerdo con su espesor y diámetro según norma. En campo hasta 85% de la anterior. | Tubacero, S.A. Monterrey, N.L. |
| b) Sin costura DCM B-177-1973 API, ASTM-120 | 42.2 o un múltiplo de 42.72 terminada en caliente. Es laada en frío de 5 hasta el max. indicado en norma. | 5 o 7 7 o 12 | Grado B, X-42, X-46, X-52, X-56, X-60 y X-65. 1265, 1476, 1772, 1940, 2193, 2362, 2531 y 2742 (presión de diseño). | En fábrica de acuerdo con su espesor y diámetro. | Tubos de acero de México, S.A. (TAMSA). Veracruz, Ver. |
| c) Galvanizado DCM-810 Tipo A ASTM-120 | 63.5, 95.3, 127.19, 125.4, 118, 381, 508, 635, 762, 1016 | 6.4 | Cédula 40 | En fábrica a 100 Kg./cm ² mínima. En obra 2.0 veces la de trabajo. | Compañía Mexicana de Tubos, S.A. Acero Alfa Monterrey, S.A. |
| CONCRETO | | | | | |
| a) Tipo Comeced Presforzado (Piso Francés) | 750, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, (seve normal y reforzado) | 7 | 4.8, 8.10, 12, 14, 16, 18, 20 y 22. Kg./cm ² | Se prueba según exigencias prácticas. En obra 1.25 veces la presión de trabajo. | Compañía Mexicana de concreto presforzado, S.A. de C.V. (COMECOP). |
| b) Tipo Lock Joint 1- Risorzoso SP-1 y 16, ANWA-C302 | 406.4, 457.2, 508, 609.6, 660.4, 762, 863.6, 2, 914.4, 1066.8, 1219.2, 1371.6, 1524, 1676.4, 1828.8, 1981.2 | 4.88 | De 103 a 36.6 m.c.c.e | Se prueba en fábrica a 110 o 125 lb de trabajo. En obra, 110 lb de trabajo. | Ingeniería y Construcciones Hidráulicas, S.A. |
| 2- Ref. con cilindro SP-3, ANWA-C 300 | 2133.6, 2286, 2438, 2590.6, 2743.2, 2895.6, 3048, 3200.4, 3352.8, 3505.2, 3657.6 | | De 225 (diám 24"), 199 (27"), 176 (30") a 42" Kg./cm ² de la SP-23 | Con cilindro, 1406-1757 Kg./cm ² en fábrica. Sin cilindro, 1.5 veces la de trabajo. | |
| 3- Presforzado con ó sin cilindro SP-23, 28 y 31 SP-3 y 12, ANWA-C302 | | | | | |
| c) Tipo Roto Presforzada (Piso Australiano) | 835, 700, 900, 900, 1000, 1100, 1200, 1350, 1500 y 1800 | 5 | 5.8, 12, 15 y 18 para diám de 635 a 900, 6, 9, y 12, para diám de 1000 a 1800 | En fábrica 1.5 veces la de trabajo durante 3 min mínimo, para líneas de bombeo y 1.25 veces para líneas a gravedad. | Constructora General del Norte, S.A. Las Reyes, La Paz, Edo de Mex. |
| P.V.C. | | | | | |
| (Fabricada de verde) DCM-12-1968 | 25, 38, 50, 60, 75, 90, 100, 125, 150 y 200 | 6 | RD-26, RD-32, RD-41 y RD-64. II 2.9, 7 y 4.5 Kg./cm ² | En fábrica presión mínima de abastecimiento, 3 veces la de trabajo. En obra 1.5 veces la de trabajo. | COTSA Plásticos de México, S.A. Tubos Ilustres, S.A. Plásticos Omega, S.A. Plásticos y Coneslanco, S.A. Asbestos de México, S.A. Masón de Occidente, S.A. Plásticos Res, S.A. |

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES PARA LA SELECCION DE TUBERIA.

El diseño de tuberías requiere un análisis para cada caso particular en el que se evalúen las cargas externas y presión interna, así como verificar que se cumplan las especificaciones correspondientes. Entre los diversos materiales existentes se eligirá el que más se adapte a las especificaciones, lo cual requiere un análisis económico. Sin embargo, de acuerdo a la experiencia en México pueden anotarse las siguientes observaciones generales:

1. Las tuberías que más se han empleado en México para conducciones y redes de distribución de localidades urbanas y rurales, son las de asbesto cemento en todos los diámetros comerciales y, en menor cantidad, las de plástico PVC en diámetros hasta de 150 mm.
2. Para la conducción y distribución de gastos pequeños y cuando el diámetro sea igual o menor de 150 mm, son recomendables las tuberías de policloruro de vinilo (PVC).
3. Cuando se requieren diámetros superiores a 150 mm, para presiones menores de 14 kg/cm, son recomendables las tuberías de asbesto cemento.
4. Cuando en líneas de conducción se requieren diámetros superiores a 600 mm y presiones mayores de 10 kg/cm², el proyectista debe elegir entre tuberías de asbesto- cemento, concreto presforzado y acero.
5. Para conducciones con presiones de trabajo superiores a 14 kg/cm² se hará el estudio económico entre tuberías de acero y concreto presforzado.
6. Para tomas domiciliarias se recomiendan tuberías de polietileno de alta densidad y, para el cuadro, tubo de acero galvanizado en diámetros de 13 y 19 mm.

Los factores principales que los proyectistas deben tener en cuenta para la selección de

tuberías son:

- a) Calidad y cantidad de agua por conducir.
- b) Características topográficas de la conducción y calidad del terreno por excavar.
- c) Costos de suministro e instalación.

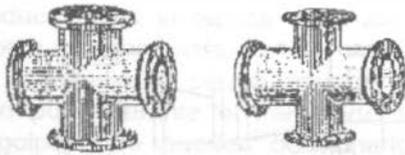
6.2 PIEZAS ESPECIALES Y DISPOSITIVOS DE CONTROL Y PROTECCION DE BOMBAS Y TUBERIAS.

Las tuberías de conducción están compuestas: (1) por tramos rectos y curvos para ajustarse a los accidentes topográficos (2) por cambios que se presentan en la geometría de la sección, y (3) por distintos dispositivos para el control del flujo en la tubería o para asegurar que el funcionamiento de la línea de conducción sea eficiente.

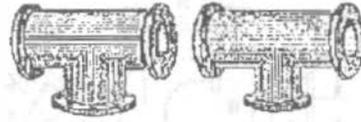
Piezas Especiales

Las conexiones de la tubería en las intersecciones, cambios de dirección, variación de diámetros, accesos a válvulas, etc., se denominan comúnmente como "piezas especiales" y pueden ser de fierro fundido, fibro-cemento o PVC, dependiendo de qué material sean los tubos.

Las piezas especiales de fierro fundido son las más empleadas y se fabrican para todos los diámetros de tuberías. Estas piezas se conectan entre sí o a las válvulas por medio de bridas y tornillos y con un empaque de sellamiento intermedio, que puede ser de plomo, hule o plástico. La unión de estas piezas con las tuberías de fibro-cemento, se efectúa utilizando la "junta gibault", que se muestra en la Figura 6.1, y que permite conectar por una de sus bocas una "extremidad" de fierro fundido y por la otra una punta de tubería de fibro cemento. El sellamiento se logra mediante la presión ejercida con las bridas y tornillos sobre el barrilete y empaques de hule.



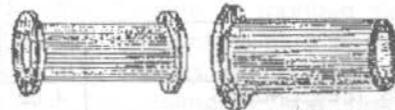
CRUCES



TEES

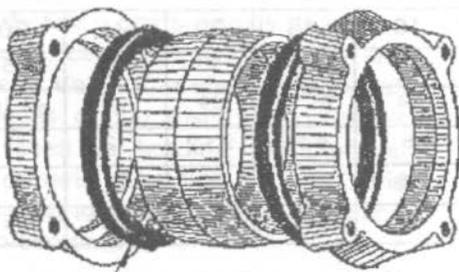


CODOS



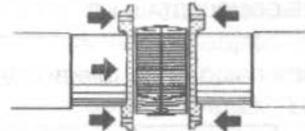
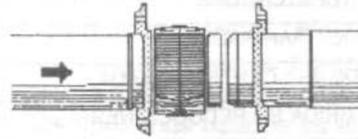
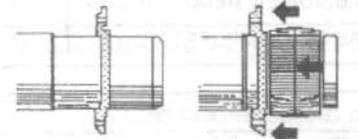
CARRETE

EXTREMIDAD

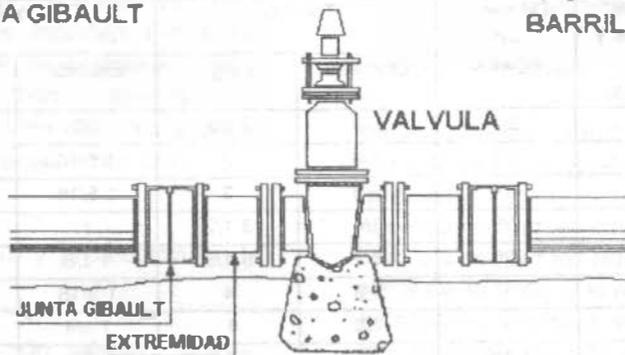


EMPAQUE DE HULE

JUNTA GIBAULT



BARRILETE



VALVULA

JUNTA GIBAULT

EXTREMIDAD

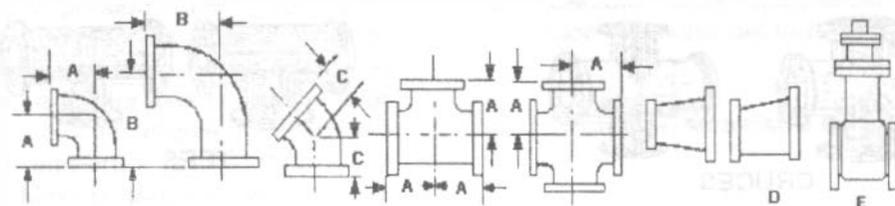
Figura 6.1. Piezas especiales de fierro fundido.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

La forma cóncava del barrilete permite efectuar deflexiones; su diámetro interior debe ser 2 mm más grande que el de las tuberías, en medidas hasta de 200 mm (8") y de 6 a 10 mm en las

tuberías mayores.

Las dimensiones de piezas especiales con brida de fierro fundido se ilustran en la Figura 6.2.



| | | 2 | 2 1/2 | 3 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|---|------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| A | CODOS, TEES, CRUCES | 4 1/2 | 5 | 5 1/2 | 6 1/2 | 8 | 9 | 11 | 12 |
| B | CODOS DE GRAN RADIO | 6 1/2 | 7 | 7 3/4 | 9 | 11 1/2 | 14 | 16 1/2 | 19 |
| C | CODOS DE 45° CENTRO A BRIDA | 2 1/2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 1/2 | 6 1/2 | 7 1/2 |
| D | BRIDA A BRIDA EN REDUCCIONES | 5 | 5 1/2 | 6 | 7 | 9 | 11 | 12 | 14 |
| E | VALVULAS DE COMPUERTA B a B | 7 | 7 1/2 | 8 | 9 | 10 1/2 | 11 1/2 | 13 | 14 |

| | | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 30 | 36 |
|---|------------------------------|--------|----|--------|-------|--------|--------|----|
| A | CODOS, TEES, CRUCES | 14 | 15 | 16 1/2 | 18 | 22 | 25 | 28 |
| B | CODOS DE GRAN RADIO | 21 1/2 | 24 | 26 1/2 | 29 | 34 | 41 1/2 | 49 |
| C | CODOS DE 45° CENTRO A BRIDA | 7 1/2 | 8 | 8 1/2 | 9 1/2 | 12 | 15 | 18 |
| D | BRIDA A BRIDA EN REDUCCIONES | 16 | 18 | 19 | 20 | 24 | 30 | 36 |
| E | VALVULAS DE COMPUERTA B a B | 11 1/2 | 12 | 12 1/2 | 13 | 13 1/2 | 15 | 16 |

Número y dimensiones de taladros y tornillos para piezas especiales según plantilla A.S.A.

| Diámetro interior | | No. de agujeros y de tornillos | Diámetro del agujero | Tornillos | | Dimensiones de la brida | | |
|-------------------|-----|--------------------------------|----------------------|-----------|-------|-------------------------|----------|---------------|
| puig | mm | | | Diámetro | Largo | Espesor | Diámetro | φ en agujeros |
| 2 1/2 | 64 | 4 | 3/4 | 5/8 | 2 1/2 | 7/8 | 7 | 5 1/2 |
| 3 | 76 | 4 | 3/4 | 5/8 | 3 | 1 5/16 | 7 1/2 | 6* |
| 4 | 102 | 8 | 3/4 | 5/8 | 3 | 1 5/16 | 9 | 7 1/2 |
| 6 | 152 | 8 | 7/8 | 3/4 | 3 1/2 | 1 | 11 | 9 1/2 |
| 8 | 203 | 8 | 7/8 | 3/4 | 3 1/2 | 1 1/8 | 13 1/2 | 11 3/4 |
| 10 | 203 | 8 | 1 | 7/8 | 4 | 1 3/16 | 13 | 14 1/4 |
| 12 | 305 | 12 | 1 | 7/8 | 4 | 1 1/4 | 19 | 17 |
| 14 | 356 | 12 | 1 1/8 | 1 | 4 1/2 | 1 3/8 | 21 | 18 3/4 |
| 16 | 406 | 16 | 1 1/8 | 1 | 4 1/2 | 1 7/16 | 23 1/2 | 21 1/4 |
| 18 | 457 | 16 | 1 1/4 | 1 1/8 | 5 | 1 9/16 | 25 | 22 3/4 |
| 20 | 508 | 20 | 1 1/4 | 1 1/8 | 5 | 1 11/16 | 27 | 25 |
| 24 | 610 | 20 | 1 3/8 | 1 1/4 | 5 1/2 | 1 7/8 | 32 | 29 1/2 |

Figura 6.2. Dimensiones de piezas especiales con brida de fierro fundido.

Las piezas especiales de fibro-cemento se fabrican con segmentos de tubería de ese material, clases A-5 y A-7 pegados con Epoxy, una resina con gran adherencia, pero cuya resistencia a los golpes es reducida. Por esta razón la producción en la fábrica se limita a conexiones para tuberías hasta de 150 mm (6") de diámetro; el manejo de piezas mayores es muy riesgoso pues durante el transporte se exponen a golpes que pueden ocasionarles serios daños.

Para uniones en tuberías hasta de 150 mm (6") de diámetro y contando con operarios cuidadosos, estas piezas son de gran utilidad dada su ligereza y diseño que evita las uniones bridadas y por su bajo costo. Figura 6.3.

Por otra parte para interconectar la tubería hidráulica de PVC y formar líneas de conducción y circuitos, existen todas las conexiones necesarias: ya sea para cambiar la dirección del flujo del agua, derivar o unir sistemas de igual o diferente diámetro, cerrar los extremos de una línea, unir tubería de PVC a válvulas o piezas metálicas bridadas o con rosca, y componer fallas en una línea ya tendida. También es posible unir la tubería hidráulica de PVC, serie métrica, con la serie inglesa e incluso unirla con tubería de fibro-cemento.

En el caso de la serie métrica todas las conexiones de 50 a 315 mm son de PVC. Para diámetros mayores no se fabrican todas las conexiones de PVC; por ello es necesario utilizar piezas especiales de fierro fundido en combinación con extremidades de PVC, o juntas mecánicas diseñadas especialmente para tubería de PVC.

- Dispositivos de control y protección en la línea de conducción.

En las líneas de conducción siempre es necesario el empleo de ciertos elementos cuyo objeto es, el de algunos, proteger a las tuberías y, si lo hay, al equipo de bombeo en general, principalmente del fenómeno llamado golpe de ariete; otros elementos controlan la descarga de la línea de conducción.

A continuación se comentará la función de los elementos de control y protección que se usan con más frecuencia, para lo cual se considera como vía de ejemplo la Figura 6.4 que muestra una instalación de 3 bombas conectadas para operar en paralelo, a una línea de conducción.

Junta flexible.

Son recomendables para absorber algunos movimientos ocasionados por el trabajo de la bomba, así como pequeños desalineamientos producidos durante el montaje del conjunto; también se aprovechan para desconectar con facilidad la unidad de bombeo cuando se requiera. Generalmente son empleadas las juntas Dresser y Gibault o algún otro elemento similar. Se indica con el número 2 en la Figura 6.4.

Válvulas eliminadoras de aire.

Algunas se instalan con el objeto de expulsar el aire retenido en la succión cuando la bomba no trabaja. Esta expulsión se efectúa luego de iniciarse la operación de la bomba; se ubican generalmente a continuación de la junta flexible. Uno de los tipos más usados es el que muestra la Figura 6.5 (1) al cual puede acoplarse una válvula Check con el objeto de amortiguar el golpe del agua para prolongar su vida útil y evitar ruidos desagradables. La instalación de esta Check es sumamente recomendable.

También se instalan válvulas eliminadoras de aire a lo largo de la línea de conducción, pues el aire en las tuberías supone una condición altamente perjudicial y potencialmente peligrosa cualquiera que sea el material que constituya el tubo. Al acumularse en el interior de una conducción, tiende a ocupar los puntos topográficos altos del perfil de la línea y si no se extrae, produce una estrangulación de la sección que puede llegar a interrumpir el flujo de agua. El mayor peligro, sin embargo, está en la posible compresión de este aire y su expulsión súbita así como en una interrupción repentina del flujo que puede multiplicar enormemente la presión de la bolsa de aire acumulado en la tubería traduciéndose en una verdadera explosión con proyección de fragmentos.

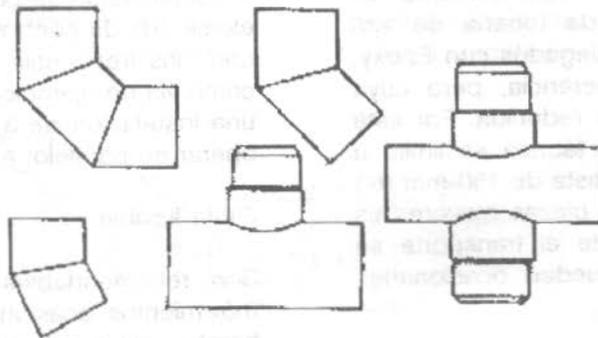


Figura 6.3. Piezas especiales de fibro-cemento.

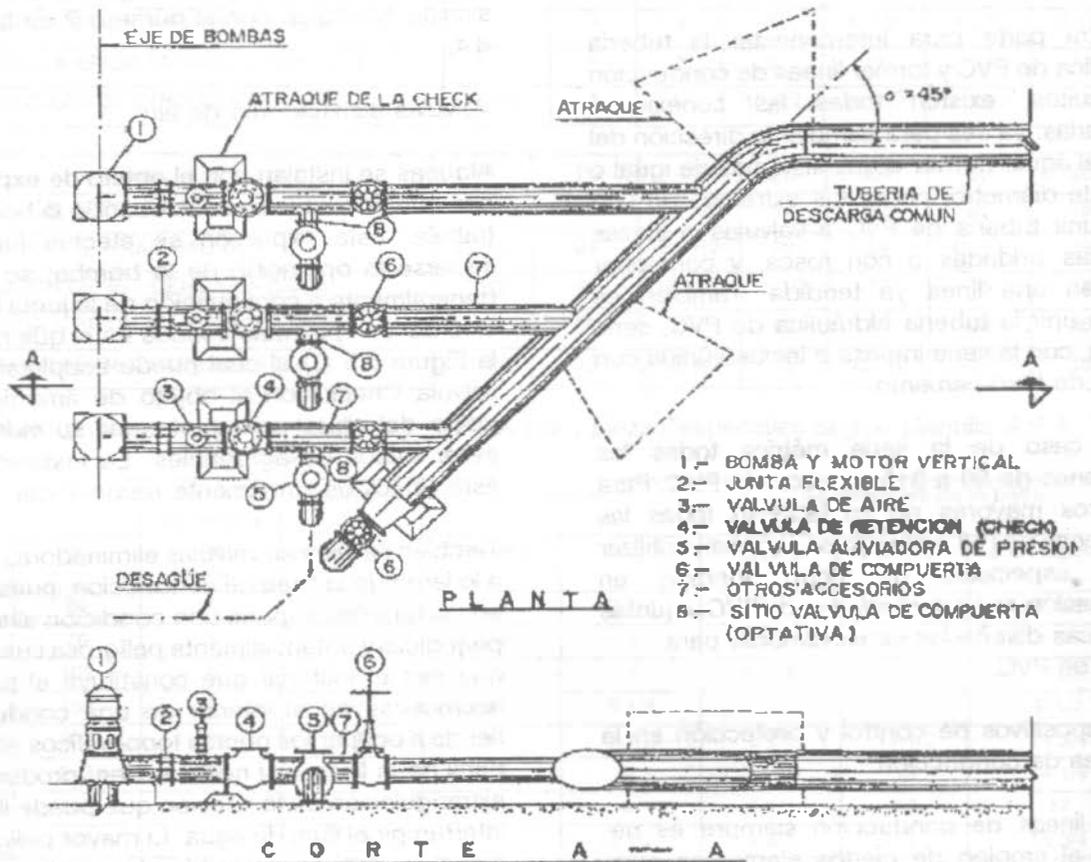
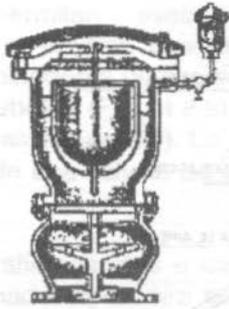
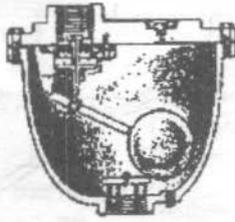


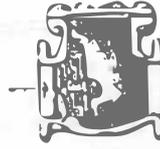
Figura 6.4. Conexión de tres bombas para trabajar en paralelo, mostrando los elementos de control y protección.



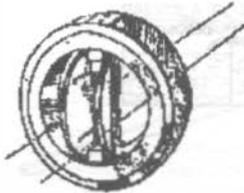
(1) DE AIRE



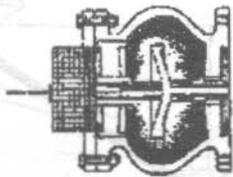
(2) DE AIRE



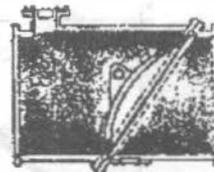
(3) CHECK



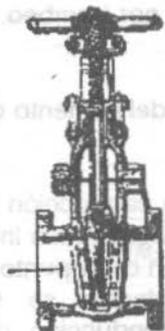
(4) DUO - CHECK



(5) CHECK SILENCIOSA



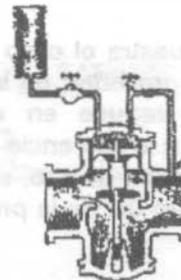
(6) ROTO CHECK



(7) COMPUERTA



(8) MARIPOSA



(9) ALMO

Figura 6.5. Válvulas.

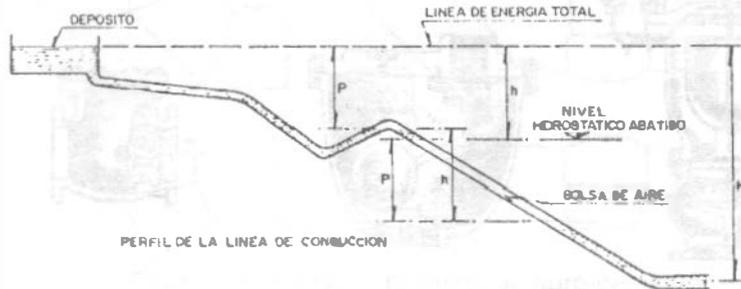


Figura 6.6. Efectos del aire dentro de una línea de conducción por gravedad.

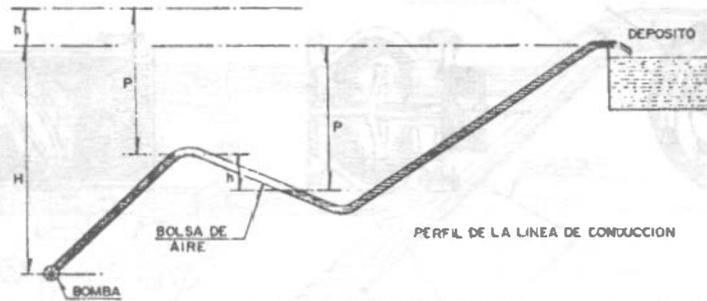


Figura 6.7. Efectos del aire dentro de una línea de conducción por bombeo.

La Figura 6.6 muestra el caso de una línea de conducción por gravedad en la cual la presión utilizable H se reduce en una cantidad h correspondiente a la diferencia de nivel entre los extremos de la bolsa de aire, en consecuencia, se reduce el gasto útil de la producción.

En la Figura 6.7 se muestra el caso en que la conducción es por bombeo. La bolsa de aire provoca un aumento de presión p en las bombas, por lo que para conducir el mismo gasto el consumo de energía se incrementa en

la misma proporción del aumento de presión en la bomba.

Cuando una línea de conducción no está llena de agua, es decir "purgada", los inconvenientes descritos se repiten en cada punto alto del perfil de la línea; sus efectos se suman y el rendimiento de la conducción disminuye en forma progresiva. Algunas veces esta disminución se atribuye equivocadamente a las bombas, siendo que con sólo purgar la línea en forma correcta, ésta recuperará su capacidad normal de escurrimiento.

Por las razones expuestas anteriormente, todos los puntos altos deben estar provistos de válvulas que permitan evacuar el aire automáticamente a medida que se acumula; estas válvulas eliminadoras de aire se instalarán después de las subidas (Figura 6.8) y antes de las bajadas bruscas (Figura 6.9). La Figura 6.10 muestra el corte de una válvula de este tipo.

Cuando la topografía sea más o menos plana, las válvulas eliminadoras de aire se ubican en puntos situados a cada 1.5 km como máximo y en los puntos más altos del perfil de la línea.

El diámetro de la "válvula de expulsión de aire", como también se les llama, se puede seleccionar de acuerdo al diámetro de la tubería y gasto que conducirá la línea, por medio de las reglas empíricas del cuadro 6.9.

En las Figuras 6.8 y 6.9 se observa que en los puntos bajos de la línea se coloca una pieza especial que permite el vaciado de la tubería, eliminándose al mismo tiempo los sedimentos que se acumulan en esos sitios cuando el agua no está en movimiento y que pueden llegar a obstruir el flujo. (Ver "Desagües", en este capítulo).

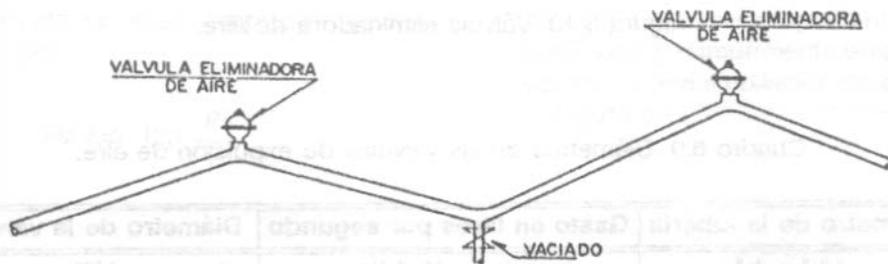


Figura 6.8. Ubicación de válvulas eliminadoras de aire en una línea de conducción.

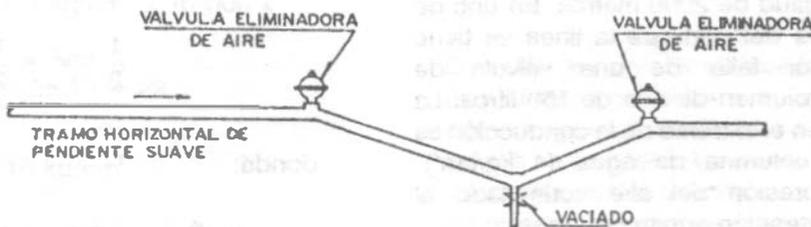


Figura 6.9. Colocación de válvulas eliminadoras de aire después de un tramo horizontal.

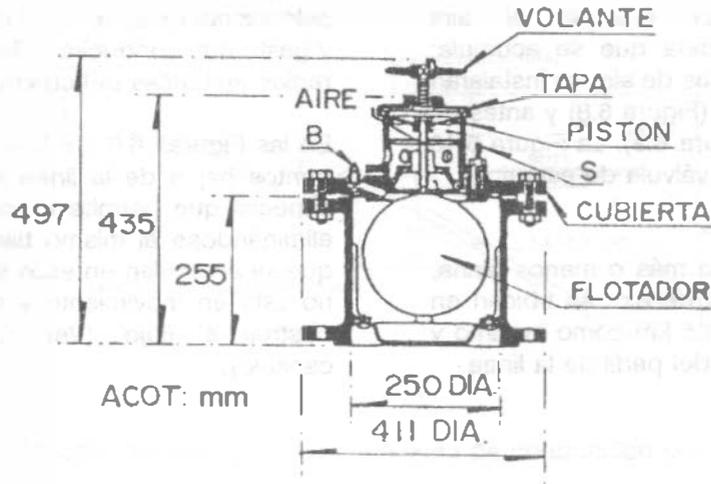


Figura 6.10. Válvula eliminadora de aire.

Cuadro 6.9. Diámetros de las válvulas de expulsión de aire.

| Diámetro de la tubería | Gasto en litros por segundo | Diámetro de la válvula |
|------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1/2" a 4" | 0 a 12.6 l/s | 1/2" |
| 6" a 10" | 12.7 a 50.4 l/s | 1" |
| 12" a 18" | 50.5 a 201.6 l/s | 2" |
| 20" a 24" | 201.7 a 472.5 l/s | 3" |
| 26" a 30" | 472.6 a 819.0 l/s | 6" a 8" |

Ejemplo 6.1

Suponga una tubería de 500 mm (20" de diámetro y longitud de 2000 metros. En uno de los puntos altos del perfil de la línea se tiene acumulado, por falta de una válvula de expulsión, un volumen de aire de 150 litros. La carga estática en el extremo de la conducción es de 40 m de columna de agua (4 kg/cm²). Calcúlese la presión del aire acumulado al llegarse a la detención súbita del agua.

Solución:

Partiendo de la presión estática de 4 kg/cm² y suponiendo que el agua es puesta en

movimiento con una velocidad de 1 m/s, se tendría una energía cinética equivalente a:

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2$$

donde:

$$W = \frac{\pi d^2}{4} \gamma L = \frac{3.14 \times 0.5^2}{4} \times 1 \times 2000$$

$$W = 392.5 \text{ ton}$$

Por tanto, la energía cinética es

$$\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2 = \frac{392500 \text{ kg}}{2 \times 9.81} \times 1^2 \approx 20000 \text{ kg} \cdot \text{m}$$

Al interrumpir el aire el flujo del agua, es comprimido hasta absorber la fuerza viva del agua en movimiento, de manera que si inicialmente se tenía un volumen de aire V a una presión P , ahora se tendrá un volumen V' a una presión P' . Esto se representa con la ley de Mariotte por la siguiente igualdad

$$PV = P'V'$$

El trabajo ejercido en esta compresión puede representarse por:

$$PV \log. \text{ hip. } \frac{P'}{P}$$

y operando con logaritmos ordinarios queda:

$$2.3 \times PV \log \frac{P'}{P}$$

Sustituyendo e igualando a la energía cinética calculada:

$$20\,000 \text{ kg} \cdot \text{m} = 2.3 \times 4 \text{ kg/cm}^2 \times 10\,000 \times$$

$$\times 0.15 \text{ m}^3 \times \log \frac{P'}{P} \approx 28.13 \approx 29$$

$$\text{Así } P' = 4 \times 29 = 116 \text{ kg/cm}^2$$

Al llegarse pues a la detención súbita del agua, la presión del aire acumulado llegará a 116 kg/cm^2 , presión elástica peligrosísima que se traduciría en una verdadera explosión con proyección de fragmentos.

Válvulas de Retención.

Volviendo a la Figura 6.4, que se ha tomado como vía de ejemplo para la explicación de los dispositivos de control y protección, después de la válvula de expulsión de aire, indicada con el número 3 en la misma figura, se ha dibujado una válvula de retención (indicada con el número 4). Estas válvulas se usan con el objeto de retener la masa de agua que se encuentra en la tubería, cuando la bomba suspende su operación y con el fin de evitar esfuerzos excesivos en las bombas debido al fenómeno del golpe de ariete. Esto NO quiere decir que estas válvulas eliminen el efecto de ese fenómeno, sino que únicamente lo atenúan.

Existen varios tipos en el mercado, y algunos de ellos se pueden observar en la Figura 6.5, (3), (4) y (5). La primera representa la válvula Check tradicional y comúnmente empleada llamada de columpio; una ampliación de ésta se muestra en la Figura 6.11.

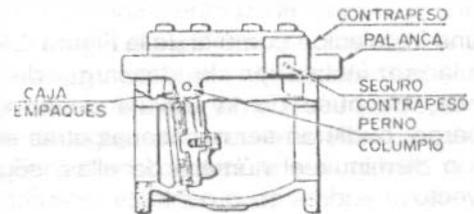


Figura 6.11. Válvula check o de retención.

La segunda (Figura 6.5 (4)) se denomina Duo-Check y consta esencialmente de dos medias lunas conectadas a un eje vertical, que se abren según el sentido del escurrimiento. Esta válvula en comparación con la tradicional es más liviana, de menor tamaño y, consecuentemente, de menor costo; sin embargo, las pérdidas de carga son mayores que en la tradicional. La tercera (Figura 6.5 (5)) tiene la característica de efectuar un cierre más o menos lento, con lo cual se consigue prolongar la vida de la válvula y casi eliminar el ruido que producen los otros tipos; suele llamársele Check Silenciosa.

La selección del tipo de Check para una determinada instalación dependerá del diámetro de la válvula a emplear, de las presiones a que operará y de su costo en el mercado. En varios proyectos, el tiempo de entrega que ofrecen sus fabricantes puede ser determinante para el tipo elegido.

La Figura 6.5 (6) muestra la sección según el eje longitudinal de la tubería, de la válvula llamada Roto-Check, cuya operación es semejante a la de columpio. Por su diseño y procedimiento de construcción (se fabrica por mitades y se une con pernos) compite en costo con la válvula Check tradicional y es especial para cuando se requieran diámetros grandes. Tiene la ventaja de efectuar un cierre lento y hermético.

Válvulas de Compuerta.

La válvula de compuerta se emplea con el objeto de aislar en un momento dado algún elemento o sección del sistema para poder efectuar una reparación, inspección o dar mantenimiento, sin que se interrumpa totalmente el servicio.

En una instalación como la de la Figura 6.4, esta válvula se instala en la descarga de cada bomba, después de la válvula de alivio; sin embargo, pudieran ser necesarias otras en otro sitio o disminuir el número de ellas, según el proyecto.

La válvula de compuerta señalada con el número (6) de la Figura 6.4, ubicada en el extremo inicial de la línea de conducción, se instala con el fin de vaciar la tubería de tiempo en tiempo, lo que permite efectuarle una especie de lavado, ya que así se extraen las arenas y lodos que se depositan a lo largo de ella, según se ha podido observar. El diámetro de la válvula de compuerta para estos fines es la mitad del de la tubería de conducción.

El tipo de válvula de compuerta más empleado es el que muestra la Figura 6.5 (7); se caracteriza por ser bridada y con vástago saliente, es decir que éste se desplaza según su eje vertical. Esto tiene la ventaja de que el operador se puede cerciorar con facilidad cuando la válvula

está abierta o cerrada. Una ampliación de la Figura 6.5 (7) se presenta en la Figura 6.12.

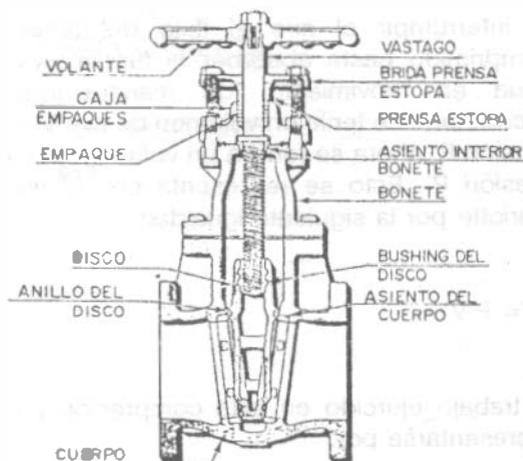


Figura 6.12. Válvula de compuerta.

Es muy importante señalar que la válvula de compuerta está diseñada propiamente para ser operada cuando se requiera un cierre o abertura total, y NO se recomienda para usarse como reguladora de gasto.

Válvulas de mariposa.

Las válvulas de mariposa, como la mostrada en la Figura 6.5 (8) puede sustituir a la de compuerta cuando se requieren diámetros grandes y para presiones bajas en la línea; tienen la ventaja de ser más ligeras, son de menor tamaño y más baratas. Estas válvulas se operan por medio de una flecha que acciona un disco haciéndolo girar centrado en el cuerpo de la válvula; la operación puede ser manual, semiautomática o automática, mediante dispositivos neumáticos, hidráulicos o eléctricos. El diseño hidrodinámico de esta válvula permite emplearla como reguladora de gasto y en ciertos

casos para estrangular la descarga de una bomba.

Válvulas de Globo

Son voluminosas y presentan una alta resistencia al paso del agua, por lo que se emplean, generalmente, solo en tuberías de pequeños diámetros. Constan de un disco horizontal accionado por un vástago para cerrar o abrir un orificio por el que pasa el agua; este mecanismo se encuentra dentro de una caja de fierro fundido con extremos de brida para los diámetros grandes y de rosca para los pequeños. (ver Figura 6.13).

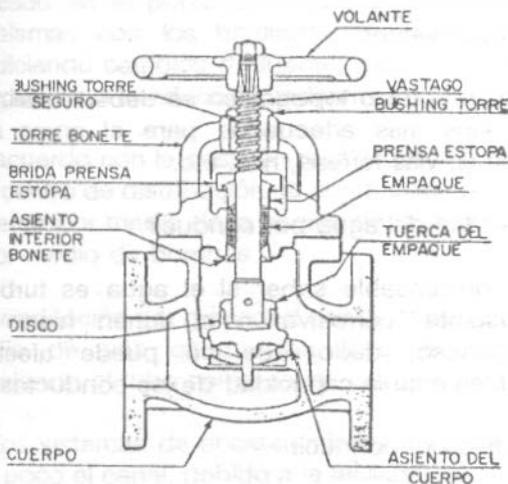


Figura 6.13. Válvula de globo.

Válvulas de alivio contra golpe de ariete.

Las válvulas aliviadoras de presión son empleadas para proteger al equipo de bombeo, tuberías y demás elementos en la conexión, contra los cambios bruscos de presión que se producen por el arranque o paro del equipo de bombeo.

La válvula está diseñada de tal manera que puede abrirse automáticamente y descargar al exterior cuando la presión en el sistema es

mayor que aquella con la que fue calibrada lográndose con ello el abatimiento de la línea piezométrica.

El cierre de esta válvula también es automático y se logra cuando la presión en la línea llega a ser menor que la de su ajuste o calibración.

De acuerdo con lo anterior, el empleo de esta válvula dependerá de la magnitud de las presiones que se tengan debidas al golpe de ariete y de la conveniencia que surja al haber hecho un estudio económico, considerando la posibilidad de emplear elementos (tuberías, válvulas, etc.) resistentes a las presiones que se van a presentar, según se estudiará más adelante en este capítulo.

En general, las válvulas de alivio que existen en el mercado, básicamente tienen el mismo diseño, véase figura 6.5 (9), y están constituidas en esencia por dos partes; una que corresponde al cuerpo de la válvula propiamente dicho y la otra formada por los mecanismos de control. En el cuerpo de la válvula se encuentra el elemento actuador, constituido por un pistón cuya posición regula el funcionamiento de la válvula. El control de este pistón se efectúa por medio de una válvula piloto calibrada que actúa con una presión determinada y no es más que una válvula de aguja de precisión para pequeños flujos. El piloto de control de esta válvula puede ser hidráulico, eléctrico o de ambos tipos.

Las válvulas que se usan con más frecuencia son las llamadas de pistón y las de diafragma, preferentemente con ambas clases de control. Las dos funcionan satisfactoriamente, pero en ocasiones se prefiere la válvula con pistón, porque la otra requiere de un servicio de mantenimiento frecuente, debido a que el material de que está hecho el diafragma (hule, neopreno, etc.) se deteriora dependiendo del tipo de agua que se maneje.

Cuando se ha definido el empleo de válvulas de alivio, su diámetro se determina en función del gasto de escurrimiento en la tubería a la que se conectará, de las presiones originadas por el golpe de ariete y de las pérdidas de carga, normalmente tolerables, ocasionadas por esta

válvula. Se recomienda determinar su diámetro consultando el catálogo de los fabricantes.

Su ubicación se elige después de los elementos de control o al principio de la tubería de descarga común. En una instalación como la de la Figura 6.4, en la cual se ha instalado una válvula de alivio a cada bomba, se sitúa entre la Check y la de Compuerta, mediante una T de acero o fierro fundido.

El desfogue de la válvula de alivio deberá diseñarse sin posibilidad de ahogamiento y guiar la descarga hacia aguas abajo de la fuente de abastecimiento.

Desagües

Se utilizan generalmente en los puntos más bajos del perfil con el fin de desaguar la línea en caso de roturas durante su operación; también se pueden usar para el lavado de la línea durante la construcción. No es recomendable la utilización de válvulas para desagües. El cruce se forma con una Tee con brida, tapa ciega y dos juntas universales, todas ellas de fierro fundido. Si en la conducción se emplean tuberías de PVC, se usan conexiones de este material para el desagüe o vaciado. (Ver figura 6.8 y 6.9). Las tapas ciegas son tapones que se colocan cuando un extremo de tubería no va a trabajar temporalmente y que tienen la forma coincidente con el tipo de junta de la tubería en que se coloca.

6.3 PROYECTO DE LINEAS DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE

6.3.1 Factores por considerar.

Para el proyecto de líneas de conducción, se deben tomar en cuenta los siguientes factores principales:

1. Topografía

El tipo y clase de tubería por usar en una conducción depende de las características topográficas de la línea. Es conveniente obtener perfiles que permitan tener presiones de operación bajas, evitando también tener puntos

altos notables.

2. Afectaciones.

Para el trazo de la línea se deben tomar en cuenta los problemas resultantes por la afectación de terrenos ejidales y particulares. De ser posible, se utilizarán los derechos de vía de cauces de agua, caminos, ferrocarriles, líneas de transmisión de energía eléctrica y linderos.

3. Clase de terreno por excavar (Geotecnia)

En general, las tuberías de conducción deben quedar enterradas, principalmente las de asbesto cemento y PVC. El trazo más adecuado puede ser el que permita disminuir al máximo posible las excavaciones en roca. Se investigará también la profundidad del nivel freático.

4. Cruzamientos

Durante el trazo topográfico se deben localizar los sitios más adecuados para el cruce de caminos, vías férreas, ríos, etc.

5. Calidad del agua por conducir.

Es indispensable saber si el agua es turbia, incrustante, corrosiva, o si tienen hierro y manganeso, dado que se puede afectar notablemente la capacidad de los conductos.

6. Gasto por conducir

Para gastos pequeños, o cuando se utilizan tuberías con diámetros de 150 mm y menores, son recomendables las de policloruro de vinilo (PVC); para diámetros mayores hasta de 500 mm y carga de operación menor a 14.0 kg/cm², son recomendables las de fibro-cemento. Para diámetros de 610 mm y mayores, se debe hacer un estudio económico muy cuidadoso, comparando tuberías de fibro-cemento, acero y concreto presforzado.

7. Costos de suministro e instalación de tuberías.

Se tomarán en cuenta los costos de suministro para los casos de adquisición por parte de los Gobiernos Federal, Estatales y por contratistas.

En el caso de diámetros grandes (760 mm y mayores), se tomará en cuenta la disponibilidad oportuna de las tuberías y las facilidades financieras que otorguen los fabricantes.

8. Normas de calidad y comportamiento de tuberías.

Es indispensable conocer las especificaciones de fabricación de las tuberías disponibles en el mercado, las pruebas de control de calidad, así como las recomendaciones para su transporte, manejo y almacenaje.

9. Aspectos socioeconómicos.

El uso ciertas fuentes de abastecimiento (concesionada o no) y el no tomar en cuenta lo indicado en el punto 2, origina en ocasiones problemas con los habitantes de la región, propiciando cambios de fuente, modificaciones del trazo de la conducción, indemnizaciones, etc.

De acuerdo con la posición relativa de la fuente y el centro de distribución, la conducción puede hacerse por medio de la acción de la gravedad o por medio de bombas.

La conducción por gravedad puede hacerse por medio de una conducción libre, es decir, trabajando el tubo como canal, o a presión.

En los sistemas de abastecimiento de agua se usa poco el canal, debido a la facilidad con que el agua puede contaminarse. Los casos más frecuentes son por consiguiente, la línea de conducción por gravedad a presión y la conducción por impulsión a bombeo.

6.3.2 Metodología de diseño

Los pasos a seguir para el diseño de una línea de conducción, son los siguientes:

Paso 1: Trazo planimétrico

Obtener un plano topográfico de la región, con curvas de niveles espaciadas razonablemente y, en su defecto, hacer estudios topográficos siguiendo distintas rutas en dicha región, que permitan estudiar el trazado que implique la línea

de conducción más económica, o sea, la más corta y de menor diámetro; generalmente este es el resultado de varios tanteos. La conducción sigue los accidentes del terreno y, si se usan tubos de fibro-cemento o PVC, va enterrada en una zanja, como medida de protección contra los agentes exteriores. Los cambios de dirección, tanto en el plano horizontal como en el vertical, deben efectuarse por medio de curvas suaves, utilizando la deflexión que permiten las uniones de los distintos tipos de tubos.

Paso 2: Trazo altimétrico

Debe hacerse un estudio del trazado en un plano vertical, es decir, debe construirse un perfil de dicho trazado. Por medio de esta representación gráfica se conocerán los accidentes topográficos presentes y sus dificultades; las posiciones relativas de la tubería con el terreno y con relación a la línea piezométrica, etc. Debe tenerse especial cuidado de que la línea de conducción se encuentre siempre debajo de la línea piezométrica.

La Figura 6.14 muestra una conducción mal trazada, que tendrá presión negativa (vacío) en los lugares que se encuentran sobre la línea piezométrica. Evidentemente, en los puntos C y D, en donde la línea piezométrica corta a la tubería, la carga de presión se iguala a la atmosférica. Si la velocidad del agua no es suficientemente grande, en el punto E se desprenderá el aire que lleva siempre disuelto el agua, con mayor facilidad que el caso estudiado antes, en que la línea piezométrica está por encima de la tubería en un punto alto (ver apartado 6.2, válvulas eliminadoras de aire). Además, el aire puede entrar por las juntas imperfectas de la tubería entre los puntos C y D. Este aire modificará la línea piezométrica y si se supone que llega a adquirir la presión atmosférica, la nueva línea piezométrica pasará de la posición HF a la HE. Como el gasto que circula por toda la tubería es el mismo, la línea piezométrica en su parte inferior tendrá que ser paralela a HE y, por tanto, la tubería entre E y G estará sometida a la presión atmosférica y no trabajará a sección llena.

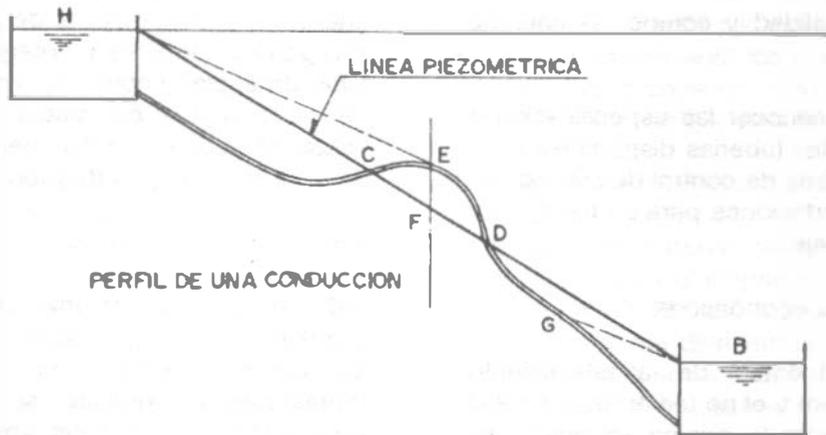


Figura 6.14. Línea de conducción mal trazada

Aunque se puede dar solución a este problema colocando en E una bomba de vacío para extraer el aire y mantener el grado de vacío existente, será preferible evitarlo buscando mejores trazos de la línea de conducción, siempre que esto sea posible. Las tuberías que pasan sobre la línea piezométrica reciben el nombre de sifones.

Si en el perfil aparecen depresiones muy profundas, puede ser económico colocar depósitos intermedios llamados "cajas rompedoras de presión", que tienen por objeto romper la línea piezométrica, lo que dará lugar a tuberías de menor espesor y, por consiguiente, de menor costo (Figura 6.15).

Se sabe que la **clase de tubería** a usar está determinada por la presión a que se encuentre sometida y ésta última depende de la distancia entre la tubería y la línea piezométrica.

PASO 3: Cálculo hidráulico

Una vez estudiado el trazo planimétrico (Paso 1) y altimétrico (Paso 2) de la conducción, se procede a calcular su diámetro. Si está alimentada por gravedad el diámetro está completamente definido. Si está alimentada por bomba, el problema tiene múltiples soluciones y la "mejor" se decide por condiciones económicas. En efecto, si el diámetro es pequeño, la pérdida de carga es grande y entonces habrá que usar una bomba de carga elevada que logre vencer las pérdidas, siendo por esta razón muy elevado también el costo de la impulsión.

Por el contrario, si el diámetro es grande, la pérdida de carga es pequeña y la altura a elevar el agua será menor, lo que significa menor costo de bombeo, pero el costo de la tubería es mayor que en el primer caso.

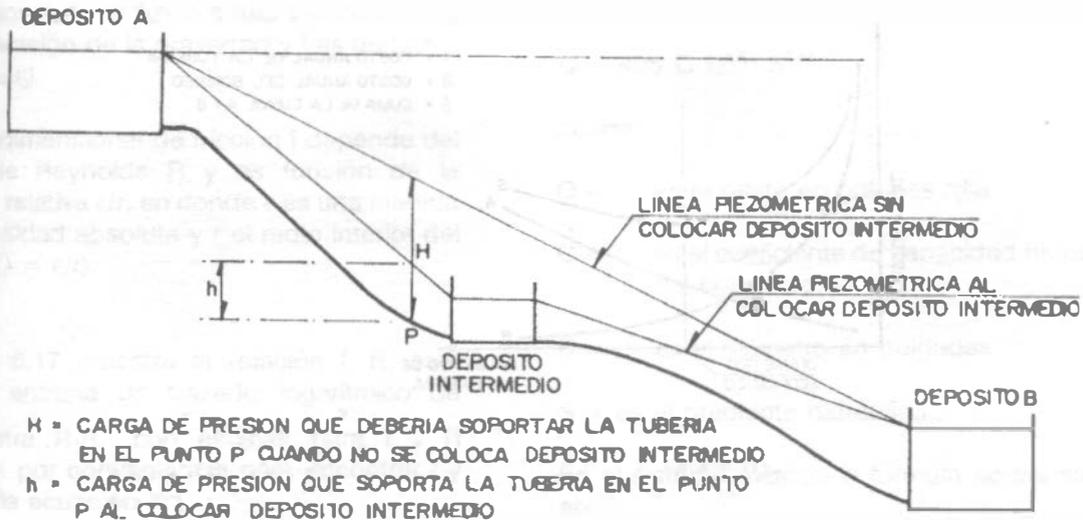


Figura 6.15. Depósito intermedio o "caja rompedora de presión" para romper la línea piezométrica.

