

CAPÍTULO XII. ALMACENAMIENTO Y REGULACIÓN DE LA PRESIÓN

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. CISTERNAS Y TANQUE ELEVADOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	2
2.1. FUNCIONES DE LOS ALMACENAMIENTOS	2
2.2. TIPOS DE ALMACENAMIENTOS	2
2.3. CAPACIDAD DE LOS ALMACENAMIENTOS.....	8
2.3.1. <i>Determinación del Volumen Operacional.....</i>	<i>8</i>
2.3.1.1. Método Basado en la Curva de Consumo por Aplicación del Diagrama de Masas (según W. Rippl).....	8
2.3.1.2. Método Basado en Asimilar la Curva de Consumo a una Sinusoide.....	14
2.3.2. <i>Volumen Para Incendio.....</i>	<i>16</i>
2.3.3. <i>Volumen Para Emergencias.....</i>	<i>19</i>
2.3.4. <i>Volumen Total de Almacenamiento</i>	<i>20</i>
2.4. INFLUENCIA DE LA LOCALIZACIÓN EN RELACIÓN AL BARICENTRO DE CARGA.....	21
2.4.1. <i>Carencia de Almacenamiento.....</i>	<i>22</i>
2.4.2. <i>Almacenamiento Antes del Baricentro de Cargas.....</i>	<i>22</i>
2.4.3. <i>Almacenamiento Después del Baricentro de las Cargas.....</i>	<i>24</i>
2.4.4. <i>Conclusiones.....</i>	<i>25</i>
2.5. FORMAS Y DIMENSIONES MÁS ECONÓMICAS.....	26
2.6. ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS DE LOS ALMACENAMIENTOS EN RELACIÓN A SU DISEÑO.....	27
2.6.1. <i>Cañería de Entrada en Tanques Elevados Ubicados Antes del Baricentro de Consumo.....</i>	<i>28</i>
2.6.2. <i>Cañería de Salida en Tanques Ubicados Antes del Baricentro de Consumo.....</i>	<i>28</i>
2.6.3. <i>Cañerías de Entrada y Salida de Tanques de Cola.....</i>	<i>28</i>
2.6.4. <i>Cañería de Desborde</i>	<i>29</i>
2.6.5. <i>Cañería de Limpieza.....</i>	<i>31</i>
2.6.6. <i>By Pass</i>	<i>32</i>
2.6.7. <i>Ventilaciones</i>	<i>32</i>
2.6.8. <i>Accesos.....</i>	<i>33</i>
2.6.9. <i>Pantallas Deflectoras</i>	<i>33</i>

2.6.10. <i>Indicador del Nivel de Agua</i>	33
2.6.11. <i>Balizamiento</i>	33
2.6.12. <i>Pararrayos</i>	34
2.7. MANTENIMIENTO PREVENTIVO	34
2.8. IMPERMEABILIZACIÓN	36
3. TANQUES ROMPECARGA	37
4. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN	40
5. CISTERNAS EN PLANTAS DE POTABILIZACIÓN	43
6. TANQUES HIDRONEUMÁTICOS	44
6.1. TEORÍA DE SU FUNCIONAMIENTO	44
6.1.1. <i>Función de un Tanque Hidroneumático</i>	44
6.1.2. <i>Ventajas e Inconvenientes del Sistema</i>	44
6.1.3. <i>Parámetros Básicos</i>	45
6.1.4. <i>Cálculo Teórico del Pulmón</i>	46
6.1.5. <i>Conclusiones Deducidas de las Fórmulas de Cálculo del Tanque</i>	48
6.1.6. <i>Frecuencia de los Ciclos de Paradas o Arranques</i>	48
6.2. SISTEMAS CON TANQUE HIDRONEUMÁTICO	49
6.2.1. <i>Sistema del Tanque o Pulmón</i>	49
6.2.2. <i>Sistemas de Impulsión</i>	49
6.2.3. <i>Sistemas de Reposición de Aire</i>	50
6.2.4. <i>Sistema de Control</i>	51
6.2.5. <i>Sistema de Operación y Protección</i>	51
6.2.6. <i>Instalaciones Complementarias</i>	52
6.2.6.1. <i>Cisterna Auxiliar</i>	52
6.2.6.2. <i>Sala de Máquinas</i>	52
6.2.6.3. <i>Línea Eléctrica</i>	52
6.3. DISEÑO DE UN SISTEMA CON TANQUE HIDRONEUMÁTICO	52
6.3.1. <i>Diseño de un Equipo Hidroneumático</i>	52
6.3.1.1. <i>Presiones de Servicio en la Red Domiciliaria</i>	52
6.3.1.2. <i>Presiones de Trabajo en el Pulmón</i>	54
6.3.1.3. <i>Volumen Total del Pulmón</i>	54
6.3.1.4. <i>Potencia de los Equipos de Impulsión</i>	55
6.3.2. <i>Equipos Comerciales Estandarizados</i>	56
6.3.2.1. <i>Características de los Equipos Comerciales</i>	56
6.3.2.2. <i>Verificación de un Equipo Comercial</i>	57
6.3.3. <i>Ejemplo de Diseño Adoptando un Tanque Comercial</i>	59
6.3.3.1. <i>Equipo Hidroneumático Elegido</i>	59
6.3.3.2. <i>Parámetros de la Red de Distribución Proyectada</i>	59
6.3.3.3. <i>Verificación de los Parámetros Básicos</i>	60
6.4. OPERACIÓN NORMAL DE UN EQUIPO HIDRONEUMÁTICO	61
6.4.1. <i>Parámetros a Considerar en el Funcionamiento</i>	61
6.4.2. <i>Ejemplo. Análisis de la Operación de un Equipo Hidroneumático</i>	62
7. BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE PARA REGULAR PRESIONES	64

8. BIBLIOGRAFÍA.....67

LISTA DE ILUSTRACIONES

TABLAS

Tabla 1. Valores parciales y acumulados del consumo diario	9
Tabla 2. Ley de demandas horarias - variaciones del consumo, expresadas como porcentajes horarios del gasto máximo diario	10
Tabla 3. Horario de operación	13
Tabla 4. Horario de operación	14
Tabla 5. Valores del volumen operacional en función del coeficiente α_2 (máximo horario del día de máximo consumo anual)	15
Tabla 6. Volumen para incendio en función de la población futura	16
Tabla 7. Caudal máximo diario, volumen de incendio y operacional en función de la población	18
Tabla 8. Volumen operacional y de incendio en función de la población	19
Tabla 9. Volúmenes de almacenamiento basados en una dotación de producción de 300 l/hab . día	21
Tabla 10. Pérdidas en función del caudal para un diámetro DN 500 y una longitud de 5.000 m	22
Tabla 11. Pérdidas de energía en función del caudal	23
Tabla 12. Cálculo de las pérdidas de carga	25
Tabla 13. Formulario de mantenimiento	35
Tabla 14. Formulario de mantenimiento	35

FIGURAS

Figura 1. Energía disponible en la tubería de ingreso – caso por presión.....	3
Figura 2. Energía disponible en la tubería de ingreso – por bombeo	3
Figura 3. Cisternas de almacenamiento semienterradas y enterradas.....	4
Figura 4. Tanque elevado.....	4
Figura 5. Ubicación de tanques – tanque distribuidor	5
Figura 6. Ubicación de tanques – tanque de cola	5
Figura 7. Tanques y/o cisternas	5
Figura 8. Columnas reguladoras	6
Figura 9. Cisterna de almacenamiento a cota suficiente para entregar presión a la red.....	7
Figura 10. Cisterna solo de almacenamiento. Presión a la red suministrada por tanque elevado, bombeo directo o equipo hidroneumático	7
Figura 11. Consumos horarios como porciento del total diario	9
Figura 12. Curva de consumo diario acumulado.....	10
Figura 13. Volumen operacional a suministro constante	11
Figura 14. Volumen operacional con suministro menor a 24 hs	12
Figura 15. Volumen operacional con suministro menor a 24 hs y caudal variable	13
Figura 16. Curva de consumos sinusoidal	14
Figura 17. Impulsión al baricentro de cargas	22
Figura 18. Tanque entre estación elevadora y baricentro de las cargas	23
Figura 19. Baricentro de las cargas entre la estación elevadora y el tanque	24
Figura 20. Cañerías de entrada y salida en tanques de cola	29
Figura 21. Desbordes	30
Figura 22. Ventilaciones	32
Figura 23. Cámara rompe-carga, planta y corte.....	38
Figura 24. Cisterna con cámara rompecarga - Planta y corte.....	39
Figura 25. Válvula reductora de presión (corte longitudinal).....	40
Figura 26. Ubicación en línea a gravedad (piloto de una vía).....	41
Figura 27. Ubicación en línea de impulsión (piloto de dos vías).....	42
Figura 28. Determinación del volumen de la cisterna para una planta de tratamiento tanques hidroneumáticos	43
Figura 29. Esquema de un tanque hidroneumático.....	45
Figura 30. Esquema de la instalación.....	62
Figura 31. Curva de funcionamiento H/Q y rendimientos a diversos números de revoluciones n	65
Figura 32. Curvas H/Q rendimiento para una bomba de velocidad variable	66

1. INTRODUCCIÓN

Después de la captación y posterior tratamiento de potabilización el sistema de distribución debe entregar el agua potabilizada a los consumidores.

Para ser adecuado, un sistema de distribución debe poder proporcionar un amplio suministro tanto en calidad (concepto sanitario) como en cantidad cuando y donde sea necesario dentro de la zona del radio servido, lo que lleva a considerar los aspectos de presión, y de almacenamiento para la operación, la lucha contra incendios y para emergencias.

En relación a las presiones el sistema debe mantener valores adecuados para los usos residenciales, comerciales, industriales y públicos normales, al igual que, cuando las normas a aplicar así lo determinen, proporcionar el abastecimiento contra incendio y emergencias.

Por lo general es necesario elevar el agua a una altura suficiente para disponer de las presiones necesarias para su distribución a través de las tuberías de la red principal y secundaria y vencer las pérdidas de energía en las conexiones y medidores de consumo en algunas o en todas las zonas del radio servido, situación que será función de la topografía del lugar.

En ciudades de topografía plana esto puede lograrse mediante la instalación de reservas y tanques elevados ubicados a una cota adecuada, mediante un tanque hidroneumático o mediante un sistema de bombeo directo a la red con bombas de velocidad variable.

También puede darse el caso en ciudades de topografía variada que grandes diferencias relativas de cotas lleven a excesos de presión en determinadas zonas, lo que plantea el caso de definir “terrazas de presión” y la necesidad de disponer de elementos limitadores tales como válvulas reguladoras de presión o de los denominados tanques rompecarga.

En lo referente a su función de almacenamiento las cisternas ubicadas a nivel de terreno o enterradas (y eventualmente los tanques elevados) deben instalarse para cumplir, por otra parte, fundamentalmente las funciones operacionales o compensadoras de volúmenes, las que pueden pensarse con un concepto similar al establecido por Rippl, mediante un diagrama de masas, debiéndose cumplir que en un período de tiempo determinado el volumen disponible sea capaz de compensar el suministro al mismo (ingresos) con las demandas (egresos), a fin de regular caudales, en base a hipótesis planteadas de alimentación y consumo.

En relación a las necesidades para incendio, diversos entes han realizado estudios, determinando volúmenes exigidos de reservas ante eventos serios, usualmente en función del tipo de edificación, de la población y de una supuesta duración del evento.

Finalmente puede disponerse de un volumen de reserva para emergencias el que deberá ser determinado por la relación interrupción del servicio versus tiempo de demora en las reparaciones.

El volumen total de las reservas será la suma de los volúmenes parciales indicados, pero la selección final estará íntimamente relacionada con consideraciones económicas y en consecuencia el volumen a adoptar reflejará la relación seguridad de servicio – inversión necesaria posible.

2. CISTERNAS Y TANQUE ELEVADOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN

2.1. FUNCIONES DE LOS ALMACENAMIENTOS

Es casi seguro que la génesis de los primitivos sistemas de abastecimiento de agua fue la necesidad de almacenar el líquido para poder atender la demanda cuando fuera necesario, tal es el caso de los aljibes domiciliarios, represas, etc.

El término almacenamiento en el sentido acá empleado se refiere a reserva en un punto de la cadena de tratamiento y su distribución, no incluyendo embalses con el propósito de abastecimiento o de utilización a largo plazo, se encuentre o no potabilizada el agua.

El concepto limita la referencia a reserva como agua en calidad y cantidad y a la presión necesaria para ser entregada al consumo de los diferentes usos de la red de distribución. Las funciones primordiales son:

- 1). Uniformizar las demandas sobre la fuente de abastecimiento, medios de producción y tuberías de conducción y distribución, por lo que no necesitarán ser de mayor tamaño dichos elementos.
- 2). Mejorar cuando es necesario las presiones del sistema buscando estabilizar el servicio a los clientes en la zona del radio servido.
- 3). Disponer cuando corresponda de los volúmenes necesarios para casos de contingencias: lucha contra incendios y fallas de servicio.

Se hace notar que la parte de reserva relacionada con los usos normales de operación tiene como fin abastecer los diferentes puntos del sistema de distribución y satisfacer los consumos máximos horarios regulando, en lo posible, caudales y presiones mientras que el resto se relaciona con eventos extraordinarios tales como incendios y/o fallas del sistema.

Existiendo fines contrapuestos es recomendable mantener intacto el volumen para uso en contingencias, combinándolos para determinar el volumen total a establecer.

2.2. TIPOS DE ALMACENAMIENTOS

Es posible clasificar los almacenamientos en base a diversos criterios. Entre ellos se pueden mencionar:

Por la energía disponible para la tubería de ingreso

- ***En presión.*** Energía disponible mayor o igual que la necesaria para mantener el escurrimiento al caudal de diseño considerando las pérdidas distribuidas y localizadas (**Figura 1**).

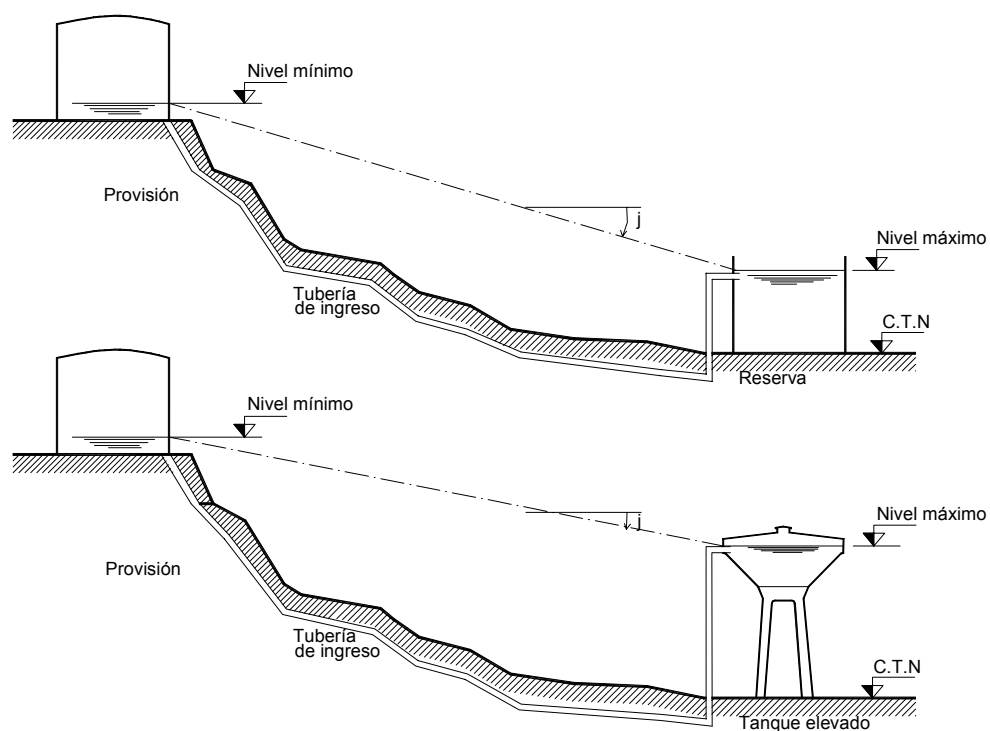


Figura 1. Energía disponible en la tubería de ingreso – caso por presión

- **Por bombeo.** La energía disponible es menor que la indicada anteriormente debiendo el equipo de bombeo suministrar al sistema la energía faltante (**Figura 2**).

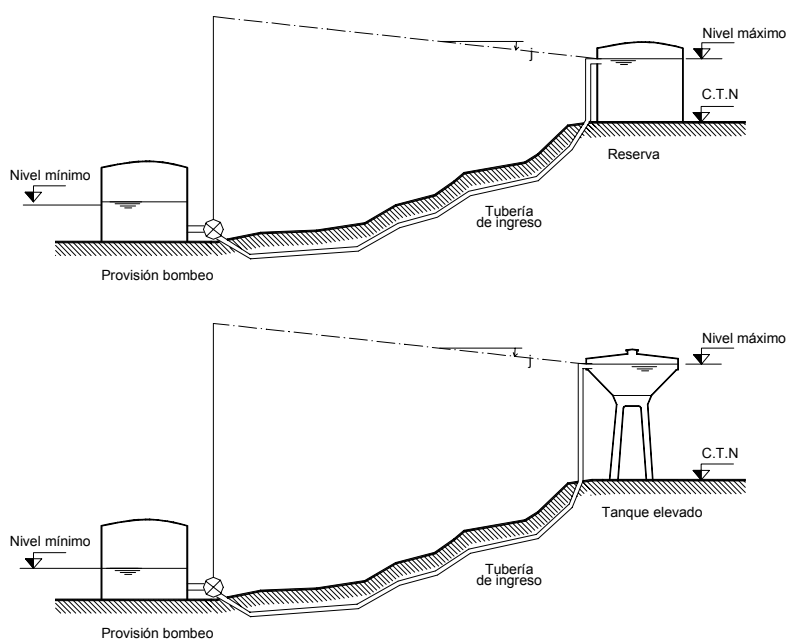


Figura 2. Energía disponible en la tubería de ingreso – por bombeo

En relación a la cota topográfica – Nivel de almacenamiento

- **Cisternas enterradas o semienterradas.** Disponiendo de un emplazamiento a una cota suficiente para la presión a suministrar. Uno u otro caso dependen fundamentalmente del material con que se construirá el almacenamiento, la tensión admisible de fundación y el nivel de la capa freática, a fin de lograr la estructura más económica (**Figura 3**).

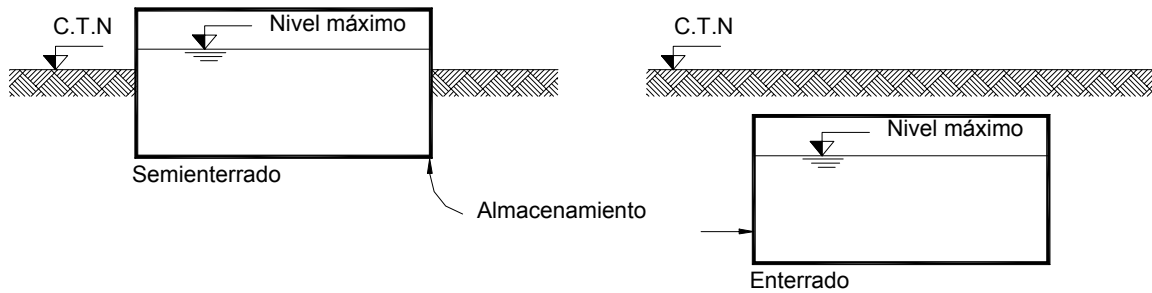


Figura 3. Cisternas de almacenamiento semienterradas y enterradas

- **Tanques elevados.** Cuando no se disponga de terrenos a cota conveniente en la ubicación seleccionada (**Figura 4**).

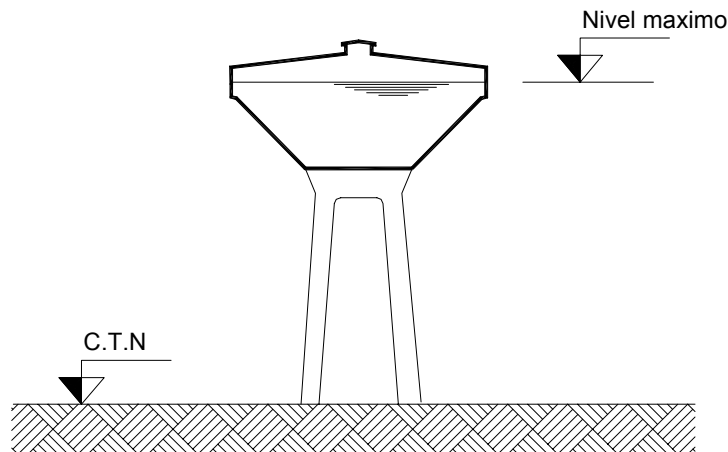


Figura 4. Tanque elevado

En relación a su ubicación respecto al baricentro de consumo

- Entre la estación elevadora y el baricentro de consumo, usualmente denominado tanque distribuidor (**Figura 5**).

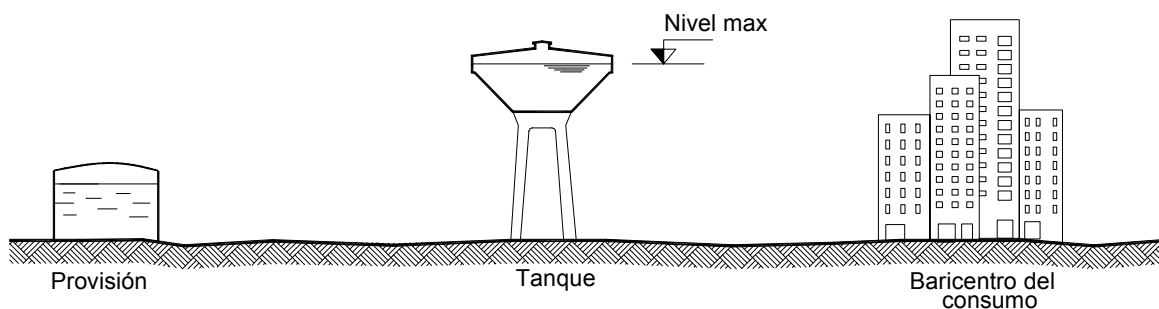


Figura 5. Ubicación de tanques – tanque distribuidor

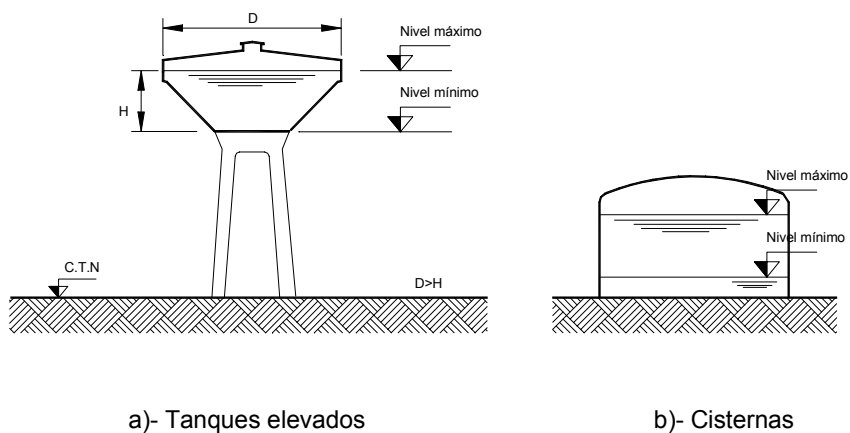
- Más allá del baricentro de consumo. (ver **Figura 6**), usualmente denominado tanque de cola.



Figura 6. Ubicación de tanques – tanque de cola

En función de la relación diámetro – Altura

- **Tanques y/o cisternas.** Cuando el diámetro o largo/ancho es mayor que la variación de altura entre los niveles máximo y mínimo (**Figura 7**).



a)- Tanques elevados

b)- Cisternas

Figura 7. Tanques y/o cisternas

- **Columnas reguladoras o “stand pipes”.** Cuando la altura es mayor que el diámetro (Figura 8).

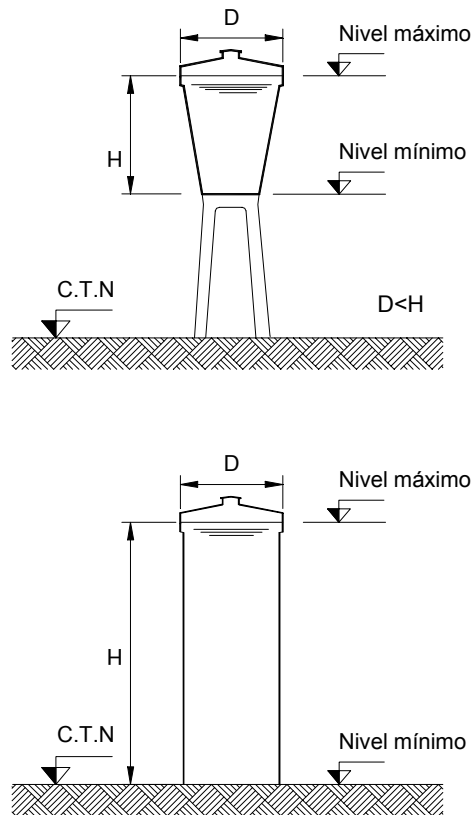


Figura 8. Columnas reguladoras

Excepto para emergencias, el volumen de agua contenido en la parte inferior de las columnas reguladoras no está disponible a los fines operacionales a causa de que las variaciones de presión esencialmente adoptadas en el diseño de la red de distribución, del orden de 2 a 4 metros, no lo permite.

En consecuencia, la parte inferior de las columnas reguladoras se utiliza como soporte de la estructura superior que oficia de almacenamiento y su adopción se hace viable cuando el costo del fuste de un tanque elevado equivalente requiere una mayor inversión inicial.

Al respecto en Handbook of Applied Hydraulics Davis - Sorenson, III edición, 1970, Mc Grow Hill, USA se desarrolla el tema.

Por la función que cumplen

Las cisternas pueden cumplir la función de almacenamiento y además suministrar presión a la red de distribución (ver **Figura 9**) o cumplir solamente la función de almacenamiento. En este caso la presión necesaria a suministrar a la red puede ser suministrada por un tanque elevado (ver **Figura 10**), por bombeo directo a la red o por un tanque hidroneumático.

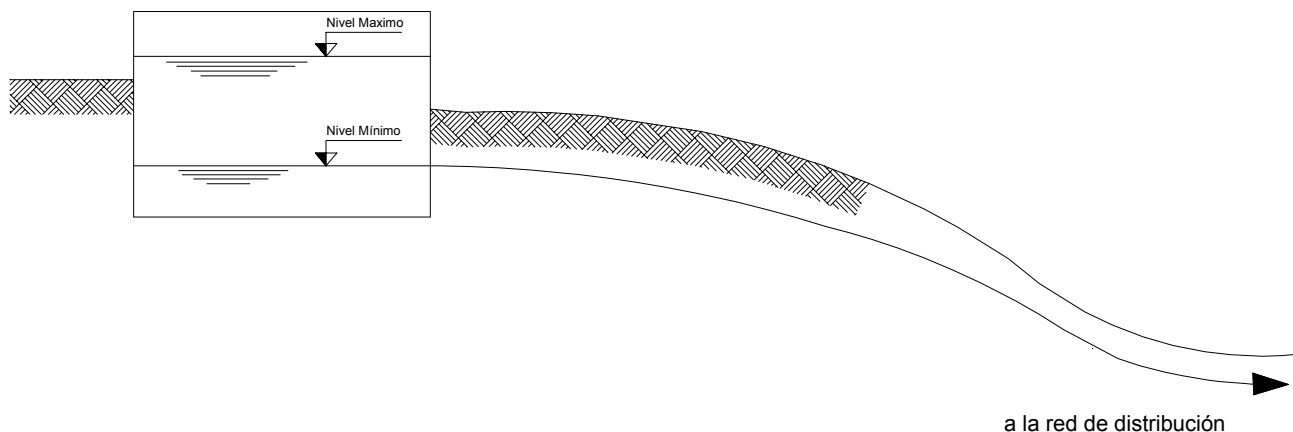


Figura 9. Cisterna de almacenamiento a cota suficiente para entregar presión a la red

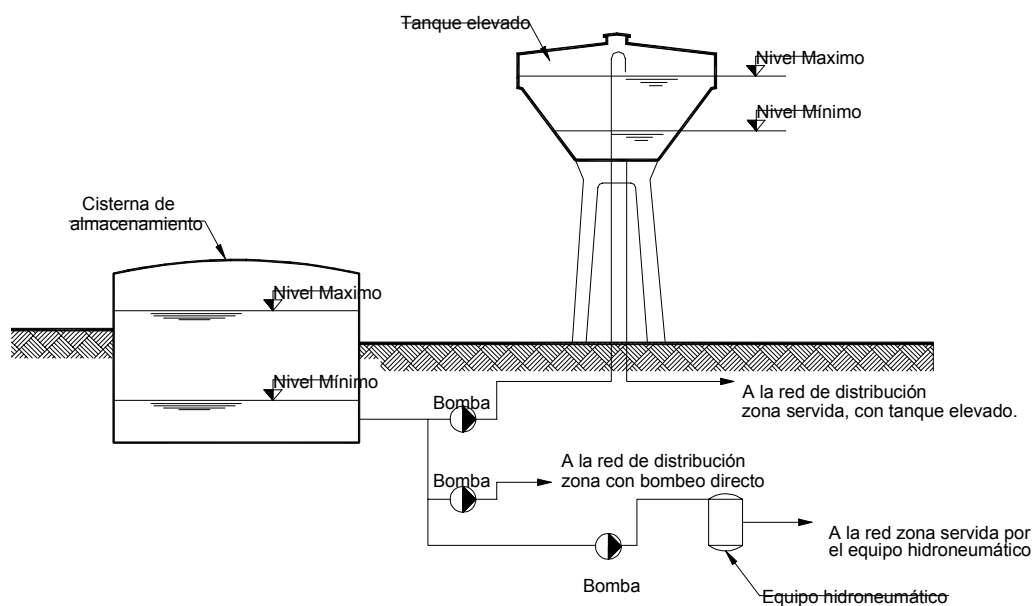


Figura 10. Cisterna solo de almacenamiento. Presión a la red suministrada por tanque elevado, bombeo directo o equipo hidroneumático

2.3. CAPACIDAD DE LOS ALMACENAMIENTOS

Como se ha expresado, la capacidad total de almacenamiento será la suma de los volúmenes correspondientes a:

- Necesidades operacionales o compensadoras.
- Combate de incendio.
- Emergencias ante fallas del servicio.

2.3.1. *Determinación del Volumen Operacional*

El volumen necesario a los fines operacionales o compensatorios, que surge de adoptar para la o las fuentes de provisión, tomas, aducciones, planta de tratamiento, estaciones elevadoras e impulsiones como consigna de diseño, el caudal del día de máximo consumo anual al horizonte de proyecto (Q_D) lleva, a fin de satisfacer los requerimientos para la hora pico máxima, a que la red de distribución sea dimensionada con el caudal máximo horario del día de máximo consumo anual (Q_E) correspondiente al fin del período de diseño.

Surge así la necesidad de contar con una masa compensatoria diaria de dichas diferencias que se materializa en el volumen operacional.

2.3.1.1. **Método Basado en la Curva de Consumo por Aplicación del Diagrama de Masas (según W. Rippl)**

Para su aplicación se deberá disponer de las mediciones de consumo necesarias para poder determinar sus valores horarios, mediciones que deben haber sido realizadas con anterioridad, con la precisión necesaria a los fines propuestos y en la suficiente cantidad para eliminar los errores sistemáticos y aleatorios (por aplicación de técnicas estadísticas).

De no contarse con ellas se puede considerar los valores horarios parciales y sus acumulados, curva de consumo, de alguna localidad próxima con características de consumo (uso residencial, comercial, industrial y público) similares a la localidad objeto del análisis.

Asimismo y de no disponer tampoco de curvas de consumo de localidades similares y próximas, el recurso consiste en adoptar valores “tipo” de consumo.

En la **Tabla 1** se observan valores que podrían adoptarse para localidades de relativa magnitud (del orden de 10.000 habitantes o menos) donde se puede apreciar dos picos de consumo, a media mañana y en las últimas horas de la tarde. A medida que se analiza el consumo de ciudades de mayor población, se verifica una mayor uniformidad en los consumos parciales.

Hora	% Parcial	% Acumulado
1	1.6	1.6
2	1.6	3.2
3	1.6	4.8
4	2.2	7.0
5	2.5	9.5
6	3.5	13.0
7	4.5	17.5
8	6.0	23.5
9	6.25	29.75
10	6.20	35.95
11	6.10	42.05
12	5.50	47.55
13	4.50	52.05
14	4.20	56.25
15	4.00	60.25
16	3.90	54.15
17	4.00	60.25
18	5.50	73.5
19	6.15	79.80
20	6.00	85.80
21	5.00	90.80
22	4.00	94.80
23	3.00	97.80
24	2.20	100.00

Tabla 1. Valores parciales y acumulados del consumo diario

En la **Figura 11** se puede observar en un diagrama de barras los consumos parciales expresados como porcentajes del total diario.

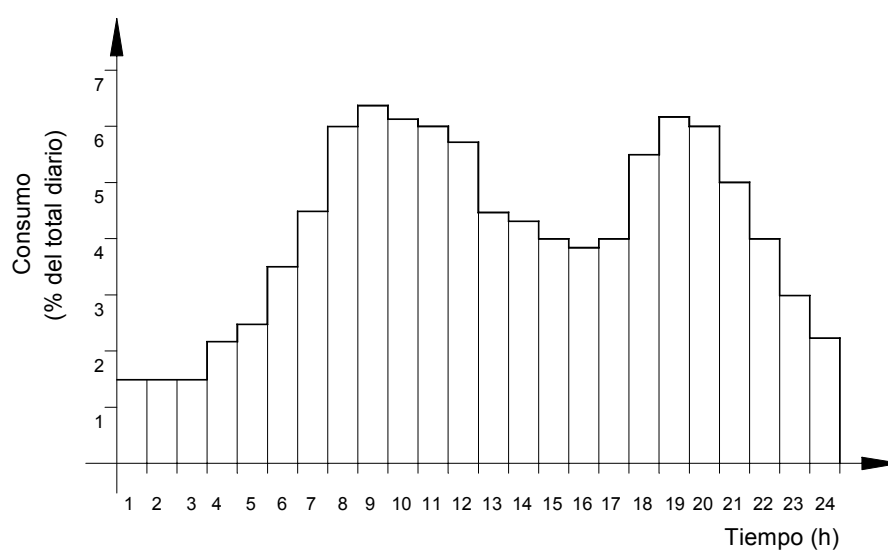


Figura 11. Consumos horarios como porciento del total diario

A continuación se deberá representar en un diagrama de ejes cartesianos empleando como abscisas el tiempo y en ordenadas, los porcentajes acumulados para obtener así la curva de consumos acumulados como se observa en la **Figura 12**.

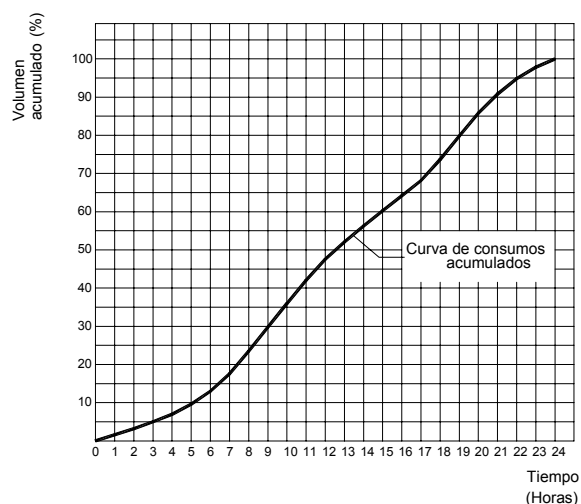


Figura 12. Curva de consumo diario acumulado

En caso de disponer del hidrograma que muestre los consumos instantáneos registrados a lo largo de un día, la representación de los caudales acumulados, se puede trazar integrando gráficamente dicha curva.