En resumen, en el primer caso, la tubería es "barata" y el costo del bombeo grande; en el segundo caso sucede lo inverso: la tubería es costosa y el gasto de bombeo es reducido.

Lo que debe procurarse es que ambos costos, den un costo anual mínimo; el diámetro correspondiente a este caso se llama **diámetro económico de la línea de conducción** (Figura 6.16).

En el caso de una línea de conducción por bombeo, en el que la pérdida de carga no está prefijada, pues éste depende de la carga suministrada por la estación de bombeo, el diámetro de la línea de conducción debe ser tal que haga que el costo anual de los distintos gastos sea mínimo.

Para un caudal conocido o supuesto, se calculan los costos de varias tuberías de diámetro diferentes, así como las pérdidas de carga que

ellas producen.

El costo anual total estará representado por el interés del costo del conducto, más la depreciación del mismo, más el costo anual del bombeo. **El diámetro económico de la línea de conducción** será el que hace que la suma de los conceptos anteriores sea mínimo. El costo de la línea de conducción por metro lineal incluye:

- Costo de la tubería, que varía con la clase y material del que está fabricada;
- Costo de uniones (juntas) y su realización (material y jornales) y,
- Colocación de la tubería, que a su vez incluye la apertura de la zanja, colocación de la tubería en la misma, relleno de la zanja y compactación del relleno (jornales y equipos).

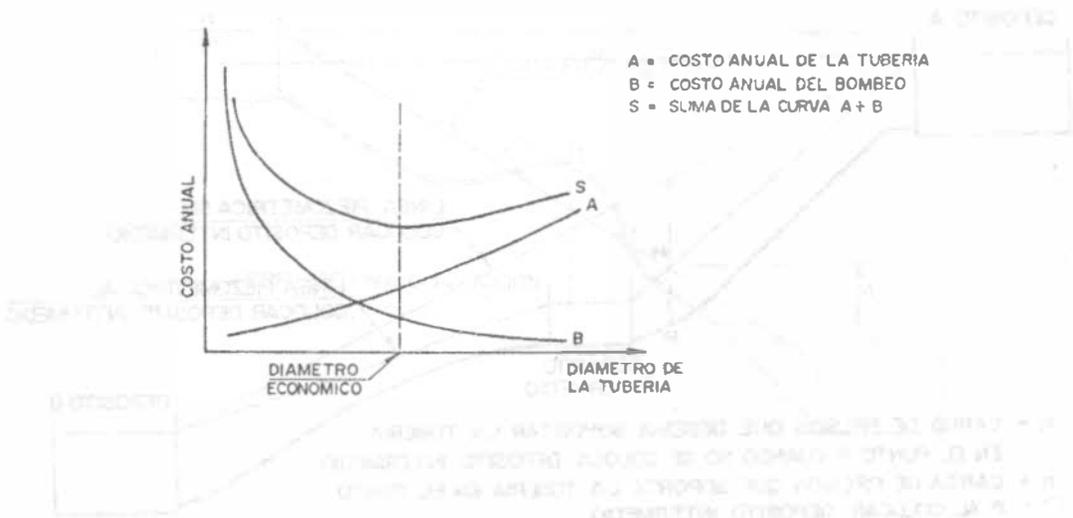


Figura 6.16. Representación gráfica del "diámetro económico de la línea de conducción".

El costo anual del bombeo será igual al interés y depreciación sobre el costo de la estación de bombeo y el costo del bombeo propiamente dicho. Como el primero es un sumando común para las distintas tuberías, pues el tamaño del conducto afecta poco al tamaño de la estación de bombeo, puede despreciarse este último concepto.

En el caso de una línea de conducción por gravedad, el diámetro económico será aquel con el que se consuma por pérdidas la mayor carga disponible que sea posible en un perfil en particular.

Al término de la descripción general de los pasos a seguir para el proyecto de la línea de conducción se darán al lector los ejemplos de cálculo que sirvan para aclarar los conceptos presentados en este paso 3.

Paso 4: Localización de piezas especiales y dispositivos.

Una vez determinado el diámetro y efectuado el trazado definitivo, se procede a localizar en el perfil y planta las piezas especiales y dispositivos

de la línea de conducción que correspondan, según las funciones y recomendaciones indicadas en el apartado 6.2.

6.3.3. Fórmulas para el cálculo de la resistencia por fricción o superficial en tuberías.

En Líneas de conducción largas, la resistencia por fricción o superficial, ofrecida por el interior del tubo es el elemento dominante en su diseño hidráulico. En esta sección se presentarán las principales fórmulas que se utilizan en los ejemplos de diseño desarrollados en este capítulo y que se aplican también en el diseño de la red de distribución, como se verá en el Capítulo 8. Para mayores detalles acerca del origen de estas y otras fórmulas aplicables, se sugiere al lector referirse a los textos especializados de hidráulica.

Fórmula de Darcy-Weisbach.

Generalmente conocida como la fórmula de Darcy-Weisbach es una de las más antiguas y al presente se escribe en la forma sugerida por Weisbach, o sea:

$$h_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (6.1)$$

en donde h_f es la pérdida de carga en una tubería de longitud L y diámetro D a través de la cual se transporta el fluido a una velocidad v ; g es la aceleración de la gravedad y f es un factor adimensional.

El factor adimensional de fricción f depende del número de Reynolds R y es función de la rugosidad relativa ϵ/r , en donde ϵ es una medida de la rugosidad absoluta y r el radio interior del tubo ($2 \epsilon/D = \epsilon/r$).

La Figura 6.17 muestra la relación $f: R$; este diagrama entraña un trazado logarítmico de $1/\sqrt{f}$ contra $R\sqrt{f}$ con escalas para f y R agregadas por conveniencia para encontrar f y usarla en la ecuación 6.1.

Con referencia a R y ϵ/r , la Figura 6.17 muestra lo siguiente:

1. El flujo laminar persiste hasta que $R=2000$, y la relación $f:R$ es simplemente $f=64/R$.
2. Por encima de $R=4000$, se establece el flujo turbulento por completo, y el trazo único para flujo laminar se ramifica en una familia de curvas para valores crecientes de ϵ/r sobre un límite inferior que identifica a la relación $f:R$ para tubos lisos como $1/\sqrt{f} = 2 \log R\sqrt{f} - 0.8$.
3. Para tubos ásperos, la rugosidad relativa ϵ/r domina y $1/\sqrt{f} = 2 \log r/\epsilon + 1.74$.
4. En la zona crítica entre $R = 2000$ y $R = 4000$, hacen su aparición tanto R como ϵ/D en la ecuación semiempírica de Colebrook y White: $1/\sqrt{f} = 1.74 - 2 \log (\epsilon/r + 18.7/R\sqrt{f})$.

Fórmula de Hazen - Williams.

La fórmula de Hazen - Williams para conductos circulares es:

$$Q = 405 C D^{2.63} S^{0.54} \quad (6.2)$$

donde:

- Q = es el gasto en galones /día.
 C = es el coeficiente de capacidad hidráulica del conducto.
 D = es el diámetro en pulgadas.
 S = es el gradiente hidráulico.

En el sistema métrico la fórmula se transforma en:

$$Q = 35.834 \times 10^{-7} C D^{2.63} S^{0.54} \quad (6.3)$$

donde:

- Q = es el gasto en l/s y
 D = diámetro en mm.

En un sistema mixto:

$$Q = 0.0177435938 C D^{2.63} S^{0.54} \quad (6.4)$$

donde:

- Q = es el gasto en l/s y
 D = es el diámetro en pulgadas.

Fórmula de Manning.

Aunque lo más conveniente sería utilizar la fórmula de Hazen-Williams en conductos de flujo libre o conductos que no fluyen llenos, los Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (CNA, 1993)^{*}, sugieren el uso de la fórmula de Manning en conductos que fluyen llenos.

* La Comisión Nacional del Agua, a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua realiza estudios para definir cuál de las fórmulas simula mejor los fenómenos de escurrimiento. Mientras se obtienen resultados concluyentes se seguirá usando la fórmula de Manning.

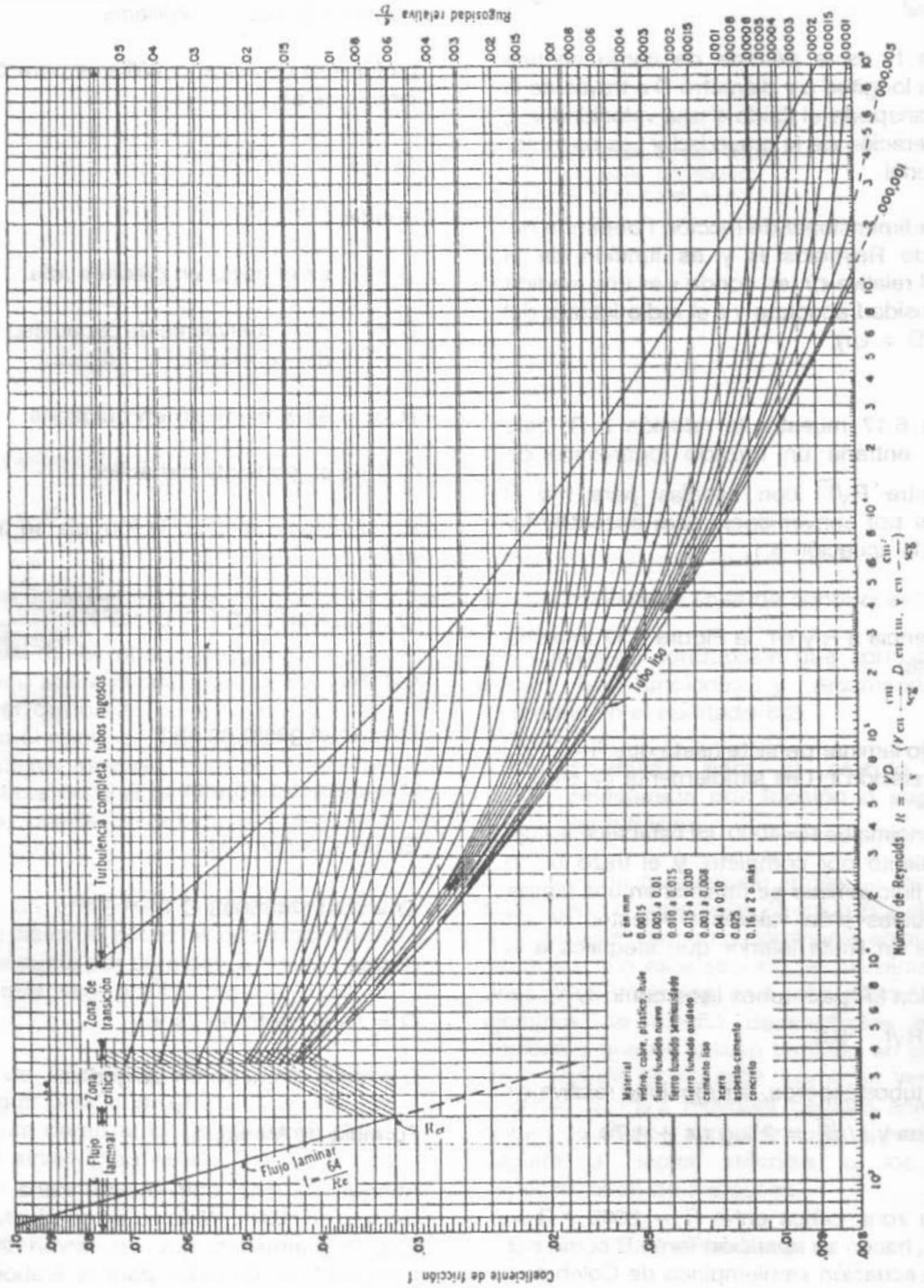


Figura 6.17. Coeficientes de fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo; diagrama universal de Moody.

La fórmula de Manning se escribe:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} s^{1/2} \quad (6.5)$$

en donde:

V = velocidad media del agua, en m/s

n = coeficiente de rugosidad de la tubería

R = radio hidráulico de la tubería en m

s = pendiente hidráulica

$$s = \frac{h_f}{L}$$

h_f = pérdida de carga por fricción, en m.

L = longitud de la línea de conducción, en m.

Q = gasto por conducir, en m³/s

D = diámetro de la tubería, en m

$$\text{Como } R = \frac{A}{p}$$

en donde

A = área hidráulica del conducto y

p = perímetro mojado, entonces

$$R = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = \frac{D}{4}$$

Sustituyendo en (6.5)

$$V = \frac{1}{n} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \left(\frac{h_f}{L}\right)^{1/2} \quad (6.6)$$

Por otra parte, la ecuación que define el gasto es:

$$Q = AV = \frac{\pi D^2}{4} V \quad (6.7)$$

Sustituyendo (6.7) en (6.6)

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{n} \left(\frac{D}{4}\right)^{2/3} \left(\frac{h_f}{L}\right)^{1/2}$$

Operando

$$Q = 0.3117 \frac{D^{8/3} h_f^{1/2}}{L^{1/2} n}$$

Despejando h_f ,

$$h_f^{1/2} = \frac{n L^{1/2} Q}{0.3117 D^{8/3}}$$

elevando al cuadrado:

$$h_f = \frac{10.3 n^2 Q^2 L}{D^{16/3}} \quad (6.8)$$

Si $K = \frac{10.3 n^2}{D^{16/3}}$, la ecuación (6.8) queda:

$$h_f = K L Q^2 \quad (6.9)$$

En el cuadro 6.10 se presentan las velocidades máximas recomendadas para el escurrimiento del agua en los distintos tipos de tubería, así como el coeficiente de rugosidad n y capacidad hidráulica C correspondiente. En todos los casos, la velocidad mínima de escurrimiento para que no se produzca sedimentación en los conductos es de 0.3 m/s.

Cuadro 6.10. Velocidades máximas recomendadas para el escurrimiento del agua en los distintos tipos de tuberías, y coeficientes de rugosidad correspondiente.

| Tubería de: | Velocidad máxima permisible (m/s) | n Coeficiente de rugosidad de Manning | C Coeficiente de capacidad hidráulica |
|--|-----------------------------------|--|--|
| Concreto simple hasta 0.45 m de diámetro | 3.0 | 0.011 | 140 |
| Concreto reforzado de 0.60 m de diámetro o mayor | 3.5 | 0.011 | 140 |
| Fibro-cemento | 5.0 | 0.010 | 140 |
| Acero Galvanizado | 5.0 | 0.014 | 140 |
| Acero sin revestimiento | 5.0 | 0.014 | 140 |
| Acero con revestimiento | 5.0 | 0.011 | 140 |
| Polietileno de alta densidad | 5.0 | 0.009 | 140 |
| PVC (policloruro de vinilo) | 5.0 | 0.009 | 140 |

6.3.4. Conducciones por gravedad

Cálculo Hidráulico

El escurrimiento del agua por gravedad en una tubería, considerano el caso común en que la descarga es libre, se rige por la expresión:

$$H = \frac{V^2}{2g} + h_f + h_s \tag{6.10}$$

en donde:

H = carga hidráulica disponible en m.

$\frac{V^2}{2g}$ = carga de velocidad, en m.

h_f = pérdida por fricción en la tubería en m.

h_s = suma de pérdidas secundarias, en m.

En el cálculo hidráulico de una conducción, conocidas:

a) La carga disponible, "H" y

b) La longitud de la línea, "L",

datos que se obtienen de los trazos altimétrico y planimétrico de la conducción, se determina:

- a) El tipo de tubería (fibro-cemento, PVC, acero, etc.);
- b) El diámetro comercial y
- c) La clase de tubería por usar, de acuerdo a las presiones de operación.

Ejemplo 6.2

Con relación a la figura 6.18a, es necesario un gasto en el punto de descarga (B) de 400 lt/s ($Q_{MD} = 400$ l/s) a una presión de 3.5 kg/cm² (35 m de columna de agua). Efectúese el cálculo hidráulico de la línea de conducción, asumiendo que las pérdidas menores son un 15 % de las de fricción.

Nota: La línea de conducción no termina en B, pero ahí se presentará una derivación y por esta razón se requiere la carga indicada en ese punto.

Solución.

En este problema, se requiere una presión en el punto B de 3.5 kg/cm² equivalente a una carga de 35.00 metros de columna de agua, y como puede verse en la figura 6.18b, en dicho punto

se tiene una carga estática de 74 m. Por este motivo sólo se tendrá disponible para consumirla en pérdidas, la diferencia, o sea 39.00 metros, ésto es:

$$\text{CARGA TOTAL DISPONIBLE} = 74 \text{ m} - 35 \text{ m} = 39 \text{ m}$$

Esta es la carga que se tiene para absorber las pérdidas mayores y menores, o sea:

$$h_f + h_s = 39 \text{ m}$$

pero $h_s = 0.15 h_f$ según se indica en el enunciado, así tenemos

$$h_f + 0.15 h_f = 39 \text{ m}$$

$$h_f = \frac{39}{1.15} = 33.91 \text{ m}$$

Con la ecuación 6.8 puede calcularse el diámetro:

$$h_f = \frac{10.3 n^2 Q^2 L}{D^{16/3}}$$

despejando el diámetro

$$D = \left(\frac{10.3 n^2 Q^2 L}{h_f} \right)^{3/16}$$

Suponiendo la instalación de tubería de fibro-cemento:

$$n = 0.010 \text{ (cuadro 6.10)}$$

$$Q = 0.4 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$L = 2050 \text{ m}$$

$$h_f = 33.91 \text{ m}$$

Sustituyendo

$$D = \left[\frac{10.3 (0.010)^2 (0.4)^2 (2050)}{33.91} \right]^{3/16}$$

$$D = 0.42 \text{ m (diámetro teórico)}$$

$$D = 420 \text{ mm}$$

El diámetro comercial más aproximado es de 400 mm, pero al reducir el diámetro se aumentaría la pérdida y entonces ya no se cumpliría con la carga requerida de 35 m en la descarga. Por este motivo se usará un diámetro sensiblemente mayor al teórico.

$$D = 450 \text{ mm (tomado del cuadro 6.1)}$$

Ahora se revisará qué sucede con las pérdidas y la carga disponible al haber aumentado el diámetro:

$$h_f = \frac{10.3 (0.010)^2 (0.4)^2 (2050)}{0.45^{16/3}}$$

$$h_f = 23.89 \text{ m}$$

Una variación tan pequeña en el diámetro ha provocado una disminución significativa de la pérdida. Si se hubiera utilizado $D = 400 \text{ mm}$, la pérdida sería $h_f = 44.78 \text{ m}$.

Recuérdese que debe revisarse que la velocidad se encuentre entre los límites permisibles; para fibro-cemento $0.3 \text{ m/s} \leq V \leq 5 \text{ m/s}$ (cuadro 6.10).

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.4}{\frac{\pi (0.45)^2}{4}} = 2.52 \text{ m/s}$$

La velocidad es aceptable.

Calculado el diámetro solo resta definir la clase de tubería de fibro-cemento que resista las presiones internas de trabajo de este sistema.

En la página siguiente se muestra la Figura 6.18, en la cual se presenta la línea piezométrica de la línea en cuestión. A manera de recordatorio se ilustra en la Figura 6.18c el concepto de la línea piezométrica.

Volviendo a al ejemplo, la carga de velocidad es

$$h_v = \frac{v^2}{2g} = \frac{2.52^2}{2(9.81)} = 0.32 \text{ m}$$

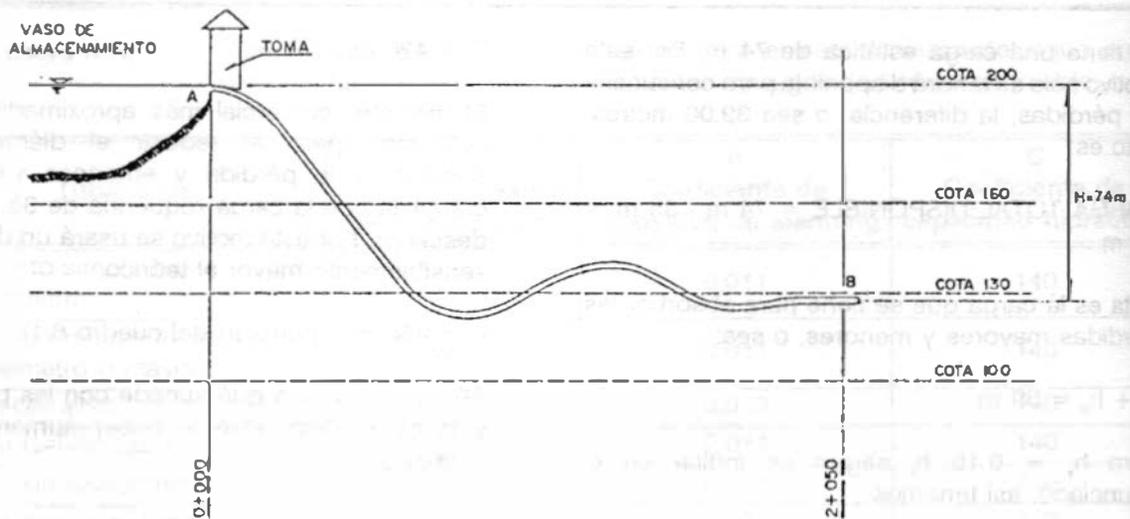


Figura 6.18 a.

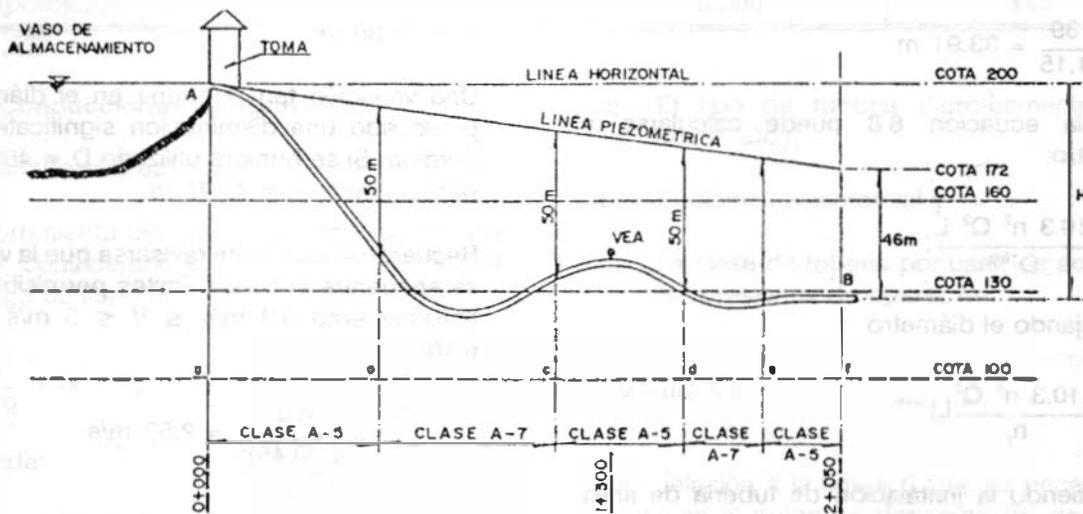


Figura 6.18 b

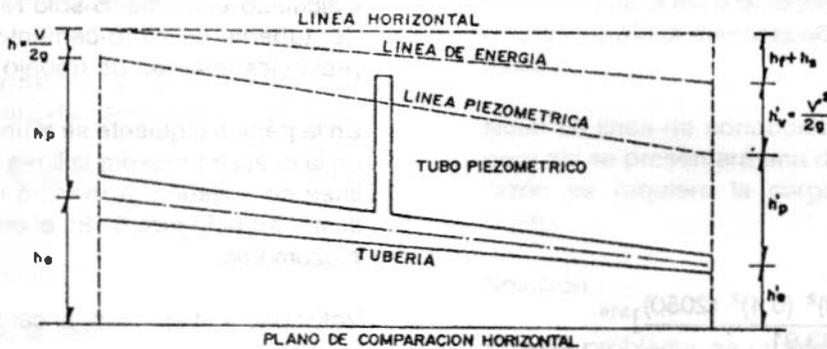


Figura 6.18 c.

Restando a la cota de la línea horizontal las pérdidas y la carga de velocidad, se tendrá la cota de la línea piezométrica en el punto B.

Cota de la línea horizontal en B - hf - hs - h'v =
Cota de la línea piezométrica en B.

$$200 \text{ m} - 23.89 - 0.15 (23.89) - 0.32 = 172.21 \text{ m}$$

Cota de la línea piezométrica en B = 172.21 msnm \approx 172 msnm.

En la Figura 6.18b, se ha definido la clase de tubería de fibro-cemento que debe instalarse para soportar las presiones internas de trabajo determinadas por la diferencia entre las cotas de la línea piezométrica y cada punto de la línea de conducción. Así por ejemplo, entre los ejes a y b (figura 6.18.b), las presiones internas de trabajo resultan ser menores de 5 kg/cm² (50 m de col. de agua), por lo que resulta adecuado el empleo de fibro-cemento clase A-5; entre los ejes b y c la distancia medida verticalmente entre la línea piezométrica y la línea de conducción, resulta superior a 5 kg/cm² aunque menor a 7 kg/cm² por lo que resulta adecuado emplear clase A-7. Con este razonamiento se seleccionó la clase de tubería para los tramos restantes (b-c, c-d, d-e, e-f).

Se observa también la necesidad de colocar una válvula de expulsión de aire (VEA), en el punto de la tubería más alto entre los ejes c y d. De acuerdo al cuadro 6.9, dado el gasto en litros por segundo y el diámetro de la tubería en pulgadas puede recomendarse una válvula apropiada. En este caso se tiene:

$$D = 450 \text{ mm} = 17.7 \text{ pulgadas} = 18 \text{ pulgadas}$$

$$Q = 400 \text{ l/s}$$

Rige el gasto, por lo que corresponde a una válvula de expulsión de aire de 3 pulgadas de diámetro.

Ejemplo 6.3

La Figura 6.19 muestra la línea de conducción de la obra de captación al tanque de regularización de un sistema de abastecimiento

para una población de proyecto de 14700 habitantes. La dotación es de 200 l/hab/día con un coeficiente de variación diaria de 1.25. La tubería de Fierro Fundido y el suministro desde el almacenamiento al tanque es continuo durante 12 horas al día.

- Calcular el diámetro económico de la línea de conducción.
- Trazar la línea piezométrica de la solución adoptada.

Solución

Cálculo del gasto máximo diario

$$Q_{MD} = \frac{200 \times 14700 \times 1.25}{86400} = 42.53 \text{ l/s}$$

Pero como el suministro es solo 12 horas al día, el gasto de diseño será

$$Q = \frac{24}{12} Q_{MD} = 2 (42.53) = 85 \text{ l/s}$$

$$Q = 0.085 \text{ m}^3/\text{s}$$

a) El gradiente hidráulico es

$$S = \frac{H}{L} = \frac{1043.75 - 998.12}{4900} = 9.31 \times 10^{-3}$$

De la fórmula de Hazen y Williams:

$$Q = 35.834 \times 10^{-7} C D^{2.63} S^{0.54}$$

Como C = 130 (Cuadro 6.10), el diámetro se obtiene por simple despeje:

$$D = \left(\frac{85}{35.834 \times 10^{-7} \times 130 (9.31 \times 10^{-3})^{0.54}} \right)^{\frac{1}{2.63}}$$

$$D = 261 \text{ mm}$$

De existir un diámetro comercial de 0.26 m, sería el diámetro económico de la línea de conducción ya que con este se consumiría por pérdidas de fricción la totalidad de la carga disponible que es igual al desnivel existente (1043.75 - 998.12 = 45.63 m).

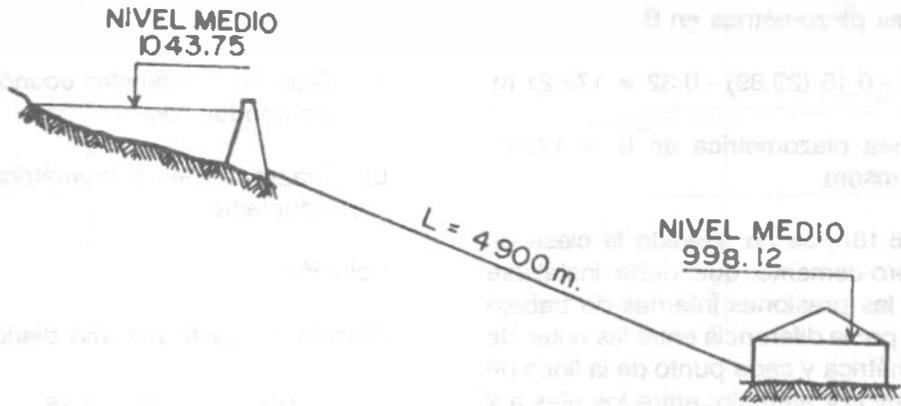


Figura 6.19. Esquema del problema 6.3.

Sin embargo, los diámetros comerciales más aproximados son uno inferior y otro superior al teórico calculado, o sea 10 y 12 pulgadas (0.254 y 0.305 m, respectivamente).

Como el diámetro de 10 pulgadas produciría una pérdida de carga mayor que la carga disponible, se optará por el diámetro de 12 pulgadas.

b) La pérdida de carga que se presenta en la tubería con el diámetro de 12 pulgadas es:

$$S = \left(\frac{Q}{35.834 \times 10^{-7} C D^{2.63}} \right)^{1.852}$$

$$S = \left(\frac{85}{35.834 \times 10^{-7} 130 (305)^{2.63}} \right)^{1.852}$$

$$S = 4.4 \times 10^{-3}$$

Como $S = \frac{H}{L}$, $H = SL$

$$H = 4.4 \times 10^{-3} \times 4900 = 21.56 \text{ m}$$

$$H = 21.56 \text{ m}$$

La línea piezométrica se muestra en la figura 6.20

En el ejemplo anterior, debido a la resistencia por fricción que ofrece la tubería al flujo, se tiene una pérdida de carga de 21.56 m. La diferencia con respecto al desnivel original existente es llamada carga residual.

$$\text{Carga residual} = 45.63 - 21.56 = 24.07 \text{ m.}$$

Aún es posible hacer que la carga residual sea cero si se diseña la línea de conducción con dos tramos de tubería de diferente diámetro cuya combinación dé por resultado que la pérdida de carga total sea igual al desnivel existente, lo cual puede resultar más económico. Así se muestra en el siguiente ejemplo.

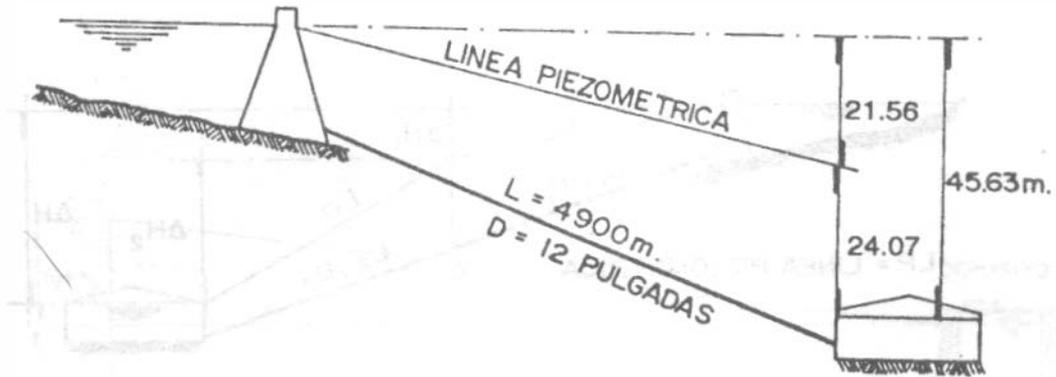


Figura 6.20. Solución del ejemplo 6.3.

Ejemplo 6.4

Diseñar la línea de conducción del ejemplo 6.3 combinando dos tramos de diámetro diferente para que se consuma por pérdidas de fricción la totalidad de la carga disponible.

Solución

La Figura 6.21 muestra el planteamiento del problema al seccionar la línea de conducción en dos tramos de diferente diámetro.

En la figura 6.21 se observa que:

$$L_1 + L_2 = L$$

$$H_1 + H_2 = H$$

o bien

$$L_1 + L_2 = L \tag{6.11}$$

$$S_1 L_1 + S_2 L_2 = L \tag{6.12}$$

En el ejemplo 6.3 se determinó un diámetro teórico de 0.26 m y en consecuencia los

diámetros comerciales más aproximados son de 10 pulgadas (0.254 m) y 12 pulgadas (0.305 m); estos diámetros se utilizarán en la solución de este problema.

Sustituyendo en las ecuaciones (6.11) y (6.12), se tiene:

$$L_1 + L_2 = 4900$$

$$\left(\frac{85}{35.834 \times 10^{-7} \times 130 (305)^{2.63}} \right)^{0.54} L_1 +$$

$$\left(\frac{85}{35.834 \times 10^{-7} \times 130 (254)^{2.63}} \right)^{0.54} L_2 = 45.63$$

En donde $D_1 = 0.305$ m, $D_2 = 0.254$ m, y la incógnita es la longitud que deben tener los tramos.

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene:

$$L_1 = 1065.21 \text{ m}$$

$$L_2 = 3834.79 \text{ m}$$

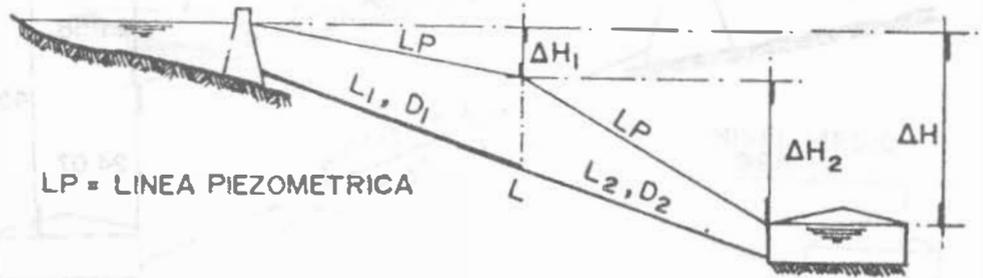


Figura 6.21. Planteamiento del ejemplo 6.4.

6.3.5 Conducción por bombeo

Cálculo Hidráulico

La bomba produce siempre un salto brusco en el gradiente hidráulico que corresponde a la energía \$H_m\$, comunicada al agua por la bomba. \$H_m\$ es siempre mayor que la carga total de elevación contra la cual trabaja la bomba, para poder vencer todas las pérdidas de energía en la tubería.

La carga de presión \$H_m\$ generada por la bomba es llamada generalmente "carga manométrica", o "carga dinámica total", e indica siempre la energía dada al agua a su paso por la bomba.

Considerando como obra de captación un pozo, según se indica en la Figura 6.22, la carga dinámica total está dada por la expresión (6.13), cuando la descarga es ahogada.

$$H_m = h_f + h_s + h_i + h_a \quad (6.13)$$

Cuando la descarga es libre, habrá que

aumentar a la expresión (6.13) la carga de velocidad;

$$H_m = \frac{v^2}{2g} + h_f + h_s + h_i + h_a \quad (6.14)$$

\$H_m\$ = carga dinámica total, en m

\$\frac{v^2}{2g}\$ = carga de velocidad, en m

\$v\$ = velocidad media del agua en m/s

\$h_f\$ = pérdidas por fricción en la tubería, en m

\$h_s\$ = pérdidas secundarias, en m

\$h_i\$ = altura de impulsión, en m

\$h_a\$ = altura de aspiración, en m

Para la determinación de las pérdidas por fricción en los conductos, se utilizan las ecuaciones del apartado 6.3.3. Las pérdidas secundarias pueden calcularse con el gráfico de la Figura 6.23.

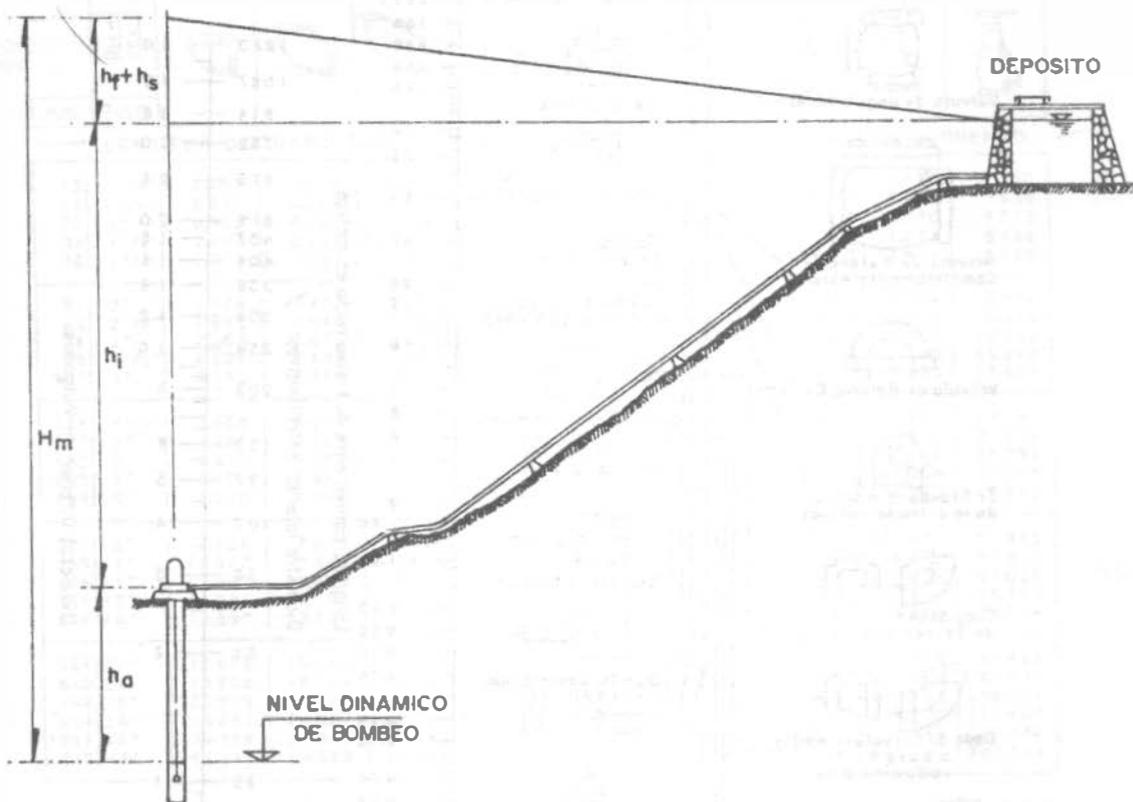
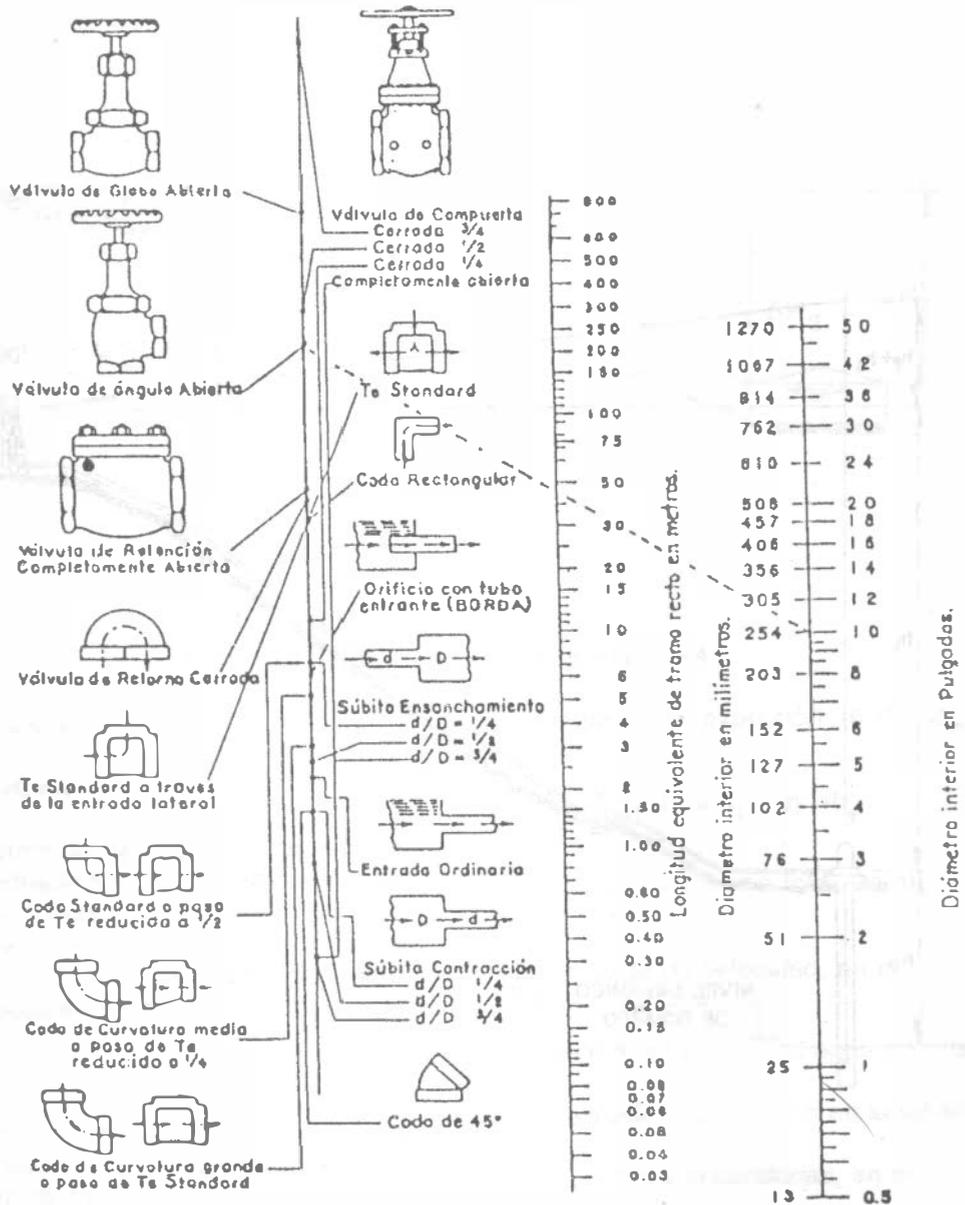


Figura 6.22. Conducción a bombeo descarga ahogada.



EJEMPLO: La línea punteada indica que la pérdida de carga en una Válvula de ángulo Abierta de 250 mm. (10") es equivalente a la que se verifica en un tramo recto de tubería del mismo diámetro y de 47 mts. de longitud.

NOTA: Para contracciones y ensanchamientos bruscos utilícase el diámetro menor d en la escala de tubos.

Para encontrar la pérdida de carga en accesorios, expresada en metros de tubería del mismo diámetro, únase el punto correspondiente a la pieza de que se trata, al diámetro en la tercera escala. La intersección con la escala central determina el equivalente en metros.

Figura 6.23a. Pérdida de carga en conexiones.

El cambio brusco de dirección del flujo en una tubería por medio de Codos, Tees, válvulas y curvas causa pérdidas de presión. Es práctica común expresar esta pérdida en términos de un equivalente de longitud de tramo recto de tubería del mismo diámetro. Por ejemplo: La pérdida de carga en un codo de 90° equivale a la que se originaría en un tramo recto de tubo de igual diámetro y de 1.00 m. de longitud.

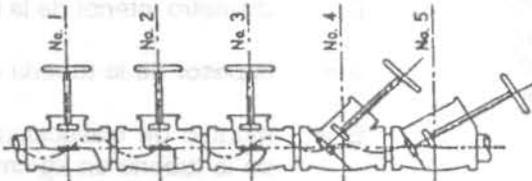
La tabla siguiente contiene pérdidas de carga para los tipos más usuales, expresados en metros de tramos rectos de tubería del diámetro correspondiente.

RESISTENCIA EN VALVULAS Y CONEXIONES

| DIAMETRO DEL TUBO | Codo STANDARD | Codo de RADIO MEDIO | Codo de RADIO GRANDE | Codo de 45° | TE | CURVA DE RETORNO | VALVULA DE COMPUESTA ABIERTA | VALVULA GLOBOS ABIERTA | VALVULA ASOULO ABIERTA | |
|---|---------------|---------------------|----------------------|-------------|--------|------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|---------|
| | | | | | | | | | | |
| m.m. PULG. | | | | | | | | | | |
| LONGITUD DE TRAMO RECTO EQUIVALENTE A LA RESISTENCIA AL ESCURRIMIENTO | | | | | | | | | | |
| 13 | 1/2" | 0.457 | 0.427 | 0.335 | 0.235 | 1.036 | 1.158 | 0.106 | 4.877 | 2.560 |
| 19 | 3/4" | 0.671 | 0.548 | 0.427 | 0.305 | 1.372 | 1.524 | 0.143 | 6.705 | 3.658 |
| 25 | 1" | 0.823 | 0.701 | 0.518 | 0.396 | 1.768 | 1.859 | 0.183 | 8.230 | 4.572 |
| 32 | 1 1/4" | 1.128 | 0.914 | 0.732 | 0.488 | 2.377 | 2.591 | 0.244 | 11.278 | 5.486 |
| 38 | 1 1/2" | 1.311 | 1.097 | 0.853 | 0.610 | 2.743 | 3.048 | 0.290 | 13.411 | 6.706 |
| 51 | 2" | 1.676 | 1.402 | 1.087 | 0.762 | 3.353 | 3.962 | 0.366 | 17.374 | 8.534 |
| 64 | 2 1/2" | 1.981 | 1.646 | 1.280 | 0.914 | 4.267 | 4.572 | 0.427 | 20.117 | 10.058 |
| 76 | 3" | 2.469 | 2.073 | 1.554 | 1.158 | 5.182 | 5.486 | 0.518 | 25.908 | 12.802 |
| 89 | 3 1/2" | 2.896 | 2.438 | 1.829 | 1.341 | 5.791 | 6.401 | 0.610 | 30.175 | 15.240 |
| 102 | 4" | 3.353 | 2.774 | 2.134 | 1.524 | 6.706 | 7.315 | 0.701 | 33.528 | 17.676 |
| 114 | 4 1/2" | 3.658 | 3.046 | 2.408 | 1.707 | 7.315 | 8.230 | 0.792 | 39.824 | 18.593 |
| 127 | 5" | 4.267 | 3.658 | 2.713 | 1.859 | 8.230 | 9.449 | 0.884 | 42.672 | 21.336 |
| 152 | 6" | 4.877 | 4.267 | 3.353 | 2.347 | 10.058 | 11.278 | 1.067 | 48.768 | 25.298 |
| 203 | 8" | 6.401 | 5.486 | 4.267 | 3.048 | 13.106 | 14.935 | 1.372 | 67.056 | 33.528 |
| 254 | 10" | 7.925 | 6.706 | 5.182 | 3.962 | 17.089 | 18.593 | 1.737 | 88.392 | 42.672 |
| 305 | 12" | 9.754 | 7.925 | 6.096 | 4.572 | 20.117 | 22.250 | 2.042 | 103.632 | 51.816 |
| 356 | 14" | 10.973 | 9.449 | 7.010 | 5.182 | 23.165 | 25.908 | 2.438 | 116.672 | 57.912 |
| 406 | 16" | 12.802 | 10.666 | 8.230 | 5.791 | 26.518 | 30.480 | 2.743 | 131.064 | 67.056 |
| 457 | 18" | 14.021 | 12.192 | 9.144 | 6.401 | 30.480 | 33.528 | 3.109 | 152.400 | 76.200 |
| 508 | 20" | 15.850 | 13.106 | 10.363 | 7.010 | 33.528 | 36.576 | 3.658 | 170.688 | 85.344 |
| 559 | 22" | 17.678 | 15.240 | 11.278 | 7.620 | 39.624 | 42.672 | 3.962 | 185.920 | 94.488 |
| 610 | 24" | 19.202 | 16.154 | 12.192 | 8.534 | 42.672 | 45.720 | 4.267 | 207.264 | 103.632 |
| 762 | 30" | 24.079 | 20.726 | 15.240 | 10.668 | 50.292 | 57.912 | 5.182 | 262.128 | 128.016 |
| 914 | 36" | 28.651 | 24.079 | 18.288 | 13.106 | 60.960 | 67.056 | 6.096 | 304.000 | 152.400 |
| 1067 | 42" | 36.576 | 28.956 | 21.846 | 15.240 | 73.152 | 79.248 | 7.010 | 365.760 | 182.880 |
| 1219 | 48" | 41.148 | 33.528 | 24.994 | 17.676 | 83.820 | 91.440 | 7.925 | 426.720 | 207.264 |

Además de las válvulas indicadas en la tabla hoy muchos otros tipos, algunos de los cuales se muestran a continuación.

Una fórmula para determinar la pérdida de carga a través de las válvulas es la siguiente.



$$h = f \frac{V^2}{2g}$$

h = pérdida de carga en mts.
 V = velocidad en mts./seg.
 f = coeficiente de fricción.

| VALV. | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 |
|-------|------|------|------|------|------|
| *f* | 3.9 | 3.4 | 2.7 | 2.5 | .80 |

Figura 6.23b. Pérdida de carga en válvulas y conexiones.

Para la protección del equipo de bombeo y de la tubería de conducción, se deben considerar los efectos producidos por el fenómeno denominado Golpe de Ariete.

Se denomina GOLPE DE ARIETE a la variación de presión en una tubería, por encima o por debajo de la presión normal de operación, ocasionada por rápidas fluctuaciones en el gasto producidas por la apertura o cierre repentino de una válvula o por el paro o arranque de las bombas, ya sea en condiciones de operación normales o por una interrupción de la energía eléctrica, cuando ésta se utiliza en los motores que impulsan a las bombas.

Al cerrar la admisión de agua con la válvula P de la Figura 6.24, se origina un golpe de ariete positivo, como indica la línea piezométrica AB. Al cesar el movimiento de cierre termina la sobrepresión positiva AB y oscila hasta adquirir una posición negativa AC con respecto a la línea de carga estática, aproximadamente a igual distancia por debajo de ésta que la AB. Y entre estas dos líneas va oscilando la presión disminuyendo de intensidad hasta que la oscilación queda amortiguada por el rozamiento, remolinos y cambio de dirección de los filetes líquidos.

Cuando se abre la admisión, se crea el golpe de ariete negativo que indica la línea piezométrica de la Figura 6.25. Después que cesa el movimiento de apertura, la presión negativa GF, oscila hasta la positiva GH, elevándose ésta por encima de la línea de carga estática, a menor distancia que la GF queda de ésta.

La línea de conducción debe proyectarse para resistir en cada punto una presión interna correspondiente a la máxima que produce el golpe de ariete positivo AB (Figura 6.24). Además la presión negativa AC (Figura 6.24) o GF (Figura 6.25) no debe quedar nunca por debajo, en ningún punto, de la arista superior del tubo; pues si se produjese en el punto K, que está más expuesto, un vacío parcial, habría peligro de aplastamiento si la tubería no tiene resistencia para soportar la presión exterior atmosférica.

Existen métodos analíticos y gráficos para el cálculo de la sobrepresión por "golpe de ariete" pero un análisis minucioso de este fenómeno, generalmente complejo y laborioso, escapa a los alcances de estos apuntes.