Horas	Poblaciones pequeñas	Ciudad de México
0 – 1	45	61
1 – 2	45	62
2 – 3	45	60
3 – 4	45	57
4 – 5	45	57
5 – 6	60	56
6 – 7	90	78
7 – 8	135	138
8 – 9	150	152
9 – 10	150	152
10 – 11	150	141
11 – 12	140	138
12 – 13	120	138
13 – 14	140	138
14 – 15	140	138
15 – 16	130	141
16 – 17	130	114
17 – 18	120	106
18 – 19	100	102
19 – 20	100	91
20 – 21	90	79
21 – 22	90	73
22 – 23	80	71
23 – 24	60	57

Tabla 2. Ley de demandas horarias - variaciones del consumo, expresadas como porcentajes horarios del gasto máximo diario

A simple título informativo, a fin de que el proyectista cuente con valores de referencia, se acompaña en la **Tabla 2** la ley de demanda que representa el consumo de agua en poblaciones de la República Mexicana, expresada como porcentajes horarios del gasto máximo diario, que fuera determinada estadísticamente por el Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos S.A.

Suministro constante durante las 24 horas

Trabajando con el gráfico de la **Figura 12**, para graficar un suministro constante durante las 24 horas del día, se une el origen de los ejes con el punto correspondiente a 100% del volumen acumulado que corresponde a 24 horas.

En cualquier abscisa la diferencia de ordenadas entre la curva de consumos acumulados y la línea recta que grafica el suministro constante durante 24 horas representa en su escala el volumen de agua en el almacenamiento (en exceso los segmentos superiores y en defecto los segmentos inferiores en relación a la curva de consumos acumulados). Para determinar el volumen de almacenamiento operacional (mínimo necesario para el funcionamiento normal del sistema) se deben trazar las tangentes exteriores a la curva de consumos acumulados. La distancia entre estas tangentes determina el máximo segmento vertical que en consecuencia representa el volumen operacional necesario en porcentaje del total diario.

Al respecto de este método gráfico se puede consultar la referencia bibliográfica "Abastecimiento de Agua Potable a Comunidades Rurales", Publicación n° 7, UBA.

Para determinar el volumen real en m^3 , dicho valor deberá ser multiplicado por el caudal máximo diario del horizonte de diseño expresado en $m^3/día$.

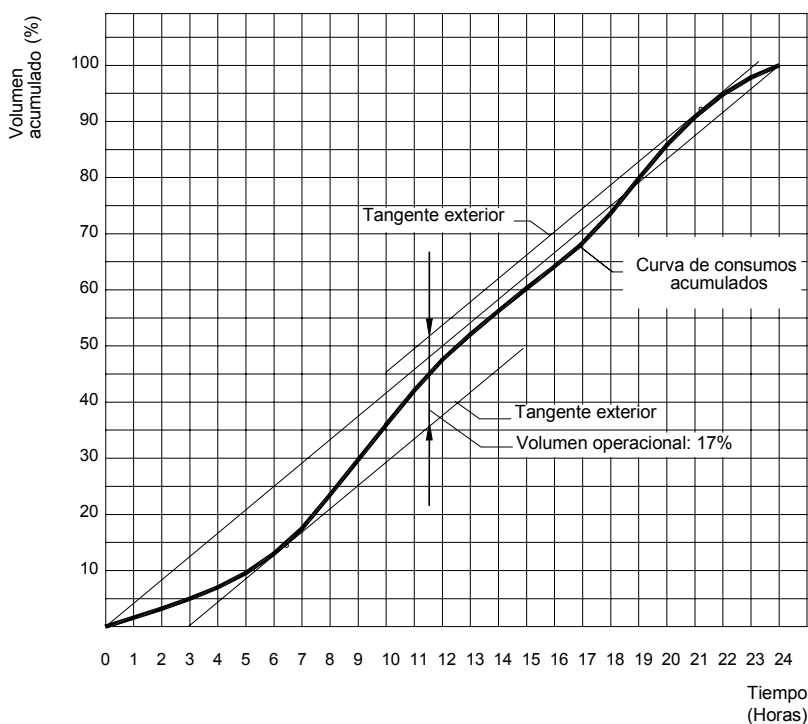


Figura 13. Volumen operacional a suministro constante

$$V.O. [m^3/día] = (V \% / 100) \cdot Q_{Dn} \quad (1)$$

donde

V. O. = volumen operacional $[m^3/día]$.

V % = volumen operacional relativo [%].

Q_{Dn} = caudal máximo diario del año n (año de diseño de las instalaciones) $[m^3/día]$.

En la **Figura 13** se observa lo descrito que para la curva de consumos acumulada considerada corresponde a un volumen operacional del 17% del caudal máximo diario futuro.

Suministro durante un período menor a 24 horas

Se puede optar por suministro continuo o discontinuo.

Como se observa en la **Figura 14** para un suministro continuo, adoptando en el caso que nos ocupa 12 horas, el volumen operacional resulta el 40% del caudal máximo diario futuro (almacenamiento parcial A + almacenamiento parcial B).

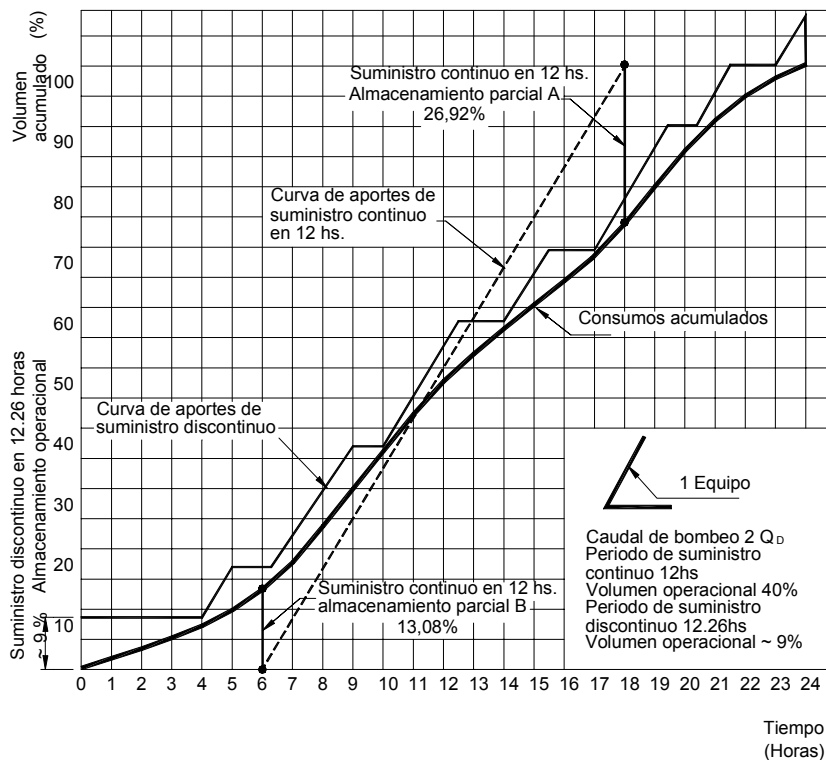


Figura 14. Volumen operacional con suministro menor a 24 hs

De considerar suministro discontinuo y de similar duración, 12,26 horas, el volumen se reduce en el ejemplo al 9% del caudal máximo diario futuro como resultado de que la curva de aportes envuelve mucho mejor a la de consumos.

Los períodos de suministro adoptados son:

Horario	Total de horas
4:00 – 5:00	1,00
6:30 – 9:00	2,50
10:00 – 12:30	2,50
14:00 – 15:30	1,50
17:00 – 19:30	2,50
20:30 – 21:46	2,26
23:00 – 24:00	1,00
Total en 24:00 horas	12:26

Fuente: elaboración propia

Tabla 3. Horario de operación

Asimismo, de haber adoptado un suministro menor a 24 horas, en nuestro caso 16 horas, y suministro a caudal variable se observa en la **Figura 15** que el volumen operacional también es el 9% del caudal máximo diario futuro pero a costa de operar con 2 (dos) equipos de suministro de manera no uniforme.

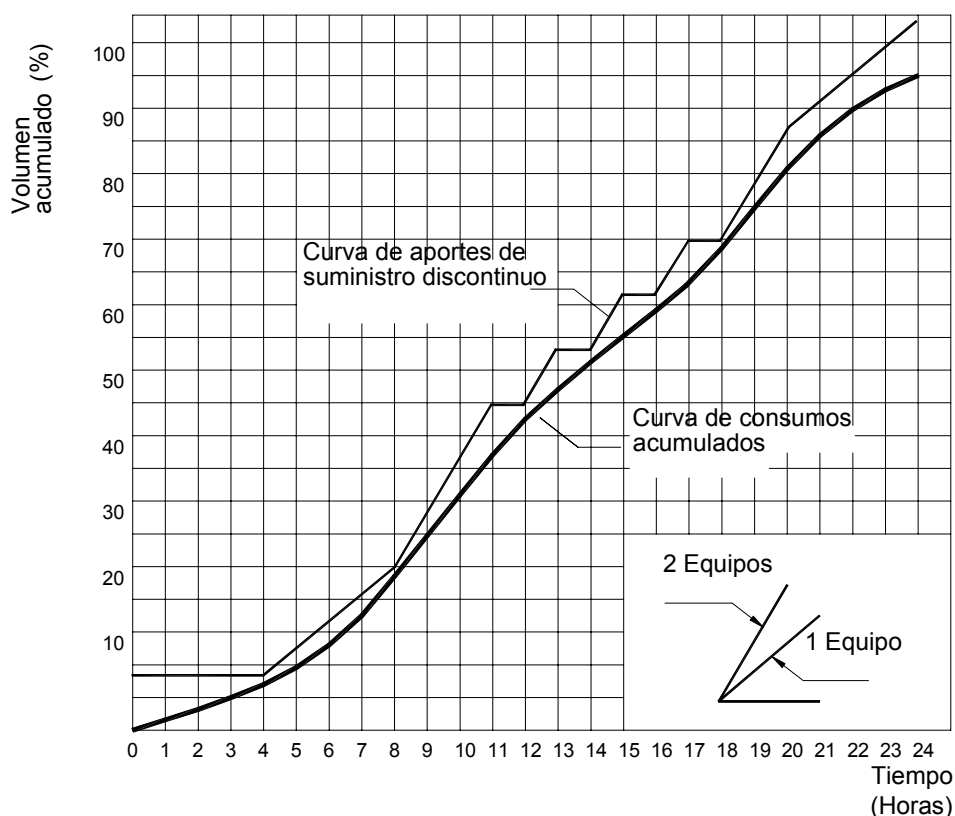


Figura 15. Volumen operacional con suministro menor a 24 hs y caudal variable

Los períodos de suministro son:

Horario	Equipos	Total de horas
4:00 – 8:00	1	4,00
8:00 – 11:00	2	3,00
12:00 – 13:00	2	1,00
14:00 – 15:00	2	1,00
16:00 – 17:00	2	1,00
18:00 – 20:30	2	2,50
20:30 – 24:00	1	3,50
Total en 24 horas		16:00

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Horario de operación

2.3.1.2. Método Basado en Asimilar la Curva de Consumo a una Sinusoide

Si se admite que la curva de consumos reales puede ser asimilada por aproximación a una senoide, lo que es una situación conservadora, se tendrá, como se observa en la **Figura 16**, que:

$$Q \left[\frac{m^3}{h} \right] = A \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi}{12} \cdot t \right) + Q_{Dn} / 24 \quad (2)$$

$$A = (\alpha_{2n} - 1) \cdot Q_{Dn} / 24 \quad (3)$$

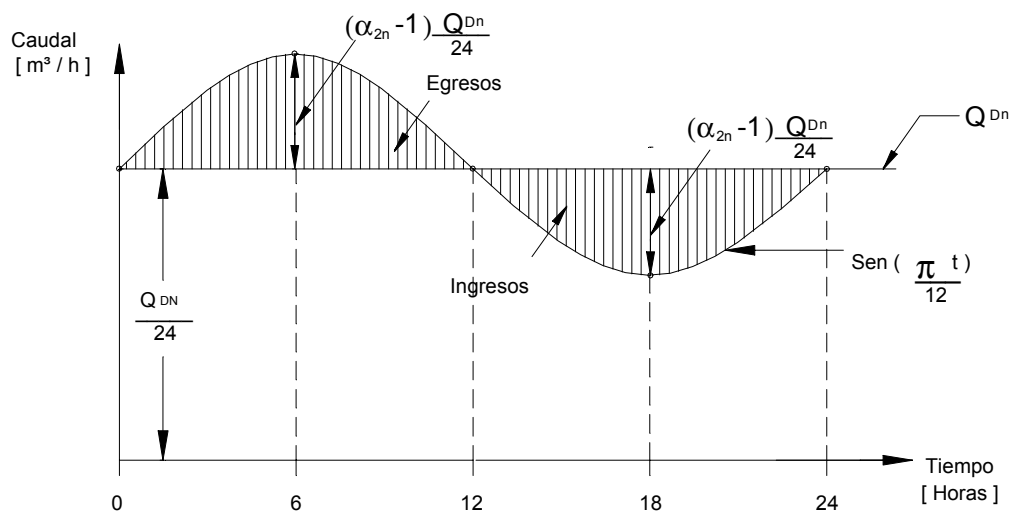


Figura 16. Curva de consumos sinusoidal

Y finalmente:

$$Q \left[\frac{m^3}{h} \right] = (\alpha_{2n} - 1) \cdot \frac{Q_{Dn}}{24} \cdot \text{sen} \left(\frac{\pi \cdot t}{12} \right) + \frac{Q_{Dn}}{24} \quad (4)$$

donde

Q = caudal correspondiente al tiempo t [m^3/h]

α_{2n} = coeficiente para la hora de máximo consumo en el día de máximo consumo anual

$$(\alpha_{2n} = \frac{Q_E}{Q_D})$$

Q_{Dn} = caudal máximo diario anual al año n horizonte de proyecto [$m^3/día$]

t = tiempo [h]

Las áreas sombreadas en la **Figura 16** representan respectivamente el exceso (área inferior) y el defecto (área superior) en relación al caudal medio diario del día de máximo consumo.

Por lo tanto el volumen de almacenamiento operacional corresponderá a la integral de cualquiera de dichas superficies.

$$V \cdot O \cdot [m^3] = \int_0^{12} Q \cdot dt - (12 \cdot Q_{Dn} / 24) \quad (5)$$

que puede expresarse por

$$V \cdot O \cdot [m^3] = \left(\frac{\alpha_{2n} - 1}{\pi} \right) \cdot Q_{Dn} = V\% / 100 \cdot Q_{Dn} \quad (6)$$

En la **Tabla 5** se observan los valores del V.O. (volumen operacional) en función de α_{2n} .

Coeficiente α_{2n}	V.O. [m^3]
1,3	0,10 Q_{Dn}
1,4	0,13 Q_{Dn}
1,5	0,16 Q_{Dn}
1,6	0,19 Q_{Dn}
1,7	0,22 Q_{Dn}
1,8	0,25 Q_{Dn}
1,9	0,29 Q_{Dn}
2,0	0,32 Q_{Dn}

Fuente: elaboración propia

Tabla 5. Valores del volumen operacional en función del coeficiente α_2 (máximo horario del día de máximo consumo anual)

2.3.2. Volumen Para Incendio

El volumen de reserva necesario para combatir incendios debe ser acordado en cada caso con la compañía de bomberos a cargo del servicio en la localidad.

Su determinación dependerá del tipo de viviendas y construcciones en general, de los equipos que disponga la compañía (en particular la existencia de camiones, tanques), de las instalaciones internas en las viviendas (en particular los tanques domiciliarios) y de los equipamientos contra incendios en los edificios.

Se destaca por otra parte que diversos entes han normatizado los volúmenes requeridos para el combate de incendios.

Entre ellos la National Board of Fire Underwriters (NBFU) o Consejo Nacional de Aseguradoras contra Incendios de los Estados Unidos donde predominan viviendas de madera y de materiales combustibles, ha impuesto valores fruto de su experiencia.

El caudal, para localidades comprendidas entre 1.000 y 200.000 habitantes se halla definido por:

$$G = 5558 \cdot \sqrt{P} \cdot (1 - 0,01 \cdot \sqrt{P}) \quad (7)$$

donde

G = caudal en [m³/día].

P = población futura en miles.

Es de hacer notar que una tercera parte del valor G tiene en cuenta las pérdidas probables por conexiones en mal estado o rotas, hidrantes fuera de servicio o por causas variadas pero relacionadas con un incendio importante en un distrito de alto valor.

En la **Tabla 6** se observan los valores y la duración adoptada, que determina el volumen necesario.

Población habitantes	Caudal m ³ /día	Duración horas	Volumen m ³
1.000	5.503	4	917
2.000	7.750	5	1.615
2.500	8.650	6	2.162
3.000	9.461	7	2.759
4.000	10.894	8	3.631
5.000	12.150	9	4.556
8.000	15.276	10	6.365
9.000	16.174	10	6.739
10.000	17.021	10	7.092

Notas: 1) Para poblaciones mayores de 10.000 habitantes se considera una duración de 10 horas
2) Para poblaciones mayores de 200.000 habitantes se adopta para el caudal 46 m³/min más 7,5 a 30 m³/min originado en un posible segundo incendio

Fuente: elaboración propia

Tabla 6. Volumen para incendio en función de la población futura

También cabe observar que la NBFU no ha fijado arbitrariamente los valores normatizados sino que se ha basado en treinta y dos (32) conceptos los que se enumeran a continuación.

- 1). Nombramientos del personal.
- 2). Capacidad del jefe o ejecutivo superior.
- 3). Planos y registros.
- 4). Disposiciones para emergencias.
- 5). Recepción y respuesta a las alarmas contra incendios.
- 6). Suficiencia normal de todo el sistema.
- 7). Confiabilidad de la fuente de abastecimiento.
- 8). Confiabilidad de la capacidad de bombeo.
- 9). Confiabilidad del suministro de energía eléctrica.
- 10). Confiabilidad del suministro de otra clase de energía, distinta de la electricidad.
- 11). Condición, disposición y confiabilidad del equipo de la planta.
- 12). Construcción de la estación de bombeo.
- 13). Protección de la estación de bombeo contra incendios.
- 14). Riesgos en la estación de bombeo.
- 15). Riesgo de explosión en la estación de bombeo.
- 16). Confiabilidad de las líneas principales de abastecimiento, en lo que afecta a su suficiencia.
- 17). Confiabilidad de la instalación de las líneas principales de abastecimiento.
- 18). Sistema vial.
- 19). Confiabilidad de la instalación de los acueductos.
- 20). Distribución local considerada en los distritos de alto valor.
- 21). Líneas de menor diámetro en el sistema de distribución.
- 22). Red no mallada.
- 23). Red de distribución.
- 24). Calidad y condición de la tubería.
- 25). Abastecimiento en zonas distintas de las de alto valor que se consideran.
- 26). Espaciamiento de las válvulas de cierre.
- 27). Inspección y condición de las válvulas de cierre.
- 28). Distribución de los hidrantes en el distrito de alto valor.