Para el cálculo de sobrepresión por golpe de ariete, se ha adoptado la fórmula de N. Joukovsky (1898) que se escribe a continuación. Con esta fórmula se obtiene el valor máximo que puede adquirir esta sobrepresión, ya que fue deducida considerando las condiciones más críticas para el cierre de una válvula, esto es, aceptando que la máxima sobrepresión se verifica al instante de la primera fase del fenómeno y que el tiempo de cierre es:

$$T = \frac{2L}{a} \text{ tiempo de cierre}$$

La fórmula es

$$h_i = \frac{145 v}{\sqrt{1 + \frac{EaD}{Et e}}} \text{ para } T = \frac{2L}{a} \quad (6.15)$$

Representando:

h_i = sobrepresión de inercia por golpe de ariete en m

v = velocidad del agua en la tubería en m/s

E_a = módulo de elasticidad del agua, en kg/cm^2

D = diámetro interior de la tubería en cm

e = espesor de la tubería en cm

E_t = módulo de elasticidad del material de la tubería en kg/cm^2

L = Longitud de la tubería en m

a = celeridad de la onda de presión en m/s

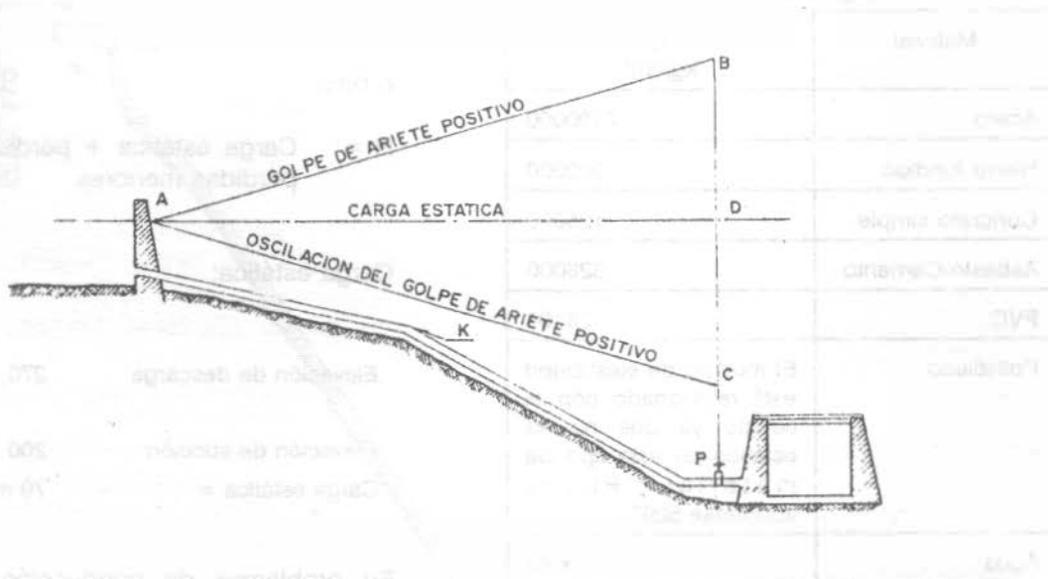


Figura 6.24. Oscilación de la línea piezométrica de una tubería en un golpe de ariete.



Figura 6.25. Oscilación de la línea piezométrica de una tubería en un golpe de ariete negativo.

En el cuadro 6.11 se presentan los módulos de elasticidad para algunos materiales.

Cuadro 6.11 Módulos de elasticidad para algunos materiales

| Materiai | E kg/cm ² |
|-----------------|---|
| Acero | 2100000 |
| Hierro fundido | 930000 |
| Concreto simple | 125000 |
| Asbesto-Cemento | 328000 |
| PVC | 28100 |
| Polietileno | El módulo de elasticidad está relacionado con el tiempo ya que no es estático en este tipo de material. Puede adoptarse 5200. |
| Agua | 20670 |

Ejemplo 6.5

Sin hacer consideraciones económicas, efectúese el cálculo hidráulico de la línea de conducción de A a B que se muestra en al figura 6.26, utilizando para la tubería fibro-cemento.

El gasto máximo diario es de 1000 l/s ($Q_{MD} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$) y el bombeo es continuo durante las 24 horas del día.

Solución.

A partir del enunciado y de la Figura 6.26, se tienen los siguientes datos:

- Elevación de la succión 200 m
- Elevación de la descarga 270 m
- Gasto total 1 m³/s
- (ya que el bombeo es continuo)
- Longitud de la descarga 2500 m

De acuerdo con los datos anteriores, las cargas

de presión normales serán aproximadamente las siguientes (ecuación 6.13)

$$H = h_f + h_o + h_t + h_s$$

o bien

$$H = \text{Carga estática} + \text{pérdidas mayores} + \text{pérdidas menores}$$

Carga estática:

- Elevación de descarga 270
- Elevación de succión 200
- Carga estática = 70 m

En problemas de conducción de agua, se acostumbra expresar las presiones en kg/cm², ya que en estas unidades está especificada la presión interna de trabajo máxima de los tubos de fibro-cemento y PVC. Para ello se presentan las siguientes relaciones:

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 10 \text{ m de columna de agua} = 1 \text{ atm métrica}$$

$$0.10 \text{ kg/cm}^2 = 1 \text{ m de columna de agua} = 3.28 \text{ pies}$$

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 14.223 \text{ lb/pulg}^2 = 32.808 \text{ pies}$$

Entonces, Carga estática = 70 m de columna de agua, implica Presión = 7 kg/cm²

Pérdidas mayores (hf)

Proponiendo una velocidad en la tubería de 2.5 m/s (permisible de acuerdo al cuadro 6.10), se tiene que el diámetro de la tubería deberá ser:

$$\text{Para } Q = 1.0 \text{ m}^3/\text{s} \text{ y } v = 2.50 \text{ m/s}$$

$$\text{siendo: } Q = vA$$

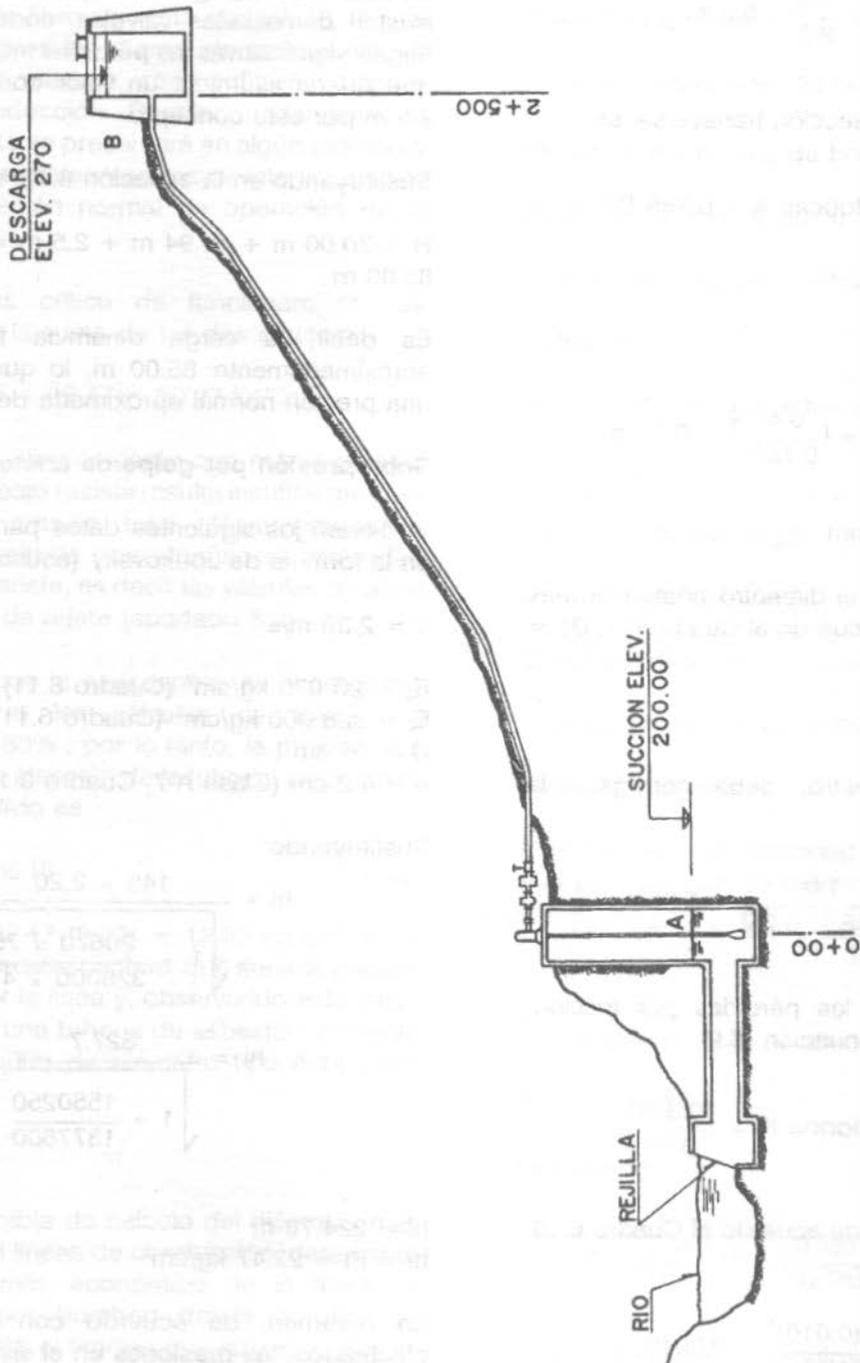


Figura 6.26. Ilustración del ejemplo 6.3 (croquis fuera de escala).

se tiene que:

$$A = \frac{Q}{v} = \frac{1.0}{2.5} = 0.4 \text{ m}^2$$

Como el área de la sección transversal es

$$A = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ entonces } A = 0.785 D^2$$

de donde

$$D = \left(\frac{A}{0.785}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{0.4}{0.785}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.71 \text{ m}$$

$$D = 0.71 \text{ m} = 710 \text{ mm}$$

Para fibro-cemento, el diámetro comercial más aproximado es, de acuerdo al Cuadro 6.1, $D_c = 750 \text{ mm}$

$$D_c = 750 \text{ mm}$$

Al usar este diámetro, debe corregirse la velocidad

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1.0}{0.785 \times 0.75^2} = 2.26 \text{ m/s}$$

Para el cálculo de las pérdidas por fricción, puede aplicarse la ecuación (6.9)

$$h_f = K L Q^2 \text{ donde } K = \frac{10.3 n^2}{D^{16/3}}$$

Para fibro-cemento, de acuerdo al Cuadro 6.10, $n = 0.010$

$$K = \frac{10.3 (0.010)^2}{0.75^{16/3}} = 0.0048$$

y

$$h_f = 0.0048 (2500)(1)^2 = 11.94 \text{ m}$$

Pérdidas menores (hs)

De acuerdo a la Figura 6.26, se observa que no existen demasiadas válvulas, codos, etc., que hagan significativas las pérdidas menores, por lo que puede asumirse un valor conservador de 2.5 m por este concepto.

Sustituyendo en la ecuación 6.13, se tiene:

$$H = 70.00 \text{ m} + 11.94 \text{ m} + 2.5 \text{ m} = 84.44 \text{ m} \approx 85.00 \text{ m}$$

Es decir, la carga dinámica total es de aproximadamente 85.00 m, lo que equivale a una presión normal aproximada de 8.5 kg/cm².

Sobrepresión por golpe de ariete

Se tienen los siguientes datos para sustituirlos en la fórmula de Joukovsky (ecuación 6.15):

$$V = 2.26 \text{ m/s}$$

$$E_p = 20\,670 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Cuadro 6.11)}$$

$$E_t = 328\,000 \text{ kg/cm}^2 \text{ (Cuadro 6.11)}$$

$$D = 75 \text{ cm}$$

$$e = 4.2 \text{ cm (Clase A-7, Cuadro 6.1)}$$

Sustituyendo:

$$h_i = \frac{145 \times 2.26}{\sqrt{1 + \frac{20670 \times 75}{328000 \times 4.2}}}$$

$$h_i = \frac{327.7}{\sqrt{1 + \frac{1550250}{1377600}}}$$

$$h_i = 224.78 \text{ m}$$

$$h_i = P_i = 22.47 \text{ kg/cm}^2$$

En resumen, de acuerdo con los cálculos efectuados, las presiones en el sistema son:

$$\text{Presión normal } P_n = 85 \text{ m} = 8.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Sobrepresión por G.A. (} P_i \text{)} = 224.78 \text{ m} = 22.47 \text{ kg/cm}^2$$

De acuerdo a los valores anteriores se observa de que si no se presentara el golpe de ariete, una tubería de fibro-cemento clase A-10, la cual resiste una presión interna de trabajo de 10 kg/cm² como máximo, sería suficiente para la línea de conducción. Desafortunadamente, el golpe de ariete se presentará en algún momento y, como puede verse con mayor intensidad que la misma presión normal de operación de la tubería.

El caso más crítico de funcionamiento se presenta con la suma de los dos efectos:

$$P_{TOTAL} = 8.5 + 22.47 = 30.97 \text{ kg/cm}^2$$

La tubería de fibro-cemento que mayor presión interna de trabajo resiste resulta insuficiente para soportar la presión total. Afortunadamente, existen dispositivos que atenúan la intensidad del golpe de ariete, es decir las válvulas de alivio contra golpe de ariete (apartado 6.2).

De acuerdo con la experiencia, se acostumbra considerarle a las válvulas de alivio una eficiencia de 80% , por lo tanto, la presión que servirá para la elección de la tubería, empleando válvulas de alivio es

$$P = P_n + 20\% P_i \tag{6.16}$$

$P_t = 8.5 + 22.47 (0.20) = 12.99 \text{ kg/cm}^2 \approx 13 \text{ kg/cm}^2$ aproximadamente que sería la presión soportada por la línea y, observando este valor, se emplearía una tubería de asbesto - cemento de 750 mm (30") de diámetro tipo A-14 (14.0 kg/cm²).

Ejemplo 6.6

Utilizando la tabla de cálculo del diámetro más económico en líneas de conducción, determinar el diámetro más económico de la línea de conducción por bombeo desde la obra de captación hasta el tanque regularizador que se muestra en la Figura 6.27. Analizar tres diámetros de tubería y escoger el de menor costo global.

Datos

Gasto Máximo Diario $Q_{MD} = 375 \text{ l/s}$

Bombeo continuo las 24 horas

Eficiencia del equipo de bombeo $\eta = 70 \%$

Costo por K.W.H. \$ 20.00

Precios Unitarios (ver cuadro 6.12).

Solución

De acuerdo con los datos anteriores se tiene:

Carga estática:

Elevación de descarga 244.70

Elevación de succión 200.00

Carga estática = 44.70 m

Esta carga implica una presión $P = 4.47 \text{ kg/cm}^2$

Pérdidas mayores

Proponiendo una velocidad en la tubería de 2.0 m/s para calcular un diámetro, se tiene:

$$Q = vA \Rightarrow A = \frac{Q}{v} = \frac{0.375}{2} = 0.1875 \text{ m}^2$$

Como el área de la sección transversal es

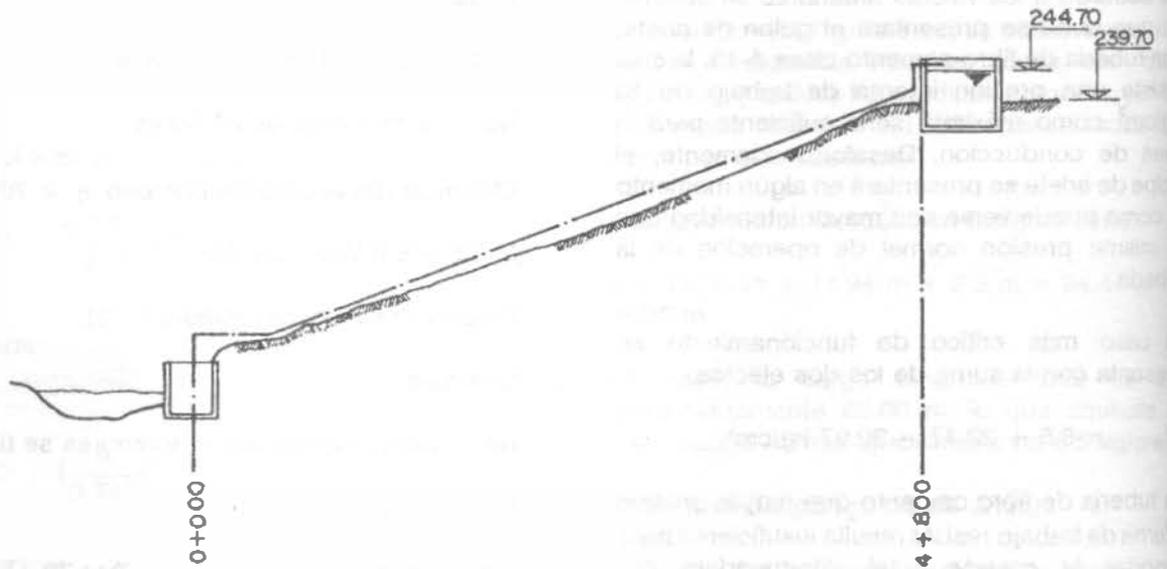
$$A = 0.785 D^2$$

Despejando

$$D = \left(\frac{A}{0.785} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{0.1875}{0.785} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.489 \text{ m}$$

$D = 0.489 \text{ m} = 19.24 \text{ pulgadas}$

Pero este es un diámetro teórico; el diámetro comercial más aproximado es $D_c = 500 \text{ mm}$ (20 pulgadas). Naturalmente que al usar este diámetro la velocidad será diferente a la supuesta en un principio. esto es



SUCCION, ELEVACION 200.00
 DESCARGA, ELEVACION 244.70
 EXCAVACION EN MATERIAL TIPO I . 60% DE LA LINEA DE CONDUCCION
 EXCAVACION EN MATERIAL TIPO II. 25% DE LA LINEA DE CONDUCCION
 EXCAVACION EN MATERIAL TIPO III. 15% DE LA LINEA DE CONDUCCION

Figura 6.27. Esquema del ejemplo 6.4.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.375}{0.785 (0.5)^2} = 1.91 \text{ m/s}$$

es decir, $A = 0.196 \text{ m}^2$

Para el cálculo de las pérdidas mayores se emplea la ecuación

$$h_f = KLQ^2, \text{ donde } K = \frac{10.3 n^2}{D^{16/3}}$$

Longitud $L = 4800 \text{ m}$

$$Q^2 = 0.1406$$

Si se usa tubería de fibro-cemento, el coeficiente de fricción de Manning correspondiente es $n = 0.010$, así;

$$K = \frac{10.3 (0.010)^2}{0.5^{16/3}} = 0.04152$$

$$h_f = 0.04152 (4800)(0.1406) \\ h_f = 28.02 \text{ m}$$

La carga dinámica total, despreciando las pérdidas secundarias, será:

$$H = \text{Carga Estática} + \text{Pérdidas mayores} = 44.70 + 28.02$$

$$H = 72.72 \text{ m}$$

La potencia del equipo de bombeo que debe ser suministrada es

$$P = \frac{\gamma Q H}{76 \eta} \text{ con } Q \text{ en } \text{m}^3/\text{s}$$

CALCULO DEL DIAMETRO MAS ECONOMICO EN LINEAS DE CONDUCCION

OBRA: _____ CALCULO: _____ FECHA: _____
 REVISO: _____ FECHA: _____

| Diámetro Nom | Area A m ² | Costo en m ³ /seg (a) | Velocidad en m/seg (v) | Long. Línea en m (L) | (Q ²) | Cost. fricción Manning n | Constante de Manning (K) | Pérdida (m) en 100 m | % de otros p.d. | h _f = 0,17 % h | Q en l.p.s. (0 en l.p.s.) | 76 h η = 70% | H P = $\frac{Q \cdot h_f}{76 \eta}$ | |
|--------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|--------------|-------------------------------------|--------|
| m | Pulg | | | | | | | | | | | | | |
| 450 | 18 | 0.1590 | 0.375 | 2.36 | 4800 | 0.1406 | 0.000 | 0.01284 | 49.16 | 39.7+5.0 | 93.86 | 35,197.5 | 53.2 | 661.60 |
| 500 | 20 | 0.1963 | 0.375 | 1.91 | 4800 | 0.1406 | 0.000 | 0.04832 | 28.02 | 39.7+5.0 | 72.72 | 27,270.0 | 53.2 | 512.59 |
| 600 | 24 | 0.2827 | 0.375 | 1.33 | 4800 | 0.1406 | 0.000 | 0.01570 | 10.60 | 39.7+5.0 | 55.30 | 20,737.5 | 53.2 | 389.80 |

GOLPE DE ARIETE

| Presión de trabajo de la tubería Kg/cm ² | Diám. Nom (d) cm | espesor pared tubo (e) cm | V en m/seg | 145V | E _d | E ₁₀ | $\frac{E_d}{E_{10}}$ | $1 + \frac{E_d}{E_{10}}$ | $\sqrt{1 + \frac{E_d}{E_{10}}}$ | Subpresión h = $\frac{145V}{11 \cdot \frac{E_d}{E_{10}}}$ | Subpresión absorida por tubería RP = 80% h | Subpresión sobre de por tubería 20% h | Carga normal de operación (v.m.) | Presión total a operación |
|---|------------------|---------------------------|------------|--------|----------------|-----------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------|---|--|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 14 | 45 | 5.0 | 2.36 | 342.2 | 930,150 | 1690,000 | 0.57 | 1.57 | 1.25 | 273.35 | 218.68 | 54.67 | 93.86 | 198.53 |
| 14 | 50 | 5.8 | 1.91 | 276.95 | 1033,500 | 1902,400 | 0.54 | 1.54 | 1.24 | 223.34 | 178.67 | 44.67 | 72.72 | 117.39 |
| 10 | 60 | 4.9 | 1.33 | 192.85 | 1240,200 | 1607,200 | 0.77 | 1.77 | 1.33 | 144.88 | 115.90 | 28.97 | 55.30 | 84.27 |

V = Velocidad normal del agua (m/seg) - E = Módulo de elasticidad del acero (20 570 Kg/cm²) - E₁₀ = Módulo de elasticidad de los bronceos del tubo (para asbesto cemento = 328 000, para acero = 2 100 000 Kg/cm²)

| CONCEPTO | Diámetro: 450 mm (18") Clase A-19 | | | | Diámetro: 500 mm (20") Clase A-19 | | | | Diámetro: 600 mm (24") Clase A-10 | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------|----------------|
| | Cantidad | Unid. | P.U. | Importe \$ | Cantidad | Unid. | P.U. | Importe \$ | Cantidad | Unid. | P.U. | Importe \$ |
| Excav. Mal clase A 60% | 4810 | m ³ | 852.40 | 4'100,044.00 | 5184 | m ³ | 852.40 | 4'418,841.60 | 6192 | m ³ | 852.40 | 5'278,060.80 |
| Excav. Mal clase B 25% | 2004 | m ³ | 1135.15 | 2'274,840.60 | 2160 | m ³ | 1135.15 | 2'451,924.00 | 2580 | m ³ | 1,135.15 | 2'928,687.00 |
| Excav. Mal clase C 15% | 1202 | m ³ | 5610.00 | 6'743,220.00 | 1296 | m ³ | 5610.00 | 7'270,560.00 | 1548 | m ³ | 5,610.00 | 8'684,280.00 |
| Piontilla adonada | 552 | m ³ | 1363.20 | 752,486.40 | 376 | m ³ | 1363.20 | 512,782.40 | 624 | m ³ | 1,363.20 | 850,636.80 |
| Inst. junta y prueba tubería | 4800 | m | 1722.00 | 8'265,600.00 | 4800 | m | 2020.00 | 9'696,000.00 | 4800 | m | 2,182.00 | 10'473,600.00 |
| Rejilla compactada | 3408 | m ³ | 973.20 | 3'316,665.60 | 3681 | m ³ | 973.20 | 3'582,349.20 | 4275 | m ³ | 973.20 | 4'160,490.00 |
| Rejilla de sifteo | 3267 | m ³ | 340.80 | 1'113,393.60 | 3410 | m ³ | 340.80 | 1'162,128.00 | 3998 | m ³ | 340.80 | 1'362,518.40 |
| Atraques de concreto (c=90) | | m ³ | | | | m ³ | | | | m ³ | | |
| Costo de tubería | 4800 | m | 34,500.00 | 165'600,000.00 | 4800 | m | 41'400.00 | 198'720,000.00 | 4800 | m | 32,300.00 | 155'040,000.00 |
| Acarreo | 789 | | 942.50 | 743,632.50 | 973 | | 942.50 | 917,051.50 | 1423 | | 942.50 | 1'341,177.50 |
| | | | | 192'909,882.70 | | | | 229'004,058.50 | | | | 190'119,390.50 |
| Costo total de conducción (5) | | | | | | | | | | | | |

RESUMEN

| Presión de trabajo tubería Kg/cm ² | Diámetro nominal | | H P (1) | H W h (2) | Costo por hora bombeo \$ (3) | Costo anual de bombeo \$ (4) | Costo total de conducción (5) | Carga anual de amortización (conducción) (15 años al 25% anual) (6) | Costo anual de bombeo y de operación de 365 días (7) |
|---|------------------|------|---------|-----------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|--|
| | mm | Pulg | | | | | | | |
| 14 | 450 | 18 | 661.60 | 493.35 | 9867.00 | 86'434,920.00 | 192'909,882.70 | 49'986,230.08 | 136'421,150.10 |
| 14 | 500 | 20 | 512.59 | 382.24 | 7644.80 | 66'468,448.00 | 229'004,058.50 | 59'338,841.63 | 126'307,292.60 |
| 10 | 600 | 24 | 389.80 | 290.67 | 5813.47 | 50'926,060.27 | 190'119,390.50 | 49'263,116.11 | 100'189,226.40 |

NOTA - El diámetro más económico está dado por el menor costo determinado en la columna (7) Referir: Ing. Laura Reynoso Torres

Cuadro 6.12 b. Cálculo del Diámetro más económico para el ejemplo 6.6.

y si el gasto se expresa en l/s, entonces P se puede escribir:

$$P = \frac{QH}{76 \eta} \quad (6.17)$$

hecho en esta forma:

$$QH = 375 (72.72) = 27270$$

$$\eta = 70 \%$$

$$76 \eta = 76 (0.70) = 53.20$$

$$P = \frac{27270}{53.20} = 512.59 \text{ H.P.}$$

Sobrepresión por golpe de ariete

Se tienen los siguientes datos para sustituirlos en la fórmula de Joukovsky (ecuación 6.15)

$$v = 1.91 \text{ m/s}$$

$$E_a = 20670 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_t = 328 \text{ 000 kg/cm}^2$$

$$d = 50 \text{ cm}$$

e = 5.8 cm, de espesor de la pared del tubo de fibro-cemento clase A-14

La fórmula es

$$h_i = \frac{145 v}{\sqrt{1 + \frac{E_a d}{E_t e}}}$$

$$145 v = 145 (1.91) = 276.95$$

$$E_a d = 20670 (50) = 1033500$$

$$E_t e = 328000 (5.8) = 1902400$$

$$\frac{E_a d}{E_t e} = 0.54; 1 + \frac{E_a d}{E_t e} = 1.54;$$

$$\sqrt{1 + \frac{E_a d}{E_t e}} = 1.24$$

queda

$$h_i = \frac{276.95}{1.24} = 223.34 \text{ m}$$

Sobrepresión absorbida por la válvula 80%

$$223.34 \times 0.8 = 178.67 \text{ m}$$

Sobrepresión absorbida por la tubería 20 %

$$223.34 \times 0.20 = 44.67 \text{ m}$$

La carga normal de operación (carga dinámica total) es, según hemos calculado:

$$H = 72.72 \text{ m}$$

Por lo tanto, la carga total que se puede presentar es:

$$H_T = 20\% h_i + \text{carga normal de operación}$$

$H_T = 44.67 + 72.72 = 117.39 \text{ m} = 11.74 \text{ kg/cm}^2$, por lo que ha sido correcta la elección de la tubería tipo A-14 ya que el tipo A-10 no podría resistir esta carga.

De acuerdo con lo expresado en el paso 3 del apartado 6.3.2, el problema tiene múltiples soluciones y la "mejor" se decide por condiciones económicas. El diámetro de la línea de conducción debe ser tal que haga que el costo anual de los distintos gastos sea mínimo. En el cuadro 6.12 que acompaña la resolución de este ejemplo se analizan diámetros comerciales alrededor al calculado. La secuela de cálculo para los diámetros de 450 mm (18 pulgadas) y 600 mm (24 pulgadas) es la misma que se ha desarrollado para el diámetro de 500 mm (20 pulgadas) a partir de que se definió éste como diámetro comercial apropiado.

En el cuadro mencionado se indican los precios unitarios de los diferentes conceptos y, numeradas las columnas, se indican las operaciones que deben efectuarse entre ellas.

El cálculo del volumen de excavación requiere conocer previamente el ancho y profundidad de la zanja en la que se alojará el tubo, lo cual depende de su diámetro; estos datos se obtienen del cuadro 6.14.

Para el cálculo del cargo anual de amortización (Columna 6), se multiplica el costo total de la conducción (Columna 5) por la anualidad "a" que se obtiene de la ecuación:

$$a = r + \frac{r}{(1+r)^n - 1} \quad (6.18)$$

En esta expresión, r es el interés anual y n el número de anualidades.

Para el ejemplo, r = 25% y n = 15 años; sustituyendo en la ecuación 6.18, se obtiene:

$$a = 0.259117$$

Para tasas de interés hasta del 10% puede usarse el cuadro 6.13.

El diámetro que a la luz de los cálculos resultó ser el más económico es el de 600 mm (14 pulgadas) de fibro-cemento clase A-10.

6.4 Instalación de tuberías.

Las tuberías se instalan sobre la superficie, enterradas o combinando estas dos maneras. Esto dependerá de la topografía, clase de tubería y geología del terreno, por ejemplo, en un terreno rocoso es probable que convenga llevarla superficialmente. En el tipo de instalación que se adopte, también se deben considerar otros factores relacionados con la protección de

la línea y así, una tubería que está propensa al deterioro o mal trato de personas y animales es preferible enterrarla, especialmente cuando es de fibro-cemento (cuadro 6.14). Cualquiera que sea la forma de instalación, se deberán evitar en lo posible los quiebres, tanto horizontales como verticales, con el objeto de eliminar codos y otras piezas especiales necesarias para dar los cambios de dirección. Estos quiebres aumentan las pérdidas de carga, el costo de la instalación y en ocasiones puede propiciar el confinamiento del aire mezclado con el agua.

Se acostumbra clasificar a las tuberías por la forma de instalarlas en visibles y enterradas; dependiendo de si llevan juntas de dilatación o no, se clasifican en abiertas y cerradas. En general, cuando se utilizan tuberías de acero se prefieren las visibles y abiertas.

No es por demás recordar que para la instalación de tuberías se consulten los catálogos e instructivos formados por los fabricantes, con el fin de eliminar la posibilidad de alguna falla durante la operación del sistema, causada por una instalación inadecuada. Es conveniente hacer un plano de la instalación de la línea de conducción, que indique claramente la ubicación de las válvulas de protección (Check, Alivio, Eliminadoras de aire, etc.) y control, así como codos, atraques o machones, silletas y juntas de dilatación.

Cuadro 6.13. Anualidad para reembolsar N\$ 1.00 (un nuevo peso) dentro de n años.

| ANUALIDAD PARA REEMBOLSAR N\$ 1 ⁰⁰ (UN NUEVO PESO) DENTRO DE "n" AÑOS | | | | | | | | | $a = r + \frac{r}{(1+r)^n - 1}$ a = anualidad r = interés anual n = número de anualidades | |
|---|---------------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|---|--|
| AÑOS | INTERÉS ANUAL | | | | | | | | AÑOS | |
| | 5 % | 5 1/2 % | 6 % | 6 1/2 % | 7 % | 8 % | 9 % | 10 % | | |
| 2 | 0.537806 | 0.541816 | 0.545437 | 0.548292 | 0.550302 | 0.550799 | 0.550809 | 0.578190 | 2 | |
| 3 | 0.367209 | 0.370954 | 0.374110 | 0.377576 | 0.381052 | 0.382829 | 0.382829 | 0.402119 | 3 | |
| 4 | 0.282012 | 0.284889 | 0.286891 | 0.289103 | 0.291278 | 0.291821 | 0.291821 | 0.315471 | 4 | |
| 5 | 0.230975 | 0.2324176 | 0.233796 | 0.234835 | 0.235691 | 0.235691 | 0.235691 | 0.263797 | 5 | |
| 6 | 0.197017 | 0.200179 | 0.203363 | 0.206568 | 0.209796 | 0.2116316 | 0.222820 | 0.229807 | 6 | |
| 7 | 0.172620 | 0.176984 | 0.18135 | 0.185231 | 0.188663 | 0.192072 | 0.198891 | 0.208428 | 7 | |
| 8 | 0.154722 | 0.1597854 | 0.164838 | 0.169437 | 0.173488 | 0.1774019 | 0.1868974 | 0.197444 | 8 | |
| 9 | 0.140890 | 0.146336 | 0.1477022 | 0.150237 | 0.153488 | 0.160080 | 0.166799 | 0.173641 | 9 | |
| 10 | 0.129600 | 0.132686 | 0.133869 | 0.139105 | 0.142879 | 0.148026 | 0.155820 | 0.162445 | 10 | |
| 11 | 0.120089 | 0.123097 | 0.126793 | 0.130066 | 0.133897 | 0.140076 | 0.149947 | 0.153963 | 11 | |
| 12 | 0.112825 | 0.116829 | 0.118277 | 0.122389 | 0.126869 | 0.132885 | 0.139891 | 0.146783 | 12 | |
| 13 | 0.108456 | 0.109894 | 0.112680 | 0.116283 | 0.119881 | 0.126822 | 0.133851 | 0.1407 | 13 | |
| 14 | 0.101094 | 0.104279 | 0.107395 | 0.110940 | 0.114346 | 0.121297 | 0.128433 | 0.136748 | 14 | |
| 15 | 0.096342 | 0.099626 | 0.102963 | 0.106383 | 0.109785 | 0.116830 | 0.124059 | 0.131474 | 15 | |
| 20 | 0.080243 | 0.083679 | 0.087185 | 0.090756 | 0.094399 | 0.101862 | 0.109546 | 0.117480 | 20 | |
| 25 | 0.072892 | 0.074549 | 0.076227 | 0.081981 | 0.083911 | 0.089879 | 0.101808 | 0.110188 | 25 | |
| 30 | 0.068091 | 0.068805 | 0.072649 | 0.076577 | 0.080489 | 0.086627 | 0.097338 | 0.106079 | 30 | |
| 35 | 0.061072 | 0.064675 | 0.0686974 | 0.073082 | 0.077234 | 0.085803 | 0.094836 | 0.103890 | 35 | |
| 40 | 0.288278 | 0.062320 | 0.068889 | 0.073384 | 0.079009 | 0.085889 | 0.092870 | 0.102269 | 40 | |
| 50 | 0.054777 | 0.059081 | 0.063444 | 0.067914 | 0.072480 | 0.081743 | 0.091227 | 0.100899 | 50 | |

Cuadro 6.14. Zanjas para tubería de fierro fundido y fibro-cemento.

ANCHO. - (FIG. 1)

El ancho de la zanja deberá ser de 50 cm. mas el diámetro exterior del tubo para tuberías con diámetro exterior igual o menor de 50 cm. Cuando este sea mayor de 50 cm. el ancho de la zanja será de 60 cm. más dicho diámetro. En la tabla mostrada abajo, se indica el ancho mínimo de zanjas en funcion de la profundidad, debiéndose usar este en caso de que el ancho calculado en funcion de diámetro exterior, sea menor.

PROFUNDIDAD. - (FIG. 1)

La profundidad de la excavacion será la fijada en el proyecto. Si no se hace así, la profundidad mínima será de 90 cm. mas el diámetro exterior de la tubería por instalar, cuando se trate de tuberías con diámetro exterior igual o menor de 90 cm. y, será del doble de dicho diámetro, para tuberías de diámetro exterior mayor de 90 cm. Para tuberías menores de 5 cm la profundidad mínima será de 70 cm. Si se tiene planilla apisonada, o los profundidades mencionados se agregará lo necesario para alajar dicha planilla.

FONDO. -

Deberán excavarlos cuidadosamente a mano las cavidades o conchos (Fig 2, 3 y 4) para alajar la campana o caja de los juntos de los tubos y permitir el juego en toda el contorno de los mismos y para que la tubería apoye en toda su longitud sobre el fondo de la zanja o la planilla consolidada.

RELLENO. -

Se utilizará el material extraído de los excavaciones, pero hasta 30 cm. arriba del lomo del tubo se usará tierra excenta de pedras.

| DIAMETRO NOMINAL | | Ancho | Profundidad | Volumen |
|------------------|----------|--------|-------------|---------------------|
| milímetros | pulgadas | en cm. | en cm. | por metro lineal |
| 25.4 | 1 | 50 | 70 | 0.35 m ³ |
| 50.8 | 2 | 55 | 70 | 0.39 " |
| 63.5 | 2.5 | 60 | 100 | 0.60 " |
| 76.2 | 3 | 60 | 100 | 0.60 " |
| 101.6 | 4 | 60 | 100 | 0.60 " |
| 152.4 | 6 | 70 | 110 | 0.77 " |
| 203.2 | 8 | 75 | 115 | 0.86 " |
| 254.0 | 10 | 80 | 120 | 0.96 " |
| 304.8 | 12 | 85 | 125 | 1.06 " |
| 355.6 | 14 | 90 | 130 | 1.17 " |
| 406.4 | 16 | 100 | 140 | 1.40 " |
| 457.2 | 18 | 115 | 145 | 1.67 " |
| 508.0 | 20 | 120 | 150 | 1.80 " |
| 609.6 | 24 | 130 | 165 | 2.15 " |
| 762.0 | 30 | 150 | 185 | 2.78 " |
| 914.4 | 36 | 170 | 220 | 3.74 " |



FIG. 1

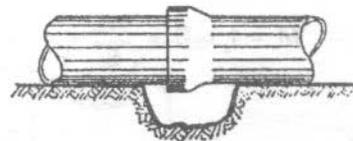


FIG. 2

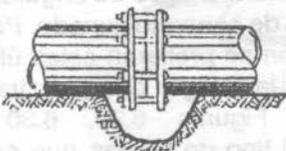


FIG. 3

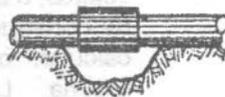


FIG. 4

6.4.1 Silletas

Ordinariamente las tuberías de acero empleadas son apoyadas sobre silletas. Para determinar el espacio máximo entre silletas de una tubería de acero, ésta se supone como una viga continua y un cantiliver formado por el extremo de la tubería que se conecta a una junta de dilatación.

En forma aproximada, el tramo de tubería entre dos apoyos se puede considerar como una viga simplemente apoyada, como se muestra en la Figura 6.28.

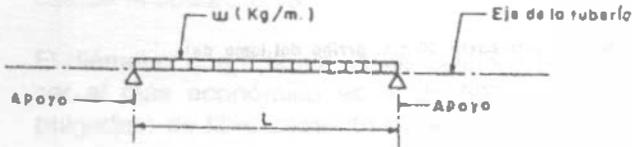


Figura 6.28.

El momento flexionante vale

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{wLL}{8} = \frac{WL}{8}, \text{ siendo } W = wL$$

Por otro lado

$$M = f_s \cdot S = \frac{WL}{8}$$

Por lo tanto

$$L = \frac{8f_s \cdot S}{W} \tag{6.19}$$

Representando

L = Longitud de la tubería entre silletas, en m.

S = Módulo de la sección de la tubería, en cm³

$$S = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 D}$$

D = Diámetro exterior

d = Diámetro interior

W = Carga total en la tubería igual a wL, en kg

w = Carga unitaria considerada (kg/m). Las cargas por valor son:

Peso propio de la tubería en kg/m y

Peso del agua dentro de la tubería en kg/m

f_s = Esfuerzo a la tensión de la tubería (1265 ó 1140 kg/cm²)

Cuando por condiciones topográficas no sea posible adoptar la máxima separación entre silletas, es claro que deberán colocarse tan cercanas como sea necesario. Esto último es frecuente en cantiles y terrenos escarpados.

Las silletas pueden quedar formadas con perfiles de hierro estructural a base de ángulos, placas y soleras, o bien de concreto armado. Por facilidad de construcción se prefieren estas últimas y se calculan con la carga que les transmite la tubería. Las Figuras 6.29, 6.30 y 6.31, representan el tipo de silletas que se emplean con más frecuencia.

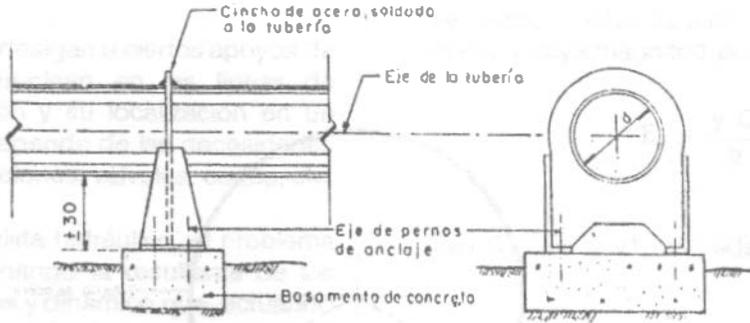
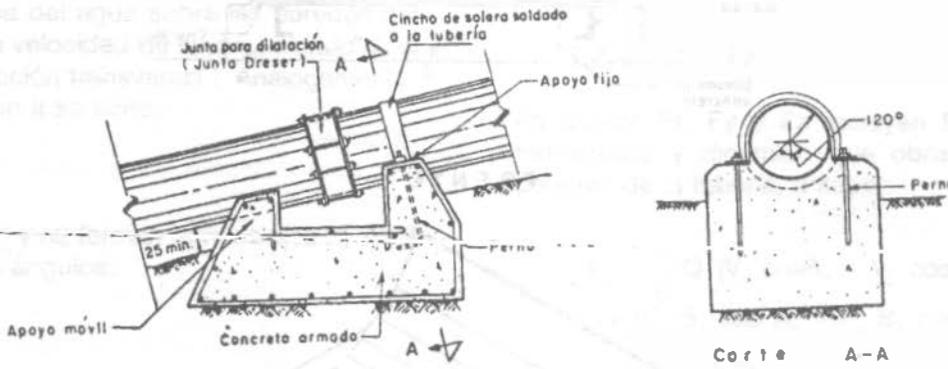


Figura 6.29. Silleta de acero para apoyo fijo.



Silleta para apoyo fijo y móvil.



Silleta para apoyo móvil.

Figura 6.30. Silletas de concreto.

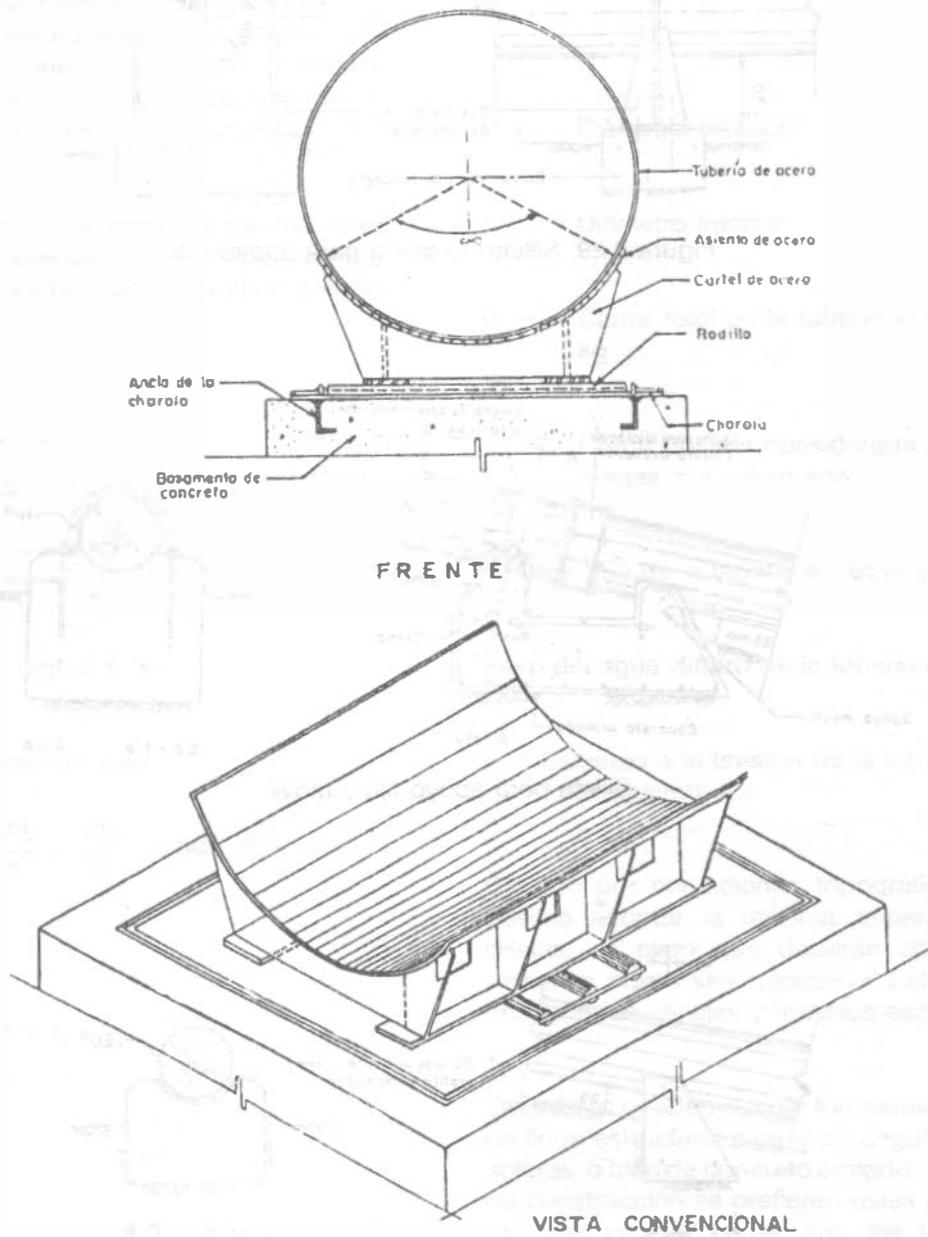


Figura 6.31. Apoyo móvil para tubería de acero.

6.4.2 Atraques

Coneste nombre se designan a ciertos apoyos de concreto que se emplean en las líneas de conducción a presión y su localización en un sistema hidráulico depende de las necesidades del proyecto: bifurcaciones, válvulas, codos, etc.

Desde el punto de vista hidráulico, el problema se resuelve determinando la resultante de los empujes hidrostáticos y dinámico que, actuando en las paredes de las tuberías, se transmiten al atraque.

En el cambio de dirección que se presenta en la Figura 6.32, se han indicado dos secciones de análisis: I y II. La sección I está sujeta a una presión interna del agua sobre las paredes del tubo P₁ y una velocidad de flujo v₁, siendo S₁ el área de la sección transversal I. Análogamente, para la sección II se tiene:

P₂, V₂ y S₂

Las fuerzas n₁ y n₂ forman con los ejes X, Y y Z los siguientes ángulos:

Angulos

Eje n1 n2

| | | |
|---|----|----|
| X | A1 | A2 |
| Y | B1 | B2 |
| Z | C1 | C2 |

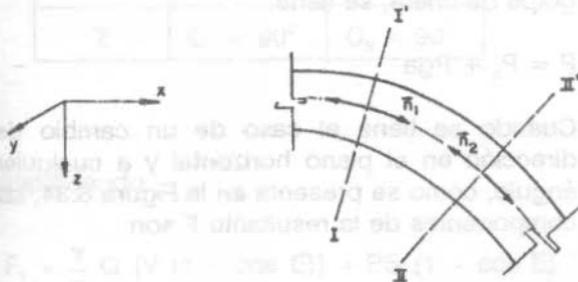


Figura 6.32.

Debido al cambio de dirección de la velocidad, se origina una fuerza dinámica que obra sobre la curva, y cuya magnitud por la ley del impulso es:

$$E_d = \frac{\gamma Q}{g} \Delta v$$

Siendo : $\Delta v = v_1 - v_2$; además

γ es el peso volumétrico del agua
 g es la aceleración de la gravedad
 E_d es el empuje dinámico

La resultante del sistema de fuerzas viene dada por

$$F = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2$$

En donde F_x, F_y y F_z incluyen los empujes hidrostático y dinámico que obran sobre las paredes de la tubería, a saber:

$$F_x = \frac{\gamma}{g} Q (V_1 \cos A_1 - V_2 \cos A_2) + (P_1 S_1 \cos A_1 - P_2 S_2 \cos A_2)$$

$$F_y = \frac{\gamma}{g} Q (V_2 \cos B_1 - V_2 \cos B_2) + (P_1 S_1 \cos B_1 - P_2 S_2 \cos B_2)$$

$$F_z = \frac{\gamma}{g} Q (V_1 \cos C_1 - V_2 \cos C_2) + (P_1 S_1 \cos C_1 - P_2 S_2 \cos C_2) + P$$

donde el primer sumando es el empuje dinámico y el segundo es el empuje hidrostático.

Para un cambio de dirección sobre el plano, a 90° y sin cambio de la sección transversal, (Figura 6.33) se tiene misma área y misma velocidad en cada sección:

$$S_1 = S_2 = S$$

$$V_1 = V_2 = V$$

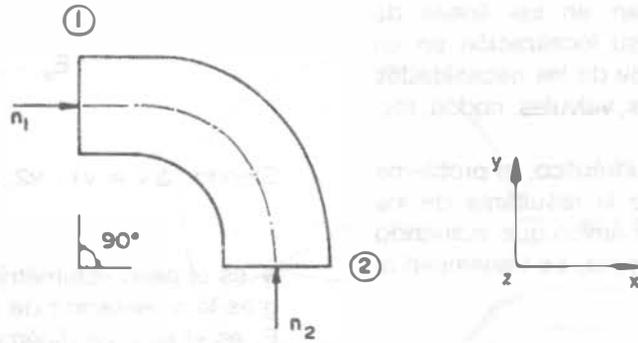


Figura 6.33.

y los ángulos que forman las fuerzas n_1 y n_2 con los ejes X, Y y Z son:

| | n_1 | n_2 |
|-----|------------------|------------------|
| Eje | Ángulos | |
| X | $A_1 = 0$ | $A_2 = 90^\circ$ |
| Y | $B_1 = 90^\circ$ | $B_2 = 0$ |
| Z | $C_1 = 90^\circ$ | $C_2 = 90^\circ$ |

Se considera también que la pérdida local es cero, así que:

$$P_1 = P_2 = P$$

Al sustituir estos resultados en las ecuaciones de las componentes de F, se tiene:

$$F_x = \frac{\gamma}{g} QV + PS$$

$$F_y = -\frac{\gamma}{g} QV - PS$$

F_z = Peso de la tubería más el agua en la sección del ataque, como esta fuerza es benéfica para el ataque, generalmente se

desprecia.

La resultante de estas fuerzas es horizontal y hacia afuera de la curav. Esta resultante debe ser contrarrestada por el peso del ataque. Se tiene:

$$F = F_x^2 + F_y^2$$

$$F = \left(\frac{\gamma}{g} QV + PS\right)^2 + \left(-\frac{\gamma}{g} QV - PS\right)^2$$

$$F = 2 \left(\frac{\gamma}{g} QV + PS\right)$$

El valor más crítico de F, es cuando se presente la sobrepresión por golpe de ariete. Llamando P_n a la presión normal y P_{ga} a la presión debida al golpe de ariete, se tiene:

$$P = P_n + P_{ga}$$

Cuando se tiene el caso de un cambio de dirección en el plano horizontal y a cualquier ángulo, como se presenta en la Figura 6.34, las componentes de la resultante F son:

$$F_x = F_1 = \frac{\gamma}{g} Q (V - V \cos E) + (PS - PS \cos E)$$

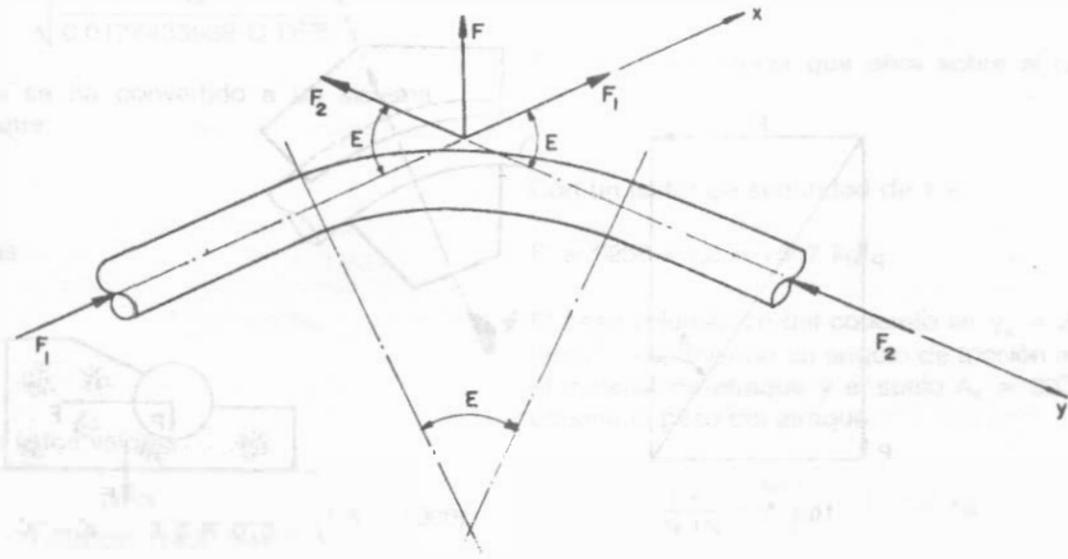


Figura 6.34.

$$F_y = F_z = \frac{\gamma}{g} Q (V \cos E - V) + (PS \cos E - PS)$$

Esto se debe a que los ángulos con respecto a X, Y y Z son:

| Fuerza | F ₁ | F ₂ |
|--------|----------------------|----------------------|
| Eje | Ángulos | |
| X | A ₁ = 0 | A ₂ = E |
| Y | B ₁ = E | B ₂ = 0 |
| Z | C ₁ = 90° | C ₂ = 90° |

En fin:

$$F = F_{12} + F_{22}$$

$$F = 2\left(\frac{\gamma}{g} QV + PS\right) \sin \frac{E}{2} = 2S \left(\frac{\gamma}{g} V^2 + P\right) \sin \frac{E}{2}$$

En la Figura 6.35 P₁ es el peso del atraque de concreto. En concreto ciclópeo $\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$. P es el peso de la sección de tubería llena de agua, de tal forma que debe cumplirse la siguiente inecuación:

$$P + P_1 \geq \frac{F}{\tan A_A}, \text{ donde } A_A > A \text{ para que no haya deslizamiento}$$

Siendo A_A el ángulo de fricción entre el material de atraque y el terreno. Para este caso A_A = 30°. Generalmente se emplea un factor de seguridad de 1.2 en el diseño de los atraques.

simplificando

$$F_1 = \frac{\gamma}{g} Q [V (1 - \cos E)] + PS (1 - \cos E)$$

$$F_2 = \frac{\gamma}{g} Q [-V (1 - \cos E)] - PS (1 - \cos E)$$

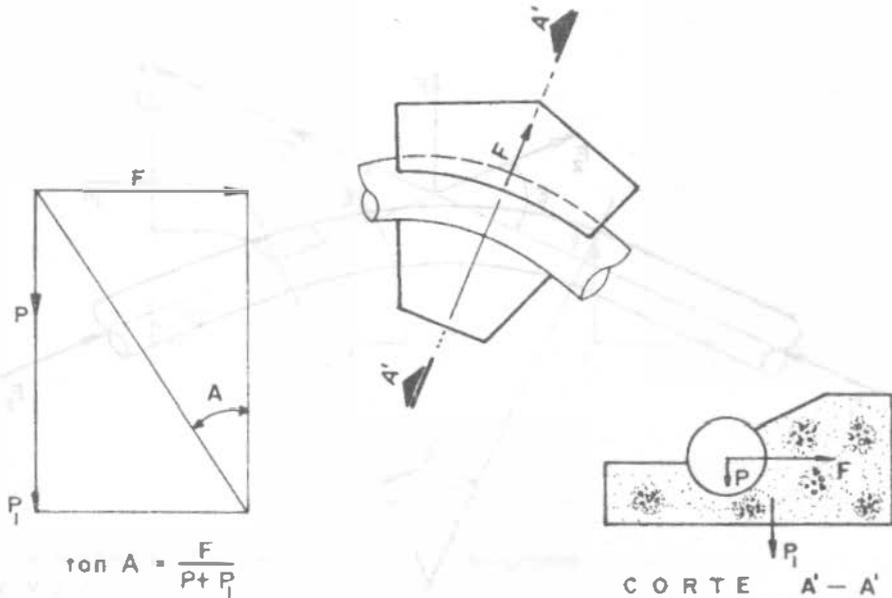


Figura 6.35.

Ejemplo 6.7

En una línea de conducción se ha instalado un codo de 45°, de 24 pulgadas de diámetro. La tubería conduce un gasto de 453 l/s. El codo se encuentra localizado a 1.8 km aguas abajo de un tanque que tiene una carga piezométrica de 33 m. El coeficiente de capacidad hidráulica de la tubería es $C = 140$. Determinar la fuerza resultante producida por la presión del agua en el codo para ser absorbida por medio de un atraque.

Solución

Como se definió antes

$$F = 2S \left(P + \frac{\gamma V^2}{g} \right) \sin \frac{E}{2} \quad (6.20)$$

Donde:

F = Fuerza total sobre el codo en kg

S = Area de la sección transversal en m^2

P = Presión en la tubería (incluyendo la debida

al golpe de ariete en caso de presentarse) en kg/m^2

V = Velocidad del agua en la tubería en m/s

E = Angulo de deflexión de la tubería

g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2)

En nuestro ejemplo $D = 24 \text{ pulgadas} = 0.6096 \text{ m}$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.6096)^2}{4} = 0.292 \text{ m}^2$$

$$Q = 453 \text{ l/s} = 0.453 \text{ m}^3/\text{s}$$

Así que

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.453}{0.292} = 1.55 \text{ m/s}$$

Presión interior de la tubería = carga piezométrica - pérdidas por fricción

Con la fórmula de Hazen y Williams:

$$h_f = \sqrt[0.54]{\frac{Q}{0.0177435938 C D^{2.63}}}$$

Esta fórmula se ha convertido a un sistema mixto, en el que

$$Q = \text{l/s}$$

$$D = \text{pulgadas}$$

$$L = \text{metros}$$

$$C = 140$$

Sustituyendo estos valores:

$$h_f = \sqrt[0.54]{\frac{453}{0.0177435938 (140) (24)^{2.63}}} (1.8 \times 1000)$$

$$h_f = 5.25 \text{ m}$$

Luego, la presión en la tubería (no se considera el golpe de ariete) es:

$$P = 33 - 5.25 = 27.75 \text{ m} = 27750 \text{ kg/m}^2$$

$$F = 2(0.292)\left[(27750) + \left(\frac{1000 \times 1.55^2}{9.81}\right)\right] \text{ sen } \frac{45}{2}$$

$F = 6256 \text{ kg}$; fuerza que obra sobre el tubo, hacia afuera.

Con un factor de seguridad de 1.2

$$F' = 6256 \times 1.2 = 7507 \text{ kg}$$

El peso volumétrico del concreto es $\gamma_c = 2400 \text{ kg/m}^3$ y suponiendo un ángulo de fricción entre el material de atraque y el suelo $A_A = 30^\circ$, se obtiene el peso del atraque.

$$P = \frac{7507}{\tan 30^\circ} = 13002 \text{ kg}$$

y el volumen de concreto necesario:

$$V_c = \frac{13002}{2400} = 5.42 \text{ m}^3 \text{ de concreto}$$

Problemas

- 6.1. En la Figura P-6.1 se presenta el trazo alimétrico de una línea de conducción que parte de un dique con toma directa, cuyo nivel se encuentra a la altura 76.15 m y su extremo final descarga al nivel 20.67. A lo largo del trayecto se ha previsto una derivación de 10 l/s en el punto 11. El gasto total extraído del dique toma es de 50 l/s. Se requiere contar con una presión mínima de 3 kg/cm² en los puntos 11 y 22 de la línea para proyectos posteriores. Determinar los diámetros de la línea D_1 y D_2 adecuados para satisfacer la condición anterior, considerando que la tubería será de fibrocemento. Trazar la línea piezométrica de la solución adoptada en equilibrio dinámico, y la clase de tubería a utilizar en condiciones de equilibrio estático.
- 6.2. Con respecto al problema 6.1, resuelva el tramo 1-11 empleando dos diámetros.
- 6.3. Diseñar la línea de conducción y la de alimentación a la red de distribución cuyo trazo alimétrico se muestra en la Figura P-6.2, determinando:
- Diámetro comercial de la tubería de fibrocemento en la línea de conducción y de PVC en la línea de alimentación a la red
 - Potencia necesaria del equipo de bombeo
 - Clase de tubería a usar

d. Cargo anual de bombeo, si el costo del KW hora es de N\$ 0.50

La carga disponible en la entrada a la red de distribución debe ser de 30 m para garantizar presión adecuada en todos los puntos de la zona de servicio.

Se tienen los siguientes datos generales:

- . Población del último censo: 11,182 habitantes
- . Población del penúltimo censo: 8,375 habitantes
- . Crecimiento demográfico del tipo geométrico
- . Periodo económico de diseño: 15 años
- . Clima templado
- . Coeficientes de variación diaria y horaria, 1.2 y 1.5, respectivamente
- . Horario de bombeo: de 6:00 a 18:00 horas
- . Velocidad aproximada en la línea de conducción por impulsión a bombeo: 1.5 m/s
- . Pérdidas secundarias: 10% h_f

Los datos del pozo son los siguientes:

- . Nivel estático: cota 636 m
- . El pozo es totalmente penetrante (profundidad de 80 m)
- . Diámetro: 61 cm
- . Coeficiente de transmisibilidad $4.35 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- . Radio de influencia: 1500 m
- . Acuífero confinado

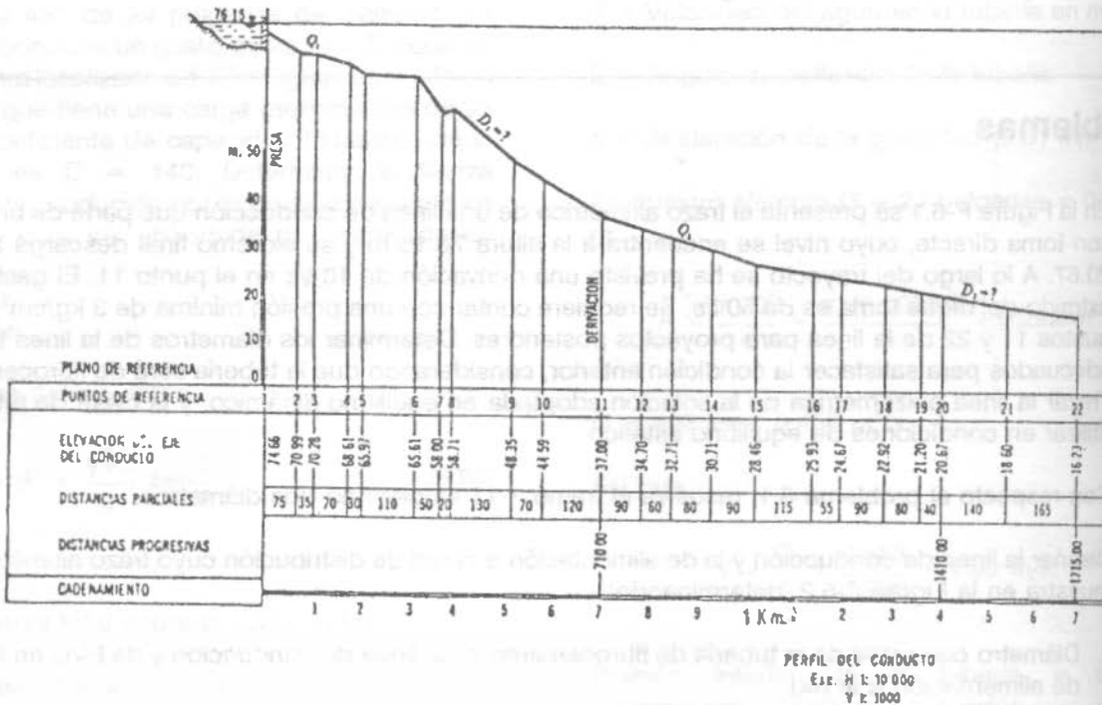
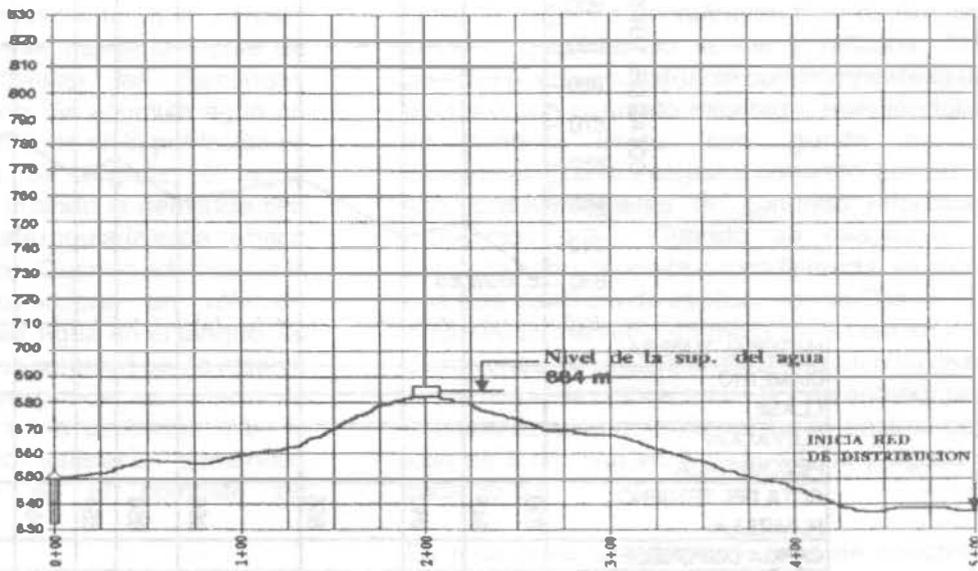


Figura P-6.1

- 6.4 Diseñe la línea de conducción cuyo trazo altimétrico se muestra en la Figura P-6.3, considerando fibrocemento para el material de la tubería y una velocidad aproximada a 1.5 m/s. El gasto de diseño es de 270 l/s.
- 6.5 Resuelva el Problema 6.4 considerando que toda la tubería será de PVC.
- 6.6 Se desea bombear agua entre dos puntos, los cuales tienen una diferencia de niveles de 70 m. El gasto de diseño es de 1 m³/s, y la longitud de la línea de conducción es de 2000 m. Calcule el diámetro del tubo y la presión interior de trabajo.



| | |
|----------------------------|--|
| MATERIAL TUBERIA | |
| DIAMETRO | |
| CLASE | |
| ELEVACION PIEZOMETRICA | |
| COTA DEL TERRENO PLANTILLA | |
| CARGA DISPONIBLE | |
| DISTANCIAS PARCIALES | |
| DISTANCIAS ACUMULADAS | |

Figura P-6.2.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

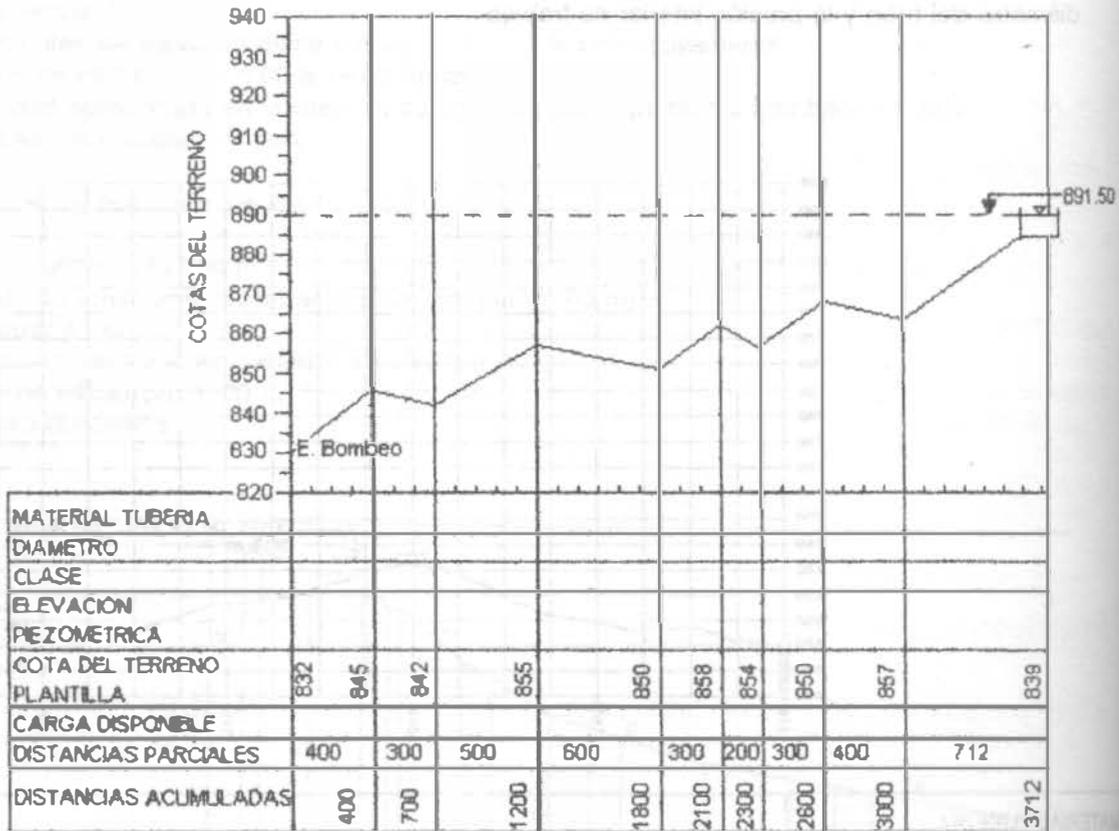


Figura P-6.3.

REGULARIZACION

El tanque de regularización (y de almacenamiento en algunos casos) es la parte del sistema de abastecimiento que permite enviar un gasto constante desde la fuente de abastecimiento y satisfacer las demandas variables de la población. Se acumula agua en el tanque cuando la demanda en la población es menor que el gasto de llegada; el agua acumulada se utilizará cuando la demanda sea mayor. Generalmente esta regularización se hace por períodos de 24 horas. Cuando además de la regularización se proporciona un volumen adicional para almacenar agua en el tanque, se dispone entonces de una cantidad como reserva con el objeto de no suspender el servicio en caso de desperfectos en la captación o en la conducción, así como satisfacer demandas extraordinarias como es el combate de incendios.

En este capítulo se expone la metodología para el cálculo del volumen del tanque, pero antes se describen los diferentes tipos de depósitos que se utilizan en los sistemas de abastecimiento.

7.1 TIPOS DE TANQUES Y SU FUNCIONAMIENTO

Las principales categorías de los depósitos de almacenamiento son:

- a) Tanques superficiales
- b) Columnas reguladoras y
- c) Tanques elevados

7.1.1 Tanques superficiales

Estos depósitos se construyen bajo el nivel del suelo o balanceando cortes y rellenos. Sus paredes pueden construirse con mampostería de piedra o con concreto reforzado, revistiéndolas en ambos casos con gunita o un impermeabilizante integral al concreto. Los pisos son, preferentemente de concreto reforzado, proporción 1:3:6. Cuando se desplante el depósito sobre tepetate o roca fisurada, se cuela una losa de 10 cm de espesor con varillas de 1/2 pulgada de diámetro en malla de 30 cm en dos direcciones. Si se hace el desplante del depósito sobre tierra, se coloca sobre la losa anterior una cubierta de yute o similar, colando encima otra losa de 5 cm con varillas de 3/8 de pulgada a cada 30 cm.

En roca firme se elimina la losa de concreto, haciendo el revestimiento con gunita descargada con un chiflón o pistola sobre un armado de varillas.

Los tanques deben techarse empleando para ello losas de concreto reforzado armadas en el lugar, o materiales preconstruidos (por ejemplo vigueta y bovedilla). No deben cubrirse las losas con tierra producto de la excavación; es mejor recubrir con 5 cm de ladrillo con pendiente mínima de 1% para que el agua de lluvia no entre al tanque. Estas losas de techo tendrán uno o más registros de inspección formados por un marco con bordes que sobresalgan unos 10 cm y una tapa con soleras que cubran el marco de fierro ángulo (Figura 7.1.). Se deben instalar en el interior escaleras con peldaños de varilla

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

(tipo marino), con el fin de poder entrar al tanque para inspección y limpieza.

Se proporciona ventilación a los tanques por medio de tubos verticales u horizontales, que atraviesan el techo o la pared, según sea. (Figura 7.2).

La ventilación también se proporciona por medio de aberturas con rejas de hierro de 30 x 60 cm instaladas en la periferia del tanque (Figura 7.3).

Este último tipo de ventilación no es tan conveniente como el primero.

La salida de agua se hace por medio de un tubo con colador o malla (Figura 7.4).

Los tubos de demasías se instalan de manera que impidan la entrada de aves, insectos, roedores, etc. (Figura 7.5).

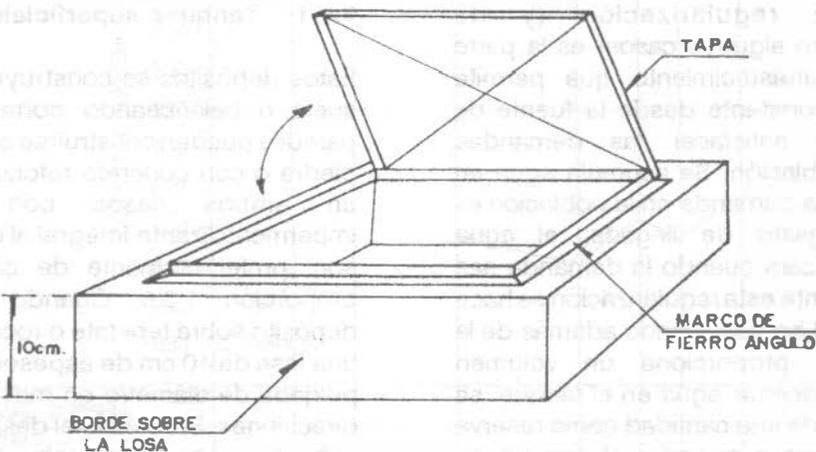


Figura 7.1. Registro para inspección del tanque.

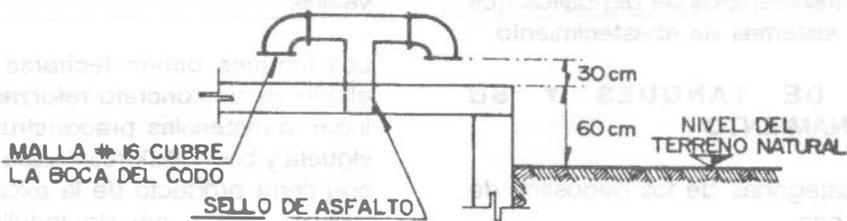


Figura 7.2. Ventilación del tanque con tubo vertical.

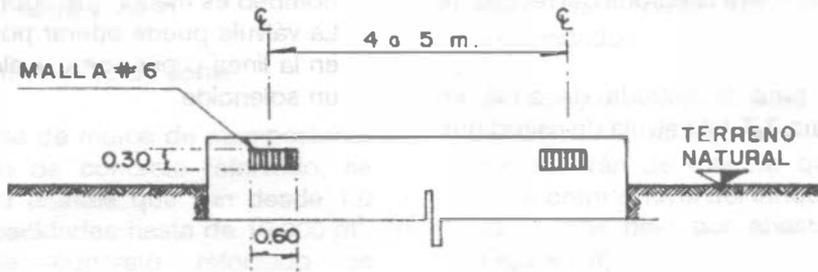


Figura 7.3. Ventilación con aberturas, con rejas y mallas.

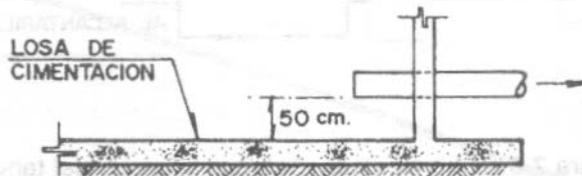


Figura 7.4. Salida de agua del tanque superficial.

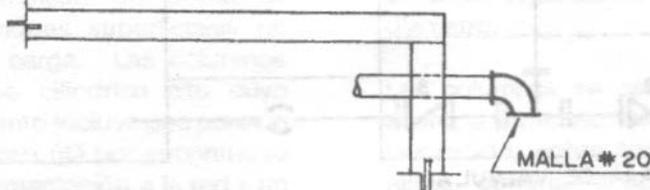


Figura 7.5. Tubo de demasías.

Para la limpieza del tanque se coloca un tubo de desagüe en el fondo, pero esta tubería no debe descargar directamente a un alcantarillado, sino que debe descargar libremente en recipiente abierto desde una altura no menor de dos diámetros del tubo sobre la corona del recipiente (Figura 7.6).

Los dispositivos para la entrada de agua se ilustran en la Figura 7.7. La válvula de altitud que

se indica en dicha figura se usa principalmente en líneas de alimentación a tanques elevados columnas reguladoras, cerrando automáticamente cuando el tanque está lleno abriendo cuando la presión sobre el lado de bombeo es menor que sobre el lado del tanque. La válvula puede operar por la presión de agua en la línea o por energía eléctrica transmitida a un solenoide.

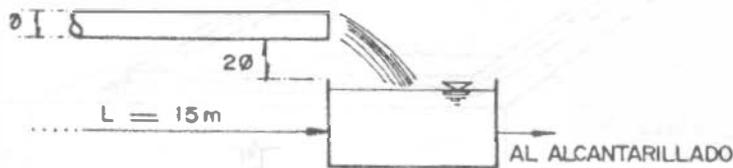
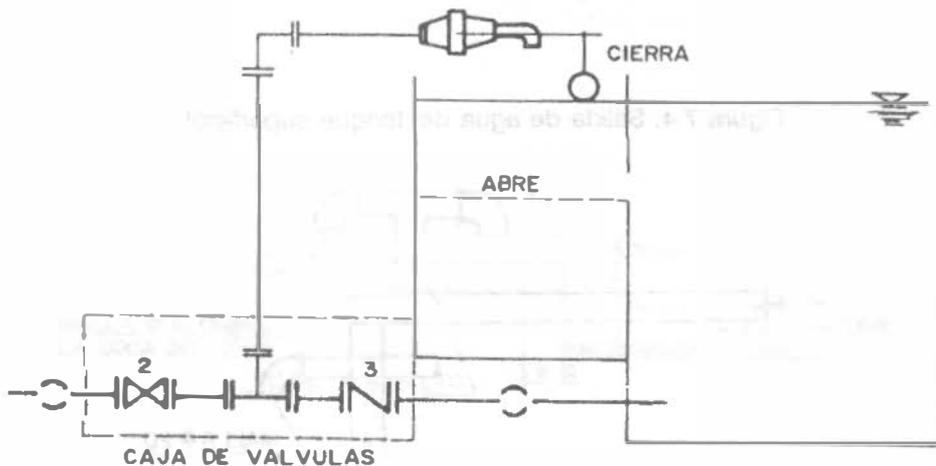


Figura 7.6. Tubo de desagüe para limpieza del tanque.



- 1.- VALVULA DE ALTITUD
- 2.- VALVULA DE SECCIONAMIENTO
- 3.- VALVULA DE RETENCION

Figura 7.7. Disposición de la entrada de agua al tanque.

El diseño estructural se hace con las siguientes condiciones de carga:

1. Con agua y sin empuje de tierra
2. Con empuje de tierra y vacío
3. Con agua y con empuje de tierra

Los tanques a base de muros de mampostería, con piso y techo de concreto reforzado, se recomiendan para tirantes que van desde 1.0 hasta 3.5 m y capacidades hasta de 10,000 m³. Los tirantes de concreto reforzado se recomiendan generalmente para tirantes entre

2.0 y 5.5 m.

Para capacidades que varían de 5000 a 50000 m³, se pueden construir de concreto presforzado, con tirantes de 5.0 a 9.0 m. En este caso gran parte de los elementos son prefabricados.

Los tanques superficiales se sitúan en una elevación natural en la proximidad de la zona a que servirán de manera que la diferencia de altura entre el nivel del tanque estando lleno y el punto más bajo por abastecer sea de 50 m (Figura 7.8).

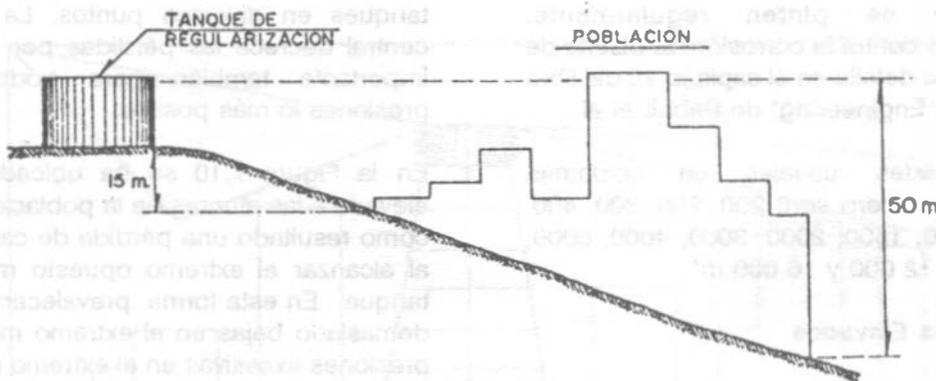


Figura 7.8. Posición del tanque de regularización superficial.

7.1.2 Columnas reguladoras

Estos depósitos se emplean en donde la construcción de los tanques superficiales no proporcionan suficiente carga. Las columnas consisten de un tanque cilíndrico alto cuyo volumen de almacenamiento incluye una porción superior que es el volumen útil por encontrarse arriba de la tubería de alimentación a la red y un volumen inferior que es de soporte y que proporcionará la carga requerida (Figura 7.9).

El volumen de soporte se puede aprovechar con bombeo de refuerzo para controlar incendios u

otras emergencias. No son económicas columnas de más de 15 m de altura; ésta, por cierto, es considerablemente más grande que su diámetro.

Las columnas se construyen normalmente de acero o concreto reforzado. El acero es más favorecido, sobre todo en columnas de gran altura, aunque el concreto requiere menores costos de mantenimiento y se adapta mejor a la concepción arquitectónica. El acero se adapta mejor a altas cargas y las fugas en estas estructuras se pueden controlar mejor. Las columnas de acero se deterioran con facilidad, a

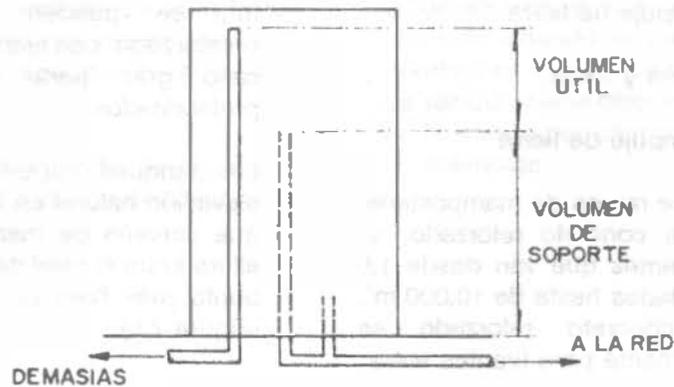


Figura 7.9. Columna reguladora.

menos que se pinten regularmente, protegiéndolas contra la corrosión. El diseño de la estructura se detalla en el capítulo 15 del libro "Water Supply Engineering" de Babbitt et al.

Las capacidades usuales en columnas reguladoras de acero son: 200, 250, 300, 400, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000, 8000, 10 000, 12 000 y 16 000 m³.

7.1.3 Tanques Elevados

Los tanques elevados se emplean cuando no es posible construir un tanque superficial, por no tener en la proximidad de la zona a que servirá, una elevación natural adecuada. El "tanque elevado" se refiere a la estructura integral que consiste en el tanque, la torre y la tubería elevadora.

Los más comunes se construyen de acero, aunque los hay también de concreto reforzado, tanto el tanque como la torre.

Se construyen tanques elevados con capacidad desde 10 hasta 1000 m³. En zonas rurales se recomienda una capacidad mínima de 10 m³. Las alturas de torre son de 10, 15 ó 20 m.

Para tener un máximo beneficio, los tanques elevados se localizan cerca del centro de uso, pero en grandes áreas se localizan varios

tanques en diversos puntos. La localización central decrece las pérdidas por fricción y es importante también para poder equilibrar presiones lo más posible.

En la Figura 7.10 se ha ubicado el tanque elevado a las afueras de la población, lo que da como resultado una pérdida de carga muy alta al alcanzar el extremo opuesto más lejano al tanque. En esta forma, prevalecerán presiones demasiado bajas en el extremo más alejado o presiones excesivas en el extremo más cercano al tanque.

En la Figura 7.11 las presiones sobre toda el área municipal son más uniformes tanto en los períodos de mínima como de máxima demanda. Nótese que durante los períodos de alta demanda el tanque está suministrando agua en ambas direcciones, mientras que durante períodos de baja demanda, la estación de bombeo alimenta al tanque y a la red.

En general, siempre son motivo de estudio en el análisis de los sistemas de distribución, la red de tuberías, las condiciones topográficas, el funcionamiento de la estación de bombeo y las características de operación del tanque de regularización. En donde se opera bajo condiciones muy variables de carga, el balance hidráulico del sistema llega a ser más complejo.

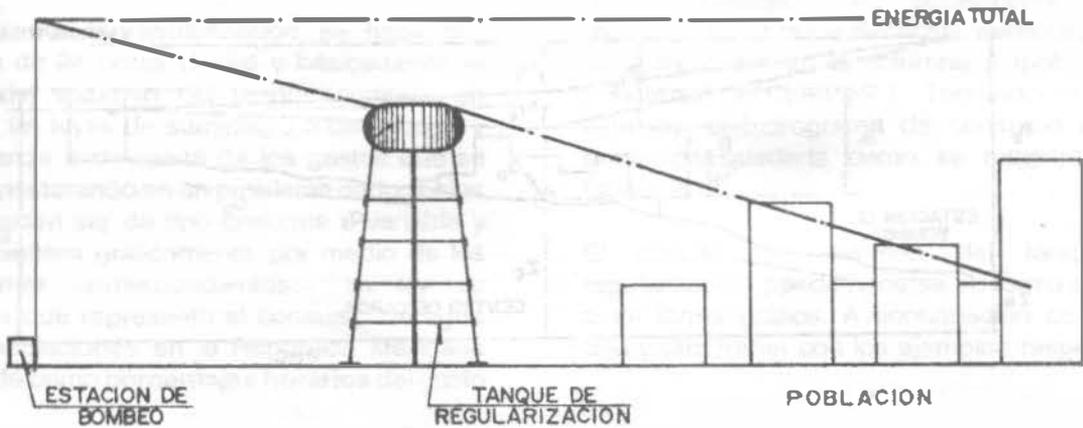


Figura 7.10. Tanque de regularización al extremo de la población.

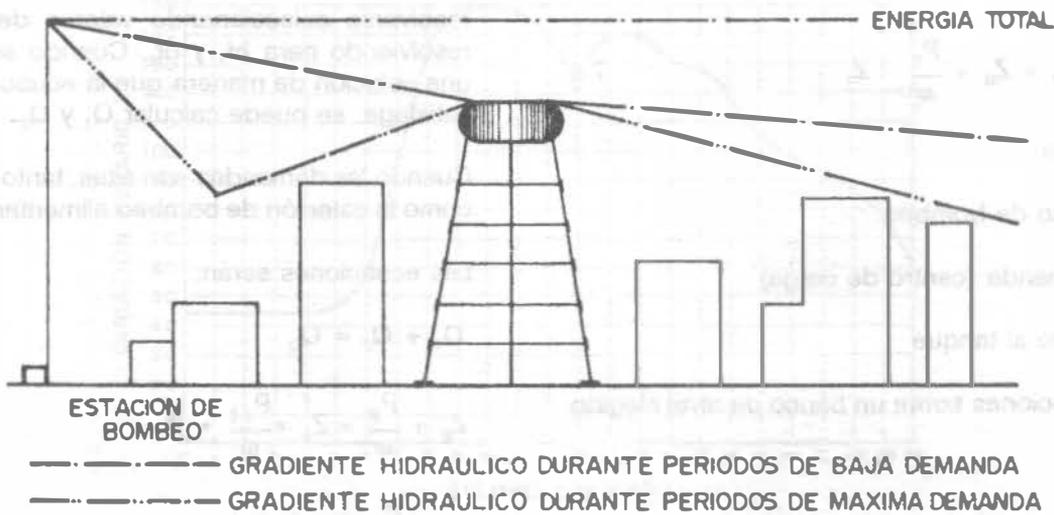


Figura 7.11. Tanque elevado cerca del centro de uso.

Considerando que la demanda de agua por el centro de carga de la red fluctúa horariamente, es evidente que hay esencialmente dos modos de operación del sistema. Cuando las demandas son bajas, la estación de bombeo suministrará estas demandas y además alimentará al depósito. Haciendo referencia a la Figura 7.12, la solución se tiene como sigue:

$$Z_B + \frac{P_B}{\omega} = Z_c + \frac{P_{c1}}{\omega} + hf_1 \quad 7.2$$

$$Z_c + \frac{P_{c1}}{\omega} = Z_T + hf_2 \quad 7.3$$

$$Q_1 - Q_D = Q_2 \quad 7.1$$

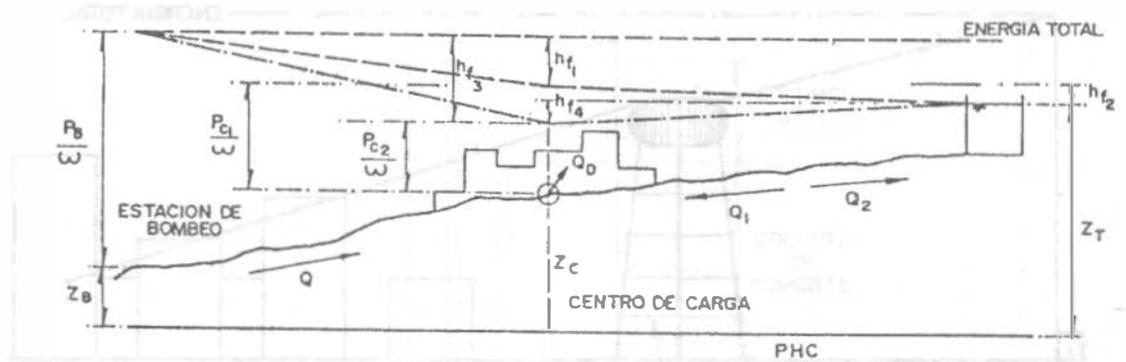


Figura 7.12.

Sumando 7.2 y 7.3 se obtiene:

$$hf_1 + hf_2 = Z_B + \frac{P_B}{\omega} - Z_T \quad 7.4$$

en donde:

Q_1 , gasto de bombeo

Q_D , demanda (centro de carga)

Q_2 , gasto al tanque

Z , elevaciones sobre un banco de nivel elegido

$\frac{P_B}{\omega}$ piezométrica producida por la estación de bombeo

$\frac{P_{c1}}{\omega}$ piezométrica residual en el centro de carga

hf pérdidas por fricción

Se pueden adoptar valores para gradientes (hf) y, conociendo las Q para valores de operación

$\frac{P_{c1}}{\omega}$ se calculan $\frac{f}{\omega}$ y Z_T . También, si se

especifican las Z y Q_D , las ecuaciones pueden resolverse seleccionando valores de $\frac{P_{c1}}{\omega}$ y resolviendo para hf_1 y hf_2 . Cuando se alcance una solución de manera que la ecuación 7.4 se satisfaga, se puede calcular Q_1 y Q_2 .

Cuando las demandas son altas, tanto el tanque como la estación de bombeo alimentarán la red.

Las ecuaciones serán:

$$Q_1 + Q_3 = Q_D \quad (7.5)$$

$$Z_B + \frac{P_B}{\omega} = Z_C + \frac{P_{c2}}{\omega} + hf_3 \quad (7.6)$$

$$Z_C + \frac{P_{c2}}{\omega} = Z_T - hf_4 \quad (7.7)$$

Para un valor asumido de $\frac{P_B}{\omega}$ y por ensayos se puede alcanzar a satisfacer la ecuación 7.5. Nótese que este ejemplo es simple ya que se ha considerado a Z_T invariable. Realmente, como Z_T fluctúa con el tiempo, es necesario saber el volumen de regularización disponible versus la elevación del agua en el tanque, de manera que cualquier condición de extracción especificada fijará el valor real de Z_T para usarse en los cálculos.

7.2 CALCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE REGULARIZACION

Generalmente la regularización se hace por periodos de 24 horas (1 día) y básicamente el cálculo del volumen del tanque consiste en conciliar las leyes de suministro o de entrada y de demanda o de salida de los gastos que se estén considerando en un problema dado. Estas leyes pueden ser de tipo uniforme o variable y se representan gráficamente por medio de los hidrogramas correspondientes. La ley de demanda que representa el consumo de agua de las poblaciones en la República Mexicana expresada como **porcentajes horarios del gasto**

máximo diario, fue determinada estadísticamente por el Banco Nacional Hipotecario Urbano y de Obras Públicas, S.A., actualmente Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.A. y es la mostrada en la columna 2 (poblaciones pequeñas) del Cuadro 7.1. Tomando en cuenta esta ley, el hidrograma de consumo de una población quedaría como se muestra en la Figura 7.13.

El cálculo del volumen del tanque de regularización puede hacerse en forma analítica o en forma gráfica. A continuación se explica una y otra forma con los ejemplos respectivos.

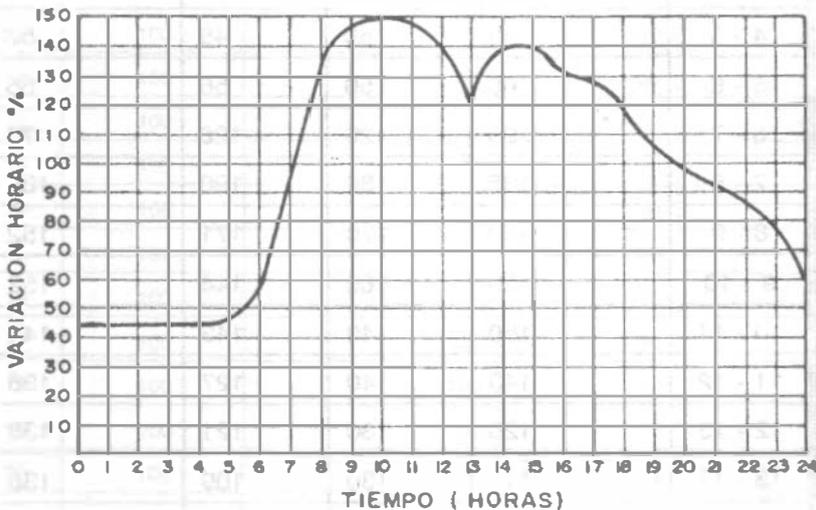


Figura 7.13. Hidrograma de consumo de una población pequeña.

7.2.1 Cálculo Analítico

El cálculo se hace mediante una tabla como la que se presenta en el Cuadro 7.2; para facilitar el trabajo y como la ley de demanda o salida es conocida en función de porcentajes horarios del gasto máximo diario, en esta misma forma se expresa la ley de entrada. En dicho cuadro se aprecia que, para calcular el volumen, se suman

los valores absolutos del máximo excedente y máximo déficit; 325 y 80, respectivamente. Esto se explica por el hecho de que de las 0 a las 7 horas entra al tanque más agua de la que sale por lo que se obtiene un porcentaje de acumulación máximo; después de las 7 horas comienza a demandarse más agua de la que entra al tanque por lo que empieza a hacerse uso de la que se tenía acumulada, situación que

prevalece hasta las 15 horas en donde el tanque se encuentra vacío. A partir de esta hora existe un déficit: sale más de lo que entra y no se cuenta con un volumen en el tanque para cubrir el faltante. A las 18 horas se llega al momento

más crítico (máximo faltante). De lo anterior, se ve la necesidad de contar de antemano con un volumen de agua en el tanque equivalente al máximo déficit, que en este caso es 80.

Cuadro 7.1. Ley de demandas horarias.

Variaciones del consumo, expresadas como porcentajes horarios del gasto máximo diario en algunas poblaciones

| Horas | Poblaciones pequeñas | Irapuato | Torreón | Cd. México |
|---------|----------------------|----------|---------|------------|
| 0 - 1 | 45 | 50 | 53 | 61 |
| 1 - 2 | 45 | 50 | 49 | 62 |
| 2 - 3 | 45 | 50 | 44 | 60 |
| 3 - 4 | 45 | 50 | 44 | 57 |
| 4 - 5 | 45 | 50 | 45 | 57 |
| 5 - 6 | 60 | 50 | 56 | 56 |
| 6 - 7 | 90 | 120 | 126 | 78 |
| 7 - 8 | 135 | 180 | 190 | 138 |
| 8 - 9 | 150 | 170 | 171 | 152 |
| 9 - 10 | 150 | 160 | 144 | 152 |
| 10 - 11 | 150 | 140 | 143 | 141 |
| 11 - 12 | 140 | 140 | 127 | 138 |
| 12 - 13 | 120 | 130 | 121 | 138 |
| 13 - 14 | 140 | 130 | 109 | 138 |
| 14 - 15 | 140 | 130 | 105 | 138 |
| 15 - 16 | 130 | 140 | 110 | 141 |
| 16 - 17 | 130 | 140 | 120 | 114 |
| 17 - 18 | 120 | 120 | 129 | 106 |
| 18 - 19 | 100 | 90 | 146 | 102 |
| 19 - 20 | 100 | 80 | 115 | 91 |
| 20 - 21 | 90 | 70 | 75 | 79 |
| 21 - 22 | 90 | 60 | 65 | 73 |
| 22 - 23 | 80 | 50 | 60 | 71 |
| 23 - 24 | 60 | 50 | 53 | 57 |

Cuadro 7.2. Volumen de regularización para el caso de suministro las 24 horas.

| Horas | Suministro (entradas) Q. Bombeo en % | Demandas (salidas) | | |
|---------|---|--------------------------|-------------|------------------------|
| | | Demanda horaria en % (1) | Diferencias | Diferencias acumuladas |
| 0 - 1 | 100 | 45 | + 55 | + 55 |
| 1 - 2 | 100 | 45 | + 55 | + 110 |
| 2 - 3 | 100 | 45 | + 55 | + 165 |
| 3 - 4 | 100 | 45 | + 55 | + 220 |
| 4 - 5 | 100 | 45 | + 55 | + 275 |
| 5 - 6 | 100 | 60 | + 40 | + 315 |
| 6 - 7 | 100 | 90 | + 10 | + 325 |
| 7 - 8 | 100 | 135 | - 35 | + 290 |
| 8 - 9 | 100 | 150 | - 50 | + 240 |
| 9 - 10 | 100 | 150 | - 50 | + 190 |
| 10 - 11 | 100 | 150 | - 50 | + 140 |
| 11 - 12 | 100 | 140 | - 40 | + 100 |
| 12 - 13 | 100 | 120 | - 20 | + 80 |
| 13 - 14 | 100 | 140 | - 40 | + 40 |
| 14 - 15 | 100 | 140 | - 40 | 0 |
| 15 - 16 | 100 | 130 | - 30 | - 30 |
| 16 - 17 | 100 | 130 | - 30 | - 60 |
| 17 - 18 | 100 | 120 | - 20 | - 80 |
| 18 - 19 | 100 | 100 | 0 | - 80 |
| 19 - 20 | 100 | 100 | 0 | - 80 |
| 20 - 21 | 100 | 90 | + 10 | - 70 |
| 21 - 22 | 100 | 90 | + 10 | - 60 |
| 22 - 23 | 100 | 80 | + 20 | - 40 |
| 23 - 24 | 100 | 60 | + 40 | 0 |
| Total | 2.400 | 2.400 | | |

$$C_1 = 325 + 80 = 405 \%$$

$$C = 4,05 \times \frac{3600}{1000} \times Q_{\text{máx}} = 14,58 Q_{\text{máx}}$$

C = Capacidad del tanque en m³

Q_{máx} = Gasto máximo diario en l/s

(1) Partiendo de las variaciones horarias del Cuadro 7,1 poblaciones pequeñas.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

En el cuadro 7.3 se aprecia cómo adicionando el déficit se pueden cubrir todas las demandas.

Cuando la alimentación se efectúa en periodos menores de 24 horas, se tendrá que aumentar el caudal de entrada para compensar las horas en que no haya alimentación y tener al final del día un total que corresponda al 2400 por ciento horario (100 por ciento durante las 24 horas).

En el cuadro 7.4 se observa que bombeando de la fuente al tanque durante 8 horas (por ejemplo de las 7:00 a las 15:00 horas) el porcentaje de suministro es

$$\frac{2400}{8} = 300 \% \text{ (Ver Cuadro 7.4)}$$

Cuadro 7.3. Adición del déficit del Cuadro 7.2 para cubrir las demandas.

| Horas | Demanda salidas diferencias | Demanda Salidas Diferencias | Diferencias Acumuladas + (Máx. Déficit) 80 |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| 0 - 1 | + 55 | + 55 | + 135 |
| 1 - 2 | + 55 | + 110 | + 190 |
| 2 - 3 | + 55 | + 165 | + 245 |
| 3 - 4 | + 55 | + 220 | + 300 |
| 4 - 5 | + 55 | + 275 | + 355 |
| 5 - 6 | + 40 | + 315 | + 395 |
| 6 - 7 | + 10 | + 325 | + 405 |
| 7 - 8 | - 35 | + 290 | + 370 |
| 8 - 9 | - 50 | + 240 | + 320 |
| 9 - 10 | - 50 | + 190 | + 270 |
| 10 - 11 | - 50 | + 140 | + 220 |
| 11 - 12 | - 40 | + 100 | + 180 |
| 12 - 13 | - 20 | + 80 | + 160 |
| 13 - 14 | - 40 | + 40 | + 120 |
| 14 - 15 | - 40 | 0 | + 80 |
| 15 - 16 | - 30 | - 30 | + 50 |
| 16 - 17 | - 30 | - 60 | + 20 |
| 17 - 18 | - 20 | - 80 | 0 |
| 18 - 19 | 0 | - 80 | 0 |
| 19 - 20 | 0 | - 80 | 0 |
| 20 - 21 | + 10 | - 70 | 10 |
| 21 - 22 | + 10 | - 60 | 20 |
| 22 - 23 | + 20 | - 40 | 40 |
| 23 - 24 | + 40 | 0 | 80 |

Cuadro 7.4. Volumen de regularización para un suministro de 8 horas al tanque.

| Horas | Suministros (Entradas) Q Bombeo en % | Demandas (Salidas) | | |
|---------|--|-----------------------------|-------------|---------------------------|
| | | Demanda horaria en % (1) | Diferencias | Diferencias Acumuladas |
| 0 - 1 | 0 | 45 | - 45 | - 45 |
| 1 - 2 | 0 | 45 | - 45 | - 90 |
| 2 - 3 | 0 | 45 | - 45 | - 135 |
| 3 - 4 | 0 | 45 | - 45 | - 180 |
| 4 - 5 | 0 | 45 | - 45 | - 225 |
| 5 - 6 | 0 | 60 | - 60 | - 285 |
| 6 - 7 | 0 | 90 | - 90 | - 375 |
| 7 - 8 | 300 | 135 | + 165 | - 210 |
| 8 - 9 | 300 | 150 | + 150 | - 60 |
| 9 - 10 | 300 | 150 | + 150 | + 90 |
| 10 - 11 | 300 | 150 | + 150 | + 240 |
| 11 - 12 | 300 | 140 | + 160 | + 400 |
| 12 - 13 | 300 | 120 | + 180 | + 580 |
| 13 - 14 | 300 | 140 | + 160 | + 740 |
| 14 - 15 | 300 | 140 | + 160 | + 900 |
| 15 - 16 | 0 | 130 | - 130 | + 770 |
| 16 - 17 | 0 | 130 | - 130 | + 640 |
| 17 - 18 | 0 | 120 | - 120 | + 520 |
| 18 - 19 | 0 | 100 | - 120 | + 420 |
| 19 - 20 | 0 | 100 | - 100 | + 320 |
| 20 - 21 | 0 | 90 | - 90 | + 230 |
| 21 - 22 | 0 | 90 | - 90 | + 140 |
| 22 - 23 | 0 | 80 | - 80 | + 60 |
| 23 - 24 | 0 | 60 | - 60 | 0 |
| Total | 2.400 | 2.400 | | 0 |

$$C_1 = 375 + 900 = 1275 \%$$

$$C = 12.75 \times \frac{3600}{1000} \times Q_{Máx} = 45.90 Q_{Máx}$$

$Q_{Máx}$ = Gasto máx. diario en l/s

C = Capacidad en m³

(1) Partiendo de las variaciones horarias del Cuadro 7.1 poblaciones pequeñas.