29). Distribución de los hidrantes en los distritos residenciales y de otras clases.

30). Inspección y condición de los hidrantes.

31). Diámetro e instalación de los hidrantes.

32). Válvulas en las conexiones de los hidrantes.

Adoptando una dotación de producción de 300 l/hab . día, coeficientes α_1 y α_2 iguales a 1,40 y 1,60 y un volumen compensador de almacenamiento de acuerdo a la **Tabla 5** de 0,19 Q_D , se tiene como se expresa en la **Tabla 7** :

Población habitantes	Volumen incendio (NBFU) m^3	Caudal Q_D $m^3/día$	Volumen operacional (Tabla 5) m^3
1.000	917	420	80
2.000	1.614	840	160
2.500	2.162	1.050	200
3.000	2.759	1.260	239
4.000	3.631	1.680	319
5.000	4.556	2.100	399
8.000	6.365	3.360	638
9.000	6.739	3.780	718
10.000	7.092	4.200	798

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Caudal máximo diario, volumen de incendio y operacional en función de la población

Se observa que la relación volumen incendio a volumen operacional está en un rango aproximado a 10:1, que habla claro sobre su peso relativo en relación al volumen total de almacenamiento.

Otros entes y países proponen volúmenes más acordes en relación a la capacidad de inversión disponible, por lo que se propone arbitrariamente disminuir el coeficiente de la fórmula (7) a 250 con lo que finalmente se tendría:

$$G = 250 \cdot \sqrt{P} \cdot (1 - 0,01\sqrt{P}) \quad (7')$$

y sus valores resultan para idénticos datos

Población habitantes	Volumen operacional m ³	Volumen incendio m ³
1.000	80	41
2.000	160	73
2.500	200	97
3.000	239	124
4.000	319	163
5.000	399	205
8.000	638	286
9.000	718	303
10.000	798	319
15.000	1.197	388
20.000	1.596	445
25.000	1.995	495
30.000	2.394	539
40.000	3.192	617
50.000	3.990	684
60.000	4.788	744
70.000	5.586	799
80.000	6.384	848
90.000	7.182	894
100.000	7.980	938
150.000	11.970	1120
200.000	15.960	1265

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Volumen operacional y de incendio en función de la población

2.3.3. Volumen Para Emergencias

Si en una localidad o en un barrio no existen tanques domiciliarios en las viviendas o edificios puede ser eventualmente conveniente disponer en el almacenamiento de un volumen para emergencias separado del volumen operacional.

Entonces el valor a adoptar dependerá de:

- Interrupción del influente por falla del abastecimiento (fallas del suministro de energía, rotura en conducciones principales, etc.).
- Tiempo requerido para las reparaciones o el mantenimiento correctivo.
- Tiempo requerido para operaciones de mantenimiento preventivo.

Si la puesta fuera de servicio del suministro se reduce al tiempo necesario para las operaciones de mantenimiento preventivo durante las horas de consumo mínimo no se requiere en la práctica de un volumen a tal fin, lo que habla de la necesidad de una eficiente organización y de la programación rigurosa y anticipada de dichos eventos.

En cuanto a disponer de un volumen almacenado para el mantenimiento correctivo (situaciones excepcionales y no predecibles) se plantea nuevamente la relación seguridad versus inversión.

En general se ha considerado en el país que el almacenamiento operativo y/o las reservas domiciliarias lo cubrirán.

En el estado actual del arte de la ingeniería y con relación a la calidad de servicio a brindar e inversiones posibles, prever dos (2) horas de almacenamiento adicional puede ser razonable asumiendo que toda reparación mayor no cubierta por dicho valor escapa a lo económicamente posible.

En cuanto a interrupciones por fallas en el abastecimiento una cuidadosa elaboración del proyecto y precauciones como disponer de dos fuentes de energía independientes serán ineludibles.

Finalmente, el valor de dicho volumen se expresa por:

$$V.E. [m^3/día] = 0,083 \cdot Q_{Dn} \quad (8)$$

Donde

$V.E.$ = volumen para emergencia $[m^3/día]$

Q_{Dn} = caudal máximo diario anual al horizonte de proyecto $[m^3/día]$

0,083 coeficiente = 2/24 (dos horas durante el día)

2.3.4. Volumen Total de Almacenamiento

$$V.T. [m^3] = V.O. + V.I. + V.E. \quad (9)$$

Donde

$V.T.$ = volumen total $[m^3]$.

$V.O.$ = volumen operacional $[m^3]$.

$V.I.$ = volumen para incendio $[m^3]$.

$V.E.$ = volumen para emergencias $[m^3]$.

De adoptarse la expresión (6) en relación al volumen operacional y la expresión (7') para las reservas contra incendio se tendría:

$$V.T. [m^3] = \left(\frac{\alpha_{2n} - 1}{\pi} \right) \cdot Q_{Dn} + 250 \cdot \sqrt{P} \cdot (1 - 0,01 \cdot \sqrt{P}) \cdot t + 0,083 \cdot Q_{Dn} \quad (10)$$

$$V.T. [m^3] = \left[\left(\frac{\alpha_{2n} - 1}{\pi} \right) + 0,083 \right] \cdot Q_{Dn} + 250 \cdot \sqrt{P} \cdot (1 - 0,01 \cdot \sqrt{P}) \cdot t \quad (11)$$

Población habitantes	Volúmenes			
	Operacional	Incendio	Emergencias	Total
1.000	80	41	35	156
2.000	160	73	70	303
2.500	200	97	87	384
3.000	239	124	105	468
4.000	319	163	139	621
5.000	399	205	174	778
8.000	638	286	279	1203
9.000	718	303	314	1335
10.000	798	319	349	1466
15.000	1.197	388	523	2108
20.000	1.596	445	697	2738
25.000	1.995	495	872	3362
30.000	2.394	539	1.046	3979
40.000	3.192	617	1.394	5203
50.000	3.990	684	1.743	6417
60.000	4.788	744	2.092	7624
70.000	5.586	799	2.440	8825
80.000	6.384	848	2.789	10021
90.000	7.182	894	3.137	11213
100.000	7.980	938	3.486	12404
150.000	11.970	1120	5.229	18319
200.000	15.960	1265	6.972	24197

Fuente: elaboración propia

Tabla 9. Volúmenes de almacenamiento basados en una dotación de producción de 300 l/hab . día

2.4. INFLUENCIA DE LA LOCALIZACIÓN EN RELACIÓN AL BARICENTRO DE CARGA

Asumamos para nuestro análisis los siguientes valores correspondientes a una localidad residencial con moderado desarrollo industrial y comercial:

Población futura	50.000 habitantes
Coeficiente α_1 máximo diario anual	1,40
Coeficiente α_2 máximo horario	1,60
Dotación de producción	300 l/hab. día
Longitud de la conducción	5.000 m
Diámetro	500 mm
Coeficiente C de Williams – Hazen	130
Caudal medio diario	15.000 m ³ /día
Caudal máximo diario	21.000 m ³ /día

Caudal máximo horario	1.400 m ³ /h
Presión mínima en la red	15 m.c.a.

2.4.1. Carencia de Almacenamiento

De no establecerse almacenamiento en el sistema bajo análisis, ver **Figura 17**, la estación elevadora debe ser suficiente para vencer las pérdidas de energía en el sistema y mantener una carga hidrostática de 15 m.c.a. en la red, con lo que se tiene:

Caudal m ³ /h	Pendiente hidráulica DN 500 -	Pérdida por conducción L = 5.000 m m	Pérdida total m
Medio diario 625	0,00149	7,45	22,45
Máximo diario 875	0,00278	13,90	28,90
Máximo horario 1400	0,00664	33,20	48,20

Fuente: elaboración propia

Tabla 10. Pérdidas en función del caudal para un diámetro DN 500 y una longitud de 5.000 m

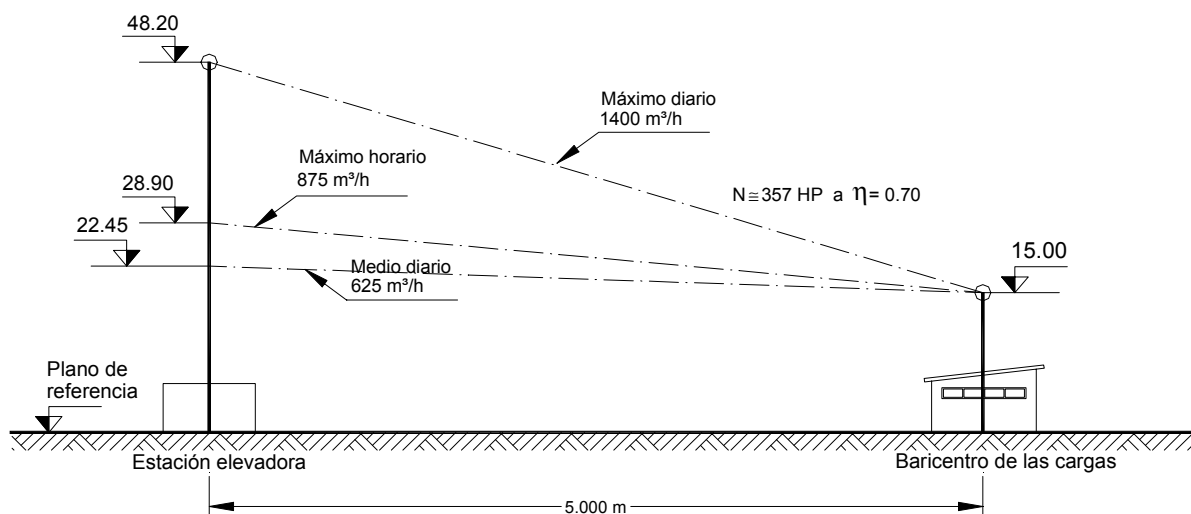


Figura 17. Impulsión al baricentro de cargas

2.4.2. Almacenamiento Antes del Baricentro de Cargas

En este caso y como se observa en la **Figura 18**, el tanque se sitúa a 3.500 m de la estación elevadora y a 1.500 m del baricentro de cargas.

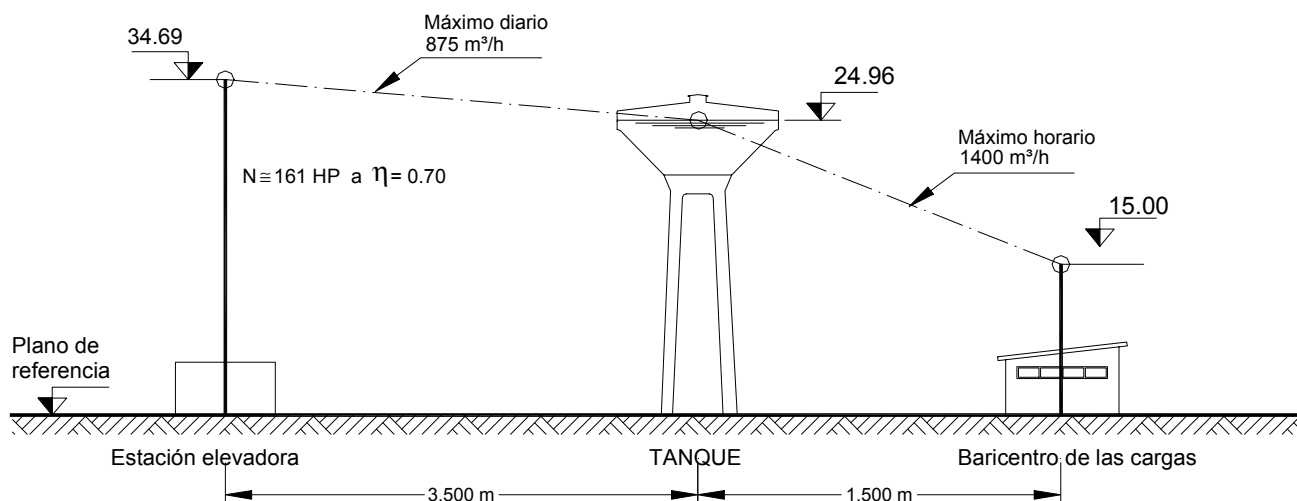


Figura 18. Tanque entre estación elevadora y baricentro de las cargas

El tanque debe estar ubicado de forma tal de suministrar la pérdida de energía en el tramo tanque – baricentro de las cargas más la presión mínima de la red para la hora de máximo consumo.

Caudal m ³ /h	Tramo E.E. Tanque L = 3.500 m		Tramo tanque Baricentro de cargas L = 1.500 m	
	Pendiente DN 500	Pérdida m	Pendiente DN 500	Pérdida m
Medio diario 625	0,00149	5,22	0,00149	2,24
Máximo diario 875	0,00278	9,73		
Máximo horario 1400			0,00664	9,96

Fuente elaboración propia

Tabla 11. Pérdidas de energía en función del caudal

Cota tanque = presión mínima en red + pérdidas tanque - baricentro de consumo al caudal máximo horario L = 1.500 m.

Cota tanque [m] = 15,00 + 9,96 = 24,96.

Altura de elevación bombas = cota tanque + pérdidas de estación elevadora (E.E.) al tanque al caudal máximo diario, L = 3.500 m.

Altura de elevación bombas [m] = 24,96 + 9,73 = 34,69

2.4.3. Almacenamiento Después del Baricentro de las Cargas

Como se observa en la **Figura 19**, la longitud estación elevadora – baricentro de cargas es 5.000 m y el tanque se halla ubicado a 1500 m del baricentro de las cargas.

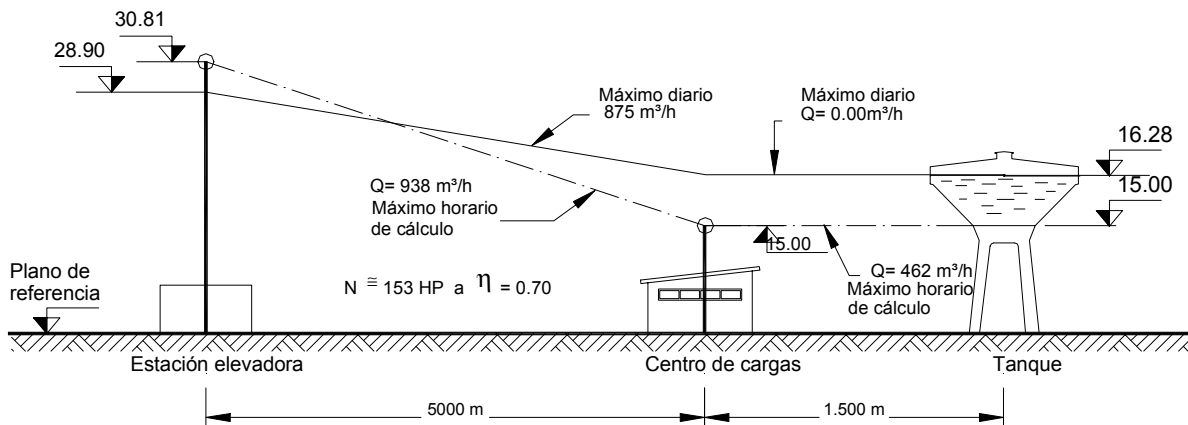


Figura 19. Baricentro de las cargas entre la estación elevadora y el tanque

Esta disposición se denomina usualmente “tanque de cola”. Responde topológicamente al siguiente esquema: Estación Elevadora, Red de Distribución, Conexión al Tanque y finalmente el Tanque (de cola).

Opera fundamentalmente entre dos estados límites:

- 1). La presión en el baricentro de cargas es superior a la mínima adoptada para la red de distribución, mayor que la cota mínima del tanque y menor que la máxima en el mismo, descontadas las pérdidas de energía en los tramos de la red correspondientes / conexión del tanque. Si fuera mayor una válvula actuada cierra el ingreso y evita los desbordes. El agua ingresa al tanque que oficia de almacenamiento.
- 2). La presión en el baricentro de cargas es igual o superior a la mínima adoptada para la red de distribución pero menor que la máxima en el tanque (descontadas las pérdidas ya indicadas). Asimismo si fuera mayor o igual que la mínima en el tanque no egresa agua del mismo. El tanque oficia de compensador entregando agua a la red de distribución.

Las hipótesis a considerar son:

- Las pérdidas de energía baricentro de consumo/tanque, se asimilan a 1500 m de longitud con DN 500 mm.
- Para el día de máximo consumo anual se supone que el tanque no aporta caudal al sistema. El caudal de bombeo corresponde al del día máximo anual.
- Para la hora de máximo consumo en el día de máximo anual se supone que el tanque aporta el 33% de la demanda y el bombeo el 67%.

Caudal m ³ /h	Tramo E.E. Baricentro de consumo L = 5.000 m		Tramo Baricentro de consumo Tanque L = 1.500 m	
	Pendiente -	Pérdida m	Pendiente -	Pérdida m
Medio diario 625	0,00149	7,45	0,00149	2,24
Máximo diario 875	0,00278	13,90		
Máximo horario 1400	0,00664	33,20	0,003320	9,96
0,33 . 1400 = 462			0,00085	1,28
0,67 . 1400 = 938	0,00316	15,81		

Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Cálculo de las pérdidas de carga

- Día de máximo consumo anual:

Altura de elevación de bombas = presión mínima a suministrar en la red + pérdidas E.E. a Baricentro de consumo al caudal máximo diario, L = 5.000 m.

Altura de elevación bombas [m] = 15,00 + 13,90 = 28,90.

- Hora de máximo consumo:

Cota tanque = presión mínima en red + pérdida tanque al baricentro de consumo con un caudal 0,33 del máximo horario, L = 1.500 m.

Cota tanque [m] = 15,00 + 1,28 = 16,28.

Altura de elevación bombas = presión mínima en red + pérdida E.E. al baricentro de consumo al caudal 0,67 del máximo horario, L = 5.000 m.

Altura de elevación bombas [m] = 15,00 + 15,81 = 30,81.

2.4.4. Conclusiones

Del análisis efectuado se obtienen las siguientes conclusiones:

- El abastecimiento sin almacenamiento implica instalar una potencia de 357 HP contra 161/153 HP considerando almacenamiento, o sea más del doble.
- La capacidad de las bombas sería 875 m³/h a 34,69 m y 938 m³/h a 30,81 m para el tanque antes o después del baricentro de las cargas, similar en ambos casos.
- La demanda sobre la fuente es similar.
- Comparando el almacenamiento situado entre la fuente y el centro de cargas con el situado más allá del baricentro de las cargas se deduce del ejemplo que es necesario un aumento de la altura de tanque para el caso primero (24,96 m) en relación al segundo (16,28 m).

- Las presiones en la red son más uniformes para el caso almacenamiento más allá del baricentro de las cargas.
- Para los casos sin almacenamiento y tanque más allá del baricentro de las cargas los equipos de bombeo no trabajarán a caudal constante, lo que implica una solución no óptima desde el punto de vista del rendimiento y su correlato: aumento del consumo de energía.

Esta situación está originada en que la curva caudales/altura de elevación de la bomba a un número de revoluciones constantes se mantiene invariable y el punto de funcionamiento (pareja caudal – altura manométrica de elevación) se determina por la intersección con la curva de la instalación, la que variará en función de los requerimientos del servicio. Lo descripto trae aparejado que los rendimientos que le corresponden no serán el máximo o el óptimo seleccionado en el diseño y como se indica, produce un aumento del consumo de energía.

La manera que el equipo opere en las proximidades del rendimiento máximo puede lograrse con la adopción de motores de velocidad variable comandados por una unidad inteligente que los regule en función de los requerimientos de caudal y/o presiones, pero a costo de una mayor inversión inicial, la que deberá ser convenientemente evaluada.

- La vida útil disminuye y el mantenimiento aumenta en equipos electrobombas que no trabajan a caudal constante.
- Un régimen de bombeo variable produce cambios en las velocidades de conducción, variaciones que originan sobrepresiones y depresiones en la impulsión y en la red de distribución debidas al fenómeno denominado golpe de ariete. Es por lo tanto aconsejable verificar dichos estados transitorios mediante un modelo matemático al efecto.
- Un aspecto adicional a considerar lo constituye la necesidad de asegurar la remoción del agua en los tanques y garantizar así el mantenimiento de la calidad del agua almacenada. En el caso del tanque ubicado antes del baricentro de carga el agua puede entrar por la parte superior y salir por la inferior. En el caso del tanque de cola debe colocarse algún dispositivo hidráulico que evite una larga permanencia del agua en la zona superior.
- Queda por lo tanto a cargo del proyectista la adopción de una u otra solución de acuerdo a su experiencia, adjuntando desde ya las debidas justificaciones técnico – económicas.

2.5. FORMAS Y DIMENSIONES MÁS ECONÓMICAS

Fijada la capacidad de almacenamiento se pueden adoptar diversas formas para las reservas y tanques elevados y dentro de ellas, las que minimicen su costo.

Para las reservas, la forma con planta circular tiene ventajas en relación a la rectangular dado que sus paredes estarán principalmente dimensionadas a la tracción (presión interna del agua) y a la compresión por carga externa (empuje del terreno), dado que en las de planta rectangular los momentos flexores son dominantes para el dimensionamiento.

En general también puede decirse que la relación ancho largo $\frac{3}{4}$ tiende a minimizar los volúmenes de estructuras para planta rectangular.

En cuanto a los tanques elevados también la planta circular, por las razones antedichas, sería la adopción lógica pero, razones estéticas y de arquitectura, pueden priorizar otras soluciones.

Los principales aspectos a tener en cuenta son:

- Hay necesidad de disponer de los correspondientes estudios de suelos y de geotecnia previamente a fin de contar con la información necesaria para decidir su ubicación, forma y tipo, eliminando mayores costos innecesarios y evitar demoras en los cronogramas de obra supuestos por las postergaciones ocasionadas.
- El costo dependerá del tipo de suelo y su tensión admisible, la forma, el tipo y material adoptado.
- Para las reservas una menor altura aumenta la necesidad del área requerida.
- Suelos con dificultades para su excavación, caso de rocas, presencia de capa freática, etc., conducen a mayor altura en las reservas, su ubicación semienterrada o sobre la cota de terreno natural.
- Las consideraciones estéticas y de arquitectura paisajística pueden conducir a mayores costos.

Consideraciones estructurales

En el cálculo de las reservas enteradas y semienterradas el diseño estructural debe prever las siguientes condiciones de carga:

- Con agua y sin empuje a tierra.
- Con empuje de tierra y vacía.
- Con agua y empuje de tierra.
- Vacío considerando la subpresión originada por la capa freática.

2.6. ELEMENTOS COMPLEMENTARIOS DE LOS ALMACENAMIENTOS EN RELACIÓN A SU DISEÑO

Toda reserva debe poseer tuberías de entrada, salida, desborde y limpieza. En algunos casos coinciden la tubería de entrada y salida (tanques de cola).

2.6.1. Cañería de Entrada en Tanques Elevados Ubicados Antes del Baricentro de Consumo

La cañería de entrada debe conectarse en la parte superior del tanque para evitar la existencia de zonas muertas.

Si la cota disponible inicial en la conducción al almacenamiento es superior a la cota operacional del mismo, desde el punto de vista de la Hidráulica sólo existe una solución (problema unívoco) en cuanto a la determinación de la variable (el diámetro) de la cañería de entrada dados la energía disponible (debido a la diferencia de cotas), el caudal, material de la tubería (su rugosidad) y la temperatura del agua (viscosidad) para el cálculo.

Si fuera el caso opuesto, una cota inicial menor que la de entrega, el planteo teórico admite infinitas soluciones (parejas bomba – diámetro de la tubería) o una cantidad limitada en la práctica.

Se está en el caso de la determinación del diámetro más económico. Se recomienda (en este caso) el empleo del Método del Valor Presente, tomando sólo en cuenta los costos (inversiones y energía) dado que los beneficios son comunes a todas las soluciones y adoptando como precios los denominados “de cuenta” o “sombra” (shadow prices) dado que nos estamos refiriendo a la rentabilidad nacional en esta selección.

Si la determinación del diámetro económico se refiriera a una inversión privada se deben utilizar los precios de mercado o corrientes.

2.6.2. Cañería de Salida en Tanques Ubicados Antes del Baricentro de Consumo

Dado que la cota en el almacenamiento y en consecuencia la presión disponible es un valor determinante en el cálculo de la red de distribución se considera que forma parte de la misma como primera cañería de su cálculo.

La tubería de salida puede estar ubicada en un costado o en el fondo de la reserva, en ambos casos debe colocarse por lo menos a 10 cm del fondo. De este modo queda un volumen “muerto” en el fondo, que no puede extraerse por la tubería de salida y que permite acumular las partículas que pueden haber sedimentado para su posterior retiro por la cañería de limpieza.

2.6.3. Cañerías de Entrada y Salida de Tanques de Cola

Debe ubicarse también en el fondo de la reserva. Sin embargo es conveniente una disposición similar a la indicada en la **Figura 20** para facilitar la no formación de zonas muertas. La válvula de retención debe impedir la entrada del agua cuando aumenta la presión y facilitar su salida cuando disminuye.

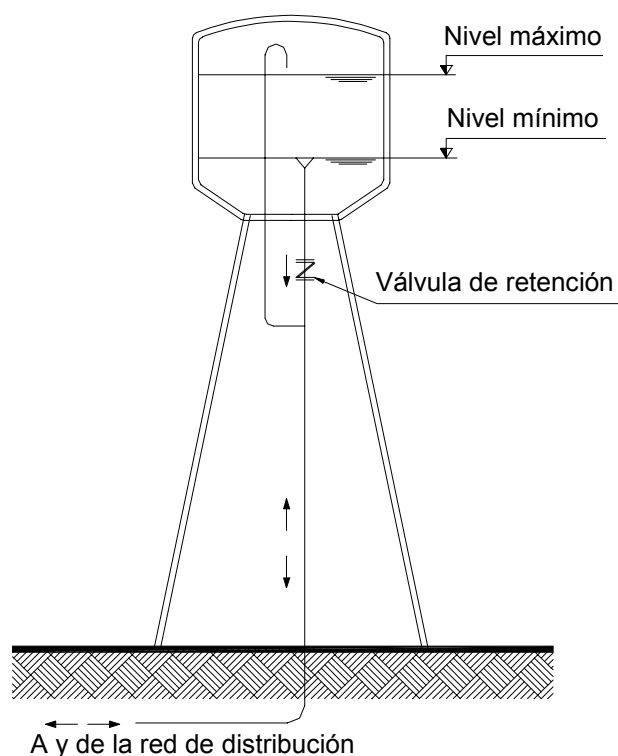


Figura 20. Cañerías de entrada y salida en tanques de cola

2.6.4. Cañería de Desborde

Su función es evacuar el caudal máximo de bombeo o de transporte de la línea de conducción ante fallas del sistema automático o manual de parada de bombas o cierre de la conducción. Se deberá dimensionar con dicho caudal y es un problema unívoco como el indicado en 2.6.1 con energía disponible igual a la cota de almacenamiento menos la cota de entrega.

Los tubos de desborde, ver **Figura 21**, deben instalarse y protegerse de manera que impidan la entrada de aves, insectos roedores, etc. y polvo o aguas exteriores que puedan contaminar el líquido almacenado.

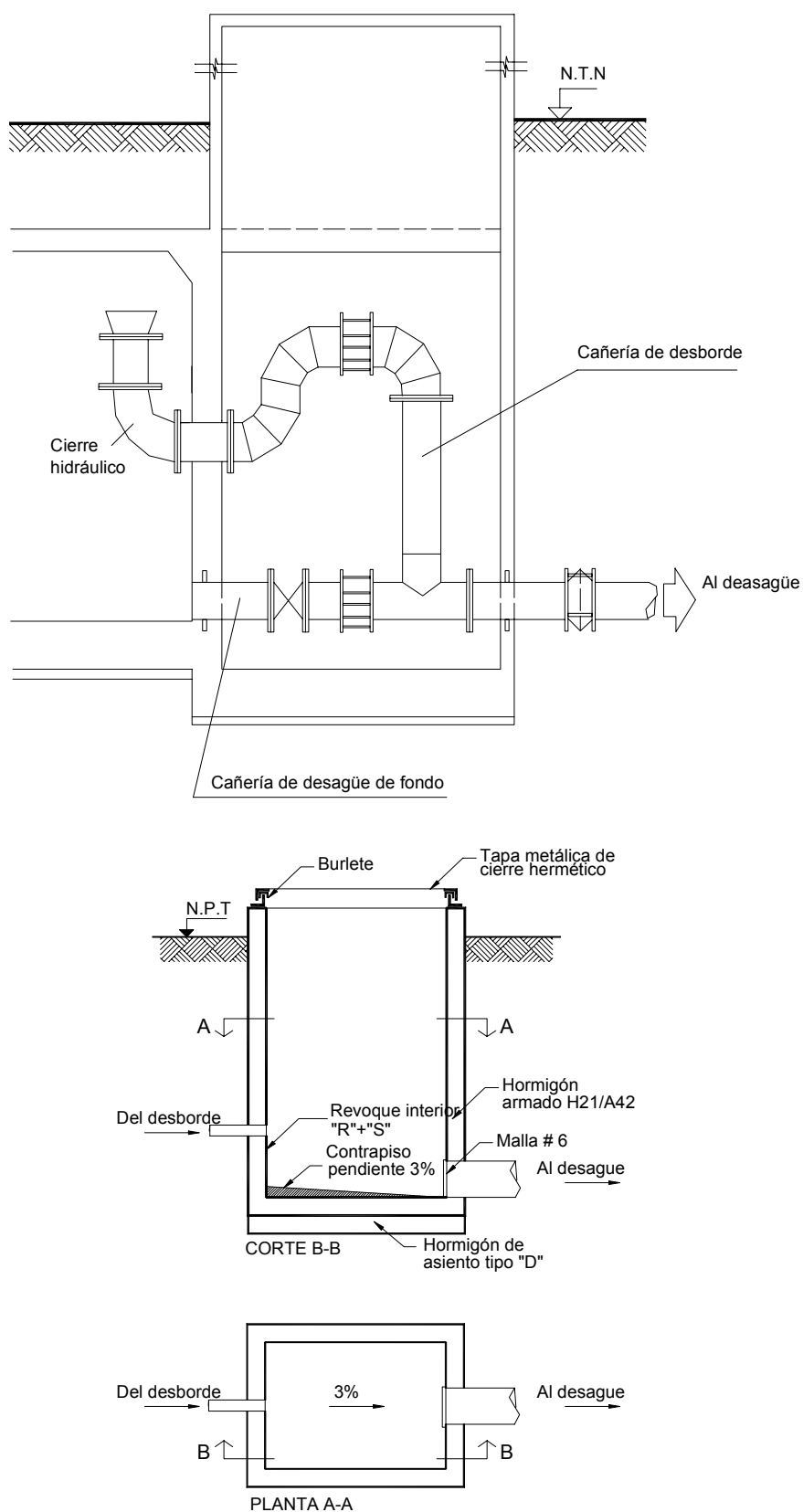


Figura 21. Desbordes

2.6.5. Cañería de Limpieza

Dado que la limpieza del almacenamiento para el caso de un tanque sin compartimentar presupone la interrupción del servicio de provisión a la red donde las necesidades serán cubiertas por las reservas domiciliarias y que en el caso de cisternas o tanques compartimentados no es conveniente ni seguro un período superior a 6 horas fuera de servicio, la tubería de limpieza deberá evacuar el volumen total en un período comprendido entre 2 y 4 horas.

El cálculo corresponde a un escurrimiento impermanente con caudal afluente cero.

- Recipiente prismático de sección constante

$$T [seg] = \frac{2 \cdot A \cdot h}{\mu \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}} \quad (12)$$

- Recipiente cuneiforme de sección transversal rectangular, paraboloidales, casquetes esféricos

$$T = \int_{h1}^{h2} \frac{A}{\mu \cdot w \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}} dh \quad (13)$$

$$A = f(h) \quad (14)$$

que para paraboloide de sección circular superior

$$A_0 = \pi r_0^2 \quad (15)$$

$$T [seg] = \frac{2}{3} \cdot \frac{A_0}{\mu \cdot w} \frac{h}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}} \quad (16)$$

y para depósitos semiesféricos:

$$T [seg] = \frac{14}{15} \cdot \frac{\pi \cdot r^{5/2}}{\mu \cdot w \sqrt{2 \cdot g}} \quad (17)$$

donde

T = tiempo de desagüe [s].

A = superficie libre del líquido [m²].

h = carga sobre el orificio de salida [m].

μ = coeficiente de gasto.

w = sección del orificio de salida [m²].

g = aceleración de la gravedad [m/s²].

La tubería de desagüe colocada en el fondo de las cisternas no debe descargar directamente a un sistema de alcantarillado cloacal o pluvial, sino que debe descargar libremente en una cámara abierta desde una altura no menor de dos diámetros sobre el coronamiento de la cámara, para evitar la posibilidad de una interconexión cruzada.

En todos los casos el fondo de las reservas debe tener pendiente hacia donde se encuentra la cañería de limpieza, a fin de facilitar el escurrimiento del líquido y el arrastre de los materiales sedimentados.

En las cisternas de grandes dimensiones se deben colocar hidrantes con tomas para mangueras provistas con boquillas para producir chorros de agua que mejoren y aceleren la limpieza del piso y las paredes de estas reservas.

2.6.6. By Pass

Siendo su función mantener el servicio al efectuar limpiezas o mantenimiento preventivo su diámetro debe corresponder al mayor entre la tubería de entrada o salida a fin de minimizar las pérdidas de energía.

2.6.7. Ventilaciones

Las reservas tanto a nivel del terreno como elevadas deben tener ventilaciones que permitan el libre ingreso o egreso del aire en correspondencia con el vaciado o llenado de la misma.

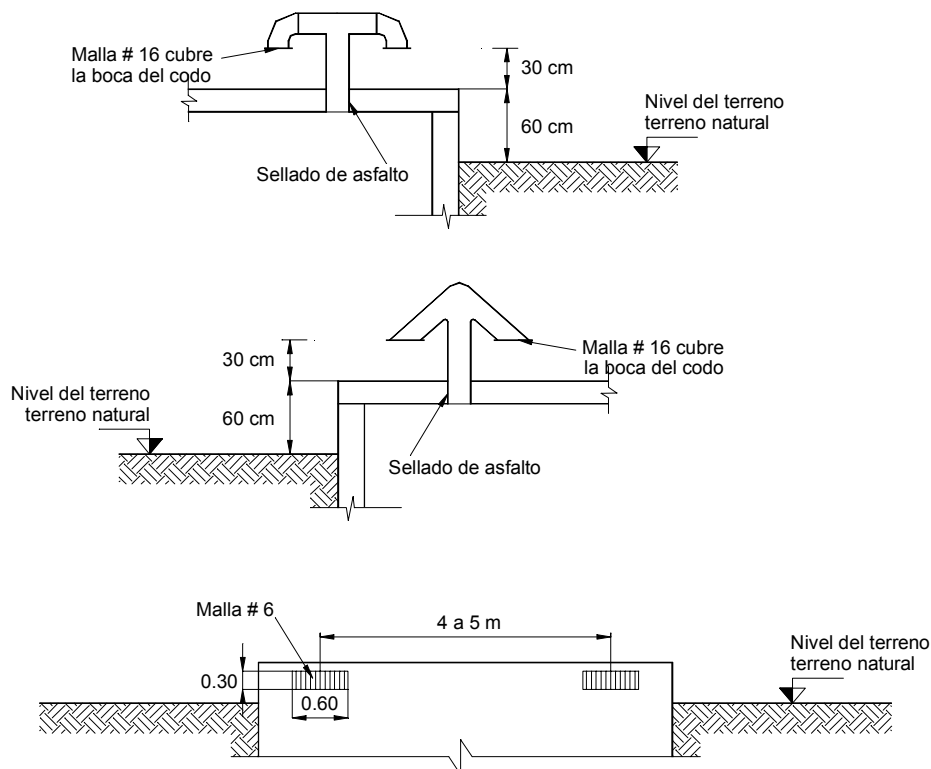


Figura 22. Ventilaciones

Estas ventilaciones se deben constituir de manera que impidan el acceso de animales, polvo o agua que puedan contaminar el almacenado.

En la **Figura 22** se muestran distintos tipos de ventilaciones.