En forma similar se encuentra la capacidad de los tanques de regularización para diferentes horas de bombeo. Para los siguientes ejemplos se tomaron las variaciones del Cuadro 7.1 para poblaciones pequeñas.

Caso: 12 horas de bombeo.

Bombeando de las 7 a las 19 horas con un Q de bombeo de 200%.

$$C_t = 420 + 375 = 795\%$$

$$C = 7.95 \times \frac{3600}{1000} \times Q_{Md} = 28.62 Q_{Md}$$

Q_{Md} = Gasto máximo diario en lts/seg

C = Capacidad en m³

Caso: 16 horas de bombeo.

Bombeando de las 6 a las 22 horas con un Q de Bombeo de 150%

$$C_t = 140 + 285 = 425\%$$

$$C = 4.25 \times \frac{3600}{1000} \times Q_{Md} = 15.30 Q_{Md}$$

Caso : 20 horas de bombeo.

Bombeando de las 4 a las 24 horas con un Q de Bombeo de 120%

$$C_t = 200 \%$$

$$C = 2 \times \frac{3600}{1000} \times Q_{Md} = 7.2 Q_{Md}$$

7.2.2 Cálculo Gráfico

El cálculo gráfico del volumen de un tanque de regularización está basado en la combinación de la "curva masa" de la entrada al tanque (ley de entrada) con la "curva masa de salida" (ley de salida) para los mismos intervalos de tiempo. La curva masa o diagrama de Rippl consiste en una gráfica que representa volúmenes acumulados escurridos en una sección con relación al tiempo (Figura 7.14).

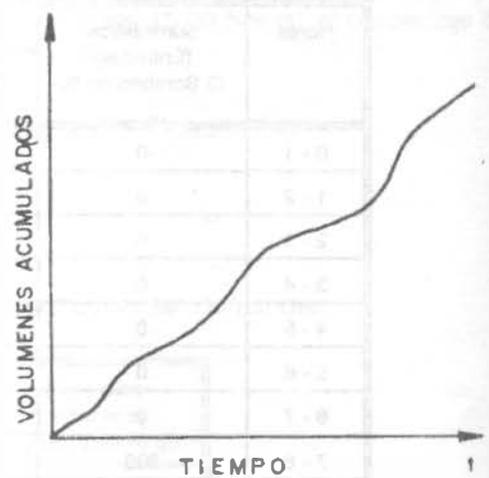


Figura 7.14. Diagrama de Rippl o curva masa.

Características del diagrama de RIPPL.

1. La diferencia de ordenadas para dos tiempos dados mide el volumen escurrido en ese intervalo (Figura 7.15), o sea:

$$Y_2 - Y_1 = \text{Volumen escurrido entre } t_1 \text{ y } t_2$$

2. La pendiente de la tangente en un punto de la curva mide el gasto en ese punto. Figura 7.16.

$$Q = \frac{dv}{dt}$$

Por lo que en una curva masa no puede haber pendientes negativas, sino a lo sumo iguales a cero.

3. Si se unen dos puntos (dos instantes) de la curva masa mediante una recta, su pendiente representa el gasto medio entre esos dos puntos o instantes. Figura 7.17.

$$Q_{\text{medio}} = \frac{\text{Volumen escurrido}}{t_2 - t_1}$$

Diagramas múltiples.

En el caso de un tanque de almacenamiento que cuenta con varias entradas y salidas de agua, se hacen combinaciones de las curvas masa correspondientes a cada conducto de entrada y

salida, sumando por un lado la curva masa de las entradas y por el otro la de las salidas. Figura 7.18.

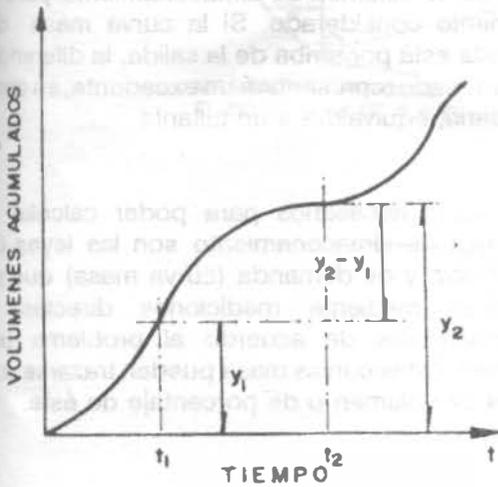


Figura 7.15. Volumen escurrido en un intervalo de tiempo

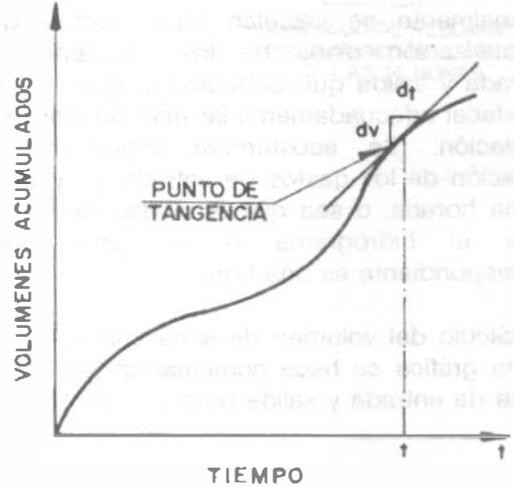


Figura 7.16. La pendiente de la tangente en un instante de la curva masa representa el gasto en ese instante.

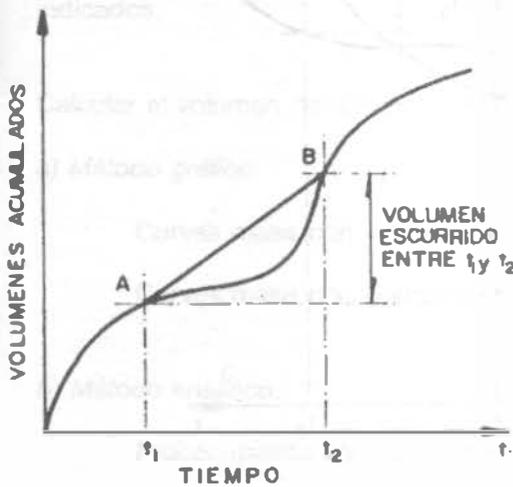


Figura 7.17. La pendiente de la recta AB representa el gasto medio entre los instantes t_1 y t_2

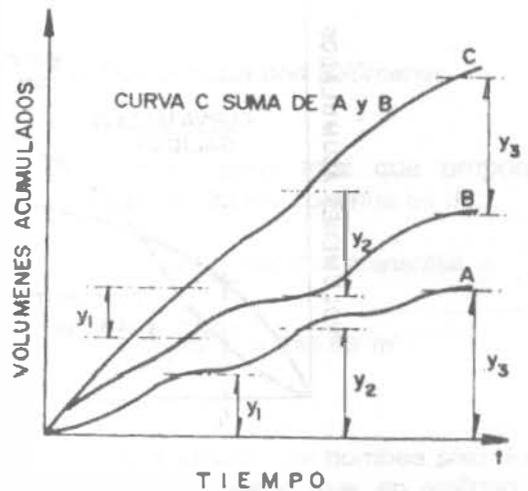


Figura 7.18. Suma de curvas masa.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

La suma de varias curvas masa, ya sea para la entrada o para la salida, se efectúa sumando las ordenadas correspondientes a cada una de las curvas para la misma abscisa de tiempo.

Cálculo del volumen de regularización.

En el caso de abastecimiento de agua, los volúmenes requeridos de almacenamiento normalmente se calculan para efectuar una regularización diaria de los volúmenes de entrada y salida que deberán ser iguales para satisfacer adecuadamente las necesidades de la población. Se acostumbra representar la variación de los gastos de entrada y salida en forma horaria, o sea que la unidad de tiempo para el hidrograma o la curva masa correspondiente es una hora.

El cálculo del volumen de almacenamiento en forma gráfica se hace combinando las curvas masa de entrada y salida para los mismos

intervalos de tiempo. Esta combinación se hace trazando las dos curvas en un mismo sistema de ejes coordenados haciendo coincidir las escalas de tiempo. Figura 7.19.

Una vez trazadas las dos curvas masa, la diferencia de ordenadas entre las curvas para un tiempo dado representa el excedente o el faltante de volumen de almacenamiento para el momento considerado. Si la curva masa de entrada está por arriba de la salida, la diferencia de ordenada representará un excedente; en caso contrario, equivaldrá a un faltante.

Los datos necesarios para poder calcular el volumen de almacenamiento son las leyes de suministro y de demanda (curva masa) que se obtienen mediante mediciones directas, o suponiéndolas de acuerdo al problema por resolver. Estas curvas masa pueden trazarse con datos de volumen o de porcentaje de éste.

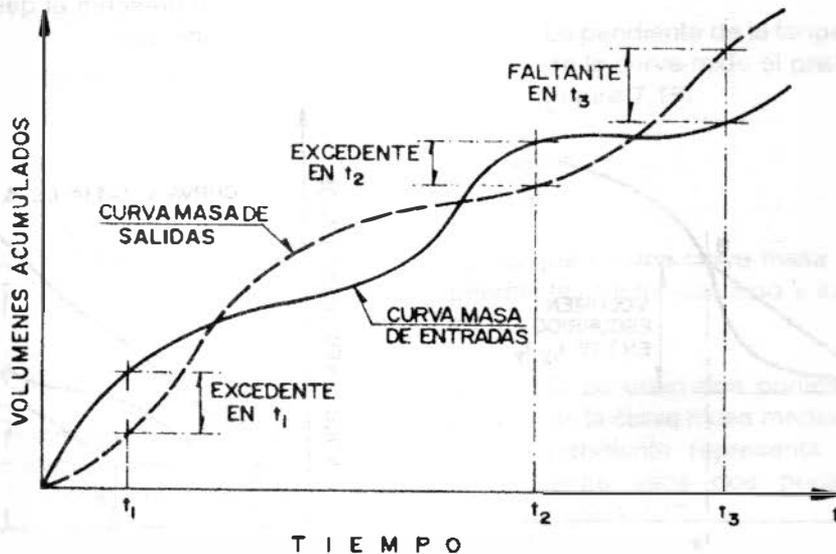


Figura 7.19. Combinación de curvas masa de entradas y salidas.

Ejemplo 7.1

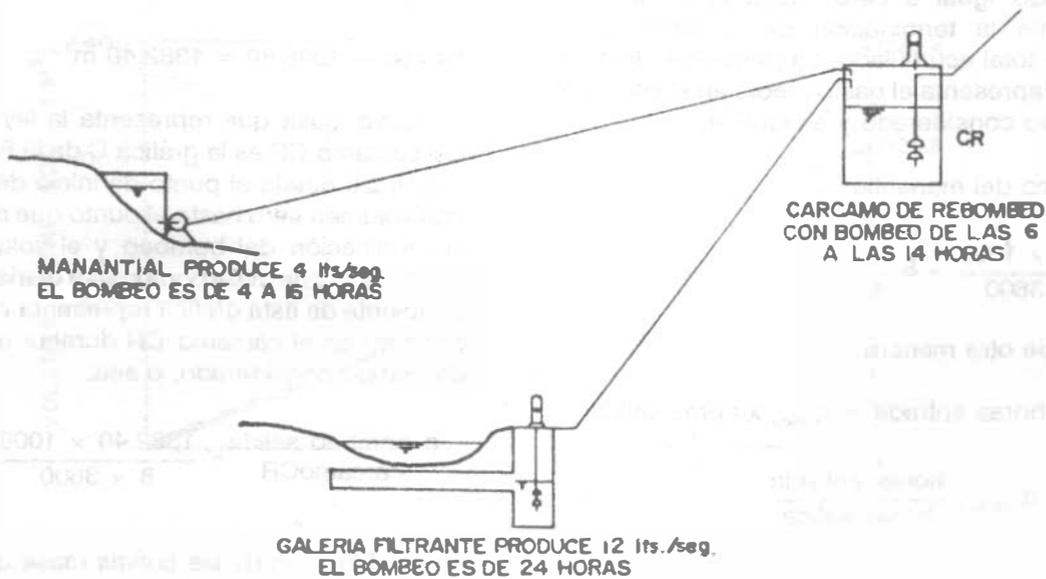


Figura 7.20.

El cárcamo de rebombado CR (Figura 7.20) es alimentado por dos fuentes de abastecimiento con los gastos y los tiempos de bombeo indicados.

Calcular el volumen del CR por medio de:

a) Método gráfico:

Curvas masa con volúmenes y;

Curvas masa con porcentajes horarios

b) Método analítico:

Procedimiento con volúmenes y;

Procedimiento con porcentajes de volumen

Solución.

a) Método gráfico

a.1) Curvas masa con volúmenes

El volumen diario total que proporciona el manantial en forma continua es de:

Volumen producido por manantial =

$$\frac{4 \times 24 \times 3600}{1000} = 345.60 \text{ m}^3$$

Pero este volumen se bombea sólo durante 12 horas al día, por lo que, en realidad también habría que calcular un cierto volumen de almacenamiento para la caja del manantial con una entrada constante y una salida intermitente.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

La curva masa correspondiente al manantial es la gráfica M de la Figura 7.21 y se dibuja a partir del punto de inicio del bombeo con volumen acumulado igual a cero, hasta el punto que representa la terminación del bombeo y el volumen total acumulado. La pendiente de esta gráfica representa el gasto medio en el intervalo de tiempo considerado y es igual a:

q bombeo del manantial =

$$\frac{345.60 \times 1000}{12 \times 3600} = 8 \frac{1}{s}$$

O visto de otra manera:

$q_{\text{entrada}} \times \text{horas entrada} = q_{\text{salida}} \times \text{horas salida}$

$$q_{\text{salida}} = q_{\text{entrada}} \frac{\text{horas entrada}}{\text{horas salida}}$$

O sea

$$q_{\text{salida caja manantial}} = \frac{4 (24)}{12} = 8 \frac{1}{s}$$

Lo que equivale a bombear de las 4 a las 16 horas $((8 \times 3600)/1000) = 28.8 \text{ m}^3/\text{hora}$.

El volumen diario total que proporciona la galería filtrante es:

$$\frac{12 \times 24 \times 3600}{1000} = 1036.80 \text{ m}^3$$

La curva masa correspondiente a la galería filtrante es la gráfica G de la Figura 7.21 y se traza de forma similar a la gráfica M. La pendiente de la curva G representa el gasto medio para el intervalo de tiempo considerado, o sea:

q bombeo galería filtrante =

$$\frac{1036.80 \times 1000}{24 \times 3600} = 12 \frac{1}{s}$$

Lo que equivale a bombear de las 0 a las 24 horas $((12 \times 3600)/1000) = 43.2 \text{ m}^3/\text{hora}$.

La suma de las dos curvas masa de entrada al cárcamo CR es la gráfica S de la Figura 7.21, siendo el volumen diario total acumulado de entrada de:

$$345.60 + 1036.80 = 1382.40 \text{ m}^3$$

La curva masa que representa la ley de salida del cárcamo CR es la gráfica C de la Figura 7.22 y se traza desde el punto de inicio del bombeo con volumen cero hasta el punto que representa la terminación del bombeo y el volumen total acumulado que debe bombearse diariamente. La pendiente de esta gráfica representa el gasto de bombeo en el cárcamo CR durante el intervalo de tiempo considerado, o sea:

$$q_{\text{bombeo salida}} = \frac{1382.40 \times 1000}{8 \times 3600} = 48 \frac{1}{s}$$

La combinación de las curvas masa de entrada y salida al cárcamo CR se muestra en la Figura 7.22 y del estudio de estas gráficas puede deducirse que:

Y_6 = Máximo volumen excedente

Y_{14} = Máximo volumen faltante

Se requieren estos volúmenes máximos de almacenamiento para poder efectuar la regulación de los volúmenes de entrada y salida. Por consiguiente, el volumen de almacenamiento que debe tener el cárcamo CR es:

Volumen Cárcamo = Máximo excedente + Máximo faltante

Esta condición se desprende al analizar las gráficas de la Figura 7.22, pues puede observarse que si a las cero horas empieza a llenarse el cárcamo CR, a las 6 horas, momento en que se inicia el bombeo de salida en este cárcamo, se tendrá un volumen máximo de entrada acumulado representado por la ordenada Y_6 . A partir de este punto como el gasto de salida del cárcamo es mayor que el de entrada, el volumen almacenado se va reduciendo y llegará un instante en que se vacíe dicho cárcamo; este instante se presenta en el punto E, donde se cruzan las dos curvas masa.

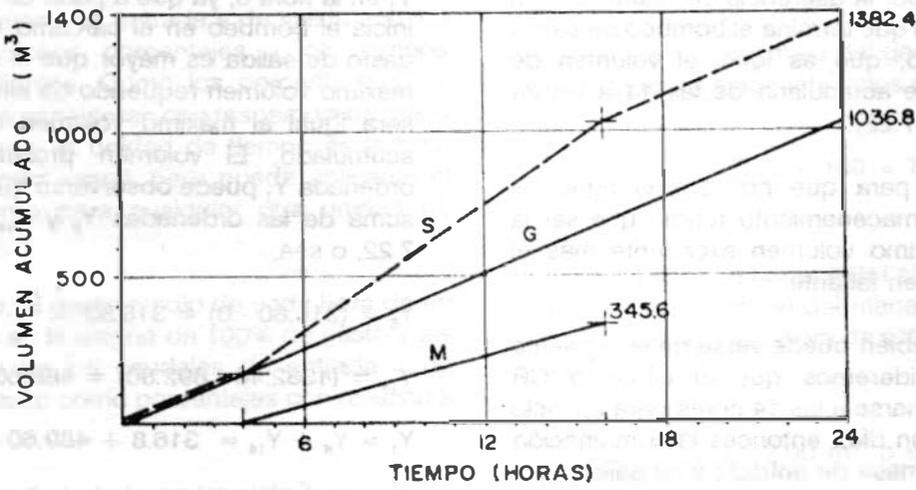


Figura 7.21.

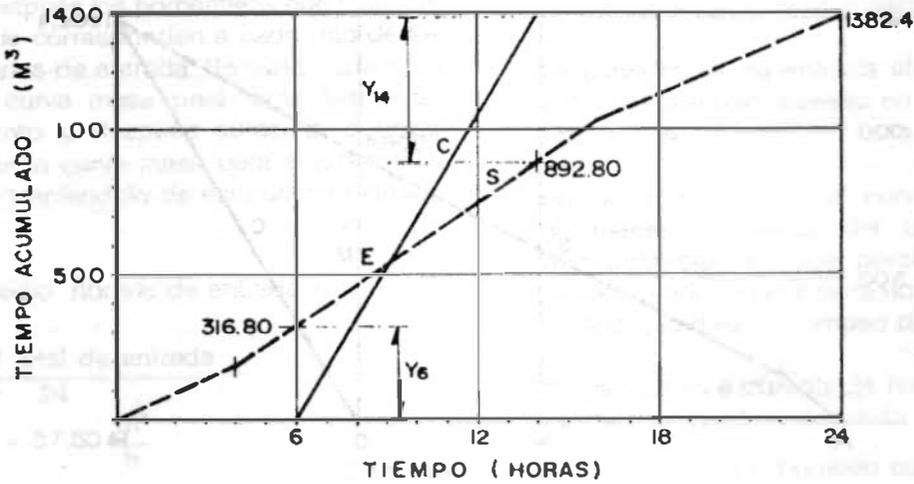


Figura 7.22.

Después de este punto y hasta las 14 horas (terminación de bombeo) el gasto de salida es mayor que el de entrada, por lo que, se tendrá un volumen máximo de almacenamiento faltante representado por la diferencia de ordenadas en el momento en que termina el bombeo de salida en el cárcamo, que es igual al volumen de entrada que se acumularía de las 14 a las 24 horas. (Figura 7.22).

Por lo tanto, para que no falte el agua, el volumen de almacenamiento tendrá que ser la suma del máximo volumen excedente más el máximo volumen faltante.

Lo anterior también puede verse de la siguiente manera: consideremos que el cárcamo CR comienza a llenarse a las 14 horas para un ciclo de 24 horas (un día), entonces la combinación de las curvas masa de entrada y de salida será como se muestra en la Figura 7.23, en donde S'

es la curva masa de entrada y C es la curva masa de salida. De estas gráficas puede deducirse inmediatamente que el máximo volumen acumulado es el valor de la ordenada Y_1 en la hora 6, ya que a partir de este punto se inicia el bombeo en el cárcamo CR y como el gasto de salida es mayor que el de entrada, el máximo volumen requerido de almacenamiento será igual al máximo volumen que se había acumulado. El volumen presentado por la ordenada Y_1 puede observarse que es igual a la suma de las ordenadas Y_6 y Y_{14} de la Figura 7.22, o sea:

$$Y_6 = (316.80 - 0) = 316.80$$

$$Y_{14} = (1382.40 - 892.80) = 489.60 \text{ de donde}$$

$$Y_1 = Y_6 + Y_{14} = 316.8 + 489.60 = 806.40 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen cárcamo} = 806.40 \text{ m}^3$$

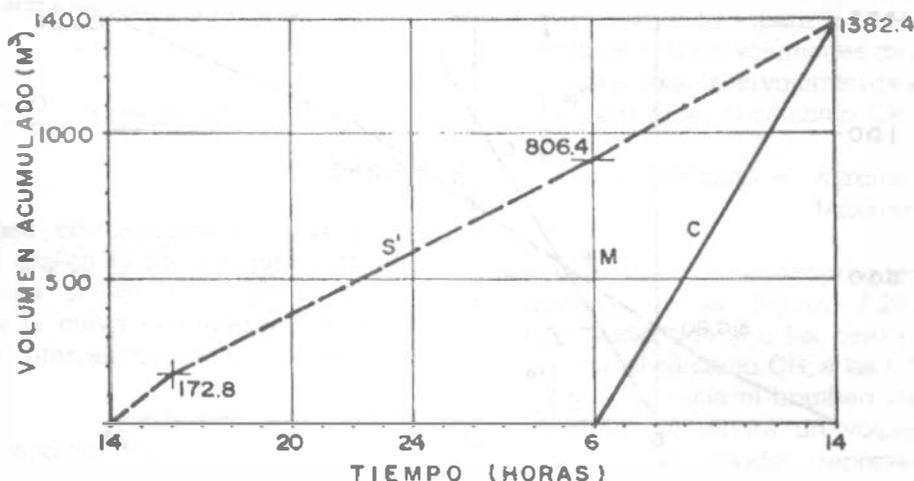


Figura 7.23.

a.2) *Curvas masa con porcentajes horarios.*

Para resolver el ejemplo usando porcentajes con respecto al gasto medio horario, hay que trazar las curvas masa de entrada y de salida con los datos de dichos porcentajes y los tiempos correspondientes. Como los porcentajes para este caso se consideran con respecto a un gasto medio horario, la unidad de tiempo es la hora que es lo más usual, pero puede aplicarse el procedimiento para cualquier otra unidad de tiempo.

Por lo tanto, al gasto medio de cada hora de un ciclo de 24 se le asigna un 100% de gasto y las variaciones de los caudales de entrada o de salida se darán como porcentajes con relación a este 100%.

Si el tiempo de trabajo es un ciclo completo de 24 horas (un día) y a cada hora le corresponde el 100% del gasto medio horario, el porcentaje correspondiente a un día será de:

$$24 \text{ horas} \times 100\% = 2400\%$$

Para dibujar la curva masa de los volúmenes de entrada al cárcamo CR, se necesita calcular en primer lugar el gasto medio horario total de entrada y después los porcentajes con respecto a éste que le corresponden a cada uno de los gastos horarios de entrada. Se puede entonces trazar una curva masa para cada fuente de abastecimiento y después sumarlas o trazar directamente la curva masa para el gasto total de entrada. Haciéndolo de esta última manera, se tiene:

Volumen medio horario de entrada =

$$= \frac{\text{Volumen total de entrada}}{24} = \frac{1382.40}{24} = 57.60 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

O sea que el gasto medio horario vale 57.60 m³/hora.

Ahora bien, de 0 a 4 y de 16 a 24 horas entra al cárcamo CR sólo el gasto de la galería filtrante, por lo que, en cada hora de estos lapsos entrará

un volumen de:

$$\frac{12 \times 3600}{1000} = 43.20 \text{ m}^3, \text{ o sea } (43.20 \frac{\text{m}^3}{\text{h}})$$

Entonces el porcentaje del gasto medio horario que entra en estos intervalos de tiempo es de:

$$\frac{43.20}{57.60} \times 100 = 75 \%$$

De las 4 a las 16 horas entra al cárcamo el gasto de la galería más el del manantial o sea 20 l/s, por lo que en cada hora de este intervalo entrará un volumen de:

$$\frac{20 \times 3600}{1000} = 72.00 \text{ m}^3, \text{ o sea } (72.00 \text{ m}^3/\text{h})$$

El porcentaje será entonces de:

$$\frac{72.00}{57.60} \times 100 = 125 \%$$

Como comprobación tenemos que:

$$75\% \times 12 + 125\% \times 12 = 2400\%$$

La curva masa de entrada al cárcamo resulta entonces como se muestra en la gráfica N de la Figura 7.24.

Por lo que toca a la curva masa de los volúmenes de salida del cárcamo CR, es necesario calcular qué porcentaje del gasto medio horario se tiene cada hora del intervalo de tiempo que dura el bombeo de salida, o sea:

$$\text{Porcentaje total durante 24 horas} = 2400\%$$

$$\text{Tiempo de bombeo de salida} = 8 \text{ horas}$$

$$\text{Porcentaje horario bombeo salida} = \frac{2400}{8}$$

$$= 300\%$$

En vista de esto, la curva masa de la salida del cárcamo queda como se muestra en la gráfica L de la Figura 7.24.

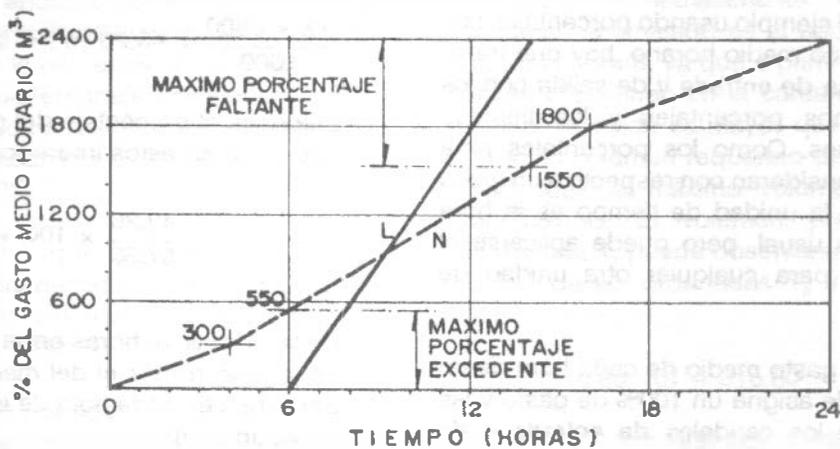


Figura 7.24.

Haciendo un análisis semejante al descrito de las curvas masa de entrada y de salida que aparecen en la Figura 7.22 se encuentra que el volumen requerido de almacenamiento será la suma de las ordenadas que representan el máximo porcentaje de volumen excedente más el máximo porcentaje de volumen faltante, multiplicada por el gasto medio horario, o sea:

$$\text{Volumen Cárcamo} = \frac{Q \text{ medio horario}}{100} \times$$

$$\Sigma(\text{Máximo porcentaje excedente} + \text{Máximo porcentaje faltante})$$

Para el ejemplo se tiene (ver Figura 7.24)

$$\text{Volumen Cárcamo} = \frac{57.60}{100} (550 + 850) = 806.40 \text{ m}^3$$

b) Método Analítico

Con el objeto de facilitar y sistematizar los cálculos, se acostumbra realizarlos mediante una tabla como la mostrada en el Cuadro 7.5.

b.1) Procedimiento con volúmenes.

Este procedimiento se ilustra en el Cuadro 7.5. En la columna 1 se enlista el ciclo de tiempo con las unidades consideradas; en la columna 2 se

anota la ley de entrada, tomando en cuenta el o los conductos de entrada así como la forma en que entregan los volúmenes de acuerdo con la unidad de tiempo seleccionada; en la columna 3 se anota la ley de salida en forma similar a la anterior; en la columna 4 se anota la diferencia algebraica entre los volúmenes de entrada y los de salida y, finalmente en la columna 5, se anotan las diferencias acumuladas resultantes de la suma algebraica de las diferencias de la columna 4.

Para los datos del ejemplo se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Volumen horario} \\ \text{Galería filtrante} &= \frac{12 \times 3600}{1000} = 43.20 \text{ m}^3/\text{hr} \end{aligned}$$

Suministrado durante las 24 horas.

$$\begin{aligned} \text{Volumen} \\ \text{horario} \\ \text{Manantial} &= \frac{8 \times 3600}{1000} = 28.80 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Suministrado sólo de las 4 a las 16 horas.

Cuadro 7.5. Método Análítico para el cálculo del volumen de almacenamiento a base de volúmenes acumulados.

| HORAS | ENTRADA m ³ | SALIDAS m ³ | DIFERENCIAS m ³ | DIFERENCIAS ACUMULADAS m ³ |
|---------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0 - 1 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | + 43.20 |
| 1 - 2 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | + 86.40 |
| 2 - 3 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | + 129.60 |
| 3 - 4 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | + 172.80 |
| 4 - 5 | + 72.00 | 0 | + 72.00 | + 244.80 |
| 5 - 6 | + 72.00 | 0 | + 72.00 | + 316.80 |
| 6 - 7 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | + 216.00 |
| 7 - 8 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | + 115.20 |
| 8 - 9 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | + 14.40 |
| 9 - 10 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | - 86.40 |
| 10 - 11 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | - 187.20 |
| 11 - 12 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | - 288.00 |
| 12 - 13 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | - 388.80 |
| 13 - 14 | + 72.00 | - 172.80 | - 100.80 | - 489.60 |
| 14 - 15 | + 72.00 | 0 | + 72.00 | - 417.60 |
| 15 - 16 | + 72.00 | 0 | + 72.00 | - 345.60 |
| 16 - 17 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 302.40 |
| 17 - 18 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 259.20 |
| 18 - 19 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 216.00 |
| 19 - 20 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 172.80 |
| 20 - 21 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 129.60 |
| 21 - 22 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 86.40 |
| 22 - 23 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | - 43.20 |
| 23 - 24 | + 43.20 | 0 | + 43.20 | 0 |
| | $\Sigma = 1382.40$ | $\Sigma = 1382.40$ | | |

Por lo tanto el volumen horario alimentado al cárcamo CR de las 4 a las 16 horas será de:

$$43.20 + 28.80 = 72.00 \text{ m}^3$$

Además:

Volumen horario de salida del Cárcamo =

$$= \frac{48 \times 3600}{1000} = 172.80 \text{ m}^3$$

Bombeado sólo de las 6 a las 14 horas.

Los cálculos quedan entonces como se muestra en el Cuadro 7.5.

Al revisar la columna de diferencias acumuladas se observa que el máximo volumen acumulado faltante es de 489.60 m³ y el máximo volumen excedente es de 316.80 m³.

Por lo tanto, y procediendo de acuerdo a como se explicó antes, el volumen requerido de almacenamiento será la suma de estos dos volúmenes, o sea:

$$\text{Volumen Cárcamo} = \Sigma \{ | + 316.80 | + | - 489.60 | \} = 806.40 \text{ m}^3$$

Este método analítico puede también aplicarse considerando únicamente los volúmenes de almacenamiento que se requieren para cubrir la demanda que se tenga, o sea que dicho volumen debe ser suficiente para satisfacer los volúmenes de salida durante el o los intervalos de tiempo en que la salida es mayor que la entrada. Lo anterior, está basado en el hecho de que al término del ciclo considerado, generalmente un día, el volumen total de salida debe necesariamente ser igual al volumen total de entrada. Esta forma de realizar el cálculo se muestra en el Cuadro 7.6.

Puede observarse que la suma de la columna de volúmenes requeridos para cubrir la demanda da un resultado exactamente igual al caso anterior, o sea:

$$\text{Volumen cárcamo} = 806.40 \text{ m}^3$$

b.2) Procedimiento con porcentaje de volumen.

Para el cálculo analítico del volumen de almacenamiento a base de porcentajes de volumen, se sigue el mismo procedimiento que en el inciso precedente con la única diferencia que ahora los datos de entrada y de salida se manejan como porcentajes del gasto medio horario para el ciclo considerado.

Por lo tanto, los porcentajes a considerar para la entrada y la salida al cárcamo CR son los determinados anteriormente y el cálculo del volumen de almacenamiento se realiza como se muestra en el Cuadro 7.7.

De la observación de los valores de la columna de diferencias acumuladas, se deduce que el máximo porcentaje excedente es de 550% y el máximo porcentaje faltante es de 850%, por lo que:

$$\text{Volumen Cárcamo} = \frac{q_{\text{promedio}}}{100} \Sigma \{ | \text{Máximo Porcentaje Excedente} | + | \text{Máximo Porcentaje Faltante} | \}$$

O sea:

$$\text{Volumen Cárcamo} = \frac{57.60}{100} \{ | +550 | + | -850 | \} = 806.40 \text{ m}^3$$

El cálculo analítico del volumen de almacenamiento a base de porcentajes de volumen, pero ahora considerando sólo los volúmenes de almacenamiento requeridos para satisfacer la demanda, se muestra en el Cuadro 7.8.

Se tiene entonces que la suma de porcentajes del gasto medio horario requerido para satisfacer la demanda es de 1400%, por lo que:

$$\text{Volumen Cárcamo} = \frac{57.60}{100} \times 1400 = 806.40 \text{ m}^3$$

Cuadro 7.6. Método analítico para el cálculo del volumen de almacenamiento a base del volumen requerido para cubrir la demanda.

| HORAS | ENTRADAS m ³ | SALIDAS m ³ | VOLUMEN REQUERIDO PARA CUBRIR LA DEMANDA m ³ |
|---------|----------------------------|---------------------------|--|
| 0 - 1 | 43.20 | 0 | 0 |
| 1 - 2 | 43.20 | 0 | 0 |
| 2 - 3 | 43.20 | 0 | 0 |
| 3 - 4 | 43.20 | 0 | 0 |
| 4 - 5 | 72.00 | 0 | 0 |
| 5 - 6 | 72.00 | 0 | 0 |
| 6 - 7 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 7 - 8 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 8 - 9 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 9 - 10 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 10 - 11 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 11 - 12 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 12 - 13 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 13 - 14 | 72.00 | 172.80 | 100.80 |
| 14 - 15 | 72.00 | 0 | 0 |
| 15 - 16 | 72.00 | 0 | 0 |
| 16 - 17 | 43.20 | 0 | 0 |
| 17 - 18 | 43.20 | 0 | 0 |
| 18 - 19 | 43.20 | 0 | 0 |
| 19 - 20 | 43.20 | 0 | 0 |
| 20 - 21 | 43.20 | 0 | 0 |
| 21 - 22 | 43.20 | 0 | 0 |
| 22 - 23 | 43.20 | 0 | 0 |
| 23 - 24 | 43.20 | 0 | 0 |
| | $\Sigma = 1382.40$ | $\Sigma = 1382.40$ | $\Sigma = 806.40$ |

Cuadro 7.7. Método analítico para el cálculo del volumen de almacenamiento a base de porcentajes del gasto medio horario.

| HORA | ENTRADAS % | SALIDAS % | DIFERENCIAS % | DIFERENCIAS ACUMULADAS |
|---------|-----------------|-----------------|------------------|---------------------------|
| 0 - 1 | + 75 | 0 | + 75 | + 75 |
| 1 - 2 | + 75 | 0 | + 75 | + 150 |
| 2 - 3 | + 75 | 0 | + 75 | + 225 |
| 3 - 4 | + 75 | 0 | + 75 | + 300 |
| 4 - 5 | + 125 | 0 | + 125 | + 425 |
| 5 - 6 | + 125 | 0 | + 125 | + 550 |
| 6 - 7 | + 125 | - 300 | - 175 | + 375 |
| 7 - 8 | + 125 | - 300 | - 175 | + 200 |
| 8 - 9 | + 125 | - 300 | - 175 | + 25 |
| 9 - 10 | + 125 | - 300 | - 175 | - 150 |
| 10 - 11 | + 125 | - 300 | - 175 | - 325 |
| 11 - 12 | + 125 | - 300 | - 175 | - 500 |
| 12 - 13 | + 125 | - 300 | - 175 | - 675 |
| 13 - 14 | + 125 | - 300 | - 175 | - 850 |
| 14 - 15 | + 125 | 0 | + 125 | - 725 |
| 15 - 16 | + 125 | 0 | + 125 | - 600 |
| 16 - 17 | + 75 | 0 | + 75 | - 525 |
| 17 - 18 | + 75 | 0 | + 75 | - 450 |
| 18 - 19 | + 75 | 0 | + 75 | - 375 |
| 19 - 20 | + 75 | 0 | + 75 | - 300 |
| 20 - 21 | + 75 | 0 | + 75 | - 225 |
| 21 - 22 | + 75 | 0 | + 75 | - 150 |
| 22 - 23 | + 75 | 0 | + 75 | - 75 |
| 23 - 24 | + 75 | 0 | + 75 | 0 |
| | $\Sigma = 2400$ | $\Sigma = 2400$ | | |

Cuadro 7.8. Método analítico para el cálculo del volumen de almacenamiento a base de los porcentajes del gasto medio horario requeridos para cubrir la demanda.

| HORAS | ENTRADAS % | SALIDAS % | PORCENTAJES REQUERIDOS |
|---------|-----------------|-----------------|---------------------------|
| 0 - 1 | 75 | 0 | 0 |
| 1 - 2 | 75 | 0 | 0 |
| 2 - 3 | 75 | 0 | 0 |
| 3 - 4 | 75 | 0 | 0 |
| 4 - 5 | 125 | 0 | 0 |
| 5 - 6 | 125 | 0 | 0 |
| 6 - 7 | 125 | 300 | 175 |
| 7 - 8 | 125 | 300 | 175 |
| 8 - 9 | 125 | 300 | 175 |
| 9 - 10 | 125 | 300 | 175 |
| 10 - 11 | 125 | 300 | 175 |
| 11 - 12 | 125 | 300 | 175 |
| 12 - 13 | 125 | 300 | 175 |
| 13 - 14 | 125 | 300 | 175 |
| 14 - 15 | 125 | 0 | 0 |
| 15 - 16 | 125 | 0 | 0 |
| 16 - 17 | 75 | 0 | 0 |
| 17 - 18 | 75 | 0 | 0 |
| 18 - 19 | 75 | 0 | 0 |
| 19 - 20 | 75 | 0 | 0 |
| 20 - 21 | 75 | 0 | 0 |
| 21 - 22 | 75 | 0 | 0 |
| 22 - 23 | 75 | 0 | 0 |
| 23 - 24 | 75 | 0 | 0 |
| | $\Sigma = 2400$ | $\Sigma = 2400$ | $\Sigma = 1400$ |

Ejemplo 7.2

Considere una población pequeña cuyo gasto máximo diario es de 50 litros por segundo. Calcule gráficamente el volumen del tanque de regularización para las siguientes condiciones:

- a) Suponiendo que la alimentación al tanque es durante 24 horas y;
- b) Suponiendo que la alimentación al tanque es durante 8 horas comenzando a las 7:00 horas.

Solución:

Como el gasto máximo diario es de 50 l/s, el volumen diario total consumido es de:

$$V_{\text{TOTAL}} = \frac{50 \times 86400}{1000} = 4320 \text{ m}^3$$

lo que equivale a un volumen medio de:

$$V = \frac{4320}{24} = 180 \text{ m}^3/\text{hora}$$

y como se trata de una población pequeña, usando los datos de porcentaje de consumo del cuadro 7.1, se obtienen los resultados que se muestran en el Cuadro 7.9.

En la Figura 7.25 se ha graficado la curva masa de los consumos a partir de la columna 4 del Cuadro 7.9. Debido a que en la condición a) el suministro es constante durante las 24 horas, la curva masa correspondiente es una línea recta que se inicia en el origen y termina a las 24 horas con un volumen de salida acumulado de 4320 m³.

En la Figura 7.25, Y₁ es el "máximo excedente" y corresponde a la mayor distancia vertical medida entre la curva masa de suministro y la curva masa de consumos cuando la primera se encuentra por arriba de la segunda, y Y₂ es el "máximo faltante" y corresponde a la mayor distancia vertical medida entre la curva masa de suministro y la curva masa de consumos cuando la primera se encuentra por debajo de la

segunda.

El volumen del tanque para la condición a) es la suma de Y₁ más Y₂.

En la Figura 7.26 se ha dibujado nuevamente la curva masa de consumos y la curva masa de suministros es una línea recta, por ser constante el bombeo, y se inicia a las 7 horas y termina a las 15 horas con un volumen de salida acumulado de 4320 m³. El volumen del tanque es, como en el caso anterior, la suma de Y₁ más Y₂, como se observa en la Figura 7.26.

Cuadro 7.9. Volúmenes acumulados del ejemplo 7.2.

| HORA | % | VOLUMEN CONSUMIDO EN EL INTERVALO (m ³) | VOLUMEN ACUMULADO CONSUMIDO m ³ |
|---------|-----------------|--|--|
| 0 - 1 | 45 | 81 | 81 |
| 1 - 2 | 45 | 81 | 162 |
| 2 - 3 | 45 | 81 | 243 |
| 3 - 4 | 45 | 81 | 324 |
| 4 - 5 | 45 | 81 | 405 |
| 5 - 6 | 60 | 108 | 513 |
| 6 - 7 | 90 | 162 | 675 |
| 7 - 8 | 135 | 243 | 918 |
| 8 - 9 | 150 | 270 | 1118 |
| 9 - 10 | 150 | 270 | 1458 |
| 10 - 11 | 150 | 270 | 1728 |
| 11 - 12 | 140 | 252 | 1980 |
| 12 - 13 | 120 | 216 | 2196 |
| 13 - 14 | 140 | 252 | 2448 |
| 14 - 15 | 140 | 252 | 2700 |
| 15 - 16 | 130 | 234 | 2934 |
| 16 - 17 | 130 | 234 | 3168 |
| 17 - 18 | 120 | 216 | 3384 |
| 18 - 19 | 100 | 180 | 3564 |
| 19 - 20 | 100 | 180 | 3744 |
| 20 - 21 | 90 | 162 | 3906 |
| 21 - 22 | 90 | 162 | 4068 |
| 22 - 23 | 80 | 144 | 4212 |
| 23 - 24 | 60 | 108 | 4320 |
| | $\Sigma = 2400$ | $\Sigma = 4320$ | |

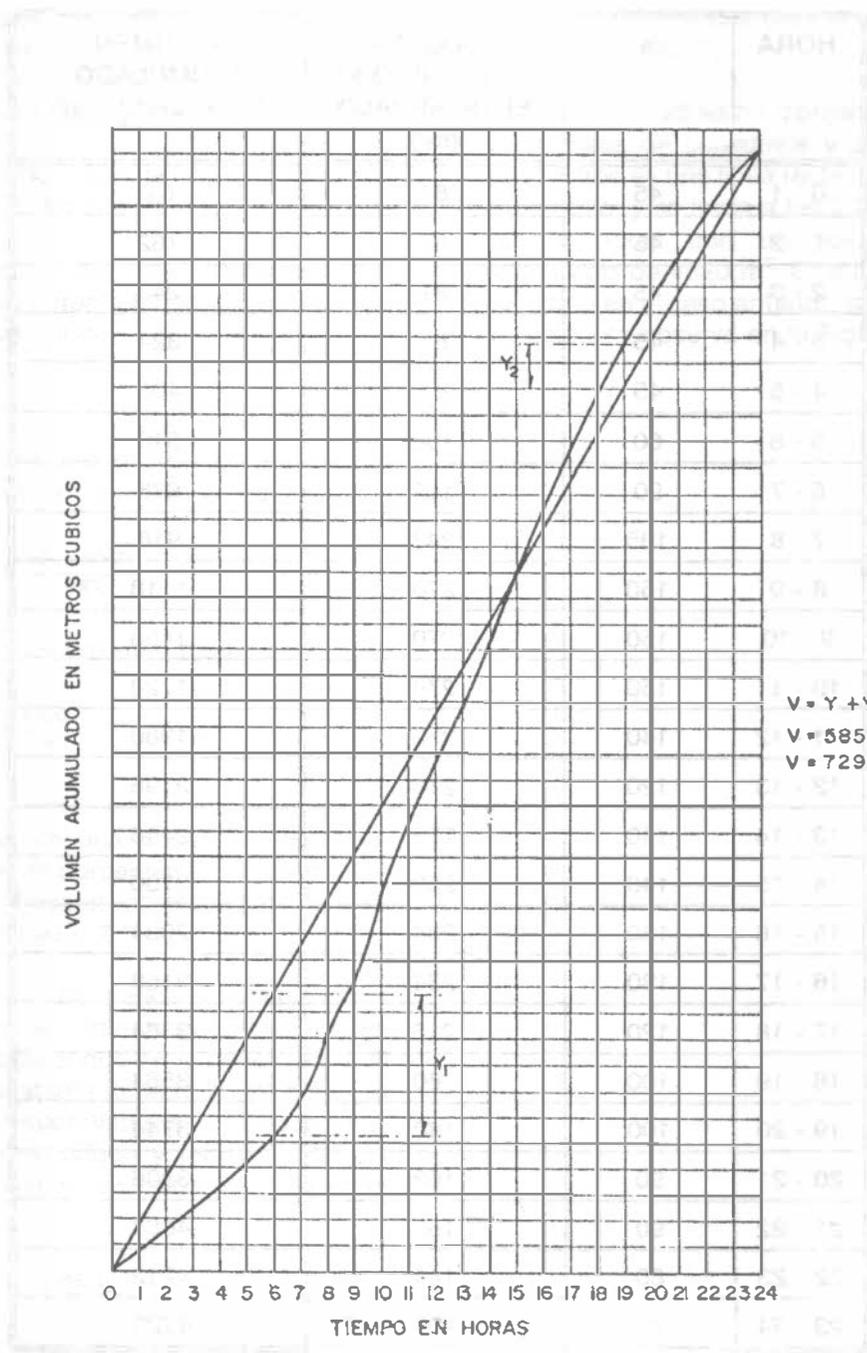


Figura 7.25. Alimentación al tanque durante 24 horas comenzando a las 0:00 horas.

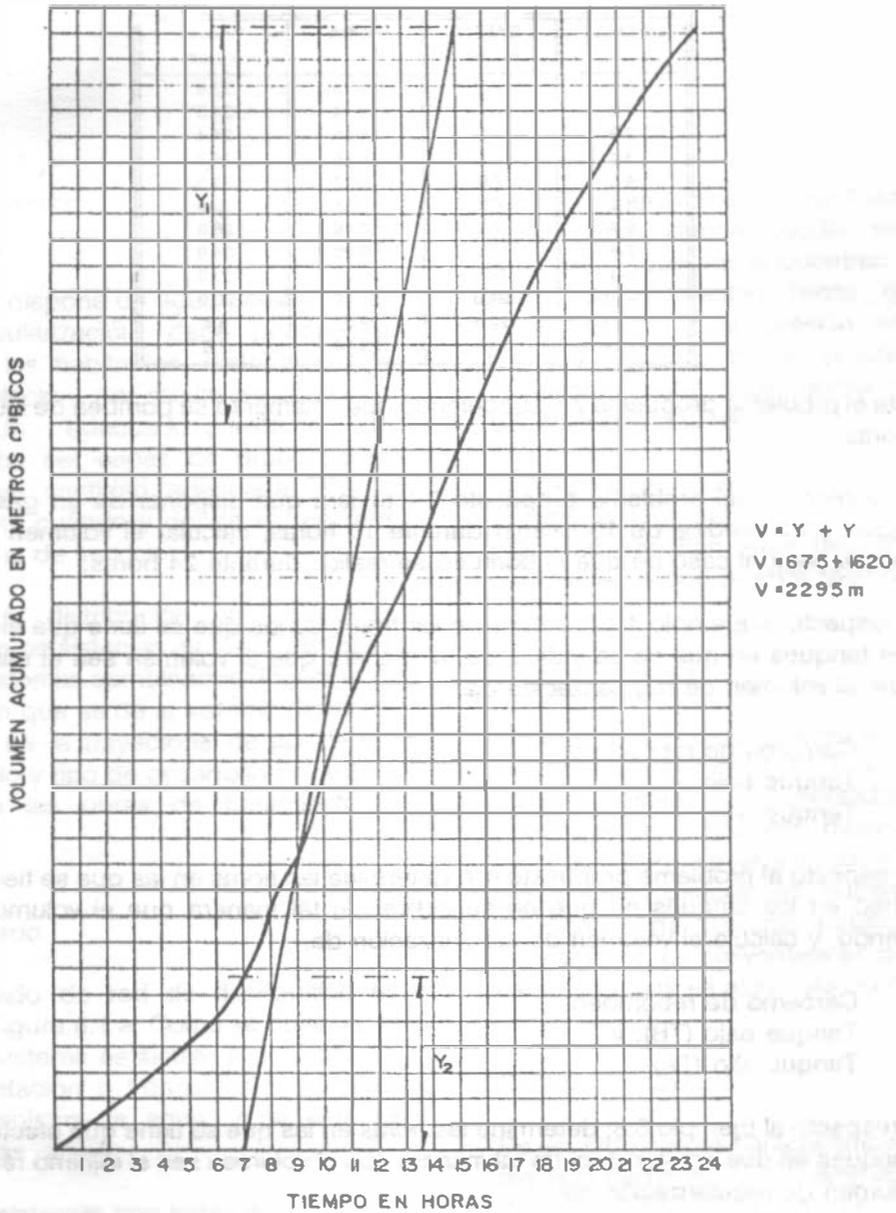


Figura 7.26. Alimentación al tanque durante 8 horas comenzando a las 7:00 horas.

Problemas

- 7.1 A partir de las demandas horarias que se indican a continuación, determinar el gasto de bombeo y el volumen de regularización requerido para poder hacer frente a la demanda máxima horaria.

| HORA | GASTO m ³ /min | HORA | GASTO m ³ /min |
|-------|------------------------------|-------|------------------------------|
| 0-1 | 7.2 | 12-13 | 23.9 |
| 1-2 | 7.1 | 13-14 | 24.5 |
| 2-3 | 7.0 | 14-15 | 24.4 |
| 3-4 | 7.1 | 15-16 | 24.2 |
| 4-5 | 7.0 | 16-17 | 24.3 |
| 5-6 | 7.3 | 17-18 | 25.6 |
| 6-7 | 7.5 | 18-19 | 26.9 |
| 7-8 | 12.2 | 19-20 | 34.0 |
| 8-9 | 18.9 | 20-21 | 33.0 |
| 9-10 | 21.0 | 21-22 | 20.0 |
| 10-11 | 22.8 | 22-23 | 8.4 |
| 11-12 | 23.5 | 23-24 | 7.6 |

- 7.2 Repita el problema propuesto 7.1 suponiendo que solamente se bombea de las 6 horas hasta las 18 horas.
- 7.3 Si la población del problema propuesto 7.1 tuviera que disponer de un gasto adicional para extinción de incendios de 10 m³/min durante 10 horas, calcular el volumen de regularización necesario para el caso de que el bombeo se realice durante 24 horas.
- 7.4 Con respecto al Ejemplo 4.12, determine las horas en las que se tiene que efectuar el bombeo en los tanques en que no se indica, de tal manera que el volumen sea el mínimo requerido, y calcule el volumen de regularización de:
- Cárcamo de rebombeo;
 - Tanque bajo; y
 - Tanque alto.
- 7.5 Con respecto al problema propuesto 4.7, determine las horas en las que se tiene que efectuar el bombeo en los tanques en que no se indica, de tal manera que el volumen sea el mínimo requerido, y calcule el volumen de regularización de:
- Cárcamo de rebombeo;
 - Tanque bajo (TB); y
 - Tanque alto (TA).
- 7.6 Con respecto al Ejemplo 3.8, determine las horas en las que se tiene que efectuar el bombeo en los tanques en que no se indica, de tal manera que el volumen sea el mínimo requerido, y calcule el volumen de regularización de:
- Cárcamo de rebombeo;
 - Tanque bajo (TB); y
 - Tanque alto (TA).

8.1 GENERALIDADES

Una vez que se dispone de agua potable en el tanque de regularización, debe ponerse a disposición de los habitantes, distribuyéndola por toda la población, por medio de la red de distribución. Un adecuado sistema de distribución debe ser capaz de proporcionar agua potable en cantidad adecuada y a la presión suficiente cuándo y dónde se requiera dentro de la zona de servicio.

Las redes de distribución se clasifican generalmente como sistemas en malla, sistemas ramificados y sistemas combinados (Figura 8.1). La configuración que se dé al sistema depende principalmente de la trayectoria de las calles, topografía, grado y tipo de desarrollo del área y localización de las obras de tratamiento y regularización.

Sistema ramificado.

El tipo ramificado de red de distribución se muestra en la Figura 8.1 a. Como se observa, la estructura del sistema es similar a un árbol. La línea de alimentación o troncal es la principal fuente de suministro de agua, y de ésta se derivan todas las ramas.

Aunque estos sistemas son simples de diseñar y construir, no son favorecidos en la actualidad por las siguientes razones: 1) en los extremos finales de las ramas se pueden presentar crecimientos bacterianos y sedimentación debido a estancamiento; 2) es difícil que se mantenga una dosis de cloro residual en los extremos muertos de la tubería; 3) cuando tienen que

hacerse reparaciones a una línea individual en algún punto, deben quedar sin servicio las conexiones que se encuentran más allá del punto de reparación hasta que ésta sea efectuada; y 4) la presión en los puntos terminales de las ramas puede llegar a ser indeseablemente baja conforme se hacen ampliaciones a la red.

El sistema ramificado se tiene generalmente cuando la topografía y el alineamiento de las calles no permitan tener circuitos, o bien, en comunidades con predios muy dispersos.

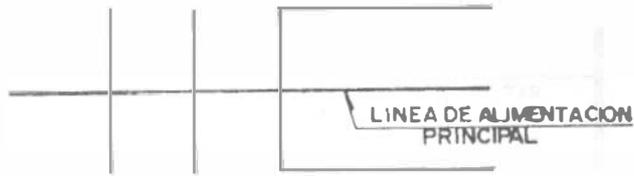
Sistema en malla

El rasgo distintivo del sistema en malla, como el mostrado en la Figura 8.1 b, es que todas las tuberías están interconectadas y no hay terminales o extremos muertos. En estos sistemas, el agua puede alcanzar un punto dado desde varias direcciones, superando todas las dificultades del sistema ramificado, discutido previamente. La desventaja es que el diseño de estos sistemas es algo más complicado.

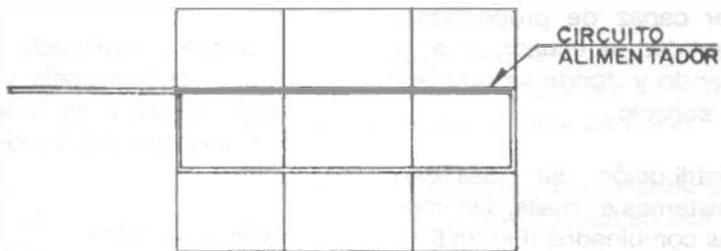
Sistema combinado

De acuerdo con las características de la zona, en algunos casos se hacen ampliaciones a la red de distribución en malla con ramas abiertas, como se muestra en la Figura 8.1 c, resultando un sistema combinado.

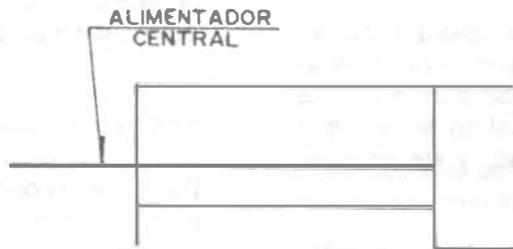
Este tipo de sistema, tiene la ventaja de permitir el uso de alimentadores en circuito que suministran agua a una área desde más de una dirección.



a) Sistema ramificado.



b) Sistema en malla.



c) Sistema combinado.

Figura 8.1. Configuraciones del sistema de distribución.

8.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION.

Tuberías

Un sistema de distribución está formado por una red de tuberías y a su vez ésta se compone de tuberías de alimentación, principales y secundarias; esta designación depende de la magnitud de su diámetro y de su posición relativa con respecto a las demás tuberías, como se explica a continuación:

a) *Líneas de alimentación.* Cuando la red trabaja por gravedad, la línea de alimentación parte del tanque de regularización y termina en el lugar donde se hace la primera derivación. En esta línea fluye el total del gasto considerado, por lo tanto resulta la de diámetro mayor; esto sucede cuando se ha de proyectar un solo tanque de regularización. Cuando haya más de uno, habrá tantas líneas de alimentación como tanques se tengan, pero en todo caso, la suma de los gastos que fluye en estas líneas debe ser igual al gasto máximo horario. (Figura 8.2). Cuando el sistema es por bombeo directo a la red con excedencias al tanque, las líneas de alimentación se originan en las estaciones de bombeo y terminan en la primera inserción.

b) *Tuberías primarias.* En el sistema de malla, son las tuberías que forman los circuitos, localizándose a distancias entre 400 y 600 m. En el sistema ramificado es la tubería troncal de donde se hacen las derivaciones. A estas líneas están conectadas las líneas secundarias o de relleno.

c) *Tuberías secundarias o de relleno.* Una vez localizadas las tuberías de alimentación, a las tuberías restantes para cubrir el área de proyecto se les llama secundarias o de relleno.

d) *Tomas domiciliarias.* Es la parte de la red gracias a la cual los habitantes de la población tienen agua en su propio predio.

Se recomienda al lector la consulta del documento titulado: "Especificaciones para la

selección de materiales e instalación de tomas domiciliarias para agua (diámetros de 13 a 19 mm)", elaborado por la Comisión Nacional del Agua.

En las tuberías de alimentación y en las primarias, el diámetro se determina en función del gasto máximo horario. El diámetro mínimo a utilizar es de 100 mm, excepto en colonias urbanas populares, donde se puede aceptar 75 mm, y en zonas rurales hasta 50 mm de diámetro. Las tuberías pueden ser de fibrocemento clase A-5, PVC y polietileno.

La red secundaria no se calcula hidráulicamente. Las tuberías secundarias o de relleno son de 75 ó 100 mm de diámetro mínimo. Sólo en localidades urbanas populares puede ser de 50 a 60 mm. Los materiales son los mismos que para las tuberías primarias.

Con el fin de reducir al máximo el costo por concepto de piezas especiales y válvulas de seccionamiento así como para facilitar la operación de la red, se buscará proyectar las tuberías secundarias a desnivel en los cruceros interiores de los circuitos (red en dos planos) (Figura 8.4).

Válvulas.

Los tipos de válvulas comúnmente usadas en la red de distribución son las de compuerta, de expulsión de aire y de retención. En general tres válvulas de compuerta se usan en las tuberías que concurren a cruces y dos válvulas en todas las té; sin embargo, para un proyecto en particular se recomienda estudiar con todo cuidado la situación de las válvulas procurando utilizar el menor número posible de estos accesorios. La principal función de estas válvulas es aislar subsecciones del sistema para reparaciones y mantenimiento. En los puntos bajos de la red para desagüe y en los sitios altos se colocan válvulas de expulsión de aire; las válvulas de retención se usan para limitar el flujo del agua hacia una dirección. En los cruceros con válvulas debe construirse una caja adecuada para su operación, en función del diámetro, número de válvulas y su ubicación.

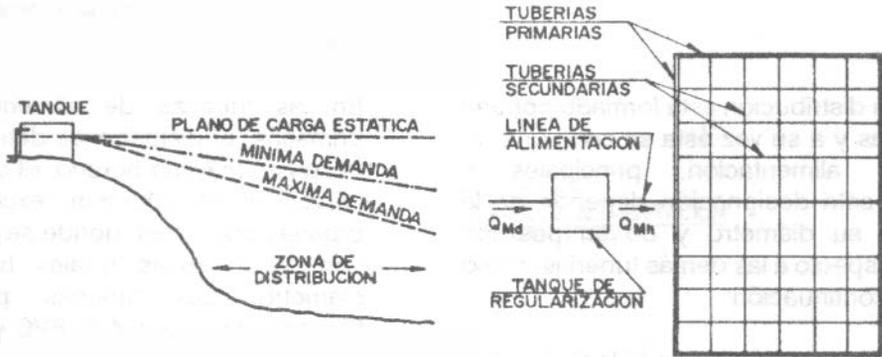


Figura 8.2. Sistema por gravedad

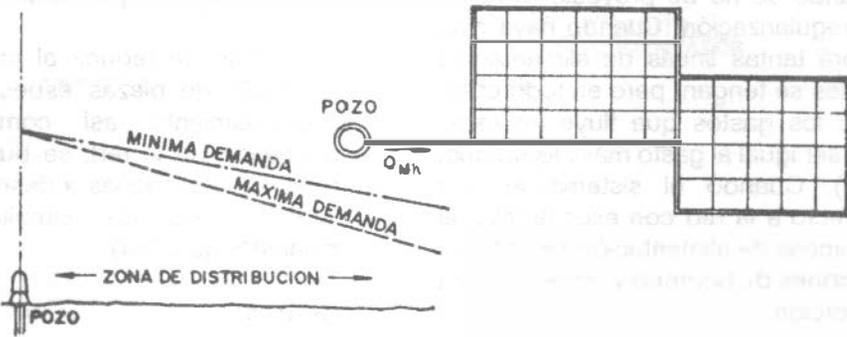


Figura 8.3. Sistema abastecido directamente por bombeo.

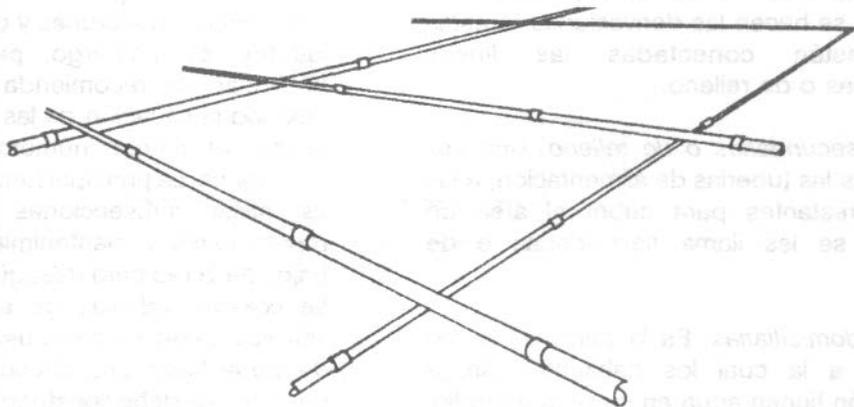


Figura 8.4. Tuberías secundarias a desnivel en los cruces interiores en un circuito.

8.3 PRESIONES REQUERIDAS Y VELOCIDAD DE FLUJO EN LA RED

El buen funcionamiento de un sistema de distribución se juzga con base en las presiones disponibles para un gasto especificado. Las presiones deberán ser lo suficientemente altas para cubrir las necesidades de los usuarios y por otro lado no deberán ser excesivas para no elevar los costos y evitar dañar la red interior de los edificios. Además, cuando la presión es excesiva se incrementan las fugas, lo que implica un costo no recuperable. Las presiones que se han de mantener en cualquier punto de la red deben permitir el suministro de una cantidad razonable de agua en los pisos más altos de las casas y fábricas y en los edificios comerciales de no más de 4 pisos. En general, se adoptan los valores que se presentan en el cuadro 8.1.

Cuadro 8.1. Valores de presión usuales en la red de distribución

| Zonas | Presión disponible (kg/cm ²) |
|--------------------|--|
| Residencial de 2a. | 1.5 a 2.0 |
| Residencial de 1a. | 2.0 a 2.5 |
| Comercial | 2.5 a 4.0 |
| Industrial | 3.0 a 4.0 |

En el proyecto, las presiones resultantes se calculan con relación al nivel de la calle en cada cruce de las tuberías primarias o de circuito. La presión mínima debe ser de 15 m de columna de agua y máxima de 50 m. En el caso de localidades urbanas pequeñas se puede admitir una presión mínima de 10 m de columna de agua. Para el cálculo de la presión máxima se partirá de la elevación máxima del agua en el tanque.

En las localidades que presenten cambios bruscos de su topografía, es común dividir el sistema de distribución en dos o más zonas de servicio, una zona de presión alta y una zona de

presión baja. Con esto se evitan las presiones excesivas en las zonas bajas cuando se quieren mantener al mismo tiempo presiones razonables en las zonas altas. Normalmente se interconectan los sistemas para casos de emergencia.

En cuanto a la velocidad de flujo en la red, para diseño se recomienda partir de valores comprendidos entre 1.2 y 1.8 m/s, los cuales se ajustarán en cada caso particular.

Para el diseño de la red de distribución, se debe disponer de un plano topográfico de la población de escala 1:2000 con curvas de nivel de equidistancia en los alrededores de 0.50 m o por lo menos con cotas en las intersecciones de las calles.

8.4 DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION RAMIFICADOS.

El procedimiento a seguir es, en general, el siguiente:

1. Se divide la ciudad en zonas de distribución, atendiendo al carácter de las mismas en: residencial, comercial e industrial. Resulta práctico colorear las zonas con un color distinto para cada clase, con el fin de localizarlas rápidamente durante el diseño.
2. Se procede a un trazado tentativo, que tenga un conducto principal, que se ramifique para conducir el agua a cada zona o grupo de zonas de distribución y se anotan las longitudes de cada tramo de tubería, que se obtendrán con el uso de un escalímetro.
3. Se determina el coeficiente de gasto por metro de tubería, dividiendo el gasto máximo horario entre la longitud virtual de toda la red. El concepto de "longitud virtual" se usará exclusivamente para definir qué gasto ha de circular por cada tramo de tubería al cual se le denomina gasto propio. Así por ejemplo, resulta evidente que un tramo de tubería que abastezca predios por un solo lado, como el A-B de la Figura 8.5, deberá conducir menos gasto que el tramo C-D de la misma Figura,

ya que este último abastece de agua a predios ubicados a cada lado del mismo. Si se trata de una zona con población uniformemente distribuída, resulta de lo antes dicho que el tramo C-D conducirá el doble de gasto que el tramo A-B. Correlacionando gastos con longitudes, es como si el tramo C-D, tuviera una longitud del doble de la del tramo A-B, siendo que en realidad, los dos tramos miden lo mismo. De acuerdo con este razonamiento expresamos que el tramo C-D tiene una longitud real de 100 metros, pero que virtualmente (existencia aparente y no real) tiene una longitud de 200 metros. Para el tramo A-B, que solo abastece predios por un solo lado, la longitud real es igual a la longitud virtual. En resumen:

a) Para líneas de alimentación $L_{VIRTUAL} = 0$

b) Para tuberías que abastecen de agua a predios localizados a un solo lado de la línea:

$$L_{VIRTUAL} = L_{REAL}$$

c) Para tuberías que abastecen de agua a predios localizados a ambos lados de la línea:

$$L_{VIRTUAL} = 2 L_{REAL}$$

Sumando las longitudes virtuales tramo a tramo de la red, se obtiene entonces el coeficiente de gasto por metro de tubería q , con la expresión siguiente:

$$q = \frac{Q_{MH}}{\sum L_{VIRTUAL}}$$

donde

q = coeficiente de gasto por metro [l/s·m]

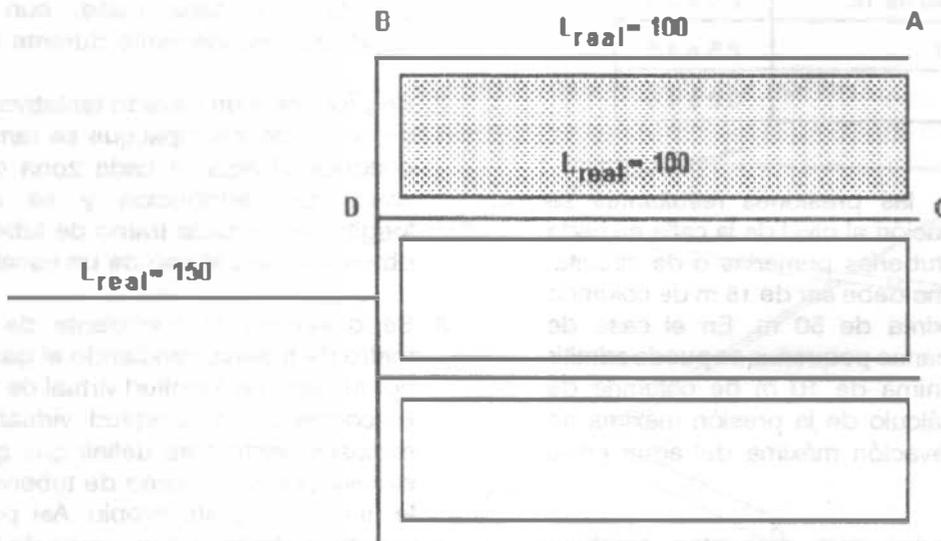


Figura 8.5. Tramos que abastecen predios a un solo lado (A-B) y a ambos lados (D-C) de la tubería.

Q_{MH} = gasto máximo horario

$\sum_i^j L_{VIRTUAL}$ = sumatoria de las longitudes virtuales de cada tramo de la red [m]

Obsérvese que si, de acuerdo a como se ha dividido la ciudad en zonas, se tienen concentraciones de población diferentes de una a otra zona, también el coeficiente de gasto por metro ha de ser diferente de acuerdo con la zona. De la misma forma, variará de acuerdo con el carácter de la zona dependiendo de si es industrial o comercial. Así pues, los coeficientes de gasto se determinan usando las dotaciones y poblaciones de las zonas a las que alimenta el tramo considerado.

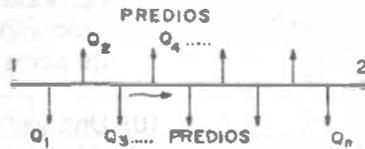
4. Se numeran los cruceos que se tengan en la red.

5. Se calculan los gastos propios de cada tramo de la red, multiplicando el coeficiente de gasto "q" por la longitud virtual del tramo de tubería.

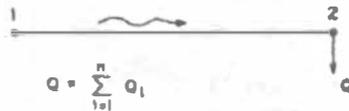
$$Q_{propio} = q \times L_{VIRTUAL} \quad (8.2)$$

6. Se efectúa el cálculo de los gastos acumulados por cada tramo de tubería, comenzando desde el más distante al más cercano al depósito de regularización, sumando, cuando sea necesario, los gastos de los tramos secundarios.

7. Se determina el diámetro de los distintos tramos o secciones del conducto, haciendo uso del gasto acumulado que deben conducir, considerándolo concentrado en el extremo o nudo terminal (Figura 8.6).



Caso Real



Idealización

Figura 8.6. Consideración del gasto acumulado del tramo, concentrado en el nudo terminal y caso real con tomas domiciliarias por cada predio.

A partir de la expresión

$$Q = Av$$

y sabiendo que $A = \frac{\pi d^2}{4}$, se tiene:

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} v$$

despejando d

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}}$$

considerando una velocidad de flujo de 1.2 m/s

$$d = 1.03 \sqrt{Q}$$

en donde

d = diámetro de la tubería en m

Q = gasto acumulado del tramo en m³/s

y haciendo una conversión de unidades, conveniente, se tiene:

$$d = 1.28 \sqrt{Q} \quad (8.3)$$

donde

d = diámetro de la tubería en pulgadas

Q = gasto acumulado del tramo en l/s

El diámetro obtenido con esta última expresión, por ser teórico, debe ajustarse al diámetro comercial más aproximado.

Hasta aquí se tendría garantizada la cantidad de agua, falta garantizar la presión suficiente, para lo cual se hace lo siguiente:

8. Se determina el nudo de la red con la presión más desfavorable. Este puede ser aquel al que para llegar se requiera consumir la mayor pérdida de carga y que a la vez exista la presión requerida (entre 1.5 y 5 kg/cm²). En general, son puntos de presión desfavorable:

- a) Los más distantes al tanque regularizador
- b) Los nudos de nivel topográfico más alto y
- c) Los más distantes y más altos, simultáneamente.

El que presente mayor pérdida de carga será el punto más desfavorable que gobierna el diseño. Las pérdidas de carga pueden calcularse con la fórmula de Manning o con la fórmula de Hazen y Williams.

Si este primer diseño no cumple con las presiones requeridas, se procede a rectificar el diseño, variando los diámetros necesarios o, si es posible, elevando el tanque regularizador.

9. Se procede a situar las válvulas de seccionamiento: en general, 3 en las intersecciones de 4 tuberías y 2 en las intersecciones de 3 tuberías, sin embargo, para cada proyecto se recomienda estudiar con todo cuidado la situación de las válvulas procurando utilizar el menor número posible de estos accesorios.
10. Una vez terminado el diseño, se procede a dibujar el plano definitivo de la red de distribución, donde debe aparecer:
 - a) Diámetros y longitudes
 - b) Piezas de conexión, válvulas, etc.
 - c) En cada nudo un círculo con los siguientes datos



La simbología usada en los proyectos para presentar los planos se reproduce en las Figuras 8.7 a 8.11.

11. Se hace una lista de diámetros y longitudes de tubería por cada diámetro, piezas especiales, válvulas, etc.
12. Muchas veces es necesario hacer planos de detalles de las conexiones en los cruces de

calle, para estudiar debidamente las combinaciones de piezas que resulten más económicas.

Todos los cálculos que presuponen el diseño anterior deben presentarse en forma de tabla, a libre elección del ingeniero a cargo del diseño. Se sugiere la tabla de cálculo del cuadro 8.2 a la cual se le pueden adicionar o restar las columnas que se considere necesario.

Dimensiones de los atraques de concreto para las piezas especiales

| Diámetro de la pieza especial | | Altura | Lado "A" | Lado "B" | Volumen por atraque |
|-------------------------------|-------|--------|----------|----------|---------------------|
| mm | Pulg. | cm | cm | cm | m ³ |
| ≤ 76 | ≤ 3 | 30 | 30 | 30 | 0.027 |
| 102 | 4 | 35 | 30 | 30 | 0.032 |
| 152 | 6 | 40 | 30 | 30 | 0.036 |
| 203 | 8 | 45 | 35 | 35 | 0.055 |
| 254 | 10 | 50 | 40 | 35 | 0.070 |
| 305 | 12 | 55 | 45 | 35 | 0.087 |
| 356 | 14 | 60 | 50 | 35 | 0.105 |
| 406 | 16 | 65 | 55 | 40 | 0.143 |
| 457 | 18 | 70 | 60 | 40 | 0.188 |
| 508 | 20 | 75 | 65 | 45 | 0.219 |
| 610 | 24 | 85 | 75 | 50 | 0.319 |
| 762 | 30 | 100 | 90 | 55 | 0.495 |
| 914 | 36 | 115 | 105 | 60 | 0.725 |
| 1067 | 42 | 130 | 120 | 65 | 1.014 |
| 1219 | 48 | 145 | 130 | 70 | 1.320 |

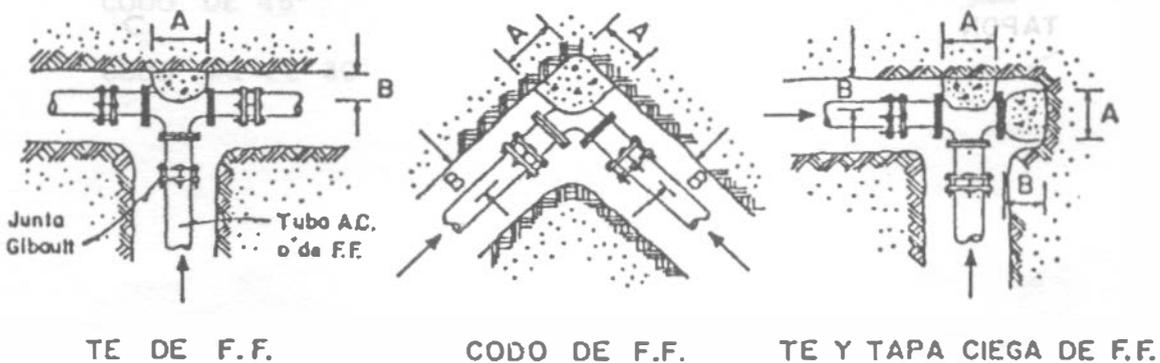


Figura 8.7. Dirección de los empujes y forma de colocar los atraques.

CRUZ

TE

COUPLE T CON SALIDA ROSCADA

CODO DE 90°

CODO DE 45°

CODO DE 22° 30'

CODO DE 90° PARA P.V.C ó AG

CODO DE 45° PARA P.V.C ó AG

CODO DE 22° 30' PARA P.V.C ó AG

REDUCCION

NIPLA

EXTREMIDAD

TRANSICION ENTRE CLASES INMEDIATAS

COUPLE DE EXPANSION o ADAPTADOR, para P.V.C.,
como galvanizado y fierro fundido

ADAPTADOR a tubería de plástico

TAPON

| Descripción | Material | Diámetro (mm) | Longitud (mm) |
|---|-----------------------------|---------------|---------------|
| CRUZ | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| TE | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| COUPLE T CON SALIDA ROSCADA | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| CODO DE 90° | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| CODO DE 45° | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| CODO DE 22° 30' | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| CODO DE 90° PARA P.V.C ó AG | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| CODO DE 45° PARA P.V.C ó AG | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| CODO DE 22° 30' PARA P.V.C ó AG | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| REDUCCION | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| NIPLA | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| EXTREMIDAD | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| TRANSICION ENTRE CLASES INMEDIATAS | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| COUPLE DE EXPANSION o ADAPTADOR, para P.V.C., como galvanizado y fierro fundido | Galvanizado, Fierro fundido | 50, 75, 100 | 100 |
| ADAPTADOR a tubería de plástico | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |
| TAPON | P.V.C. | 50, 75, 100 | 100 |

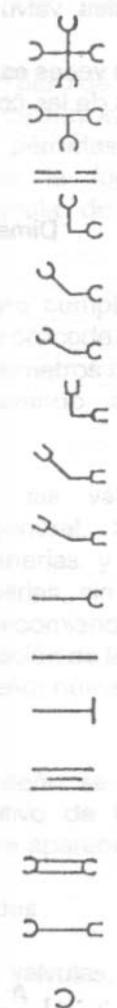
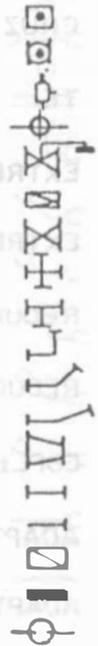


Figura 8.8. Signos convencionales de piezas especiales de fibro-cemento.

| | |
|--------------------|---|
| CRUZ |  |
| TE |  |
| EXTREMIDAD CAMPANA |  |
| EXTREMIDAD ESPIGA |  |
| REDUCCION CAMPANA |  |
| REDUCCION ESPIGA |  |
| COPELE DOBLE |  |
| ADAPTADOR CAMPANA |  |
| ADAPTADOR ESPIGA |  |
| TAPON CAMPANA |  |
| TAPON ESPIGA |  |
| CODO DE 90° |  |
| CODO DE 45° |  |
| CODO DE 22° 30' |  |

Figura 8.9. Signos convencionales de piezas especiales de P.V.C.

- Válvula reductora de presión
- Válvula de altitud
- Válvula divisoria de presión
- Válvula para expulsión de aire
- Válvula de flotador
- Válvula de retención (check) de f.f. con brida
- Válvula de seccionamiento de f.f. con brida
- Cruz de f.f. con brida
- Te de f.f. con brida
- Codo de 90° de f.f. con brida
- Codo de 45° de f.f. con brida
- Codo de 22°30' de f.f. con brida
- Reducción de f.f. con brida
- Carrele de f.f. con brida (corto y largo)
- Extremidad de f.f. con brida
- Topa con cuerda
- Topa ciega de f.f.
- Junta Gibault



PIEZAS ESPECIALES G.P.B

- Válvula vofflex J.J. (con 2 juntas universales G.P.B.)
- Válvula vofflex B.J. (con una brida y una junta universal)
- Válvula reducción vofflex B.J. (con una brida y una junta universal)
- Junta universal G.P.B.
- Terminal G.P.B.
- Reducción G.P.B.-B.B. (con 2 bridas planas)
- Reducción G.P.B.-B.J. (con una brida y una junta universal)

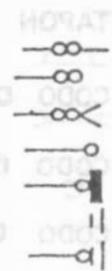


Figura 8.10. Signos convencionales de piezas especiales para conexiones.

Cuadro 8.2. Tabla de cálculo para red de distribución ramificada.

| Tramo | Longitud (m) | | Gastos (l/s) | | Diámetro | | | | Pérdidas hf (m) | Cotas | | Carga disponible (m) |
|-------|--------------|---------|--------------|-----------|----------|------|-----------|------|-----------------|--------------|---------|----------------------|
| | Real | Virtual | Propio | Acumulado | Teórico | | Comercial | | | Piezométrica | Terreno | |
| | | | | | m | pulg | m | pulg | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Ejemplo 8.1

Calcular las pérdidas de carga en los tramos 22-22', 22'-F' y las cotas piezométricas en los puntos 22', E' y F' (Figura 8.12).

Solución:

Las pérdidas se calculan con la fórmula de Hazen-Williams usando el gasto acumulado.

El proceso de cálculo se presenta en la tabla anexa, en donde:

- q - gasto tributario del tramo en l/s
- Q - gasto acumulado del tramo en l/s
- D - distancia o longitud del tramo
- d - diámetro de la tubería en pulgadas
- c - coeficiente de H-W
- H - pérdida de carga en m.

Para el tramo 22-22', por ejemplo, se obtiene:

$$Q = 1.251 + 0.118 + 0.118 = 1.487$$

$$S = \sqrt[0.54]{\frac{Q}{0.0177435938 \times C \times d^{2.63}}}$$

$$S = H_f/L \quad H_f = SL \quad L = D$$

$$H_f = \sqrt[0.54]{\frac{1.487}{0.0177435938 \times 140 (25)^{2.63}} \times D}$$

$$H_f = 1.031 \text{ m}$$

$$\text{Cota piezométrica} = 1017.566 - 1.031 = 1016.535$$

$$\text{Carga disponible} = 1016.535 - 997.873 = 18.662$$

Los tramos 22'-E' y 22'-F' se calculan en forma similar.

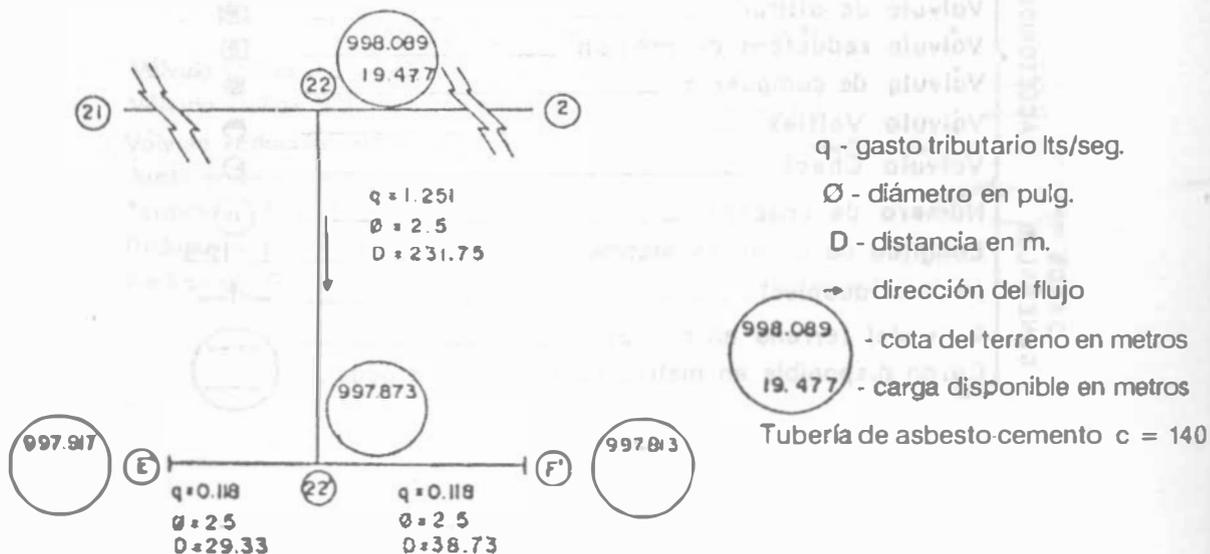


Figura 8.12.

Cuadro 8.3. Proceso de cálculo del ejemplo 8.1.

| Crucero | Tramo | q | Q | D | d | c | H | Cotas | | Carga disponible (m) |
|---------|--------|-------|-------|--------|-----|-----|-------|----------|---------|----------------------|
| | | | | | | | | Piezom. | Terreno | |
| 22 | | | | | | | | 1017.566 | 998.089 | 19.477 |
| 22' | 22-22' | 1.251 | 1.487 | 231.75 | 2.5 | 140 | 1.031 | 1016.535 | 997.873 | 18.662 |
| E' | 22'-E' | 0.118 | 0.118 | 29.33 | 2.5 | 140 | 0.001 | 1016.334 | 997.917 | 18.617 |
| F' | 22'-F' | 0.118 | 0.118 | 38.73 | 2.5 | 140 | 0.002 | 1016.532 | 997.813 | 18.719 |

Ejemplo 8.2

Considérese el diseño de una red abierta para un fraccionamiento (Figura 8.13).

DATOS DE PROYECTO:

Población de proyecto: 8000 habitantes (uniformemente repartida; casa tipo).

Dotación: 150 l/hab/día

Coefficiente de variación diaria: 1.2
 Coeficiente de variación horaria: 1.25

Carga disponible en cada crucero entre 15 y 45 m de columna de agua.

En la primera etapa de construcción, el tanque "Lagunillas de Rayón" dará servicio solamente a la zona Axochiapan I, pero se ha contemplado construir la zona Axochiapan II con capacidad para 9000 habitantes en una segunda etapa. Por esta razón, el tramo 1-2 deberá diseñarse para la población total (8000 + 9000 = 17000 habitantes).

Se instalará tubería de fibro-cemento.

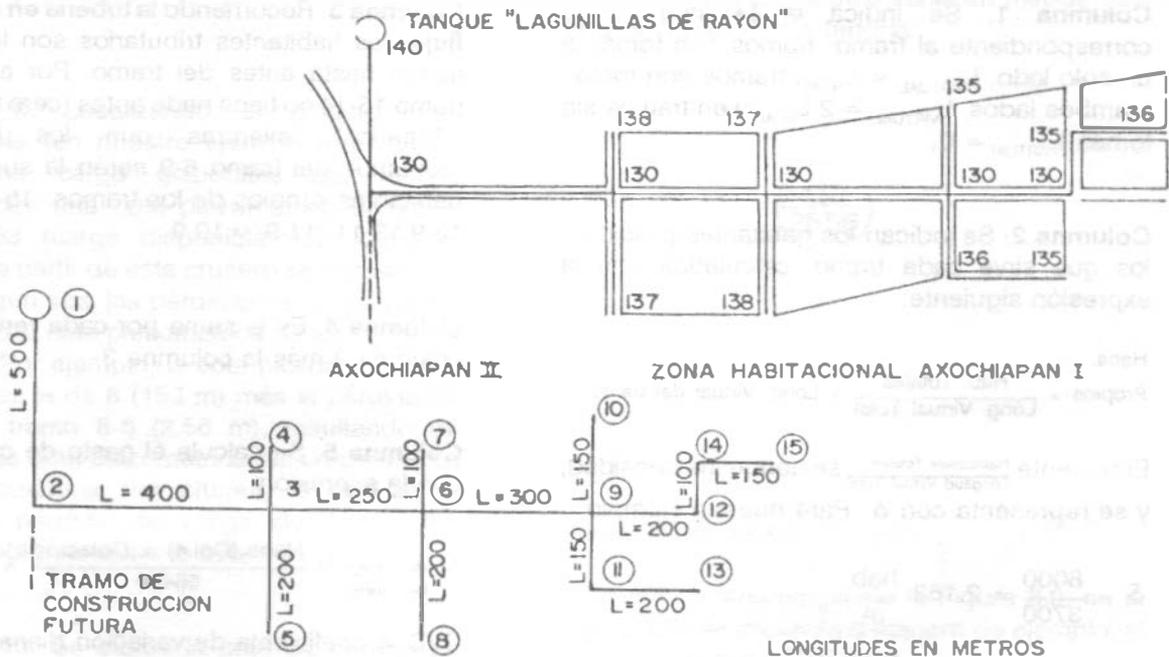


Figura 8.13. Esquema del ejemplo 8.2.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Los resultados se presentan en el cuadro 8.4. El proceso de cálculo se hace en contra del sentido

de flujo desde el punto o crucero más alejado al tanque de regularización.

Cuadro 8.4. Hoja de cálculo para el diseño de la red abierta del ejemplo 8.2.

| Tramo De A | Cruceo | Longitud real (m) | Longitud virtual | Propios | Habitantes Tributarios | Totales | Gasto l/s | Diámetro | | Pérdida de carga H (m) | Cotas | | Carga Disponible (m) |
|------------|--------|-------------------|------------------|---------|------------------------|---------|-----------|---------------|-----------------|------------------------|----------------|-----------|----------------------|
| | | | | | | | | Teórico pulg. | Comercial pulg. | | Piezométrica m | Terreno m | |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 15 a 14 | 15 | 150 | 300 | 649 | 0 | 649 | 2.81 | 2.14 | 2.5 | 1.128 | 151.08 | 136.0 | 15.08 |
| 14 a 12 | 14 | 100 | 200 | 432 | 649 | 1081 | 4.69 | 2.77 | 3.0 | 0.798 | 152.21 | 135.0 | 17.21 |
| 12 a 9 | 12 | 200 | 400 | 864 | 1081 | 1946 | 8.45 | 3.72 | 4.0 | 1.170 | 153.01 | 130.0 | 23.01 |
| 13 a 11 | 13 | 200 | 200 | 432 | 0 | 432 | 1.87 | 1.75 | 2.0 | 2.090 | 150.81 | 135.0 | 15.81 |
| 11 a 9 | 11 | 150 | 300 | 649 | 432 | 1081 | 4.69 | 2.77 | 3.0 | 1.190 | 152.90 | 136.0 | 16.09 |
| 10 a 9 | 10 | 150 | 300 | 649 | 0 | 649 | 2.81 | 2.14 | 2.5 | 1.120 | 153.06 | 135.0 | 18.06 |
| 9 a 6 | 9 | 300 | 600 | 1297 | 3676 | 4973 | 21.58 | 5.94 | 6.0 | 1.380 | 154.18 | 130.0 | 24.18 |
| 8 a 6 | 8 | 200 | 400 | 865 | 0 | 865 | 3.75 | 2.47 | 2.5 | 2.560 | 153.00 | 138.0 | 15.00 |
| 7 a 6 | 7 | 100 | 200 | 432 | 0 | 432 | 1.87 | 1.75 | 2.0 | 1.040 | 154.52 | 137.0 | 17.56 |
| 6 a 3 | 6 | 250 | 500 | 1081 | 6270 | 7351 | 31.90 | 7.22 | 8.0 | 0.580 | 155.56 | 130.0 | 25.56 |
| 5 a 3 | 5 | 200 | 200 | 432 | 0 | 432 | 1.87 | 1.75 | 2.0 | 2.090 | 154.05 | 137.0 | 17.05 |
| 4 a 3 | 4 | 100 | 100 | 216 | 0 | 216 | 0.94 | 1.24 | 2.0 | 0.290 | 155.85 | 138.0 | 17.85 |
| 3 a 2 | 3 | 400 | 0 | 0 | 7999 | 7999 | 34.72 | 7.54 | 8.0 | 0.064 | 156.14 | 130.0 | 26.14 |
| A-11 a 2 | - | - | 0 | 0 | 0 | 9000 | 39.06 | 7.99 | 8.0 | - | - | - | - |
| 2 a 1 | 2 | 500 | 0 | 0 | 16999 | 16999 | 73.78 | 10.99 | 12.0 | 0.76 | 157.23 | 130.0 | 27.23 |
| 1 | | | Σ = 3700 | | | | | | | | 158.00 | 140 | 18.00 |

Columna 1. Se indica la longitud virtual correspondiente al tramo: tramos con tomas a un solo lado, $L_{VIRTUAL} = L_{REAL}$; tramos con tomas a ambos lados, $L_{VIRTUAL} = 2 L_{REAL}$ y en tramos sin tomas $L_{VIRTUAL} = 0$.

Columna 2. Se indican los habitantes propios a los que sirve cada tramo, calculados con la expresión siguiente:

$$\text{Habs. Propios} = \frac{\text{Hab. Totales}}{\text{Long. Virtual Total}} \times \text{Long. Virtual del tramo}$$

El cociente $\frac{\text{Habitantes Totales}}{\text{Longitud Virtual Total}}$ se denomina densidad, y se representa con δ . Para nuestro ejemplo

$$\delta = \frac{8000}{3700} = 2.162 \frac{\text{hab}}{\text{m}}$$

Columna 3. Recorriendo la tubería en contra del flujo, los habitantes tributarios son los que se tienen hasta antes del tramo. Por ejemplo, el tramo 15-14 no tiene nada antes (cero habitantes tributarios), mientras que los habitantes tributarios del tramo 6-9 serán la suma de los habitantes propios de los tramos: 15-14, 14-12, 12-9, 13-11, 11-9, y 10-9.

Columna 4. Es la suma por cada región de la columna 2 más la columna 3.

Columna 5. Se calcula el gasto de cada tramo con la expresión

$$Q_{\text{Del Tramo}}^{\text{Máx. Horario}} = \frac{\text{Habs. (Col.4)} \times \text{Dotación}}{86400} \times \text{CVD} \times \text{CVH}$$

CVD = coeficiente de variación diaria
CVH = coeficiente de variación horaria

Columna 6. Se indica el diámetro teórico, calculado con la ecuación

$$D_T = 1.28 \sqrt{Q}$$

que supone una velocidad en la tubería de 1.2 m/s. La fórmula está en un sistema mixto de unidades, con Q en l/s y D en pulgadas.

Columna 7. Se indica el diámetro comercial, a criterio del proyectista, lo más aproximado al teórico. Para fibro-cemento, los diámetros comerciales son 2, 2.5, 3, 4, 6, 8, 10, etc. pulgadas.

Columna 8. Se indica la pérdida de carga, calculada con la fórmula de Hazen y Williams, traducida a un sistema mixto de unidades.

$$H = \sqrt[0.54]{\frac{Q}{0.0177 \times C \times D^{2.63}}} \times L_{\text{REAL}}$$

donde Q en l/s; D en pulg; L en m; C = 200 y H en m

Columna 9. Localizando el cruceo más desfavorable (en nuestro ejemplo el 8), se le asigna una carga disponible de 15 m, obteniéndose una cota piezométrica de $15 + 138 = 153$ (carga disponible más cota de terreno) y a partir de este cruceo se suman o se restan, según sea, las pérdidas de carga para ir obteniendo la cota piezométrica de los cruceos restantes. Por ejemplo, la cota piezométrica del cruceo 6 es la de 8 (153 m) más la pérdida de carga del tramo 8-6 (2.56 m), resultando de 155.56 m, la cota piezométrica del cruceo 6. La cota piezométrica del cruceo 6 (155.56 m) menos la pérdida de carga del tramo 9-6 (1.38 m), obteniéndose la cota 154.18 m.

Columna 10. Se indica la cota de terreno en cada cruceo; es un dato que se obtiene de la carta topográfica de la población.

Columna 11. Se indica la carga disponible del cruceo y se calcula como:

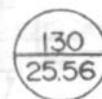
$$\text{COTA PIEZOMETRICA} - \text{COTA DE TERRENO} = \text{CARGA DISPONIBLE.}$$

Si en algún cruceo se tuvieran menos de 15 m de carga disponible, significaría que equivocamos el cruceo más desfavorable. Suponiendo que en alguno de los cruceos tuviéramos 14 m de carga disponible, tendríamos que elevar el tanque un metro para poder tener la carga disponible mínima requerida de 15 m. Si esto no fuera posible, tendríamos que revisar los diámetros para reducir las pérdidas.

En nuestro ejemplo, todos los cruceos cumplen con la carga disponible requerida.

En los planos de redes de distribución, cada tramo se representa con una simbología de acuerdo con su diámetro. La Figura 8.14, ilustra la simbología correspondiente a la red de nuestro ejemplo, basada en los símbolos de la Figura 8.11.

En cada cruceo se anotan en un círculo, la cota del terreno y la carga disponible en metros. Así, para el cruceo 6, se tendría.



Diseño de cruceos

Utilizando la simbología de la Figura 8.9, en la Figura 8.15 se presenta a manera de ejemplo, el diseño de algunos cruceos.

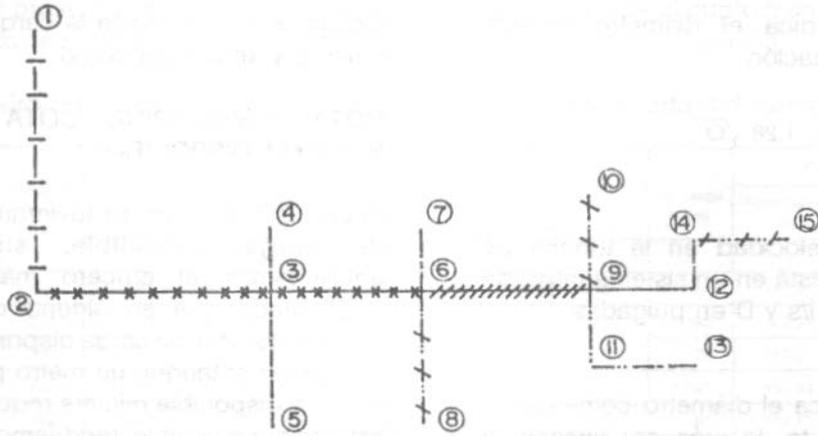


Figura 8.14. Simbología de la red ramificada del ejemplo 8.2.

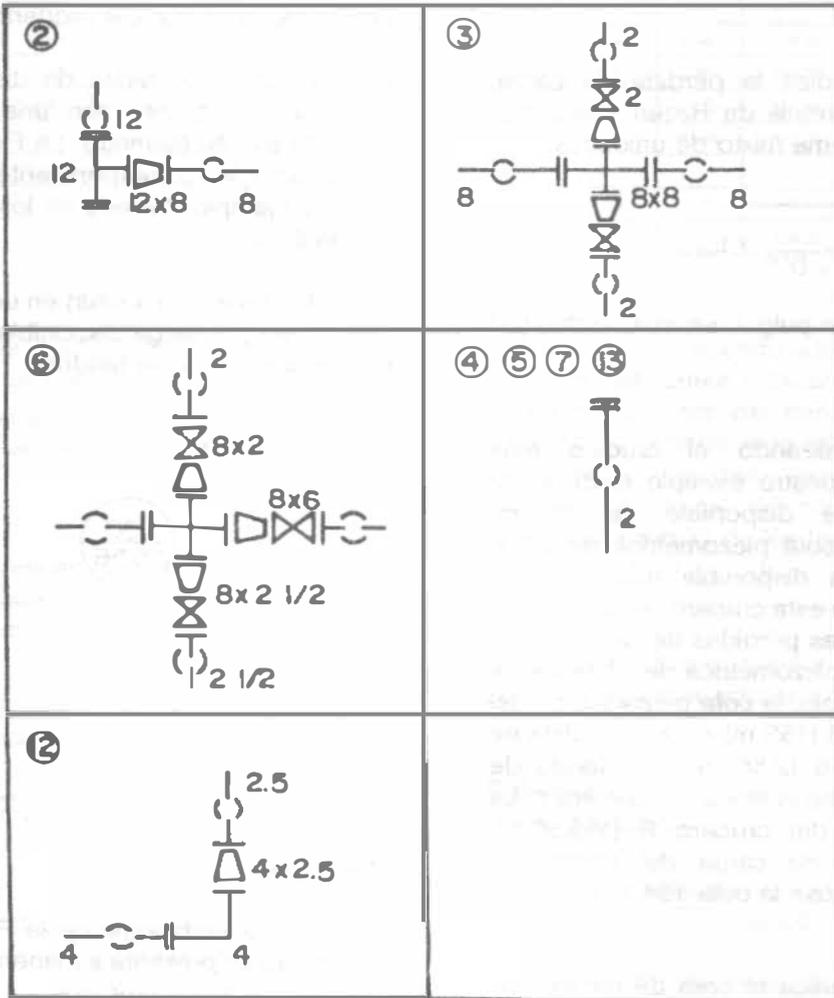


Figura 8.15. Algunos cruceos del ejemplo 8.2.

8.5 DISEÑO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION EN MALLA.

El diseño de un sistema de distribución en malla para una nueva área puede mecanizarse como se explica a continuación. El análisis de sistemas ya existentes se estudia en las siguientes secciones.

1. Obtener un plano topográfico del área a ser servida, escala 1:2000 con curvas de nivel equidistantes 0.50 m o por lo menos con cotas en las intersecciones de las calles presentes y futuras.
2. Basado en la topografía, seleccione la posible localización de los tanques de regularización. Si el área a ser servida es muy grande puede dividirse en varias subáreas con sistemas de distribución separados.
3. Disponer un "esqueleto" de red de distribución en malla que muestre la o las líneas de alimentación.
4. Estime el gasto máximo horario para el área o para cada subárea, según sea, teniendo en cuenta el crecimiento futuro.
5. Asigne una dirección al flujo en las tuberías y calcule el gasto propio de cada tramo de tubería utilizando el criterio de la longitud virtual que se estudió en la sección 8.4. Cuando se considera un consumo uniforme, el gasto propio se estima empleando un caudal unitario, es decir, por metro de longitud de tubería, que resulta de dividir el gasto máximo horario total demandado por la población entre la longitud virtual total de los circuitos principales. Si se consideran zonas de distintos consumos, se calcula según su amplitud, a partir de un gasto por unidad de área, distinto para cada zona de consumo.
6. En forma ficticia, suponer que se interrumpe la circulación del agua en unos tramos para formar una red abierta, con el objeto de definir perfectamente cuál tubería alimenta a

otras. Así se llegan a definir puntos en los que ya no existe posibilidad de alimentación a otros tramos, los cuales reciben el nombre de "puntos de equilibrio".