2.6.8. Accesos

Las aberturas para el ingreso a las reservas y para inspección y limpieza, deben ser convenientemente localizadas y protegidas contra la posibilidad de contaminación. Deben colocarse tapas adecuadas, sobreelevadas con respecto al nivel del solado donde se las ubica, presentando un borde saliente de 10 cm o más a ser cubierto por el ala de la tapa de por lo menos 5 cm a fin de impedir el ingreso de aguas externas.

En caso de no preverse la provisión de escaleras transportables para ingresar a las reservas deberán instalarse escalones empotrados en los muros de material que no sufran procesos de corrosión.

2.6.9. Pantallas Deflectoras

Las reservas deben proyectarse de manera tal de evitar zonas muertas donde el agua no circule y pueda por lo tanto producirse un deterioro de sus características. Para satisfacer tal condición es habitual colocar pantallas para guiar la circulación del líquido. Estas pantallas no deben llegar al piso de la reserva, dejando un espacio de 5 a 10 cm a fin de permitir el libre escurrimiento del agua durante las operaciones de limpieza. Si bien deben ser de material resistente a la corrosión, no se requiere que presenten resistencia estructural ya que no se verán sometidas a presiones hidrostáticas ni a esfuerzos originados en la circulación del agua.

2.6.10. Indicador del Nivel de Agua

Es siempre conveniente contar con un dispositivo que permita conocer el nivel del agua en la reserva. El sistema puede ser accionado por un flotador, presóstatos, en forma neumática, etc.

De disponer de equipamiento que informe a distancia el volumen almacenado disponible, facilitará la tarea del operador y podrá utilizarse para la automatización de los equipos de bombeo.

2.6.11. Balizamiento

Los tanques elevados deberán contar con balizamiento para la seguridad aérea de acuerdo a las disposiciones vigentes aplicables al lugar de su emplazamiento.

2.6.12. Pararrayos

Dado que el tanque elevado generalmente es la construcción de mayor altura de la localidad debe instalarse, por motivos de seguridad, un pararrayos ejecutado de acuerdo a normas que aseguren su efectividad.

2.7. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Consiste en ejecutar en las instalaciones o equipos una serie de acciones de mantenimiento, sin esperar que se produzcan daños y justamente para evitar, dentro de lo posible, que éstos se presenten.

Por su naturaleza se debe programar todas y cada una de las acciones en forma de calendario y por ese mismo hecho y en base que esta programación se haga en forma inteligente, se obtiene una gran economía, ya sea en horas hombre, transporte, trámites, etc.

Debe ejecutarse en forma ineludible y es la única garantía de buen funcionamiento a través del tiempo. Su no cumplimiento produce desorden, anarquía y problemas que siempre se manifiestan a posteriori por una destrucción parcial o total de las instalaciones, o la aparición de problemas de orden sanitario.

Se deberá contar con:

- Planos completos generales.
- Planos de detalle.
- Volumen útil.
- Sistemas de entrada, salida, desagüe, desborde y controles especiales.
- Fuentes de abastecimiento.
- Zonas a las que sirve.

En las **Tabla 13** y

Tabla 14 se dan los lineamientos respecto al período de mantenimiento, responsables del mismo, trabajos a realizar, materiales y repuestos indispensables.

NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN				
NORMAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE INSTALACIONES Y EQUIPOS				
- TANQUES DE HORMIGÓN O MAMPOSTERÍA.....				Página 1/1
Periodo de mantenimiento	Ejecutante		TRABAJO A REALIZAR	Materiales, Repuestos y Lubricantes - INDISPENSABLES
	Nivel	Grupo		
1 año			<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje, limpieza manual y lavado del fondo y paredes interiores. - Desinfección con solución de cloro. - Revisión de válvulas y elementos de operación y reparaciones si fueren necesarias. 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementos de trabajo para limpieza - Hipoclorito - Empaquetaduras de válvulas - Prensa - estopas - Pintura anticorrosiva para elementos metálicos.

Tabla 13. Formulario de mantenimiento

NOMBRE DE LA INSTITUCIÓN ENCARGADA				
NORMAS DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE INSTALACIONES Y EQUIPOS				
- TANQUES METÁLICOS.....				Página 1/1
Periodo de mantenimiento	Ejecutante		TRABAJO A REALIZAR	Materiales, Repuestos y Lubricantes - INDISPENSABLES
	Nivel	Grupo		
1 año			<ul style="list-style-type: none"> - Drenaje, limpieza manual y lavado del fondo y paredes interiores. - Desinfección con solución de cloro. - Revisión de válvulas y elementos de operación y reparaciones si fueren necesarias. 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementos de trabajo para limpieza - Empaquetaduras de válvulas - Pernos y tuercas - Compuertas de válvulas - Prensa - estopas - Pintura anticorrosiva.
3 años			<ul style="list-style-type: none"> - Pintura de toda la estructura, usando pintura anticorrosiva especial para protección del metal. <p>NOTA: Deberá usarse alguna pintura o revestimiento – anticorrosivo reconocido y de alta calidad, teniendo especial cuidado en los tanques ubicados en las cercanías del mar, en los cuales puede ser indispensables acortar este período.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pintura.

Tabla 14. Formulario de mantenimiento

Como recomendación general puede indicarse que cada seis meses o cuando haya alguna señal que lo justifique se deberá inspeccionar el depósito de distribución con relación al estado de su limpieza interior, roturas o fallas, pérdidas y cualquier diferencia estructural que se observe.

2.8. IMPERMEABILIZACIÓN

Para el caso de almacenamientos contruidos en acero o plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV), siendo estos materiales impermeables no es necesario considerar el tema en el diseño.

Para cisternas o tanques elevados contruidos en hormigón armado o simple, la permeabilidad y las pérdidas son originadas por el material en sí o por fisuras. Es por dicha situación que se deberá básicamente tener en cuenta calidad de áridos, tipo y dosaje de cemento, agua de amasado y tipo de encofrado, tarea que corresponde a un tecnólogo en hormigón. Asimismo un recubrimiento interno efectuado con pinturas epoxi aptas para estar en contacto con agua potable o la colocación de membranas de P.V.C. contribuirán a minimizar o eliminar las pérdidas.

En relación a la impermeabilización de las cubiertas, se producen actualmente membranas plásticas (PVC) de capa única o múltiple (aluminio, plástico, asfalto de petróleo) con uniones estancas por soldadura, en las que siguiendo las instrucciones de colocación de los fabricantes otorgan prácticamente impermeabilidad total de las cubiertas y una razonable vida útil en relación a su costo.

3. TANQUES ROMPECARGA

En localidades con notables diferencias de cota entre las diversas zonas o mallas de la red de distribución, se da el caso que los valores de presiones exceden los máximos establecidos por las normas o conducen al empleo de tuberías de clases superiores con los consiguientes aumentos de inversión y pérdidas en la red, con especial énfasis en las que se originan en las conexiones internas domiciliarias por el tipo de grifería empleada en la República Argentina con cierre por interposición de un material elástico (cuero, goma, fibra) en relación a los ampliamente usados en otros países con cierre cerámico.

Es habitual definir entonces las denominadas “terrazas de presión”.

Estas pueden materializarse ya sea por la adopción de válvulas reguladoras o limitadoras de presión de agua abajo en dichas zonas, por la división de la red con suministro de almacenamientos con distintas cotas o por el empleo de tanques o tanquillas rompecarga.

Como se observa en la **Figura 23** y **Figura 24** estos tanques consisten en una cámara en la que la tubería de ingreso tiene una válvula comandada por el nivel de agua en la misma y permite o no su suministro. Al estar dicha cámara ventilada a la atmósfera la presión de suministro agua abajo queda definida por su nivel.

Una segunda válvula comandada también a flotante y de diámetro menor permite, operando en un entorno de niveles reducidos y superiores al de apertura / cierre de la válvula principal, evitar sus oscilaciones, los consiguientes golpe de ariete y disminuir asimismo el mantenimiento.

Su volumen y dimensiones surgen de las necesidades de ubicación de los diversos elementos y consideraciones hidráulicas en su diseño.

Puede darse el caso que su volumen incluya las necesidades de un volumen operacional, para incendio y emergencias con lo que, descontados los mismos del almacenamiento que las aprovisiona se transforman en una reserva típica que incluye además los elementos limitadores de nivel indicados.

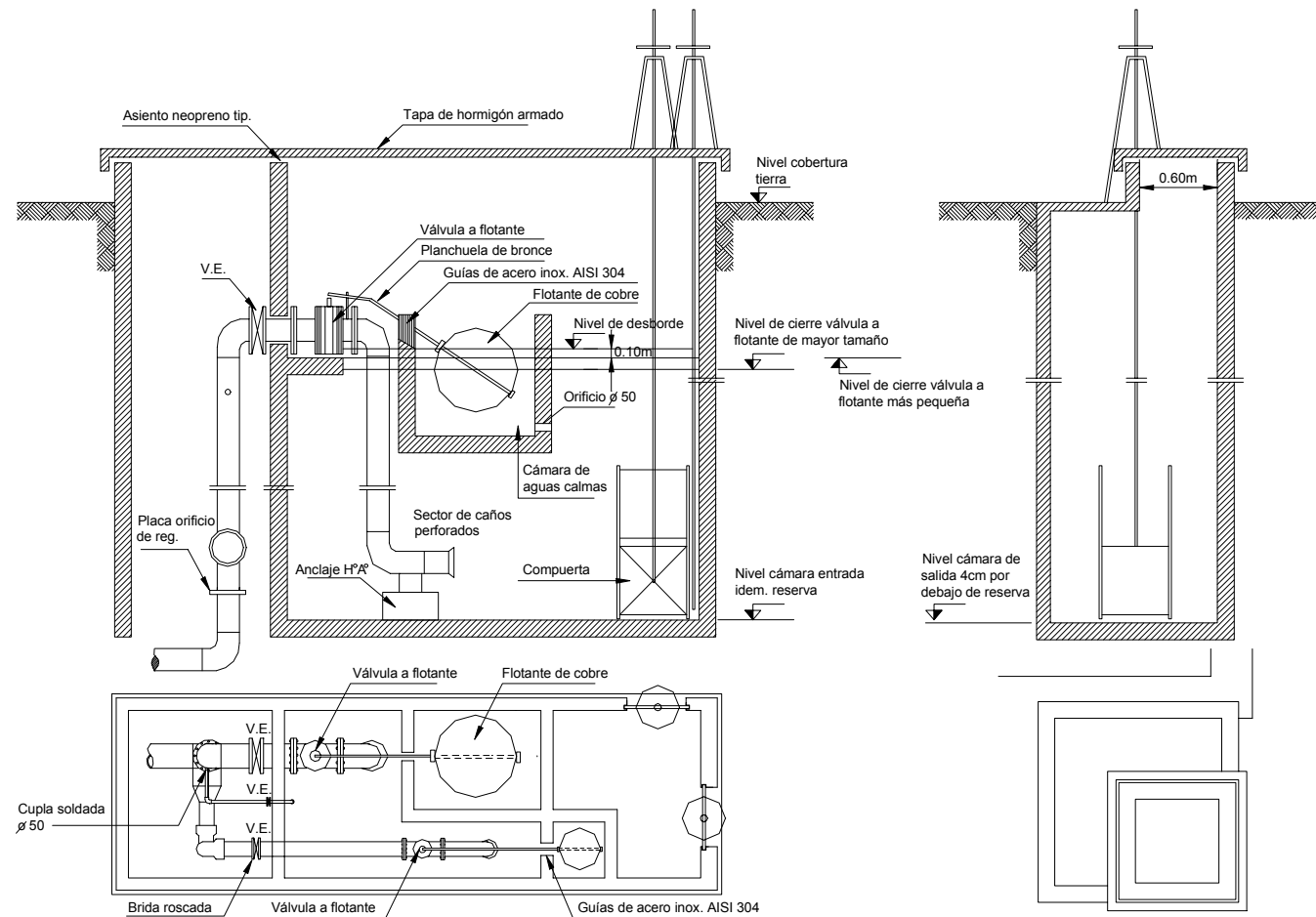


Figura 23 Cámara rompe-carga, planta y corte

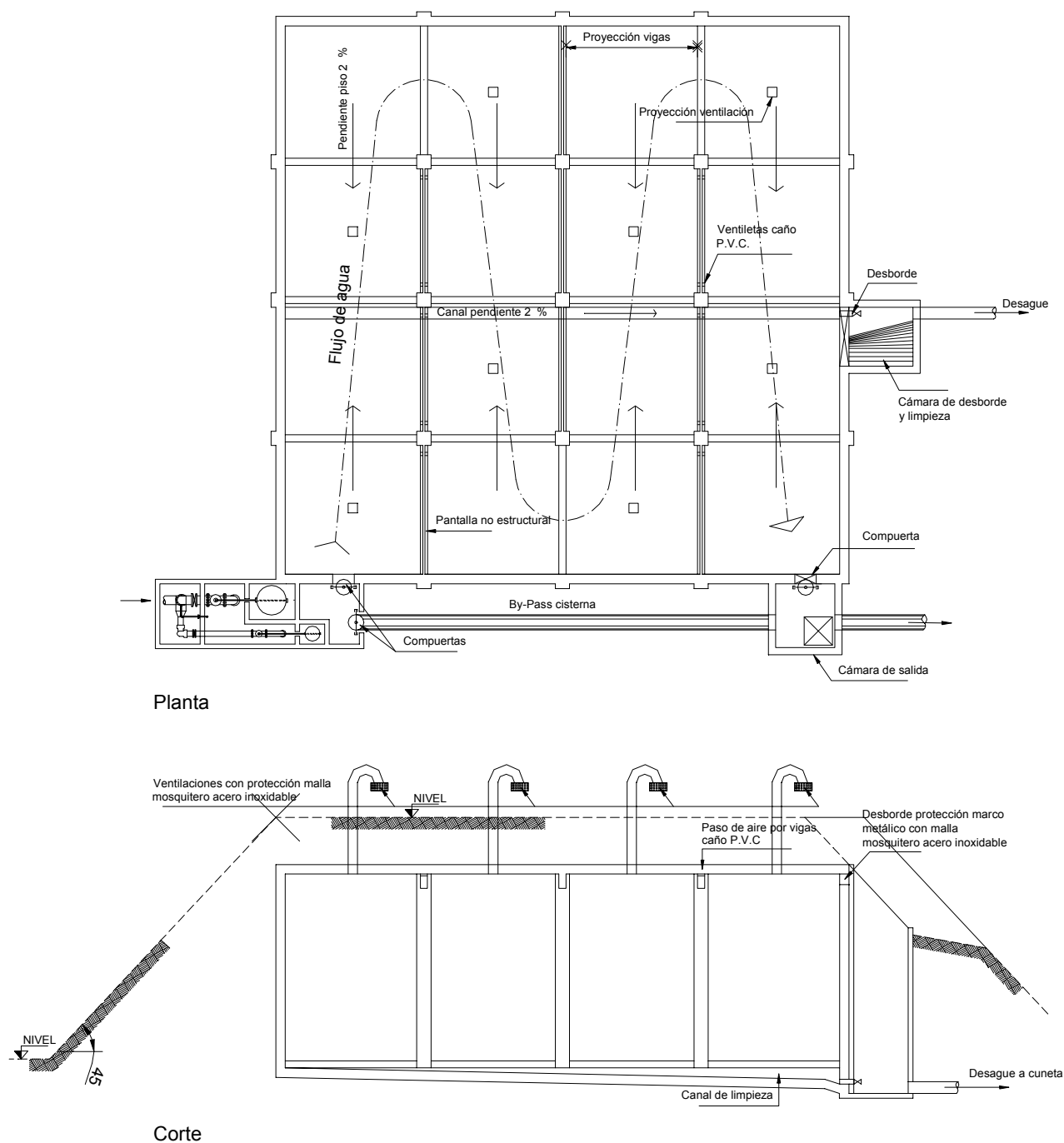


Figura 24. Cisterna con cámara rompecarga - Planta y corte

4. VÁLVULAS REDUCTORAS DE PRESIÓN

Como se ha indicado en el Numeral 3 su misión es reducir la presión aguas abajo de las mismas a un valor determinado aceptable para la línea de conducción o la red de distribución. Se puede con ellas entonces mantener regulada la presión en sitios en que en otros casos, podría existir valores de sobrepresiones inaceptables. (Ver **Figura 25**).

La diferencia importante con las válvulas de cierre, tipo escluso o mariposa, es que estas reducen la presión estando parcialmente cerradas, con una pérdida de carga singular, tanto mayor cuanto mayor sea el cierre de la válvula.

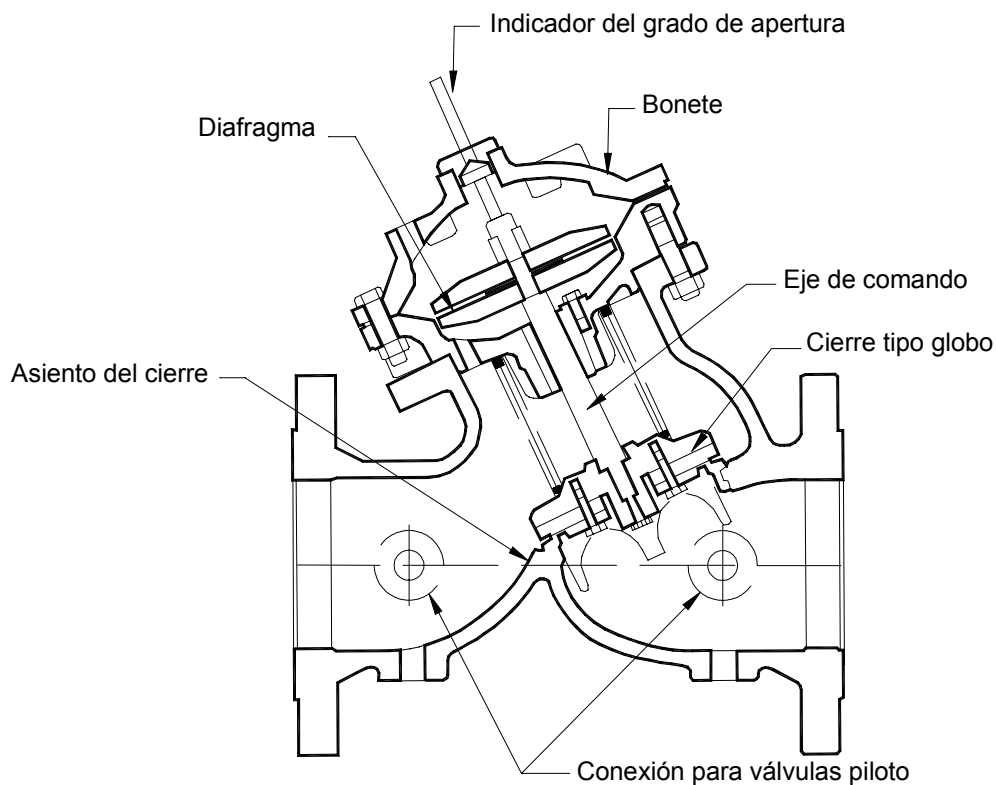


Figura 25. Válvula reductora de presión (corte longitudinal)

Las válvulas reductoras de presión se ajustan automáticamente, a cualquier caudal, de forma que la presión agua abajo se mantenga dentro de los rangos programados. El funcionamiento se consigue mediante sensores, que regulan la apertura o cierre de la misma en función de la presión aguas abajo, materializados por una válvula tipo piloto de una vía para la ubicación en líneas a gravedad (ver **Figura 26**) y de dos vías en las impulsiones. (Ver **Figura 27**).