7. Acumular los gastos propios calculados en el paso 5 en sentido contrario al escurrimiento, partiendo de los puntos de equilibrio hasta llegar al punto de alimentación a la red.
8. Estimar el diámetro de las tuberías utilizando el gasto acumulado en cada tramo y la ecuación 8.3.
9. Usando alguno de los varios métodos que se discuten en la siguiente sección, analizar los gastos y presiones en la red de distribución. Un análisis por separado debe efectuarse para cada subárea.
10. Ajuste el diámetro de las tuberías para corregir irregularidades de presión en la red.
11. Con los diámetros ajustados, reanalice la capacidad hidráulica del sistema.
12. Añada las tuberías secundarias o de relleno.
13. Localice las válvulas necesarias.
14. Prepare los planos de diseño final.

8.6 ANALISIS HIDRAULICO DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION

El propósito del análisis hidráulico de un sistema de distribución es estimar gastos (incluyendo su dirección) y la distribución de presión asociada que se desarrolla dentro del sistema. Se dispone de varios métodos para este análisis entre los cuales se tienen los siguientes: 1) relajación, 2) tubería equivalente, 3) seccionamiento, 4) método del círculo, 5) análisis en computadora digital y 6) analogía eléctrica.

Las características de cada uno de estos métodos se resumen en el cuadro 8.5.

Cuadro 8.5. Métodos de análisis de redes de distribución de agua

| Método | Descripción |
|-----------------------------|---|
| De relajación | Es un procedimiento de ensayo-error en el que se aplican correcciones sistemáticas a: 1) Un conjunto de gastos iniciales asumidos 2) Un conjunto inicial de cargas asumidas, hasta que la red esté balanceada hidráulicamente (p. ej. Hardy-Cross) |
| De secciones | La malla del sistema de distribución se corta en una serie de secciones, y la capacidad de las tuberías se compara con la demanda aguas abajo del corte. |
| De la tubería equivalente | Las tuberías en una red de distribución se reemplazan con una tubería sencilla de capacidad equivalente. |
| Del círculo | Las tuberías de un sistema de distribución tributarias a un hidrante central o grupo de hidrantes, se cortan con un círculo y se evalúa la capacidad de las tuberías para cubrir la demanda. |
| De análisis con computadora | Se escriben algoritmos para resolver las ecuaciones básicas para el análisis de una red de tubos. Los algoritmos se resuelven usando computadora. También se dispone de programas comerciales para resolver estos problemas. |
| Analogía eléctrica | El sistema de distribución es modelado con componentes eléctricamente equivalentes. Por ejemplo, resistencias no lineales se usan para simular la fricción en tuberías. Si la corriente entrante y saliente son proporcionales al flujo de agua, entonces las pérdidas de carga serán proporcionales a la caída de voltaje. |

8.6.1 Método de relajación (Método de Hardy Cross)

Según el gasto a transportar a través de una tubería, calculado según el criterio de la longitud virtual, se supone un diámetro de ésta que posteriormente se revisará, para saber si la red trabaja correctamente por el método de Hardy Cross. éste se resuelve por aproximaciones sucesivas que pueden aplicarse a los gastos supuestos en un principio o bien a las pérdidas de carga iniciales.

a) *Método de Hardy Cross o de balanceo de cargas por corrección de gastos acumulados.*

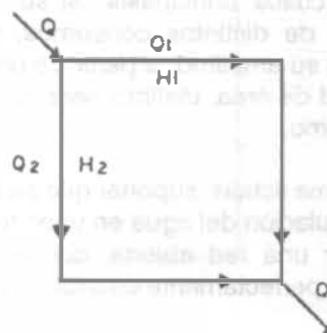
En este método, los gastos inicialmente supuestos se van corrigiendo mediante una fórmula de manera iterativa, hasta alcanzar el equilibrio hidráulico de la red. Para ello se asignan convencionalmente, signos positivos a los gastos que circulan conforme a la dirección de las manecillas del reloj y negativos en caso contrario.

A cada gasto Q_1 y Q_2 corresponden pérdidas de carga H_1 y H_2 respectivamente, las pérdidas en función del gasto están dadas por:

$$H = KQ^n \quad (8.4)$$

donde K es una constante que depende de la tubería y n es una constante común en todas las tuberías; $n = 1.85$ cuando se aplica Hazen-Williams y $n = 2.00$ si se usa Manning.

Tomando Q_1 y Q_2 de un sistema balanceado hidráulicamente



$$H_1 = K_1 Q_1^n$$

$$H_2 = K_2 Q_2^n$$

Entonces $H_1 = K_1 Q_1^n$ debe ser igual a $H_2 = K_2 Q_2^n$, o sea, $H_1 - H_2 = 0$. Lo más usual en un primer ensayo es que $H_1 - H_2 \neq 0$.

Entonces debe aplicarse una corrección a valores iniciales Q_1 y Q_2 ; así por ejemplo, si $H_1 < H_2$, Q_1 necesita un incremento q quedando $Q_1 = Q_1 + q$, mismo que debe ser restado al Q_2 , por lo que $Q_2' = Q_2 - q$.

Si q es la corrección real, tenemos que:

$$H_1' - H_2' = 0$$

o bien

$$K_1 (Q_1 + q)^n - K_2 (Q_2 - q)^n = 0$$

desarrollando los binomios:

$$K_1 (Q_1^n + n q Q_1^{n-1} + \dots q^n) - K_2 (Q_2^n - n q Q_2^{n-1} + \dots q^n) = 0$$

Si la primera estimación de la distribución del gasto ha sido razonable, q , será pequeño pudiéndose despreciar los términos siguientes.

Por lo tanto:

$$K_1 Q_1^n + n K_1 q Q_1^{n-1} - K_2 Q_2^n + n K_2 q Q_2^{n-1} = 0$$

Sustituyendo

$$H_1 = K_1 Q_1^n \quad H_2 = K_2 Q_2^n$$

$$K_1 Q_1^{n-1} = \frac{K_1 Q_1^n}{Q_1}$$

$$K_2 Q_2^{n-1} = \frac{H_2}{Q_2}$$

$$H_1 + nq \frac{H_1}{Q_1} - H_2 + nq \frac{H_2}{Q_2} = 0$$

despejando:

$$H_1 - H_2 = -nq \left(\frac{H_1}{Q_1} + \frac{H_2}{Q_2} \right)$$

$$q = - \frac{H_1 - H_2}{n \left(\frac{H_1}{Q_1} + \frac{H_2}{Q_2} \right)} \quad (8.5)$$

En donde: Q_1 , Q_2 , H_1 y H_2 tienen los signos correspondientes (+ ó -) según el sentido del recorrido.

Generalizando la expresión 8.5:

$$q = - \frac{\sum H}{n \sum \frac{H}{Q}}$$

si se usa Hazen-Williams queda:

$$q = - \frac{\sum H}{1.85 \sum \frac{H}{Q}}$$

y aplicando la ecuación de Manning

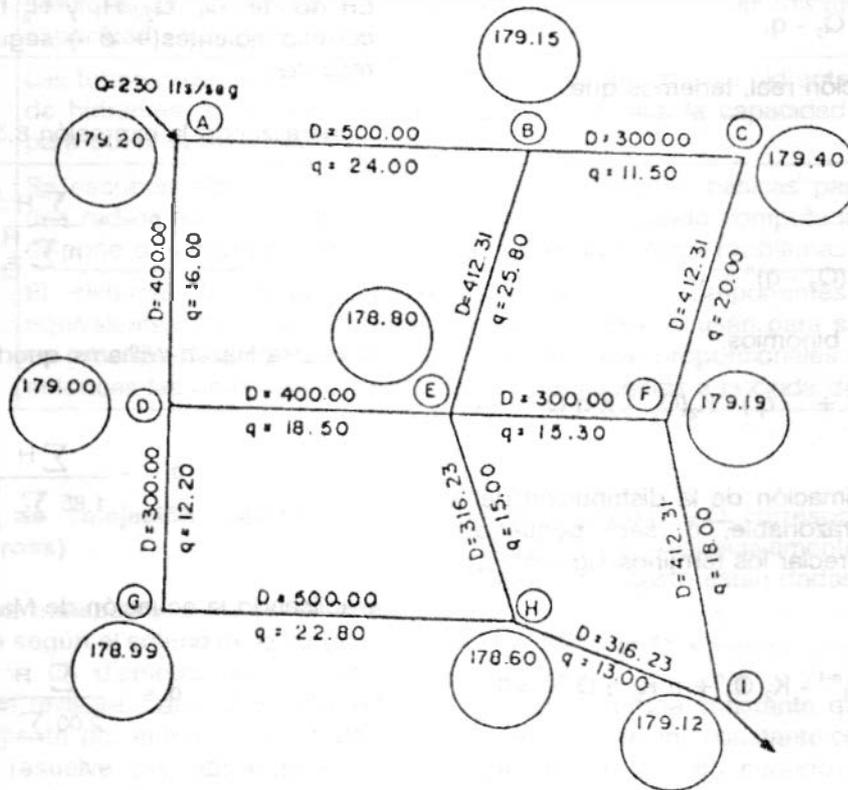
$$q = - \frac{\sum H}{2.00 \sum \frac{H}{Q}}$$

El número de correcciones que debe hacerse depende de la aproximación del gasto distribuido en la primera estimación y del grado de exactitud deseado en los resultados.

Para efectuar los cálculos conviene ayudarse de una tabla como la que se usa en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 8.3

- a) Equilibrar la red mostrada en la Figura 8.16 por el método de Hardy Cross. (Balanceo de cargas por corrección de gastos) y;
- b) Representar la red por medio de extracciones en los nodos una vez que se haya supuesto la distribución de los gastos.



D - Distancia en metros
 Q - Gasto tributario de cada tramo en lts/seg
 179.20 - Cota del terreno en metros

Notas:

Los gastos tributarios de cada tramo son datos, por lo que sólo hay que calcular los gastos acumulados.

En el nodo (A) se encuentra un tanque elevado de 20 m de altura del terreno a la cota de plantilla.

Figura 8.16.

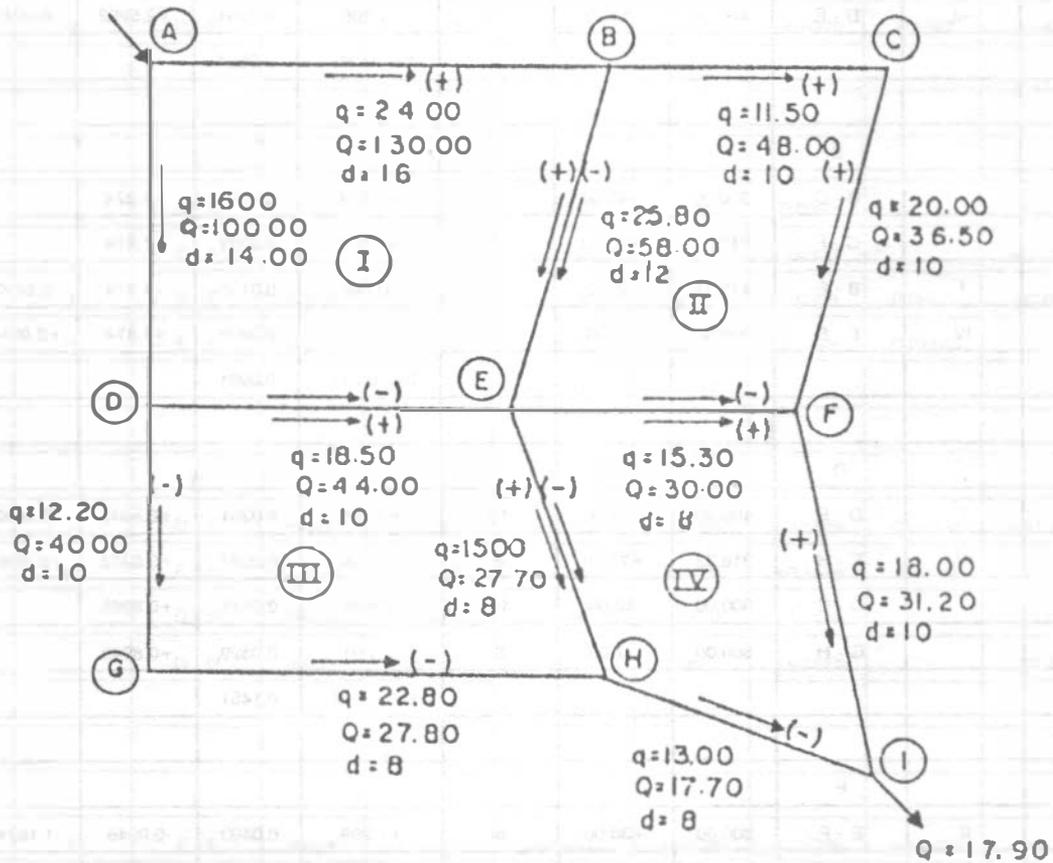
Solución:

- 1 Se forman circuitos y se supone un sentido del escurrimiento en cada tramo, asignando un signo positivo al flujo con dirección igual al de las manecillas del reloj y negativo en caso contrario (Figura 8.17).
- 2 Se acumulan gastos de acuerdo al sentido del recorrido y al criterio del proyectista (Figura 8.17).
- 3 Se suponen diámetros de acuerdo al caudal de escurrimiento supuesto. En este caso se tomó como base para la selección de los

diámetros una pérdida de carga promedio de (0.002 m.2/1000).

- 4 Se procede a calcular las pérdidas de fricción por tramo aplicando la fórmula de Hazen-Williams con un coeficiente $c = 140$ (fibro-cemento).

Para facilitar el cálculo se usó el cuadro 8.6. La tolerancia de la variación de gastos fue de 0.10 l/seg. y la variación de cargas de 0.012 metros; resultado que en la realidad no es práctico alcanzar.



q - gasto tributario en lts/seg.
 Q - gasto acumulado en lts/seg.
 d - diámetro supuesto en pulgadas

Figura 8.17.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Cuadro 8.6 Tabla de cálculo del ejemplo 8.3.

| CIRCUITO | | CRUCERO | LONG. (M) | GASTO Q_0 (l/s) | DIAM. (pulg.) | H_s | H_f/Q_0 | CORRECCION Δ | | Q_1 (l/s) |
|----------|-------|---------|--------------|----------------------|------------------|-------------------|-----------|---------------------|---------|----------------|
| PROPIO | COMUN | | | | | | | | | |
| | | A | | | | | | | | |
| I | | A - B | 500.00 | +130.00 | 16 | +1.041 | 0.0080 | +2.5292 | | +132.529 |
| I | II | B - E | 412.31 | +58.00 | 12 | +0.782 | 0.0135 | +2.5292 | -1.1874 | +59.342 |
| I | | A - D | 400.00 | -100.00 | 14 | -0.982 | 0.0098 | +2.5292 | | -97.471 |
| I | III | D - E | 400.00 | -44.00 | 10 | -1.105 | 0.0251 | +2.5292 | -0.8945 | -42.365 |
| | | | | | | $\Sigma = -0.264$ | 0.0564 | | | |
| | | B | | | | | | | | |
| II | | B - C | 300.00 | +48.00 | 10 | +0.974 | 0.0203 | +1.874 | | +49.187 |
| II | | C - F | 412.31 | +36.50 | 10 | +0.806 | 0.0221 | +1.874 | | +37.687 |
| II | I | B - E | 412.31 | -58.00 | 12 | -0.782 | 0.0135 | +1.874 | -2.5292 | -59.342 |
| II | IV | E - F | 300.00 | -30.00 | 8 | -1.209 | 0.0403 | +1.874 | +0.9946 | -27.818 |
| | | | | | | $\Sigma = -0.211$ | 0.0851 | | | |
| | | D | | | | | | | | |
| III | I | D - E | 400.00 | +44.00 | 10 | +1.105 | 0.0251 | +0.8945 | -2.5292 | +42.365 |
| III | IV | E - H | 316.23 | +27.70 | 8 | +1.099 | 0.0397 | +0.8945 | +0.9946 | +29.589 |
| III | | D - G | 300.00 | -40.00 | 10 | -0.695 | 0.0174 | +0.8945 | | -39.106 |
| III | | G - H | 500.00 | -27.80 | 8 | -1.750 | 0.0629 | +0.8945 | | -26.906 |
| | | | | | | $\Sigma = -0.240$ | 0.1451 | | | |
| | | E | | | | | | | | |
| IV | II | E - F | 300.00 | +30.00 | 8 | +1.209 | 0.0403 | -0.9946 | -1.1874 | +27.818 |
| IV | | F - I | 412.31 | +31.20 | 10 | +0.603 | 0.0193 | -0.9946 | | +31.007 |
| IV | III | E - H | 316.23 | -27.70 | 8 | -1.099 | 0.0397 | -0.9946 | -0.8945 | -29.589 |
| IV | | H - I | 316.23 | -17.70 | 8 | -0.480 | 0.0271 | -0.9946 | | -16.705 |
| | | | | | | $\Sigma = +0.233$ | 0.1264 | | | |

Cuadro 8.6 Tabla de cálculo del ejemplo 8.3. (Continuación).

| CIRCUITO | | CRUCERO | LONG (M) | GASTO Q, (l/s) | H, (m) | H/Q, (m/l/s) | CORRECCION 2 | | Q ₂ (l/s) |
|----------|-------|---------|-------------|-------------------|--------------------|-----------------|--------------|----------|-------------------------|
| PROPIO | COMUN | | | | | | | | |
| | | A | | | | | | | |
| I | | A - B | 500.00 | +132.529 | +1.079 | 0.0081 | +0.6976 | | +133.227 |
| I | II | B - E | 412.31 | +59.342 | +0.816 | 0.0137 | +0.6976 | +0.0399 | +60.080 |
| I | | A - D | 400.00 | -97.471 | -0.936 | 0.0096 | +0.6976 | | -96.773 |
| I | III | D - E | 400.00 | 42.365 | -1.030 | 0.0243 | +0.6976 | -0.1528 | -41.820 |
| | | | | | $\Sigma = -0.072$ | 0.0558 | | | |
| | | B | | | | | | | |
| II | | B - C | 300.00 | +49.187 | +1.019 | 0.0207 | -0.0399 | | +49.147 |
| II | | C - F | 412.31 | +37.687 | +0.855 | 0.0227 | -0.0399 | | +37.647 |
| II | I | B - E | 412.31 | -59.342 | -0.816 | 0.0137 | -0.0399 | -0.06976 | -60.080 |
| II | IV | E - F | 300.00 | -27.818 | -1.051 | 0.0378 | -0.0399 | -0.01135 | -27.971 |
| | | | | | $\Sigma = 0.007$ | 0.0949 | | | |
| | | D | | | | | | | |
| III | I | D - E | 400.00 | +42.365 | +1.030 | 0.0243 | +0.1528 | -0.06976 | +41.820 |
| III | IV | E - H | 316.23 | +29.589 | +1.242 | 0.0420 | +0.1528 | -0.1135 | +29.628 |
| III | | D - G | 300.00 | -39.106 | -0.666 | 0.0170 | +0.1528 | | -38.953 |
| III | | G - H | 500.00 | -26.906 | -1.647 | 0.0612 | +0.1528 | | -26.753 |
| | | | | | $\Sigma = -0.040$ | 0.1445 | | | |
| | | E | | | | | | | |
| IV | II | E - F | 300.00 | +27.818 | +1.051 | 0.0378 | +0.1135 | +0.0399 | +27.917 |
| IV | | F - I | 412.31 | +31.007 | +0.596 | 0.0192 | +0.1135 | | +31.121 |
| IV | III | E - H | 316.23 | -29.589 | -1.242 | 0.0420 | +0.1135 | -0.01528 | -29.628 |
| IV | | H - I | 316.23 | -16.705 | -0.431 | 0.0258 | +0.1135 | | -16.582 |
| | | | | | $\Sigma = -0.0262$ | 0.1248 | | | |

Cuadro 8.6. Tabla de cálculo del ejemplo 8.3. (Continuación).

| CIRCUITO | | CRUCERO | LONG. (M) | GASTO O ₂ (l/s) | H ₂ | H ₂ /O ₂ | CORRECCION 3 | | Q ₂ (l/s) |
|----------|-------|---------|--------------|-------------------------------|----------------|--------------------------------|--------------|---------|-------------------------|
| PROPIO | COMUN | | | | | | | | |
| | | A | | | | | | | |
| I | | A - B | 500.00 | +133.227 | +1.089 | 0.0082 | +0.0564 | | +133.283 |
| I | II | B - E | 412.31 | +60.080 | +0.834 | 0.0139 | +0.0564 | -0.1465 | +59.99 |
| I | | A - D | 400.00 | -96.773 | -0.924 | 0.0095 | +0.0564 | | -96.717 |
| I | III | D - E | 400.00 | -41.820 | -1.006 | 0.0241 | +0.0564 | -0.1506 | -41.914 |
| | | | | | Σ=-0.006 | Σ=0.0557 | | | |
| | | B | | | | | | | |
| II | | B - C | 300.00 | +49.147 | +1.017 | 0.0207 | +0.1465 | | +49.294 |
| II | | C - F | 412.31 | +37.647 | +0.653 | 0.0227 | +0.1465 | | +37.794 |
| II | I | B - E | 412.31 | -60.080 | -0.834 | 0.0139 | +0.1465 | -0.0564 | -59.99 |
| II | IV | E - F | 300.00 | -27.971 | -1.061 | 0.0360 | +0.1465 | -0.0392 | -27.864 |
| | | | | | Σ= -0.026 | 0.0952 | | | |
| | | D | | | | | | | |
| III | I | D - E | 400.00 | +41.820 | +1.006 | 0.0240 | +0.1506 | -0.0564 | +41.914 |
| III | IV | E - H | 316.23 | +29.628 | +1.245 | 0.0420 | +0.1506 | -0.0392 | +29.739 |
| III | | D - G | 300.00 | -38.953 | -0.661 | 0.0170 | +0.1506 | | -38.802 |
| III | | G - H | 500.00 | -26.753 | -1.630 | 0.0609 | +0.1506 | | -26.602 |
| | | | | | Σ=-0.040 | 0.1440 | | | |
| | | E | | | | | | | |
| IV | II | E - F | 300.00 | +27.917 | +1.062 | 0.0380 | +0.0392 | -0.1465 | +27.864 |
| IV | | F - I | 412.31 | +31.121 | +0.600 | 0.0193 | +0.0392 | | +31.160 |
| IV | III | E - H | 316.23 | -29.628 | -1.245 | 0.0420 | +0.0392 | -0.1506 | -29.739 |
| IV | | H - I | 316.23 | -16.592 | -0.426 | 0.0256 | +0.0392 | | -16.553 |
| | | | | | Σ=-0.009 | 0.1249 | | | |

Cuadro 8.6. Tabla de cálculo del ejemplo 8.3. (Continuación).

| CIRCUITO | | CRUCERO | LONG. (m) | GASTO Q_3 (l/s) | H_3 | H_2/Q_2 | CORRECCION 4 | | Q_4 (l/s) |
|----------|-------|---------|--------------|----------------------|-------------------|-----------|--------------|---------|----------------|
| PROPIO | COMUN | | | | | | | | |
| | | A | | | | | | | |
| I | | A - B | 500.00 | +133.283 | +1.09 | 0.0062 | +0.1017 | | +133.385 |
| I | II | B - E | 412.31 | +59.99 | +0.832 | 0.0139 | +0.1017 | -0.0237 | +60.068 |
| I | | A - D | 400.00 | -96.717 | -0.923 | 0.0095 | +0.1017 | | -96.615 |
| I | III | D - E | 400.00 | -41.914 | -1.001 | 0.0241 | +0.1017 | -0.0208 | -41.833 |
| | | | | | $\Sigma = -0.011$ | 0.0557 | | | |
| | | B | | | | | | | |
| II | | B - C | 300.00 | +49.294 | +1.023 | 0.0207 | +0.0237 | | +49.318 |
| II | | C - F | 412.31 | +37.794 | +0.859 | 0.0227 | +0.0237 | | +37.818 |
| II | I | B - E | 412.31 | -59.99 | -0.832 | 0.0138 | +0.0237 | -0.1017 | -60.068 |
| II | IV | E - F | 300.00 | -27.864 | -1.054 | 0.0378 | +0.0237 | -0.0951 | -27.935 |
| | | | | | $\Sigma = -0.004$ | 0.0952 | | | |
| | | D | | | | | | | |
| III | I | D - E | 400.00 | +41.914 | +1.001 | 0.0241 | +0.0208 | -0.1017 | +41.833 |
| III | IV | E - H | 316.23 | +29.739 | +1.254 | 0.0422 | +0.0208 | -0.0951 | +29.665 |
| III | | D - G | 300.00 | -38.802 | -0.657 | 0.0169 | +0.0208 | | -38.781 |
| III | | G - H | 500.00 | -26.602 | -1.613 | 0.0606 | +0.0208 | | -26.581 |
| | | | | | $\Sigma = -0.006$ | 0.1438 | | | |
| | | E | | | | | | | |
| IV | II | E - F | 300.00 | +27.864 | +1.054 | 0.0378 | +0.0951 | -0.0237 | +27.935 |
| IV | | F - I | 412.31 | +31.160 | +0.601 | 0.0193 | +0.0951 | | +31.255 |
| IV | III | E - H | 316.23 | -29.739 | -1.254 | 0.0422 | +0.0951 | -0.0208 | -29.665 |
| IV | | H - I | 316.23 | -16.553 | -0.424 | 0.0258 | +0.0951 | | -16.458 |
| | | | | | $\Sigma = -0.022$ | 0.1249 | | | |

Cuadro 8.6. Tabla de cálculo del ejemplo 8.3. (Continuación).

| CIRCUITO | | CRUCERO | LONG. (M) | H COMP | COTAS | | CARGA DISP. |
|----------|-------|---------|--------------|-----------|---------|---------|----------------|
| PROPIO | COMUN | | | | PIEZOM. | TERRENO | |
| | | A | | | 199.2 | 179.20 | 20.00 |
| I | | A - B | 500.00 | 1.082 | 198.108 | 179.15 | 18.958 |
| I | II | B - E | 412.31 | 0.834 | 197.274 | 178.80 | 18.474 |
| I | | A - D | 400.00 | 0.920 | 198.280 | 179.00 | 19.280 |
| I | III | D - E | 400.00 | 1.006 | 197.274 | 178.80 | 18.474 |
| | | | | | | | |
| | | B | | | 198.108 | | |
| II | | B - C | 300.00 | 1.029 | 129.179 | 179.40 | 17.679 |
| II | | C - F | 412.31 | 0.864 | 196.215 | 179.19 | 17.025 |
| II | I | B - E | 412.31 | 0.864 | 197.274 | 178.80 | 18.474 |
| II | IV | E - F | 300.00 | 1.059 | 196.215 | 179.19 | 17.025 |
| | | | | | | | |
| | | D | | | 198.280 | | |
| III | I | D - E | 400.00 | 1.006 | 197.274 | 178.80 | 18.474 |
| III | IV | E - H | 316.23 | 1.248 | 196.026 | 178.60 | 17.426 |
| III | | D - G | 300.00 | 0.650 | 197.630 | 178.99 | 18.640 |
| III | | G - H | 500.00 | 1.604 | 196.026 | 178.60 | 17.426 |
| | | | | | | | |
| | | E | | | 197.274 | | |
| IV | II | E - F | 300.00 | 1.059 | 196.215 | 179.19 | 17.025 |
| IV | | F - I | 412.31 | 0.606 | 195.609 | 179.12 | 16.489 |
| IV | III | E - H | 316.23 | 1.248 | 196.026 | 178.60 | 17.426 |
| IV | | H - I | 316.23 | 0.411 | 195.609 | 179.12 | 16.489 |

- 5 Se compensaron las pérdidas de carga H de tal manera que su suma en cada malla fuera igual a cero, repartiendo el error sólo en los tramos no comunes (Figura 8.18).

Se toman los gastos tributarios en los

tramos como extracciones en los nodos quedando como se muestra en la Figura 8.19.

La Figura 8.20 muestra el diseño final de la red con la simbología correspondiente.

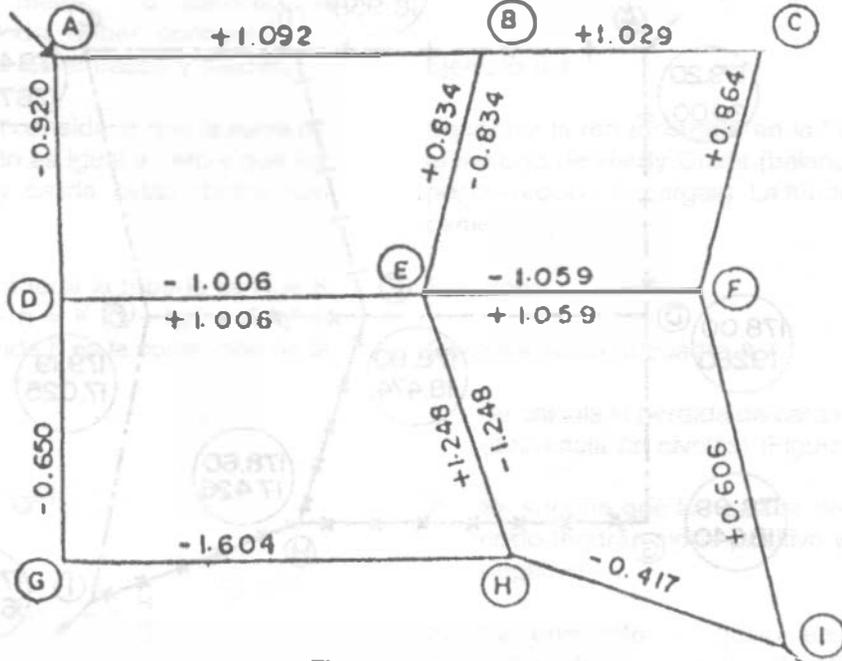


Figura 8.18.

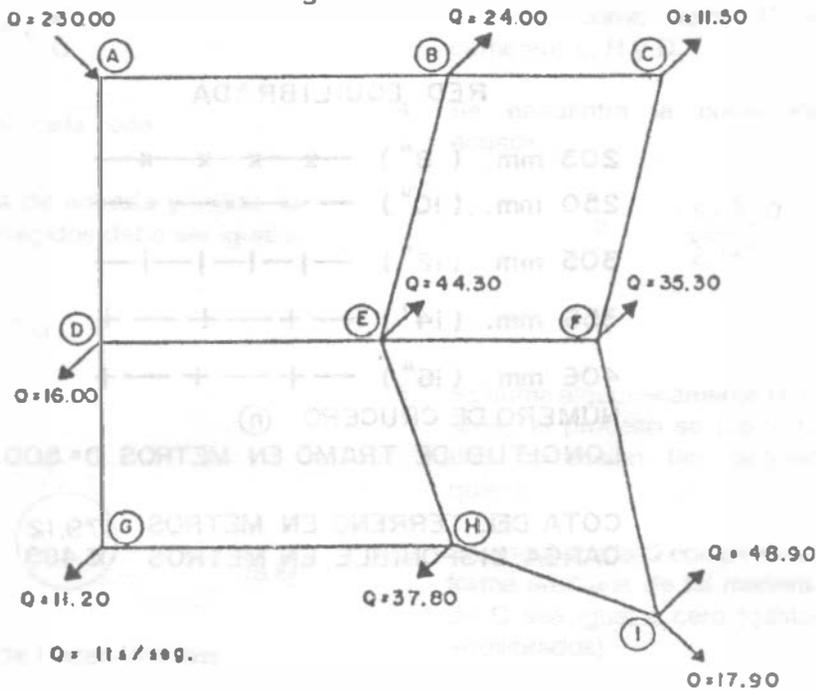
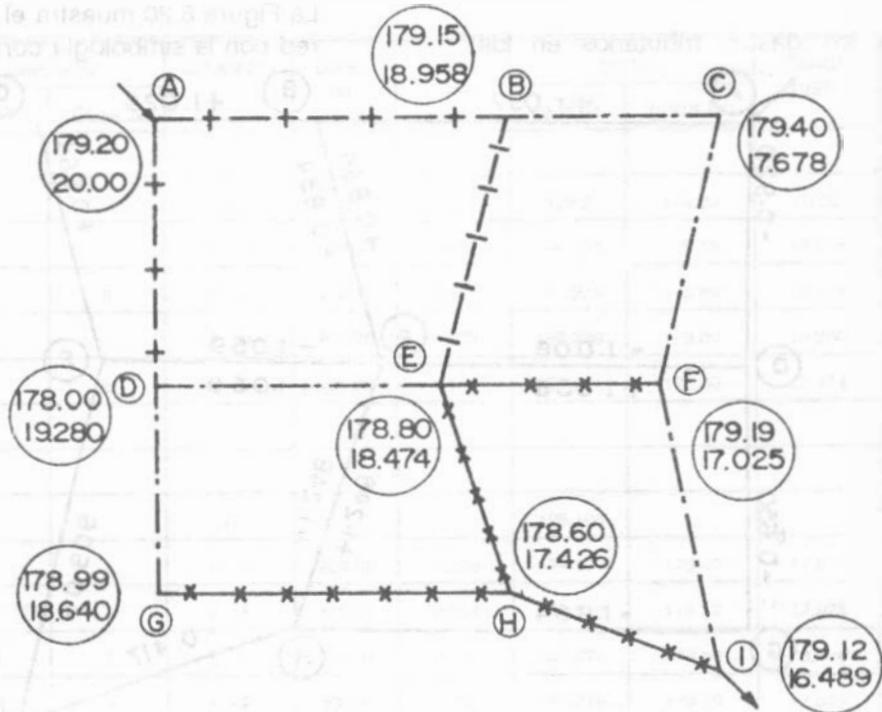


Figura 8.19.



RED EQUILIBRADA

203 mm. (8") — x x x x —

250 mm. (10") — - - - - -

305 mm. (12") — | - | - | - | —

356 mm. (14") — + — + — + — +

406 mm. (16") — + — + — + — +

NUMERO DE CRUCERO (n)

LONGITUD DE TRAMO EN METROS D= 500.00

COTA DEL TERRENO EN METROS

179.12
16.489

CARGA DISPONIBLE EN METROS

Figura 8.20.

b) Método de Hardy Cross o de balanceo de gastos por corrección de cargas.

Si los gastos son desconocidos y hay varias entradas, la distribución del gasto puede determinarse por el método de balanceo de gastos. En este método, deben conocerse las cargas de presión en las entradas y salidas.

El método se basa en considerar que la suma de los gastos en un nodo es igual a cero y que los gastos de entrada y salida están dados con signos contrarios.

La carga supuesta en toda la tubería es $H = K Q^n$ y la corregida $H + h = K (Q + q)^n = K (q^n + n q Q^{n-1} + \dots)$. En donde h es la corrección de la carga.

Sustituyendo:

$$H = K Q^n \text{ y } H/Q = K Q^{n-1}$$

se tiene:

$$H + h = H + n q \frac{H}{Q}$$

$$h = n q \frac{H}{Q}$$

$$q = \frac{h}{n} \frac{Q}{H} \text{ en cada nodo}$$

Exceptuando los nodos de entrada y salida, la suma de los gastos corregidos debe ser igual a cero.

$$\sum(Q + q) = 0 \quad \sum Q = - \sum q$$

pero

$$\sum q = \frac{h}{n} \sum \frac{Q}{H}$$

$$h = - \frac{n \sum Q}{\sum Q/H} \quad (8.6)$$

Aplicando la ecuación de Hazen-Williams

Aplicando la ecuación de Manning

$$h = - \frac{1.85 \sum Q}{\sum Q/H}$$

$$h = - \frac{2.00 \sum Q}{\sum Q/H}$$

Ejemplo 8.4

Equilibrar la red mostrada en la Figura 8.21 por el método de Hardy Cross (balanceo de gastos por corrección de cargas). La tubería es de fibrocemento.

Solución:

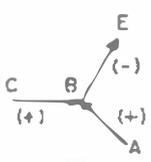
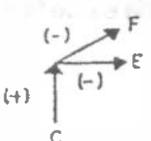
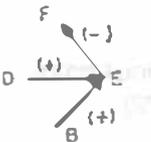
Con referencia al cuadro 8.7:

1. Se calcula la pérdida de carga en los tramos (diferencia de niveles) (Figura 8.22).
2. Se supone que los gastos de entrada a un nodo tendrán signo positivo y los de salida negativo.
3. Se encuentra el gasto en cada tramo, aplicando la ecuación de Hazen-Williams, teniendo como datos $C = 140$ (fibrocemento) L, H y D .
4. Se encuentra la corrección h con la ecuación

$$h = - \frac{1.85 \sum Q}{\sum Q/H}$$

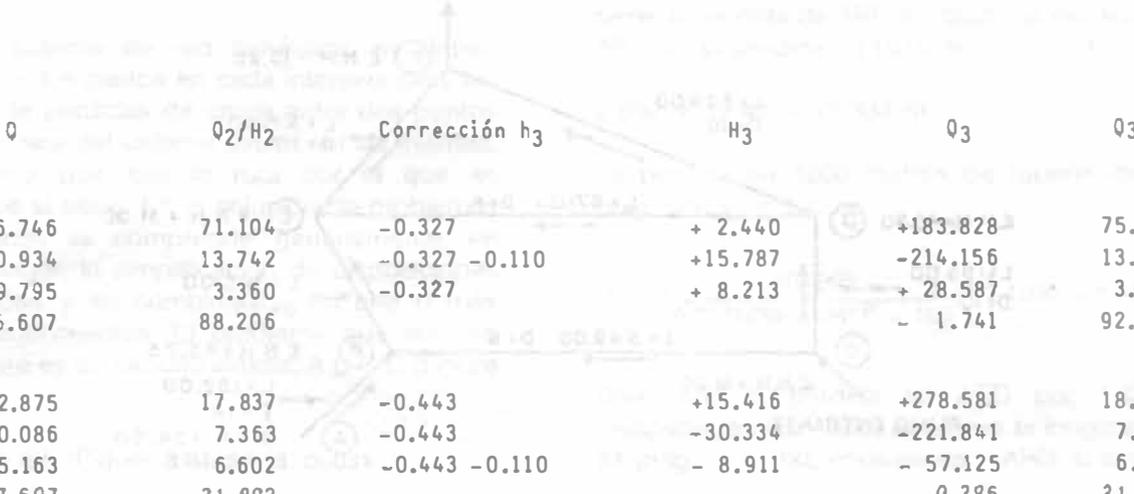
5. Se suma algebraicamente $H + h$ obteniendo la H_1 , el proceso se repite hasta alcanzar una corrección tan pequeña como se quiera.
6. Se encuentra la Q compensada. Se hace en forma arbitraria de tal manera que la suma de Q sea igual a cero (gastos en el nodo equilibrados).

Cuadro 8.7. Tabla de cálculo del ejemplo 8.4.

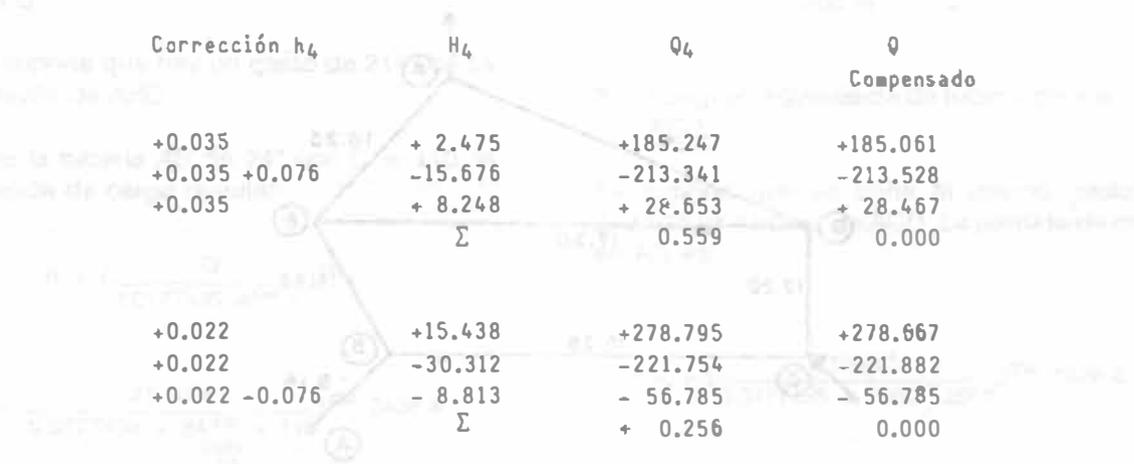
| | Crucero | Tramo | Longitud (m) | H ₀ (m) | Diámetro pulgada | Q ₀ lts/seg. | Q/H |
|---|---------|-------|--------------|--------------------|------------------|-------------------------|--------|
|  | B | B-A | 152.00 | + 9.15 | 12 | +375.308 | 41.017 |
| | B | B-E | 305.00 | -14.25 | 10 | -202.632 | 14.220 |
| | B | B-C | 549.00 | +15.25 | 6 | +39.930 | 2.618 |
| | | | | | Σ | +212.606 | 57.855 |
|  | D | D-C | 183.00 | +12.20 | 10 | +245.516 | 20.124 |
| | D | D-F | 249.00 | -33.55 | 10 | -234.247 | 6.982 |
| | D | D-E | 671.00 | -17.30 | 8 | - 81.736 | 4.725 |
| | | | | | Σ | - 70.467 | 31.831 |
|  | E | E-F | 274.50 | -16.25 | 10 | -230.260 | 14.170 |
| | E | E-D | 671.00 | +17.30 | 8 | + 81.736 | 4.725 |
| | E | E-B | 305.00 | +14.25 | 10 | +202.632 | 14.220 |
| | | | | | Σ | + 54.108 | 33.114 |

| Corrección h ₀ | H ₁ | Q | Q ₁ /H | Corrección h ₁ | H ₂ |
|---------------------------|----------------|----------|-------------------|---------------------------|----------------|
| -6.798 | + 2.352 | +180.217 | 76.623 | +0.415 | + 2.767 |
| -6.798 +3.023 | -18.025 | -230.049 | 12.763 | +0.415 +2.260 | -15.350 |
| -6.798 | + 8.452 | + 29.033 | 3.435 | +0.415 | + 8.867 |
| | Σ | + 2.484 | 91.231 | | Σ |
| +4.095 | +16.295 | +287.049 | 17.616 | -0.436 | +15.859 |
| +4.095 | -29.455 | -218.347 | 7.413 | -0.436 | -29.891 |
| +4.095 +3.023 | -10.182 | - 61.390 | 6.029 | -0.436 +2.260 | - 8.358 |
| | Σ | + 7.312 | 31.058 | | Σ |
| -3.023 | -19.273 | -252.481 | 13.100 | -2.260 | -21.533 |
| -3.023 -4.095 | +10.182 | + 61.390 | 6.029 | -2.260 +0.436 | + 8.358 |
| -3.023 +6.798 | +18.025 | +230.049 | 12.763 | -2.260 -0.415 | +15.350 |
| | Σ | + 38.958 | 31.852 | | Σ |

Cuadro 8.7. Tabla de cálculo del ejemplo 8.4 (Continuación).



| Q | Q ₂ /H ₂ | Corrección h ₃ | H ₃ | Q ₃ | Q ₃ /H ₃ |
|----------|--------------------------------|---------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| +196.746 | 71.104 | -0.327 | + 2.440 | +183.828 | 75.339 |
| -210.934 | 13.742 | -0.327 -0.110 | +15.787 | -214.156 | 13.565 |
| + 29.795 | 3.360 | -0.327 | + 8.213 | + 28.587 | 3.481 |
| + 15.607 | 88.206 | | | - 1.741 | 92.385 |
| +282.875 | 17.837 | -0.443 | +15.416 | +278.581 | 18.071 |
| -220.086 | 7.363 | -0.443 | -30.334 | -221.841 | 7.313 |
| - 55.163 | 6.602 | -0.443 -0.110 | - 8.911 | - 57.125 | 6.411 |
| + 7.607 | 31.802 | | | - 0.386 | 31.795 |
| -268.061 | 12.449 | +0.110 | -21.643 | -268.799 | 12.420 |
| + 55.183 | 6.602 | +0.110 +0.443 | + 8.911 | + 55.987 | 6.521 |
| +210.934 | 13.742 | +0.110 +0.327 | +15.787 | +214.156 | 13.565 |
| - 1.944 | 32.793 | | | + 1.343 | 32.506 |



| Corrección h ₄ | H ₄ | Q ₄ | Q Compensado |
|---------------------------|----------------|----------------|--------------|
| +0.035 | + 2.475 | +185.247 | +185.061 |
| +0.035 +0.076 | -15.676 | -213.341 | -213.528 |
| +0.035 | + 8.248 | + 28.653 | + 28.467 |
| | Σ | 0.559 | 0.000 |
| +0.022 | +15.438 | +278.795 | +278.667 |
| +0.022 | -30.312 | -221.754 | -221.882 |
| +0.022 -0.076 | - 8.813 | - 56.785 | - 56.785 |
| | Σ | + 0.256 | 0.000 |
| -0.076 | -21.719 | -269.309 | -270.313 |
| -0.076 -0.022 | + 8.813 | + 56.785 | + 56.785 |
| -0.076 -0.035 | +15.676 | +213.341 | +213.528 |
| | Σ | + 0.817 | 0.000 |

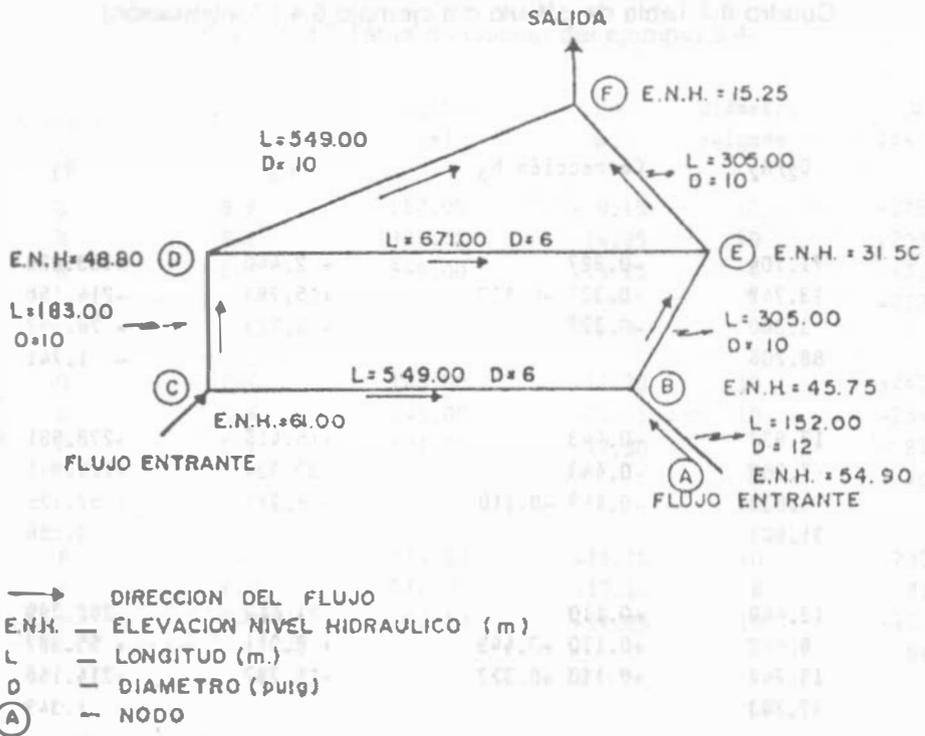
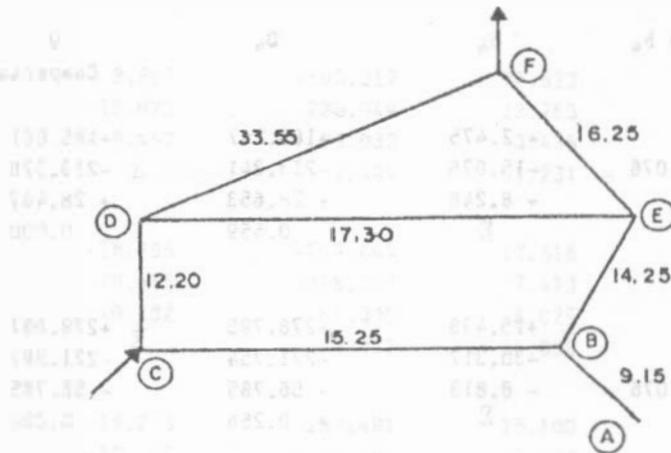


Figura 8.21.



Pérdidas de carga en los diferentes tramos

Nota:

Para facilitar el cálculo se usó la tabla adjunta.

Figura 8.22.

8.6.2 Método de la tubería equivalente.

En un sistema de red hidráulica, se deben balancear los gastos en cada intersección y las sumas de pérdidas de carga entre dos puntos cualesquiera del sistema deben ser las mismas, cualquiera que sea la ruta por la que se desplace el agua. En la solución de problemas específicos se comprende generalmente, en primer lugar, la simplificación de disposiciones intrincadas y su combinación en una o más líneas equivalentes. El problema que aquí se considera es un circuito simple, A B C D (Figura 8.23).

Ejemplo 8.5 (Figura 8.23)

Se supone que es recomendable substituir el circuito A D con una sola longitud equivalente de tubería de 24 pulg. (610 mm) con un valor de $C = 100$. El proceso para la determinación de la longitud equivalente comprende tres pasos básicos, que se describen a continuación.

1. Longitud equivalente de tubería para la rama A B D.

Se supone que hay un gasto de 219.065 l/s a través de ABD.

Para la tubería AB de 24" con $C = 110$, la pérdida de carga resulta:

$$h_f = \left(\frac{Q}{0.0177435 d^{2.63} C} \right)^{1.854} L$$

$$h_f = \left(\frac{219.065}{0.0177435 \times 24^{2.63} \times 110} \right)^{1.854} 2438.4$$

$$h_f = 2.894 \text{ m}$$

La pérdida de carga en 1219.2 m de tubería de 16 pulgadas con $C = 100$ es:

$$h_f = \left(\frac{219.065}{0.0177435 \times 16^{2.63} \times 100} \right)^{1.854} 1219.2$$

$$h_f = 12.44 \text{ m}$$

Como AB y BD se encuentran conectadas en serie, la pérdida de ABD es igual a la pérdida de AB más la pérdida en BD, o sea:

$$2.894 + 12.44 = 15.334 \text{ m}$$

La pérdida en 1000 metros de tubería de 24 pulg. con $C = 100$ es

$$h_f = \left(\frac{219.065}{0.0177435 \times 24^{2.63} \times 100} \right)^{1.854} 1000 = 1.42 \text{ m}$$

Dividiendo la pérdida en ABD por 1.42 y multiplicando por 1000, se deriva la longitud de 24 pulg. $C = 100$, equivalente a ABD, o sea:

$$\frac{15.334 \text{ m}}{1.42 \text{ m}} \times 1000 = 10798.59 \text{ m}$$

que resulta de:

$$\frac{1.42 \text{ m}}{1000 \text{ m}} = \frac{15.334}{x}$$

2. Longitud equivalente de tubería para la rama ACD.

Se supone que se tiene el mismo gasto de 219.065 l/s a través de ACD. La pérdida de carga en AC es:

$$h_f = \left(\frac{219.065}{0.0177435 \times 105 \times 20^{2.63}} \right)^{1.854} 1828.8$$

$$h_f = 5.75 \text{ m}$$

Como puede verse en la Figura 8.23, CD es idéntica a BD, o sea 12.44m.