Como todos los demás tipos de válvulas, deben construirse acorde lo determinen las normas y cuidando todas las condiciones que se exijan, especialmente en cuanto hace a las inspecciones en fábrica. Corresponden a válvulas hidráulicamente operadas, actuadas mediante diafragma y del tipo globo.

Las velocidades de paso no deben ser excesivas, ya que se puede producir cavitación por la pérdida de carga que se origina, situación esta especificada por cada fabricante para sus diversos tipos.

En casos necesarios pueden colocarse en serie, tomando cada una de las válvulas del conjunto un porcentaje del total de la presión a reducir, de manera que entre todas se pueda conseguir el objeto deseado. Estos elementos deben ser acompañados por válvulas de cierre antes y después del conjunto. De este modo se pueden desmontar para su mantenimiento y / o reparación. Es aconsejable la ejecución de un by-pass en paralelo que permita seguir manteniendo el servicio aguas abajo.

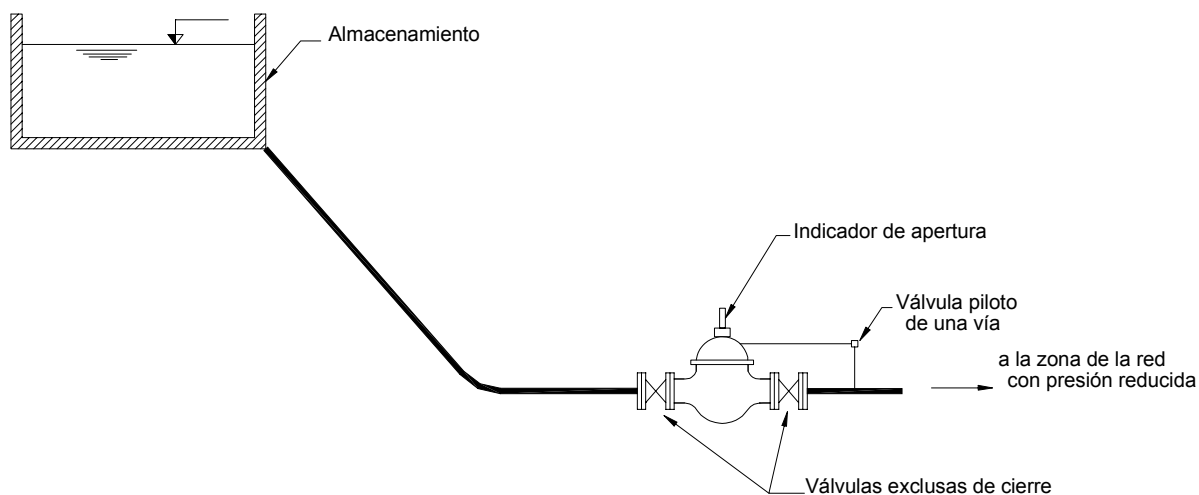


Figura 26. Ubicación en línea a gravedad (piloto de una vía)

Es conveniente indicar en las especificaciones técnicas para su adquisición que estén equipadas con indicador del grado de apertura y que las bridas correspondan en cuanto a norma, serie de presión y perforación a las utilizadas como estándar en la línea en que serán instaladas.

Asimismo se deberá especificar que operarán correctamente sin la necesidad de un by-pass o una tobera previa a la válvula y que el sistema de control contará con válvulas piloto (una o dos vías según el caso), filtro interno removible y cierre manual.

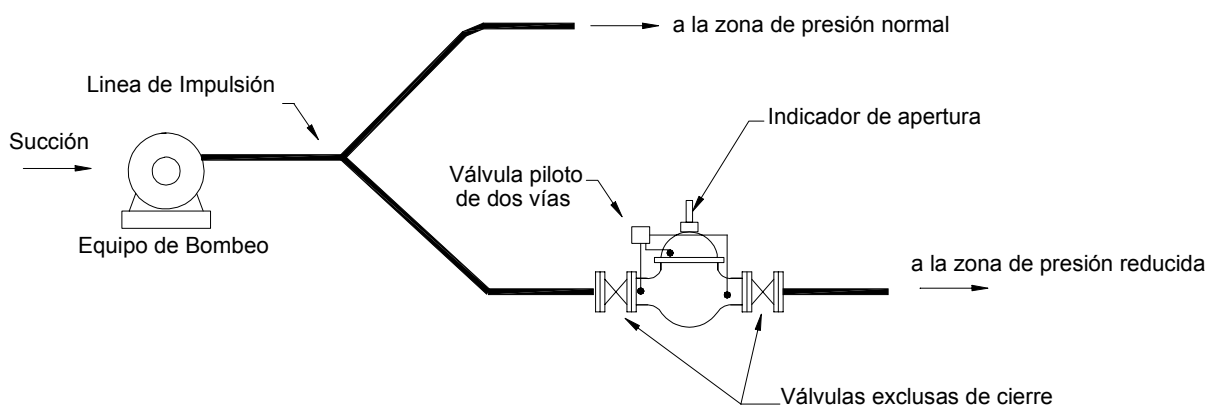


Figura 27. Ubicación en línea de impulsión (piloto de dos vías)

5. CISTERNAS EN PLANTAS DE POTABILIZACIÓN

De acuerdo al criterio sustentado en el Numeral 2.1 la función de la cisterna en una planta de tratamiento sólo es operacional, es decir, verificar que sus caudales de producción (ingresos a la cisterna) sean compensados en relación a los egresos (requerimientos del sistema y de la planta de tratamiento en sí) durante un período de 24 hs para el caudal máximo diario al horizonte de proyecto, por lo que para su dimensionamiento o verificación se puede aplicar el procedimiento descrito en el Numeral 2.3.1.1 Método del Diagrama de Masas o de Rippl, adaptado a las necesidades del caso.

En la **Figura 28** se observa un ejemplo para el caso de producción en 12 horas continuas de la planta de tratamiento (6:00 a 18:00) y un requerimiento de agua para proceso del 8% que conduce a que para poder regular la operación la cisterna debe tener una capacidad del 55% (suma del almacenamiento parcial A y B) del caudal medio diario al horizonte de proyecto.

Esto habla a las claras de minimizar los consumos del agua para proceso y de ampliar el período de producción de la planta de tratamiento.

Debe recordarse, cuando una de las cisternas u otras reservas intermedias se utilizan como tanques de bombeo, los conceptos expuestos en el Capítulo IX respecto al volumen mínimo a proyectar para dichas estructuras a fin de que las bombas tengan una frecuencia de arranques sucesivos compatible con sus características. Para la determinación de este volumen deberán seguirse las indicaciones del Capítulo IX numeral 2-9.

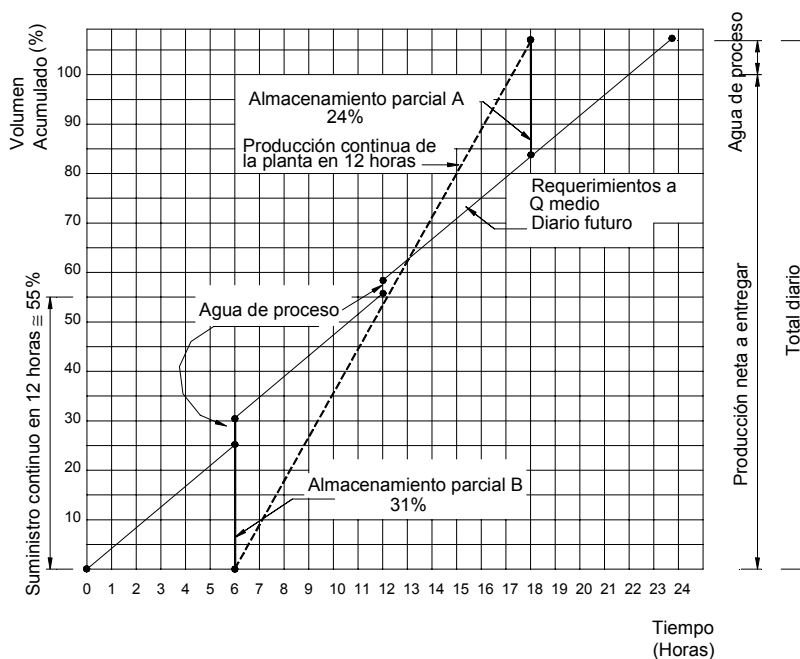


Figura 28. Determinación del volumen de la cisterna para una planta de tratamiento tanques hidroneumáticos

6. TANQUES HIDRONEUMÁTICOS

6.1. TEORÍA DE SU FUNCIONAMIENTO

6.1.1. *Función de un Tanque Hidroneumático*

Un tanque hidroneumático (TH), tiene por finalidad suministrar agua para el consumo, a caudal y presión constante, dentro de un rango mínimo de variación, suplantando al tanque elevado para sostener la presión en un servicio con red domiciliaria.

El elemento fundamental es un recipiente metálico cerrado denominado pulmón TH. Este contiene presurizados una cámara de aire y una reserva de agua que se adiciona al volumen existente en las cañerías de la red y tanques domiciliarios.

Los equipos de impulsión al tanque ubicados en el punto inicial de la red funcionan intermitentemente. Mientras operan dan directamente presión y caudal a la red y al pulmón respectivamente. A su vez cuando están detenidos, únicamente el pulmón efectúa su aporte a la red.

La aspiración del agua debe realizarse desde una cisterna con capacidad necesaria para tener una reserva adecuada según indicado en el numeral 2.

6.1.2. *Ventajas e Inconvenientes del Sistema*

Entre las ventajas se mencionan:

- Disminuye los picos de consumo.
- Reemplaza al tanque elevado.
- Requiere poco espacio de terreno.
- Es de fácil operación y mantenimiento, semejante a la necesaria para un tanque elevado.
- Al ser equipos compactos, su transporte e instalación no ofrecen inconvenientes.

La mayor desventaja es que la única reserva disponible cuando no hay energía eléctrica o ante la rotura de algún equipo, es sólo la existente en el pulmón y en los tanques domiciliarios.

6.1.3. Parámetros Básicos

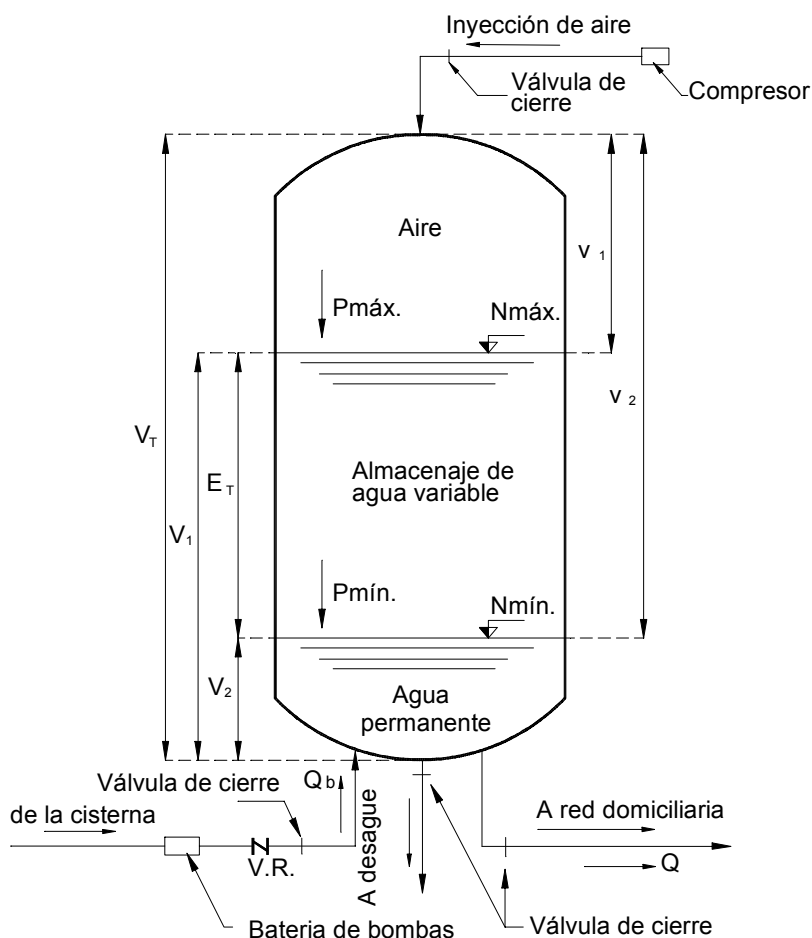


Figura 29. Esquema de un tanque hidroneumático

Q_b = caudal de bombeo total. Es la suma de los caudales de cada equipo impulsor al TH (m^3/h).

Q_d = caudal medio de la demanda futura o caudal medio de diseño al horizonte de proyecto (m^3/h).

V_T = volumen total del pulmón del TH (m^3).

V_1 = a % de V_T (m^3) es el volumen máximo en el pulmón del TH cuando se tiene dentro del mismo, el nivel líquido máximo $N_{máx.}$

V_2 = b % de V_T (m^3) es el volumen mínimo de agua en el TH cuando se tiene dentro del mismo, el nivel líquido mínimo $N_{mín.}$

$E_T = V_1 - V_2 = (a - b) \% \text{ de } V_T \text{ (m}^3\text{)}$ es la capacidad de almacenaje de agua cuando los equipos se detienen, o “eficiencia” del tanque TH.

$v_1 = (100 - V_1) \% \text{ de } V_T \text{ (m}^3\text{)}$ es el volumen mínimo de aire en el TH para $N_{\text{máx}}$.

$v_2 = (100 - V_2) \% \text{ de } V_T \text{ (m}^3\text{)}$ es el volumen máximo de aire en el TH para $N_{\text{mín}}$

$p_{\text{máx}}$ = presión absoluta de aire en el TH para $N_{\text{máx}}$ o presión máxima suministrada al sistema pulmón – red domiciliaria.

$p_{\text{mín}}$ = presión absoluta de aire en el TH para $N_{\text{mín}}$ o presión mínima suministrada al sistema pulmón – red domiciliaria.

$r = \frac{p_{\text{máx}}}{p_{\text{mín}}}$ es el rango de presiones límites de trabajo dentro del pulmón.

6.1.4. Cálculo Teórico del Pulmón

El cálculo del tanque se basa en la Ley de Boyle - Mariotte que expresa:

$$v \cdot p = v_1 \cdot p_1 = v_2 \cdot p_2 = cte \quad (1)$$

Entonces:

$$v_1 \cdot p_1 = v_2 \cdot p_2$$

Se tiene que $v_1 = (100 - V_1)$ y $v_2 = (100 - V_2)$, siendo v_1 , v_2 , V_1 y V_2 expresados en un porcentaje de V_T (volumen total).

Reemplazando en la fórmula de Boyle – Mariotte

$$(100 - V_1) p_1 = (100 - V_2) p_2 \quad (2)$$

$$\text{De allí: } V_2 = 100 - \frac{p_1}{p_2} (100 - V_1) = \text{volumen mínimo de agua} \quad (3)$$

$$\text{Como } E_T = V_1 - V_2 = V_1 - \left[100 - \frac{p_1}{p_2} (100 - V_1) \right] = (100 - V_1) \left(\frac{p_1}{p_2} - 1 \right)$$

La eficiencia en porcentaje de V_T para $\frac{p_1}{p_2} = \frac{p_{\text{máx}}}{p_{\text{mín}}}$ es entonces:

$$(100 - V_1) \left(\frac{p_{\text{máx}}}{p_{\text{mín}}} - 1 \right) \quad (4)$$

La duración de un ciclo entre paradas o arranques sucesivos es:

$$t = t_d + t_r$$

siendo

$$t_d = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_d} = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b \cdot Q_d / Q_b} = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b \cdot X} = \text{lapso o tiempo de descarga, siendo } X = \frac{Q_d}{Q_b}$$

$$t_r = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b - Q_d} = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b (1 - Q_d / Q_b)} = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b (1 - X)} = \text{lapso o tiempo de recarga}$$

$$\text{Entonces } t = t_d + t_r = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b \cdot X} + \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b \cdot (1 - X)} = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b} \frac{1}{X(1 - X)} \quad (5)$$

Derivando t respecto a la variable x e igualando a cero, se tiene el tiempo mínimo t_{\min} de un ciclo, o sea:

$$Q_d = 0,5 Q_b \quad ; \quad Q_b = 2 Q_d \quad ; \quad X = 0,5 \quad (6)$$

La fórmula (6) expresa que en un ciclo mínimo entre paradas o arranques, el caudal de bombeo es el doble del caudal medio de diseño. En la práctica se establece que $Q_b = 1,15$ a $1,25 Q_{\max h}$, en donde Q_{\max} es el caudal máximo horario de diseño de la red.

Reemplazando (6) en la fórmula (5), X se tiene:

$$t_{\min} = \frac{V_T \cdot E_T}{Q_b \cdot 0,5 (1 - 0,5)} = \frac{4V_T \cdot E_T}{Q_b} \quad (7)$$

La inversa de t_{\min} es el número máximo de arranques o paradas en la unidad de tiempo, s_{\max} .

$$s_{\max} = \frac{1}{t_{\min}} = \frac{60 \text{ minutos} / \text{hora}}{t_{\min} \text{ minutos}} = \frac{60 / \text{hora}}{t_{\min}} = \text{número o frecuencia máxima de arranques o paradas horarias.}$$

Reemplazando en la fórmula (7): $t_{\min} = \frac{60}{s_{\max}}$, que es el valor más desfavorable, se tiene:

$$\frac{60}{s_{\max}} = \frac{4 \cdot V_T \cdot E_T}{Q_b}$$

$$V_T = \frac{60 Q_b}{4 \cdot E_T \cdot s_{\max}} = \frac{15 Q_b}{E_T \cdot s_{\max}} = \text{volumen total del tanque hidroneumático} \quad (8)$$

Si el caudal Q_b se expresa en m^3/h , s_{\max} en N° ciclos/hora y E_T en por ciento de V_T , se tiene V_T en m^3 .