Como AC y CD se encuentran conectadas en serie, la pérdida en ACD es igual a la pérdida en AC más aquella de CD, o sea:

$$5.75 + 12.44 = 18.19 \text{ m}$$

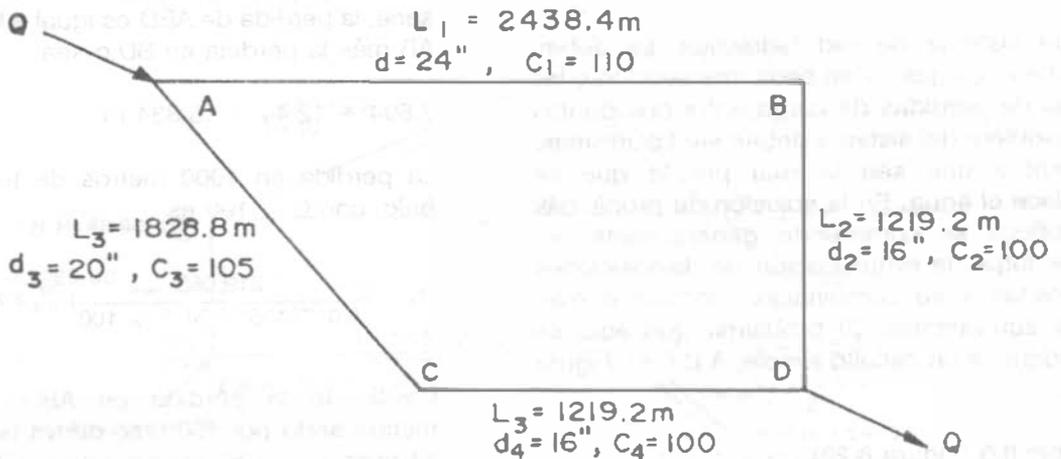


Figura 8.23

Dividiendo la pérdida en ACD por la pérdida en 1000 m de tubería de 24 pulg, C = 100 (1.42 m) y multiplicando por 1000, se deriva la longitud equivalente de tubería de 24 pulg, C = 100, de ACD, o sea

$$\frac{18.19 \text{ m}}{1.42 \text{ m}} \times 1000 = 12809.86 \text{ m}$$

3. Longitud equivalente de tubería para el circuito AD.

Se supone una pérdida de carga en AD de 15.24 m.

Para ABD, la longitud equivalente de tubería fue de 10798.59 m.

En consecuencia, la pérdida por 1000 m de tubería equivalente es

$$\frac{10798.59}{1000} = 10.79859$$

$$\frac{15.24}{10.79859} = 1.41 \text{ m}$$

El gasto al cual 1000 m de tubería de 24 pulg, C = 100, experimenta una pérdida de carga de 1.41 m es

$$Q = 0.0177435 \text{ c } d^{2.63} \left(\frac{hf}{L}\right)^{0.54}$$

$$Q = 0.0177435 \times 100 \times 24^{2.63} \left(\frac{1.41}{1000}\right)^{0.54}$$

$$Q = 218.56 \text{ l/s}$$

Para ACD, la longitud equivalente de tubería fue de 12809.86 m. Por tanto la pérdida por 1000 m de tubería de 24 pulg, C = 100 es

$$\frac{15.24}{12.81} = 1.19 \text{ m}$$

El gasto al cual 1000 pies de tubería de 24 pulg, C = 100 experimenta una pérdida de 1.19 m es

$$Q = 0.0177435 \times 100 \times 24^{2.63} \left(\frac{1.19}{1000}\right)^{0.54}$$

$$Q = 199.43 \text{ l/s}$$

Por lo tanto, el gasto total (el gasto en ABD más el gasto en ACD) es

$$Q = 218.56 + 199.43$$

$$Q = 417.99 \text{ l/s}$$

La pérdida en 1000 m de tubería de 24 pulg. C = 100 a un gasto de 417.99 l/s es

$$h_f = \left(\frac{417.99}{0.0177435 \times 24^{2.63} \times 100} \right)^{1.854} 1000 = 4.68 \text{ m}$$

Dividiendo la pérdida en AD (supuesta inicialmente de 15.24 m) por 4.68 m y multiplicando por 1000, se obtiene la longitud de tubería de 24 pulg. C = 100, que equivale a AD, o.

$$\frac{15.24}{4.68} \times 1000 = 3253.10 \text{ m}$$

Para comprobar el análisis anterior, es necesario demostrar que la pérdida de carga en ABD es igual a la pérdida de carga en ACD, como sigue:

- a) La pérdida en AB a 219.065 l/s es 2.894 m.
La pérdida en BD a 219.065 l/s es 12.44 m.
La pérdida en ABD es

$$12.44 + 2.894 = 15.334 \text{ m.}$$

- b) La pérdida en AC a 199.43 l/s es

$$h_f = \left(\frac{199.43}{0.0177435 \times 105 \times 20^{2.63}} \right)^{1.854} 1828.8$$

$$h_f = 4.83 \text{ m}$$

La pérdida en CD a 199.43 l/s es

$$h_f = \left(\frac{199.43}{0.0177435 \times 100 \times 16^{2.63}} \right)^{1.854} 1219.2$$

$$h_f = 10.45 \text{ m}$$

Por lo tanto, la pérdida ACD es

$$4.83 + 10.45 = 15.28 \text{ m}$$

Por lo tanto, como las pérdidas en ABD y ACD son esencialmente iguales, el análisis es válido.

Ejemplo 8.6

Para la red mostrada en la Figura 8.24 encontrar:

- 1) El diámetro de la tubería equivalente (A-D) de la línea A-B-D.
- 2) La longitud equivalente de la línea A-C-D si se coloca sólo tubería de 8".
- 3) El gasto que puede conducir la tubería A-C-D (con un diámetro de 10") de tal manera que sus pérdidas en el punto D sean iguales a las de la línea A-B-D.

Solución:

Gastos

Línea A-B-D : 150 l/s

Línea A-C-D : 70 l/s

Usar la ecuación de Hazen y Williams con C = 140

Calculando las pérdidas de carga en las líneas de tubería considerando que las pérdidas en tuberías en serie se suman, se tienen:

- a) Línea A-B-D

Tubo A-B L = 300.00m D = 12" C = 140

Q = 150 l/s

aplicando H-W (inciso 1.5.3)

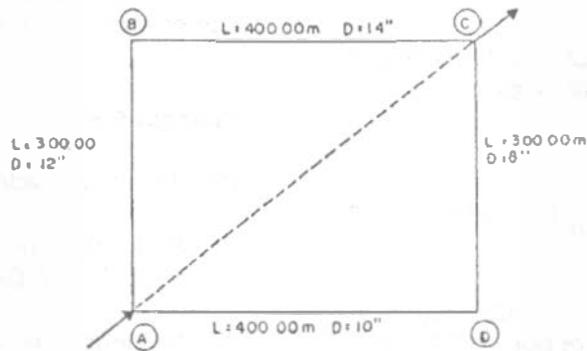
H = 3.305 m. pérdida de carga

Tubo B-D L = 400.00 m D = 14" C = 140

Q = 150 l/s

H = 2.080 m.

H total = 5.385 m



Gastos

Línea A-B-D 150 lts/seg

Línea A-C-D 70 lts/seg

Nota:

Usar ecuación de Hazen-Williams con $c = 140$

Figura 8.24.

b) Línea A-C-D

Tubo A-C $L=400.00\text{m}$ $D=10"$ $C=140$
 $Q = 70.00 \text{ l/s}$

$H = 2.611 \text{ m.}$

Tubo C-D $L = 300.00 \text{ m}$ $D = 8"$ $C = 140$
 $Q = 70.00 \text{ lts/seg}$

$H = 5.805 \text{ m}$

$H \text{ total} = 8.415 \text{ m}$

c) Aplicando la ecuación de Hazen-Williams

$L= 500.00$ $H = 5.385 \text{ m.}$ $D = ?$

$C = 140$

$$Q = 0.0177435938 \times 140 \times d^{2.63} S^{0.54}$$

$$d^{2.63} = \frac{Q}{0.0177435938 \times 140 \times S^{0.54}}$$

$$d = \sqrt[2.63]{\frac{Q}{0.0177435938 \times 140 \times S^{0.54}}}$$

$$S = H/L$$

$$d = \sqrt[2.63]{\frac{150}{0.0177435938 \times 140 \times \left(\frac{5.385}{700.00}\right)^{0.54}}}$$

$d = 12.91"$

Pero como este diámetro no es comercial, se opta por una tubería de 14", teniéndose:

$d = 14"$; $L= 500.00$; $Q= 150.00 \text{ m}$; $C = 140$

$H = 2.600 \text{ m} \ll 5.385$ por lo que no es tubería equivalente.

Optando por una tubería de 12" se tiene:

$d = 12"$ $L = 500.00$ $Q = 150.00 \text{ m}$ $C = 140$

$H = 5.508 \text{ m} > 5.385 \text{ m}$

Siendo ésta tubería de 12" aproximadamente equivalente a la línea A-B-D.

- 2) $H = 8.415 \text{ m}$ $L = ?$ $D = 10''$ $C = 140$
 $Q = 70 \text{ l/s}$

$$L_{eq} = \frac{8.415}{\left(\frac{70}{0.0177435938 \times 140 \times 10^{2.63}}\right)^{0.54}}$$

$$L_{eq} = 1289.535 \text{ m}$$

- 3) Línea A-B-D: $H = 5.385 \text{ m}$; $L = 700.00$

$$S = \frac{5.385}{700.00}$$

Línea A-C-D: $L = 700.00 \text{ m}$. $D = 10''$

$$Q = 0.0177435938 \times 140 \times d^{2.63} \times S^{0.54}$$

$$Q = 0.0177435938 \times 140 \times 10^{2.63} \times \left(\frac{5.385}{700}\right)^{0.54}$$

$$Q = 76.499 \text{ l/s}$$

8.6.3 Método de secciones

El método de secciones fue desarrollado por Allen Hazen como un método rápido para verificar que los diámetros de las tuberías de una red ya diseñada sean los correctos. Un procedimiento similar fue propuesto por Pardoe. Aunque el método es aproximado, es extremadamente útil en el análisis de redes de tubería si se aprecian sus limitaciones.

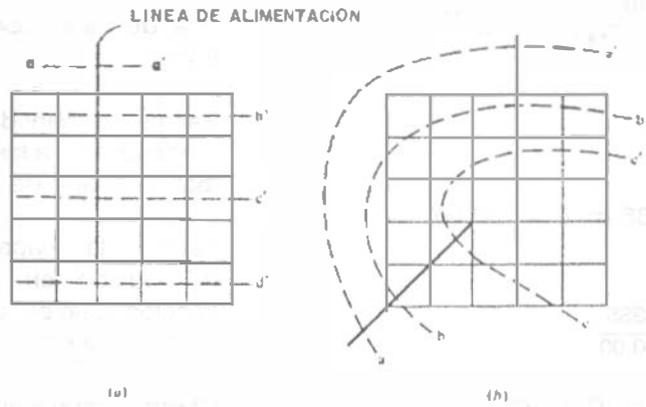
Los pasos que se sugiere seguir en el método de secciones son los siguientes:

1. Corte la red con una serie de líneas que tomen en cuenta la variación de diámetros de tubería y características de la ciudad. Las líneas no tienen que ser rectas o estar regularmente espaciadas.

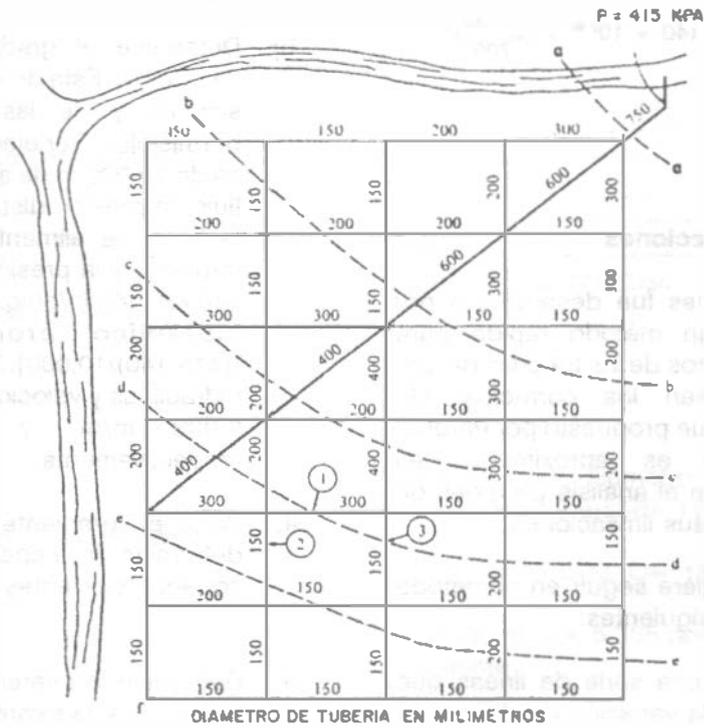
Es común que la primera serie de líneas corte a la red a ángulos rectos con respecto a la dirección del flujo. Las líneas de corte

adicionales pueden orientarse en otras direcciones importantes a criterio del calculista. Si se tiene más de una línea de alimentación, debe usarse una línea de corte curva para interceptar el flujo de cada una de ellas, como lo muestra la Figura 8.25.

2. Estime la cantidad de agua que debe suministrarse a las áreas que se encuentran "aguas abajo" de cada línea de corte.
3. Estime la capacidad de la red de distribución en cada línea de corte o sección. Esto puede hacerse como se indica a continuación:
 - a) Cuente y tabule el número de tubos de cada diámetro que fueron cortados. Sólo deben contarse aquellas tuberías que proporcionen agua en la dirección del flujo.
 - b) Determine el gradiente hidráulico medio disponible. Este dependerá de la presión del sistema y de las velocidades de flujo permisibles. Por ejemplo, si una malla plana es de 10,000 m de ancho en la dirección del flujo; la presión disponible en la entrada de la línea de alimentación es 415 kPa (60 lb/pulg²) y la presión mínima permisible es 140 kPa (60 lb/pulg²), entonces el gradiente hidráulico promedio es 0.0028 [(415-140)/10,000]. Son comunes gradientes hidráulicos y velocidades entre 0.001 m/m y 0.003 m/m, y 0.6 a 1.25 m/s, respectivamente.
4. Para el gradiente hidráulico calculado, determine la capacidad de las tuberías cortadas existentes y la capacidad total.
5. Determine la diferencia entre la capacidad requerida y la existente.
6. Si la capacidad total existente es inadecuada, seleccione diámetros de tubería y patrones que compensen cualquier deficiencia para alcanzar el gradiente hidráulico requerido.



APLICACION DEL METODO DE SECCIONES



- 1 REEMPLAZAR CON 400mm
- 2 3 REEMPLAZAR CON 200mm

Figura 8.25.

La capacidad del sistema puede incrementarse reemplazando las tuberías pequeñas con diámetros mayores o agregando tuberías a la malla. La experiencia en el diseño de redes ayuda algunas veces en la selección de los diámetros de las tuberías, pero dicha experiencia no es necesaria. Si se encuentra capacidad en exceso, los diámetros de tubería pueden reducirse usando los mismos procedimientos.

7. Determine el diámetro de la tubería equivalente para el sistema reforzado y estime la velocidad de flujo.
8. Revise los requerimientos de presión contra el sistema reforzado.

Ejemplo 8.7.

Aplicacion del método de secciones.

Usando el método de secciones, analice la red de distribución de agua que se muestra en la Figura 8.25. Especifique la naturaleza y localización de cualquier modificación que usted crea que debe hacerse en la red de tuberías y reanalicela con estas modificaciones. Asuma que se aplican las siguientes condiciones.

1. La demanda de incendios en el centro de la zona se estima usando la siguiente ecuación:

$$Q = 65 (p)^{1/2} [1 - 0.01 (p)^{1/2}]$$

donde Q = gasto en l/s
 p = población en miles

Nota. La ecuación anterior fue comúnmente usada por el National Board of Fire Underwriters.

2. Dotación de 416.8 l/hab/día
3. Coeficientes de variación diaria y horaria 1.2 y 1.5, respectivamente.

4. Calcule las pérdidas de carga con la ecuación de Darcy-Weisbach, usando un valor de f de 0.020.
5. Use solo tuberías de 150, 200, 300, 400 y 600 mm de diámetro cuando modifique la red del sistema de distribución.

Solución

1. Modificando la ecuación de Darcy-Weisbach para que adopte la forma de pendiente y diámetro, se tiene:

$$h = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{h}{L} = s = \frac{f V^2}{D 2g}$$

$$s = \frac{f}{2g} \frac{Q^2}{A^2 D}$$

$$Q = \left(\frac{g \pi^2}{8 f} \right)^{1/5} D^{5/2} s^{1/2}$$

donde Q = gasto, m³/s
 D = diámetro de tubería, m
 s = pendiente, m/m
 g = aceleración debida a la gravedad, 9.81 m/s²

$$Q = \left[\frac{9.81 \pi^2}{8 (0.02)} \right]^{1/5} D^{5/2} s^{1/2}$$

$$Q = 24.60 D^{5/2} s^{1/2}$$

Por conveniencia, expresamos Q en 10³ m³/día:

$$Q = 2125 D^{5/2} s^{1/2}$$

Reescribiendo la ecuación anterior en términos de s y D , se obtiene:

$$s = (2.215 \times 10^{-7}) \frac{Q^2}{D^5}$$

$$D = (4.667 \times 10^{-2}) \left(\frac{Q^2}{s}\right)^{1/5}$$

- Corte la red de distribución con una serie de líneas seccionadas aproximadamente perpendiculares a la línea de alimentación (ver Figura 8.25).
- Estime la población aguas abajo de cada sección cortada. Los valores para las secciones mostradas en la figura son:

| Sección | Población |
|---------|-----------|
| aa | 28,000 |
| bb | 23,000 |
| cc | 16,500 |
| dd | 9,000 |
| ee | 3,750 |

- Estime la demanda aguas abajo de cada sección de corte. Los valores requeridos son:

| Sección | Población | Demanda, 10 ³ m ³ /d | | |
|---------|-----------|--|----------|-------|
| | | Consumo | Incendio | Total |
| aa | 28,000 | 21.00 | 26.14 | 48.14 |
| bb | 23,000 | 17.25 | 26.14 | 45.39 |
| cc | 16,500 | 12.38 | 26.14 | 40.52 |
| dd | 9,000 | 6.75 | 26.14 | 34.89 |
| ee | 3,750 | 2.81 | 5.45 | 8.27 |

* Basado en demanda de incendio residencial de 63 l/s.

- Consumo doméstico

$$Q_{MH} = \frac{(1.2)(1.5)(416.8 \text{ l/h/día})(16,500 \text{ h})}{10^3 \text{ l/m}^3}$$

$$Q_{MH} = 12.38 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{día}$$

- La demanda de incendio de la zona central o de comercio está basada en una población de 28,000 habitantes.
- Determine el gradiente hidráulico disponible a través del sistema de distribución.

$$s = \frac{\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma}}{L}$$

donde:

- P_1 = presión en la entrada de la línea de alimentación (415 x 10³ Pa, es dato)
- P_2 = presión mínima requerida en el extremo más lejano de la red de distribución = 140 x 10³ Pa (20 lb/pulg²)
- L = longitud de la tubería de alimentación o primaria a través del sistema = 9,025 m

$$s = \frac{\frac{415 - 140 \text{ N/m}^2}{9,810 \text{ N/m}^3} \times 10^3}{9,025 \text{ m}} = 0.0031 \text{ m/m}$$

- Cuente y tabule el número de tuberías de cada diámetro cortadas por cada sección.

Por ejemplo, para la sección bb:

- 1 - 0.6 m diámetro
- 1 - 0.3
- 2 - 0.2
- 4 - 0.15

- Calcule la capacidad de cada tubería cortada por la sección bb usando la ecuación de Darcy-Weisbach y el gradiente hidráulico disponible. Por ejemplo, para la tubería de 0.6 m de diámetro.

$$Q = 2125 D^5 s^3$$

$$Q = 2125 (0.6)^{\frac{5}{2}} (0.031)^{\frac{1}{2}} = 32.99 \times 10^3 \frac{m^3}{día}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{10^3 \frac{m^3}{d} (10^3) \frac{h}{3600} \frac{d}{24 h}}{\frac{LD^2}{4}}$$

Las capacidades de los tubos cortados por la sección bb son:

| | |
|----------|---|
| 1 - 0.6 | 32.99 x 10 ³ m ³ /día |
| 1 - 0.3 | 5.83 |
| 2 - 0.2 | 4.23 |
| 4 - 0.15 | 4.12 |
| <hr/> | |
| | 47.17 x 10 ³ m ³ /día |

$$V = (1.474 \times 10^{-2}) \frac{Q}{D^2}$$

donde

Q = gasto, 10³ m³/día

D = diámetro de tubería, m

V = velocidad del fluido, m/s

Si la suma es mayor que la demanda hay suficiente capacidad a través de la sección. Para la sección bb el suministro es mayor que la demanda (45,390 m³/día).

Por ejemplo, para la tubería de 0.6 m de diámetro

8. Calcule el diámetro de un tubo sencillo equivalente usando la ecuación de Darcy en su forma de diámetro:

$$D = (4.667 \times 10^{-2}) \left[\frac{47.17^2}{0.0031} \right]^{\frac{1}{5}} = 0.692 \text{ m}$$

$$V = (1.474 \times 10^{-2}) \left[\frac{31.80}{0.6^2} \right] = 1.30 \text{ m/s}$$

Si las velocidades calculadas son muy altas, podrían ser necesarias modificaciones a la red.

9. Calcule el gradiente hidráulico actual cuando la capacidad en la línea de sección iguale a la demanda usando la ecuación de Darcy-Weisbach en su forma de pendiente:

$$s = (2.215 \times 10^{-7}) \left[\frac{45.39^2}{0.692^5} \right] = 0.00288$$

12. Complete los cálculos necesarios para las secciones restantes. Los cálculos requeridos para el sistema mostrado en la Figura 8.24 se resumen en el cuadro 8.8, las secciones dd y ee tienen capacidad insuficiente. Aunque es posible efectuar muchas modificaciones a la red de distribución, tres que corregirán los problemas de capacidad insuficiente se muestran en la misma Figura 8.25. Las secciones dd y ee fueron recalculadas y los nuevos resultados se muestran en el cuadro 8.8 como secciones dd y ee (revisadas).

10. Usando el gradiente hidráulico actual, recalculé la capacidad en la línea de sección. Debe igualar la demanda.

| | |
|----------|---|
| 1 - 0.6 | 31.80 x 10 ³ m ³ /día |
| 1 - 0.3 | 5.62 |
| 2 - 0.2 | 4.08 |
| 4 - 0.15 | 3.89 |
| <hr/> | |
| | 45.48 x 10 ³ m ³ /día |

11. Revise las velocidades en exceso en las tuberías, usando las capacidades actuales del paso 10.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Cuadro 8.8.

RESUMEN DE CALCULOS PARA LA APLICACION DEL METODO DE SECCIONES

| Sección | Demanda 3 3 10 m/d | Tuberías No. D (m) | Capacidad s=0031, 10 m /d | Diámetro equivalente (m) | Pendiente cuando la cap.=demand. | Verif. de 10 m /d | Velocidad cuando cap.=dem. (m/s) |
|----------------|--------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------------------------|--|----------------------|---|
| aa | 44.14 | 1 0.75 | 57.64 | 0.750 | 0.00225 | 49.10 | 1.29 |
| bb | 45.39 | 1 0.6 | 32.99 | 0.692 | 0.00228 | 31.80 | 1.30 |
| | | 1 0.3 | 5.83 | 5.62 | | 0.92 | |
| | | 2 0.2 | 4.23 | 4.08 | | 0.75 | |
| | | 4 0.15 | 4.12 | 3.98 | | 0.65 | |
| | | | 47.17 | | | 45.48 | |
| cc | 40.52 | 2 0.4 | 23.95 | 0.667 | 0.00275 | 22.55 | 1.04 |
| | | 2 0.3 | 11.66 | 10.98 | | 0.90 | |
| | | 3 0.2 | 6.35 | 5.98 | | 0.73 | |
| | | 1 0.15 | 1.03 | 0.97 | | 0.64 | |
| | | | 42.99 | | | 40.48 | |
| dd | 34.89 | 1 0.4 | 11.97 | | | | |
| | | 1 0.3 | 5.83 | Capacidad | | | |
| | | 4 0.2 | 8.47 | insuficiente | | | |
| | | 2 0.15 | 2.06 | | | | |
| | | | 28.33 | | | | |
| ee | 8.27 | 1 0.2 | 2.12 | Capacidad | | | |
| | | 5 0.15 | 5.16 | insuficiente | | | |
| | | | 7.28 | | | | |
| dd revisado | 34.80 | 2 0.4 | 23.95 | 0.618 | 0.00299 | 23.52 | 1.08 |
| | | 5 0.2 | 10.58 | 10.39 | | 0.77 | |
| | | 1 0.15 | 1.03 | 1.01 | | 0.66 | |
| | | | 35.56 | | | 34.92 | |
| ee revisado | 8.27 | 3 0.2 | 6.35 | 0.364 | 0.00237 | 5.55 | 0.68 |
| | | 3 0.15 | 3.09 | 2.70 | | 0.59 | |
| | | | 9.44 | | | 8.25 | |

8.6.4 Método del círculo.

Este método permite realizar el proyecto o el estudio de los tubos más pequeños que forman las mallas de la red. La Figura 8.26(a) muestra una forma de disposición de estos tubos, para cuyo cálculo se hacen las siguientes suposiciones: se desprecia el consumo doméstico ordinario y sólo se considera la demanda de incendios. Las manzanas son de 75 x 150 m. Las arterias principales del sistema (que no se ha dibujado en la Figura) cumplen las recomendaciones del Insurance Services Office y, por consiguiente, mantienen una separación de 1000 m entre sí, constituyendo, además, su propia malla. Los tubos cortados por un círculo de 150 m de radio son los que suministran el agua necesaria para la extinción de incendios. Esto se basa en el hecho de que las mangueras de más de 150 m de longitud proporcionarían poca agua, y que la presión en las bocas de incendios no debe ser menor de 1.5 Kg/cm², si se emplean motobombas.

En la Figura 8.26 (a), el círculo corta a 14 tubos, contando los puntos de tangencia como dos tubos. Si el distrito que se estudie es el más densamente edificado de la sección residencial, será necesario, para atender a los casos de incendio, un máximo de 9.5 m³/min. Cada uno de los 14 tubos que el círculo corta conducirá 0.68 m³ /min, y si tienen un diámetro de 15 cm, la pérdida de carga será 5.5×10^{-3} . Cada tubo, si el incendio se produce en el centro de la malla formada por las arterias, tendrá un recorrido de unos 500 m hasta llegar a la arteria que le suministra el agua, y por tanto, la pérdida de presión en cada tubo será de 0.28 Kg/cm². Para una presión normal en la arteria de 2.8 Kg/cm² es evidente que la presión en los hidrantes próximos al lugar del incendio será holgada. Una cantidad desconocida de agua alcanzará la zona después de recorrer una gran parte del camino por los tubos dispuestos paralelamente a las direcciones que van directamente a las arterias. Con una red de tubos de 15 cm de diámetro, esta cantidad sería, sin embargo, reducida y, además, la demanda normal doméstica tenderá a impedir cualquier disminución considerable de la pérdida de presión producida por esta causa.

La Figura 8.26 (b) se refiere a manzanas de 150 x 150 m. El círculo, en este caso, solamente corta 10 tubos, por lo que cada uno deberá conducir 0.95 m³/min, lo que, si su diámetro es de 15 cm, dará una pérdida de carga de 10 m por kilómetro, que representa 0.5 kg/cm² de pérdida desde la periferia del círculo hasta los alimentadores, lo que conduciría a que la presión en la boca de incendios alcanzase el valor de 2.3 kg/cm². Si las manzanas fuesen de 175 x 175 m la circunferencia solo cortaría a seis tubos, como indica la Figura 8.25(c) sería deseable reemplazar algunos de los tubos de 150 mm por otros de mayor tamaño para asegurar que existen presiones adecuadas en caso de incendio.

El estudio anterior se ha realizado para una zona residencial de gran demanda. En general, las demandas para incendios son menores excepto en los distritos de lujo o de negocios, para los cuales el Insurance Services Office exige que los tubos sean de 20 cm de diámetro como mínimo. La disposición de las redes de arterias tiene una gran importancia. Si solamente se dispone de arterias por los dos lados, únicamente será razonable considerar que la totalidad del agua necesaria llegará a la zona estudiada circulando nada más que por la mitad, o las tres cuartas partes de los tubos que corta la circunferencia, con lo que se incrementarán las pérdidas de presión haciendo necesario que los tubos de enlace con las arterias sean de mayor diámetro.

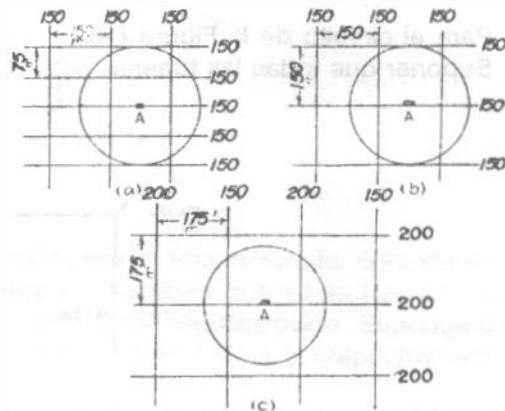


Figura 8.26. El método del círculo para el cálculo de caudales.

8.6.5 Análisis con computadora.

La mayor parte de las redes de distribución se analizan en la actualidad usando programas de computadora. Al diseñar un programa que resuelva problemas de redes de flujo, deben satisfacerse las siguientes ecuaciones simultáneamente a través de la red:

En cada nudo o cruceo:

$$\sum Q_{\text{entrada}} = \sum Q_{\text{salida}}$$

Para cada circuito completo:

$$\sum H = 0$$

Para cada tubería:

$$H = KQ^n$$

En los programas de computadora para redes más complejos, las ecuaciones anteriores se resuelven simultáneamente usando una o varias técnicas de inversión de matrices.

Quizá la mayor ventaja ofrecida por el uso de las computadoras es que pueden desarrollarse

muchas más soluciones a un costo razonable para analizar la respuesta del sistema ante la variación de entradas. En la actualidad casi todas las firmas consultoras cuentan con programas de computadora. Lo importante no es solo aprender a correr el programa, sino comprender el problema que se quiere resolver.

8.6.6 Analogía eléctrica.

El analizador eléctrico de McIlroy es de tipo analógico. Requiere el empleo de unos tubos de vacío especiales denominados fluistores, en los cuales la caída de voltaje es proporcional a la potencia 1.85 de la corriente, con lo que es análogo a la pérdida de carga producida por la fricción en la tubería, por tanto, se pueden practicar alimentaciones y cortes de corriente equivalentes a las alimentaciones y salidas propuestas para un sistema de distribución y registrar los cambios de voltaje. Asimismo, es posible estudiar los efectos de la implantación de nuevas tuberías reemplazando los tubos por otros equivalentes a líneas mayores.

Problemas

8.1 Para el circuito de la Figura P-8.1, calcule la distribución de gastos y la presión en el cruceo A. Suponer que todas las tuberías están a la misma cota.

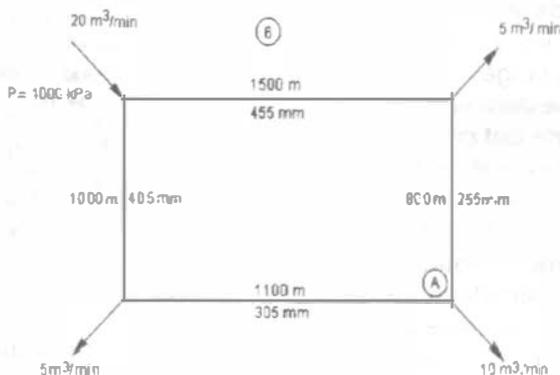


Figura P-8.1

8.2 Para el circuito de la Figura P-8.2, calcule la distribución de gastos y la presión en el crucero A. Suponer que todas las tuberías están a la misma cota.

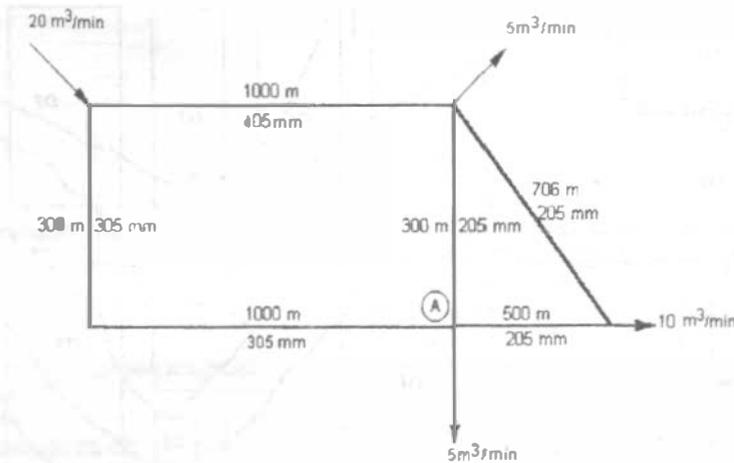


Figura P-8.2

8.3 Para el circuito de la Figura P-8.3, calcule la distribución de gastos y la presión en el cruce A. Suponer que todas las tuberías están a la misma cota, excepto en donde se indica.

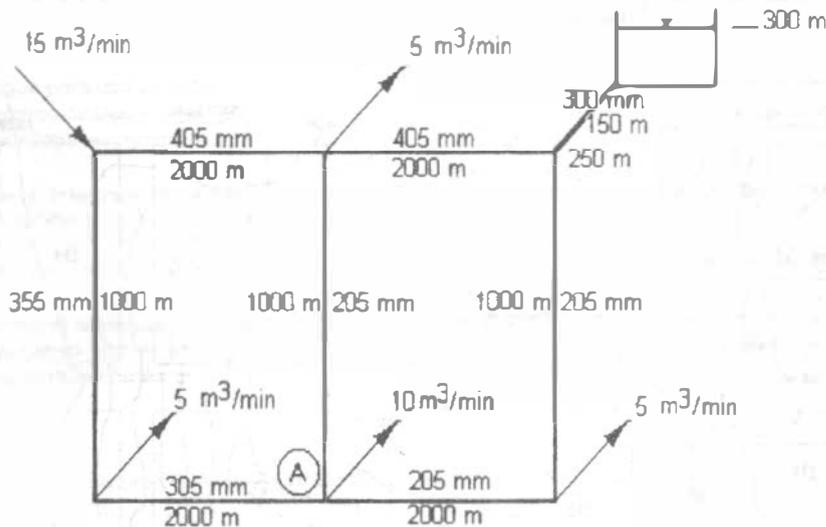


Figura P-8.3

8.4 Con referencia a la Figura P-8.4, diseñe la red de distribución para el área mostrada, considerando por lo menos dos circuitos y las densidades en habitantes por hectárea que se indican en cada manzana. Indique la posición y altura más conveniente del tanque de regularización. Suponga una dotación de 200 l/hab/día y los coeficientes de variación diaria y horaria 1.2 y 1.5, respectivamente.

8.5 Con referencia a la Figura P-8.5, diseñe la red de distribución para el área mostrada, considerando por lo menos dos circuitos y las densidades en habitantes por hectárea que se indican en cada manzana. Indique la posición y altura más conveniente del tanque de regularización. Suponga una dotación de 250 l/hab/día y los coeficientes de variación diaria y horaria 1.25 y 1.45, respectivamente.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental, agua para uso y consumo humano - límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

INDICE

| | |
|---|--|
| 0 | INTRODUCCIÓN |
| 1 | OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN |
| 2 | REFERENCIAS |
| 3 | DEFINICIONES |
| 4 | LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA |
| 5 | TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACION DEL AGUA |
| 6 | BIBLIOGRAFIA |
| 7 | OBSERVANCIA DE LA NORMA |

AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO - LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION.

0 INTRODUCCION

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para lo cual se requiere establecer límites permisibles en cuanto a sus características biológicas, físicas, organolépticas, químicas y elementos radiactivos.

Con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua en los sistemas, hasta la entrega al consumidor, se debe someter a tratamientos de potabilización.

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACION

Esta Norma Oficial Mexicana establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano, que deben cumplir los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que la distribuya, en todo el territorio nacional.

2 REFERENCIAS

NOM-008-SCF1-1993 "Sistema General de Unidades de Medida"

3 DEFINICIONES

- 3.1 **Ablandamiento.**- Proceso de remoción de los iones calcio y magnesio, principales causantes de la dureza del agua.
- 3.2 **Adsorción.**- Remoción de iones y moléculas de una solución que presentan afinidad a un medio sólido adecuado, de forma tal que son separadas de la solución.
- 3.3 **Agua para uso y consumo humano.**- Aquélla que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causa efectos nocivos al ser humano.
- 3.4 **Características bacteriológicas.**- Son aquéllas debidas a microorganismos nocivos a la salud humana. Para efectos de control sanitario se determina el contenido de indicadores generales de contaminación microbiológica, específicamente organismos coliformes totales y organismos coliformes fecales.

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

- 3.5 Características físicas y organolépticas.- Son aquéllas que se detectan sensorialmente. Para efectos de evaluación, el sabor y olor se ponderan por medio de los sentidos y el color y la turbiedad se determinan por medio de métodos analíticos de laboratorio.
- 3.6 Características químicas.- Son aquéllas debidas a elementos o compuestos químicos, que como resultado de investigación científica se ha comprobado que pueden causar efectos nocivos a la salud humana.
- 3.7 Características radiactivas.- Son aquéllas resultantes de la presencia de elementos radiactivos.
- 3.8 Coagulación química.- Adición de compuestos químicos al agua, para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos, a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración.
- 3.9 Contingencia.- Situación de cambio imprevisto en las características del agua por contaminación externa y que pongan en riesgo la salud humana.
- 3.10 Desinfección.- Destrucción de organismos patógenos por medio de la aplicación de productos químicos o procesos físicos.
- 3.11 Filtración.- Remoción de partículas suspendidas en el agua, haciéndola fluir a través de un medio filtrante de porosidad adecuada.
- 3.12 Floculación.- Aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química, a través de medios mecánicos o hidráulicos.
- 3.13 Intercambio iónico.- Proceso de remoción de aniones o cationes específicos disueltos en el agua, a través de su reemplazo por aniones o cationes provenientes de un medio de intercambio, natural o sintético, con el que se pone en contacto.
- 3.14 Límite permisible.- Concentración o contenido máximos o intervalo de valores de un componente, que garantiza que el agua será agradable a los sentidos y no causará efectos nocivos a la salud del consumidor.
- 3.15 Neutralización.- Ajuste del pH, mediante la adición de agentes químicos básicos o ácidos al agua en su caso, con la finalidad de evitar incrustación o corrosión de materiales que puedan afectar su calidad.
- 3.16 Osmosis inversa.- Proceso esencialmente físico para remoción de iones y moléculas disueltas en el agua, el cual por medio de altas presiones fuerza el paso de ella a través de una membrana semipermeable de porosidad específica, reteniendo los iones y moléculas de mayor tamaño.
- 3.17 Oxidación.- Introducción de oxígeno en la molécula de ciertos compuestos para formar óxidos.
- 3.18 Potabilización.- Conjunto de operaciones y procesos físicos y/o químicos que se aplican al agua a fin de mejorar su estado y hacerla apta para uso y consumo humano.
- 3.19 Precipitación.- Proceso físico que consiste en la separación de las partículas suspendidas sedimentables del agua, por efecto gravitacional.
- 3.20 Sistema de abastecimiento.- Conjunto intercomunicado o interconectado de fuentes, obras de captación, plantas cloradoras, plantas potabilizadoras, tanques de almacenamiento y regulación, cárcamos de bombeo, líneas de conducción y red de distribución.

4 LÍMITES PERMISIBLES DE CALIDAD DE AGUA

4.1 Límites permisibles de características bacteriológicas.

El contenido de organismos resultante del examen de una muestra de agua simple, deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 1.

Bajo situaciones de emergencia sanitaria, las autoridades competentes dictarán las medidas necesarias para identificar la presencia de otros agentes biológicos nocivos a la salud.

TABLA 1

| CARACTERÍSTICA | LÍMITE PERMISIBLE |
|-------------------------------|---|
| Organismos coliformes totales | 2 NMP/100 ml 2 UFC/100 ml |
| Organismos coliformes fecales | No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml |

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana.

4.2 Límites permisibles de características físicas y organolépticas.

Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 2

TABLA 2

| CARACTERÍSTICA | LÍMITE PERMISIBLE |
|----------------|--|
| Color | 15 unidades de color verdadero en la escala de platino cobalto. |
| Olor y sabor | Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultado de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico) |
| Turbiedad | 5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método. |

4.3 Límites permisibles de características químicas.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 3. Los límites se expresan en mg/l, excepto cuando se indique otra unidad.

TABLA 3

| CARACTERÍSTICA | LÍMITE PERMISIBLE |
|---|--|
| Aluminio | 0.20 |
| Arsénico | 0.05 |
| Bario | 0.70 |
| Cadmio | 0.005 |
| Cianuros (como CN ⁻) | 0.07 |
| Cloro residual libre | 0.5-1.00 (después de un tiempo de contacto mínimo de 30 min) |
| Cloruros (como Cl ⁻) | 250.00 |
| Cobre | 2.00 |
| Cromo total | 0.05 |
| Dureza total (como CaCO ₃) | 500.00 |
| Fenoles o compuestos fenólicos | 0.001 |
| Hierro | 0.30 |
| Fluoruros (como F ⁻) | 1.50 |
| Fosfatos (como PO ₄ ⁼) | 0.10 |
| Manganeso | 0.10 |
| Mercurio | 0.001 |

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

| | |
|---|---------|
| Nitratos (como N) | 10.00 |
| Nitritos (como N) | 0.05 |
| Nitrógeno amoniacal (como N) | 0.50 |
| Oxígeno consumido en medio ácido | 3.00 |
| pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH | 6.5-8.5 |
| Plaguicidas en microgramos/Aldrín y dieldrín o combinados)(separados | 0.03 |
| Clordano (total de isómeros) | 0.30 |
| DDT (total de isómeros) | 1.00 |
| Gamma-HCH (lindano) | 2.00 |
| Hexaclorobenceno | 0.01 |
| Heptacloro y epóxido de heptacloro | 0.03 |
| Metoxicloro | 20.00 |
| 2,4-D | 50.00 |
| Plomo | 0.025 |
| Sodio | 200.00 |
| Sólidos disueltos totales | 1000.00 |
| Sulfatos (como SO ₄ =) | 400.00 |
| Sustancias activas al azul de metileno | 0.50 |
| Tetrahalometanos totales | 0.20 |
| Zinc | 5.00 |

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

4.4 Límites permisibles de características radiactivas.

El contenido de constituyentes radiactivos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 4. Los límites se expresan en Bq/l (Bequerel por litro).

TABLA 4

RADIATIVIDAD ALFA GLOBAL 0.1
RADIATIVIDAD BETA GLOBAL 1.0

5 TRATAMIENTOS PARA LA POTABILIZACIÓN DEL AGUA

La potabilización del agua proveniente de una fuente en particular, debe fundamentarse en estudios de calidad y pruebas de tratabilidad a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad.

Se deben aplicar los tratamientos específicos siguientes o los que resulten de las pruebas de tratabilidad cuando los contaminantes biológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua enlistados a continuación, excedan los límites permisibles establecidos en el apartado 4.

5.1 Contaminación biológica.

5.1.1 Bacterias, helmintos, protozoarios y virus.- Desinfección con cloro, compuestos de cloro, ozono o luz ultravioleta

5.2 Características físicas y organolépticas.

5.2.1 Color, olor, sabor y turbiedad.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, adsorción con carbón activado u oxidación.

5.3 Constituyentes químicos.

5.3.1 Arsénico.- Coagulación-floculación-precipitación-filtración; cualquiera o la combinación de ellos, intercambio iónico y ósmosis inversa.

5.3.2 Aluminio, bario, cadmio, cianuros, cobre, cromo total y plomo.- Intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción con carbón activado.

5.3.3 Cloruros.- Intercambio iónico, ósmosis inversa, o evaporación.

5.3.4 Dureza.- Ablandamiento químico o intercambio iónico.

- 5.3.5 Fenoles o compuestos fenólicos.- Adsorción con carbón activado u oxidación con ozono.
- 5.3.6 Hierro y/o manganeso.- Oxidación-filtración, intercambio iónico u ósmosis inversa.
- 5.3.7 Fluoruros.- Adsorción con carbón activado, ósmosis inversa o coagulación química.
- 5.3.8 Materia orgánica.- Oxidación-filtración o adsorción con carbón activado.
- 5.3.9 Nitratos y nitritos.- Intercambio iónico o coagulación-floculación-sedimentación-filtración, cualquiera o la combinación de ellos.
- 5.3.10 pH (potencial de hidrógeno).- Neutralización.
- 5.3.11 Plaguicidas.- Adsorción con carbón activado granular.
- 5.3.12 Trihalometanos.- Preozonización y adsorción con carbón activado granular.
- 5.3.13 Sulfatos.- Intercambio iónico y ósmosis inversa.
- 5.3.14 En el caso de contingencia, resultado de la presencia de sustancias contempladas o no contempladas en el apartado 4, se deben coordinar con la autoridad sanitaria competente, las autoridades locales, la Comisión Nacional del Agua, los responsables del abastecimiento y los particulares, instituciones públicas o empresas privadas involucrados en la contingencia, para determinar las acciones que se deben realizar con relación al abastecimiento de agua a la población.

6. BIBLIOGRAFIA

- 6.1 NOM-Z-13 "Guía para la Redacción, Estructuración y Presentación de las Normas Oficiales Mexicanas".
- 6.2 Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios, Diario Oficial de la Federación. Enero de 1988.
- 6.3 Desinfección del Agua. Oscar Cáceres López. Lima, Perú. Ministerio de Salud, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. 1990.
- 6.4 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 1. Recomendaciones. Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud. 1985.
- 6.5 Guías para la Calidad del Agua Potable. Volumen 2. Criterios relativos a la salud y otra información de base. Organización Panamericana de la Salud. 1987.
- 6.6 Ingeniería Sanitaria Aplicada a la Salud Pública. Francisco Unda Opazo. UTEHA 1969.
- 6.7 Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales. Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales. Gordon M. Fair, John C. Geyer, Daniel A. Okun, Limusa Wiley. 1971.
- 6.8 Instructivo para la Vigilancia y Certificación de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Comisión Interna de Salud Ambiental y Ocupación. Secretaría de Salud, 1987.
- 6.9 Integrated Design of Water Treatment Facilities. Susumu Kawamura. John Wiley and Sons, Inc. 1991.
- 6.10 Normas Técnicas para el Proyecto de Plantas Potabilizadoras. Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras públicas, 1979.
- 6.11 Revision of the WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. IPS International Programme on Chemical Safety, United Nations Environment Programme. International Labour Organization, World Health Organization, 1991.
- 6.12 WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 1. Recommendations. World Health Organization. 1992.
- 6.13 WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Chapter 1: Microbiological Aspects. United Nations Environment Programme International Labour Organization, World Health Organization, 1992.

7 OBSERVANCIA DE LA NORMA

- 7.1 Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria en todo el territorio nacional para los organismos operadores de los sistemas de abastecimiento públicos y privados o cualquier persona física o moral que distribuya agua para uso y consumo humano.
- 7.2 La vigilancia del cumplimiento de esta Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Salud y a los gobiernos de las entidades federativas en coordinación con la Comisión Nacional del Agua, en sus respectivos ámbitos de competencia.

BIBLIOGRAFIA

Fair, G.M., Geyer, J.C., Okun D.A.
Abastecimiento de Agua y Remoción de Aguas Residuales, Vol.1
Ed. Limusa

García Chable Miguel Angel
Elementos de Hidráulica Aplicada
Editado por el autor

Mendoza Gamez Gastón
Sistemas de Abastecimiento de Agua
Apuntes de clase; División de Estudios Superiores, Fac. de Ingeniería, UNAM

Murguía Vaca Ernesto
Ingeniería Sanitaria
Editado por el autor

Núñez Luis A.
Hidráulica Aplicada, Tomo I
Universidad de Puerto Rico

Nyerges V. Nicolás
Obras de Captación en Cursos Superficiales de Agua Potable
Editado por el autor

Rusell E. George
Hidráulica
Ed. CECSA

Sotelo Avila Gilberto
Hidráulica General
Ed. Limusa

Steel Ernest W.
Abastecimiento de Agua y Alcantarillado
Ed. Gustavo Gili

Wanielista Martin P.
Engineering and the Environment
Ed. Brooks Cole Engineering Division

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Por último, será muy conveniente tener la visión en el sentido de que cuando las necesidades técnicas lo ameriten, a través de las fotografías de contacto, pares estereoscópicos de la zona en estudio o en proceso de investigación, se llevarán a cabo trabajos técnicos muy útiles de fotointerpretación, ya sea geológica, hidrológica, forestal, agrícola o urbana.

3.6 ELABORACION INTEGRAL DEL ESTUDIO

Cuando se cuente con la información previa, con la investigación directa y con los resultados de los estudios complementarios, geohidrológicos, hidrométricos y fotogramétricos, se podrá elaborar verdaderamente el estudio completo de la población. De esta manera, los proyectos que se realicen serán realmente seguros y se podrá

dilucidar la construcción más conveniente y económica que deba ejecutarse.

Cualquiera que sea la categoría de la población ya sea poblado, villa o ciudad, el estudio debe ser fundamentalmente completo.

Indudablemente que las investigaciones pueden ser más sencillas a medida que la localidad sea reducida, pero tiene tanta importancia para el problema humano y social llevar el agua a un núcleo habitado pequeño como a una gran ciudad. En ambos aspectos, los problemas son idénticos, lo único que varía es la magnitud de la obra, o la amplitud del estudio; en consecuencia, en los dos casos, el estudio debe ser terminantemente integral y lo más amplio posible.

Problemas

- 3.1. Instrucciones: Relacione los conceptos de la columna izquierda con los enunciados de la columna derecha (Ejemplo: 10-g).

| | | | |
|----|---------------------------------|----|--|
| 1. | NITRATOS | a. | Se incrusta en las tuberías, colorea el agua y le da un sabor desagradable. |
| 2. | HIERRO | b. | Da mala apariencia al agua y reduce la efectividad del desinfectante durante el tratamiento. |
| 3. | CADMIO | c. | Produce incrustaciones en las tuberías y causa la dureza del agua. |
| 4. | FLUORUROS | d. | Pueden producir metahemoglobinemia. |
| 5. | CARBONATOS DE CALCIO Y MAGNESIO | e. | Arriba de 1.5 mg/l producen manchas oscuras en los dientes. |
| 6. | ARSENICO | f. | Se acumula en los tejidos provocando alteraciones en el metabolismo y anemia. |
| 7. | ALUMINIO | | |

ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Cairncross S., Feachem Richard
Small Water Supplies
The Rooss Institute Information and Advisor Service

Peavy S. H., Rowe R. D., Tchobanoglous G.
Environmental Engineering
McGraw-Hill International Editions

Agencias de Gobierno

Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos
Proyectos de Plantas de Bombeo

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas
Manual de Estudios de Proyectos para Desarrollos Industriales
Volumen I y II

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas
Manual de Normas de Proyecto para Obras de Aprovechamiento de Agua
Potable en Localidades Urbanas de la República Mexicana

Secretaría de Salubridad y Asistencia
Dirección de Ingeniería Sanitaria
Manual de Saneamiento, Vivienda, Agua y Desechos
Ed. Limusa

Secretaría de Salud
Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades,
Establecimientos, Productos y Servicios

Comisión Nacional del Agua
Lineamientos Técnicos para la Elaboración de Estudios y Proyectos de Agua Potable y
Alcantarillado Sanitario

APUNTE
61



907100

G1.- 907100

FACULTAD DE INGENIERIA

Coordinación de Bibliotecas

FECHA DE DEVOLUCION

EL LECTOR SE OBLIGA A DEVOLVER
ESTE LIBRO ANTES DEL VENCIMIENTO
DE PRESTAMO INDICADO POR EL SELLO

COLOCACION:

61

NUMERO DE ADQUISICION:

G1-907100

FACULTAD DE INGENIERIA
ESTE LIBRO NO SALE
DE LA BIBLIOTECA
ENRIQUE RIVERO BORRELL