6.1.5. Conclusiones Deducidas de las Fórmulas de Cálculo del Tanque

De la fórmula (4) se deduce:

- 1). La capacidad de almacenaje o eficiencia aumenta con el incremento del rango $r = \frac{p_{\max}}{p_{\min}}$ = relación entre las presiones límites de trabajo en el pulmón.
- 2). Al aumentar el rango r , o sea la presión p_{\max} , se incrementa el espesor de las paredes metálicas del pulmón. Esta situación desfavorable se compensa con el aumento de E_T .
- 3). La mayor presión p_{\max} produce también una presión o altura de impulsión superior, aspecto también negativo a considerar en la optimización de costos.

De la fórmula (8) se concluye

- 1). El incremento del rango r y en consecuencias de la eficiencia E_T , ocasiona una disminución de la frecuencia máxima s_{\max} de paradas o arranques horarios. Esta circunstancia significa una mayor duración de los equipos de impulsión y de los contactores.
- 2). La capacidad de almacenaje aumenta con la disminución del volumen máximo de agua V_1 en el pulmón.
- 3). Como $V_2 = V_1 - E_T$ = volumen mínimo de agua en el tanque, V_1 tiene que ser mayor que E_T para evitar la entrada de aire circunstancial desde la red. Por ese motivo se adopta:

$$r = \frac{p_{\max}}{p_{\min}} = 1,5 \text{ a } 2,0$$

6.1.6. Frecuencia de los Ciclos de Paradas o Arranques

El número de paradas o arranques horarios consecutivos s , es un parámetro básico para el cálculo del volumen V_T del tanque.

Cada equipo impulsor está conectado eléctricamente a un presóstato. Estos se programan para que su límite superior p_1 produzca la parada del equipo y el inferior p_2 ocasione el arranque. Esos valores límites corresponden a la presión interna en el pulmón y deben estar dentro de la gama de diseño (p_{\max} y p_{\min}).

La demanda de la red produce una variación del nivel líquido dentro del pulmón y por consiguiente de la presión en la cámara de aire. Esta corresponde a la presión interna p que es acusada por cada presóstato. Esta situación ocasiona un número s de arranques y paradas por la fluctuación de la demanda.

Para el diseño se aconseja como valor normal $s_{\text{máx}} = 11$ ciclos horarios y como valor máximo $s_{\text{máx}} = 15$ ciclos horarios.

6.2. SISTEMAS CON TANQUE HIDRONEUMÁTICO

6.2.1. Sistema del Tanque o Pulmón

Es el elemento fundamental en cuyo interior se establecen las presiones requeridas en la red de distribución.

Consiste en un recipiente metálico cerrado a presión, compuesto por un cuerpo cilíndrico en cuyos extremos hay cabezales de forma generalmente toriesférica.

En el cabezal superior hay una tapa de inspección abulonada, tipo pasa hombre con ajuste hermético.

Son contruidos básicamente con chapa negra o acero inoxidable soldados eléctricamente. Los de chapa negra deben estar protegidos interiormente con dos manos de pintura epoxy y en su exterior con dos manos de pintura anticorrosiva y dos manos de esmalte sintético.

En la pared del tanque van soldadas las siguientes conexiones:

- De entrada y salida común del agua.
- De inyección del aire en la tapa.
- De la cañería de vinculación con los presóstatos.
- Del tubo visor de vidrio para verificar niveles líquidos en el interior del pulmón.
- Del manómetro y presóstato, en sistemas pequeños con un solo equipo de impulsión.

6.2.2. Sistemas de Impulsión

Son los que suministran al sistema pulmón-red de distribución la presión y el caudal requeridos por el sistema de abastecimiento.

Debido a las continuas variaciones de la demanda en la red de distribución y para evitar un número de ciclos s superior al admitido, se recomienda la instalación de varias bombas que operen escalonadamente en cadena o cascada. En teoría la suma de los caudales suministrados por cada bomba debe ser igual al caudal de bombeo Q_b de diseño.

Generalmente se adoptan electrobombas centrífugas de eje horizontal colocadas en una base común. Se puede adicionar una bomba de reserva accionada con motor de combustión interna o instalar un grupo electrógeno que opere cuando no se disponga eventualmente del fluido eléctrico.

La variación de la presión interna p en el pulmón producida por las fluctuaciones del nivel líquido dentro del mismo, es acusada por el presóstato de cada electrobomba permitiendo su arranque o parada dentro de la gama de presiones para la que fue programado.

Cuando aumenta la demanda en la red de distribución hay una bomba que arranca en primer término y la última lo hace cuando la presión interna $p = p_{\min}$. Si la demanda es decreciente y en consecuencia aumenta la presión interna p , se produce la detención en cadena. Primeramente lo hace la última en arrancar y finalmente cuando $p = p_{\min}$, se para la primera en operar.

Para evitar el desgaste prematuro de la bomba que tiene mayor número de horas de operación, se cambian las conexiones con los presostatos variando de esa forma la entrada en servicio o detención de las electrobombas. Esa misma operación se puede ejecutar variando el rango de trabajo o límites de presiones para la que fue programado cada presóstato.

La aspiración se realiza desde una cisterna mediante una cañería común (múltiple) con derivación a cada bomba provista de una válvula de cierre. La impulsión al pulmón-red de distribución se hace con un sistema semejante pero con el agregado de una válvula de retención.

6.2.3. Sistemas de Reposición de Aire

Sirven para mantener un volumen constante de aire dentro del pulmón por pérdidas en la operación. En general están compuestos por un cabezal de compresor acoplado mediante correas a un motor eléctrico. El conjunto está ubicado sobre un bastidor metálico adosado a uno de los muros de la sala.

Hay un control de nivel compuesto de electrodos de acero inoxidable ubicado en el pulmón, cuya misión es la de mantener el nivel de presión de aire dentro del mismo, activando o parando la marcha del compresor según la necesidad de aire.

La cañería de conexión entre el pulmón y el compresor lleva una válvula especial aire-agua, purgador automático de condensado con filtro incorporado para expulsar automáticamente emulsiones de agua y aceite.

En equipos pequeños se utiliza una válvula dosificadora de aire que reemplaza al compresor.

Otro sistema es el drenaje de agua en la impulsión de las electrobombas. La realimentación de aire al pulmón se hace mediante una válvula de drenaje y otra de admisión de aire.

6.2.4. Sistema de Control

Esta compuesto por los siguientes elementos:

- Control de nivel líquido en el pulmón para mantener constante la cámara de aire ya mencionada anteriormente. También puede hacerse con un flotante en lugar de electrodos.
- Tubo visor de vidrio en el pulmón para la verificación del nivel líquido dentro del mismo.
- Un manómetro con escala 0-4 kg/cm² y un presóstato por cada electrobomba, para regular en forma constante y automática el ingreso de agua a la red. En los equipos de mayor capacidad ambos se colocan en un compartimento anexo al tablero eléctrico general; en los de menor capacidad se adosan a la pared del pulmón.

6.2.5. Sistema de Operación y Protección

En general comprende un tablero de chapa pintada conteniendo los siguientes elementos eléctricos:

- Una línea de 220/380 V de entrada, con fusibles.
- Un amperímetro.
- Un voltímetro 0-500 V.
- Una llave selector de fases.
- Fusibles (compresor y electrobombas).
- Contactor de arranque del compresor.
- Contactor de arranque para cada electrobomba.
- Protección térmica del compresor y electrobombas.
- Control electrónico automático del compresor.
- Luz piloto para funcionamiento del compresor, de las electrobombas e indicador de cisterna vacía.
- Llaves interruptoras manual y automáticas del compresor, electrobombas y general de marcha.
- Borneras de conexión.
- Conexiones del flotante de la cisterna, control electrónico del pulmón y presóstatos.

6.2.6. Instalaciones Complementarias

6.2.6.1. Cisterna Auxiliar

Sirve para almacenar el volumen de agua necesario para el funcionamiento del tanque. La capacidad mínima debe ser de acuerdo a lo indicado en el numeral 2. El agua ingresada a la misma puede provenir de una planta de tratamiento, manantial o fuente subterránea.

Debe instalarse un interruptor de nivel a flotante a fin de parar automáticamente el servicio en caso de registrarse en la cisterna un nivel mínimo, evitando así daños mecánicos y electrónicos al equipo.

De la cisterna debe salir el múltiple de aspiración de las bombas, en cuya entrada se debe colocar un chupón de protección ubicado dentro de la misma.

El nivel del piso debe ser superior al del piso de la sala de máquinas para permitir que las bombas se encuentren siempre cebadas.

6.2.6.2. Sala de Máquinas

La instalación de una sala de máquinas se utiliza para protección climática de los elementos que integran el sistema: Tanque Hidroneumático, electrobombas con sus accesorios, cañerías, tableros (general, del Tanque Hidroneumático y de la iluminación) y compresor. Las medidas deben ser compatibles con la ubicación de cada uno de esos elementos.

6.2.6.3. Línea Eléctrica

Para el cálculo de la línea eléctrica se considera la potencia absorbida por la totalidad de los motores y artefactos eléctricos, más el consumo normal de iluminación. Debe instalarse un seccionador.

6.3. DISEÑO DE UN SISTEMA CON TANQUE HIDRONEUMÁTICO

6.3.1. Diseño de un Equipo Hidroneumático

6.3.1.1. Presiones de Servicio en la Red Domiciliaria

En el cálculo de una red de distribución hay tres puntos singulares:

“A” es el punto en donde está previsto colocar el tanque hidroneumático TH.

“B” es el punto más bajo de la red o sea el que soportará la mayor carga estática del sistema.

“C” es el punto en donde se producirá la menor carga piezométrica disponible “a”.

Los nudos “B” y “C” pueden coincidir separadamente con el “A” según sea el desnivel geométrico resultante z (con su signo) y el desnivel piezométrico h hasta el punto “C”, desde “A”.

Se considera un tanque elevado ficticio ubicado en el mismo lugar que el hidroneumático (punto “A”) con presiones de trabajo límites dentro del pulmón iguales a las correspondientes en la red. En ese tanque ficticio se tienen las siguientes alturas respecto al eje horizontal de las bombas o del terreno natural si no hay grandes diferencias de cotas con ese eje:

H_1 = altura del nivel líquido máximo en el tanque ficticio. Este nivel corresponderá a la cota estática o máxima de la red de distribución.

H_2 = altura del nivel líquido mínimo o fondo del tanque ficticio. Este nivel será el arranque del perfil piezométrico de la red. El valor de H_2 tendrá el siguiente valor:
 $H_2 = a + h + z$, en donde:

a = carga piezométrica mínima ubicada en “C”.

h = suma de las pérdidas de energía en cada tramo desde “A” hasta “C”. Esta resultante es siempre positiva.

z = suma de los desniveles geométricos del terreno en esos mismos tramos desde “A” hasta “C”. En los tramos con rampas (pendiente ascendente) el desnivel es positivo y en los tramos con declives (pendiente descendente) el desnivel es negativo. La suma es positiva si predominan los declives.

Los puntos “B” y “C” tienen distintas ubicaciones respecto al punto “A”.

- Si “C” coincide con “A” y si además la suma de desniveles geométricos z hasta “B” es mayor que la suma de desniveles piezométricos h (con sus signos) hasta B, se tiene que $h = z = 0$. Entonces: $H_2 = a$.
- Si “C” coincide con “B” y el valor absoluto resultante de z es menor que h , se tiene que z es negativo. Entonces $H_2 = a + h - z$.
- Si “C” está ubicado entre “A” y “B”, se aplica el caso: $H_2 = a + h + z$.
- Si “B” está ubicado entre “A” y “C”, se aplica el caso: $H_2 = a + h - z$.

La altura del tanque será:

$$H_1 = H_2 + H$$

donde

H = tirante líquido en el tanque ficticio que se determina efectuando la equivalencia de la columna de agua con la diferencia de presiones $\Delta p = p_{\text{máx}} - p_{\text{mín}}$ dentro del pulmón.

El valor H_1 determina el nivel estático N_E de la red de distribución. Se tiene:
 $H_E = N_E - N_T$ = carga estática máxima sobre el punto más bajo de la red (“B”), cuyo nivel es N_T (puede ser también el trasdós del caño).

El valor H_E debe ser compatible con el espesor o clase del caño adoptado en la zona de "B". Si se diseñará un caño clase 6, H_E debe ser menor a 60 m (6 Kg/cm² su equivalencia).

Si es mayor que ese valor límite hay dos alternativas: la primera es aumentar el espesor o clase del caño y la segunda es disminuir H y por ende Δp (o el rango r) pero verificando las condiciones del diseño.

6.3.1.2. Presiones de Trabajo en el Pulmón

Se igualan las presiones de servicio o columnas de agua H_1 y H_2 de la red de distribución con las presiones internas del pulmón haciendo la equivalencia 1 Kg/cm² = 10 m de columna de agua.

Entonces se tiene: $H_1 = p_{\text{máx}}, H = p_{\text{máx}} - p_{\text{mín}}$ y

$$H_1 = 1,5 \text{ a } 2 H_2$$

Se verifica si el rango $r = p_{\text{máx}}/p_{\text{mín}}$ está comprendido entre 1,5 y 2,0. Si r es menor que 1,5 hay que incrementar $p_{\text{máx}}$ verificando las condiciones de diseño. Si r es mayor a 2,00 hay que disminuirla efectuando las mismas verificaciones.

Es fundamental determinar el rango r para la optimización de los parámetros del diseño. Así la eficiencia E_T , el consumo de energía y el espesor de la chapa metálica se incrementan cuando aumenta el rango r ; pero también se produce la disminución de otro parámetro esencial como es la frecuencia horaria de paradas o arranques de las bombas. Lo contrario ocurre cuando el rango r se reduce.

6.3.1.3. Volumen Total del Pulmón

Según la fórmula (8) se tiene:

V_T = volumen total del pulmón [m³].

$$V_T = \frac{15 Q_b}{s_{\text{máx}} E_T}$$

Para el cálculo de V_T se aplican los siguientes parámetros:

Q_b = caudal total de bombeo [m³/h].

$Q_{\text{máxh}}$ = caudal de diseño de la red o sea el máximo horario futuro [m³/h].

siendo:

$$Q_b = 1,15 \text{ a } 1,25 Q_{\text{máxh}}$$

$s_{\text{máx}}$ = 11 frecuencias horarias como valor normal y 15 como valor máximo admitido.

V_1 = volumen máximo del agua (y mínimo v_1 del aire) en el pulmón, expresado en un porcentaje de V_T .

V_2 = volumen mínimo del agua (y máximo v_2 del aire) en el pulmón, expresado en un porcentaje de V_T .

siendo:

$$V_1 = 1,05 \text{ a } 1,10 E_T$$

E_T = eficiencia o capacidad de almacenaje en el pulmón, expresado en un porcentaje de V_T , que se calcula conociendo el rango $r = p_{\max}/p_{\min}$

$$E_T = V_1 - V_2 = (100 - V_1) (p_{\max}/p_{\min} - 1) = (100 - 1,05 \text{ a } 1,10 E_T) (r-1).$$

6.3.1.4. Potencia de los Equipos de Impulsión

Para el cálculo de la potencia nominal requerida por cada equipo de bombeo, se aplica la siguiente fórmula:

$$P = \frac{\gamma_E q_b H_{man}}{K\eta}$$

donde:

P = potencia nominal requerida para el equipo bomba-motor [HP].

Q_b = 1,15 a 1,25 $Q_{\max h}$ es el caudal total de bombeo [m^3/s].

$q_b = \frac{Q_b}{N_b}$ es el caudal unitario de cada bomba [m^3/s].

N_b = número de equipos de bombeo, en general electrobombas, que trabajan alternativamente en cascada. Para pequeños caudales requeridos, se tiene $N_b = 1$, pudiendo llegar hasta $N_b = 4$ para grandes caudales, según equipos estandarizados.

γ_E = peso específico del agua 1000 [kg/m^3].

K = coeficiente de transformación de unidades energéticas $76,06 \frac{kg \cdot m / s}{HP}$.

η = $\eta_1 \eta_2$, rendimiento del conjunto motor-bomba.

η_1 = rendimiento del motor; η_2 = rendimiento de la bomba.

$H_{man} = H + J$, altura manométrica de impulsión [m].

H = altura geométrica de impulsión que puede variar desde un máximo H_1 hasta un mínimo H_2 [m].

J = suma de pérdidas de carga por fricción y en puntos singulares (curvas, ramales, válvulas, etc.), debido al caudal q_b en las cañerías de aspiración e impulsión al pulmón [m].

6.3.2. Equipos Comerciales Estandarizados

6.3.2.1. Características de los Equipos Comerciales

La industria ofrece equipos hidroneumáticos estandarizados que incluyen los siguientes elementos o ítems:

a) **Tanque hidroneumático o pulmón.** En la pared del tanque van soldadas las siguientes conexiones:

- De entrada y salida común del agua.
- De inyección del aire en la tapa de acceso.
- De la cañería de vinculación con los presóstatos ubicados en el tablero.
- Del tubo visor de vidrio que permite el control directo de los niveles dentro del pulmón.
- Para sistemas pequeños con una sola bomba, conexiones del manómetro y del presóstato.

b) **Equipo de impulsión.** Generalmente compuesto por una batería de bombas centrífugas de eje horizontal con sus respectivos motores eléctricos, con un equipo alternativo accionado con otra fuente energética.

Todo el conjunto está en un bastidor o base común.

c) **Cañerías.** Comprenden las de aspiración, de impulsión (ambas con un múltiple común a todas las bombas) y las de interconexión. Están provistas de válvulas de cierre y de retención, chupón de aspiración y piezas especiales.

d) **Sistema de reposición del aire.** Comprende:

- Cabezal de compresor y motor eléctrico de ½ HP o válvula dosificadora si correspondiere (pequeños equipos).
- Cañería de conexión con válvula especial aire-agua.
- Sistema de control de nivel de aire en el pulmón.

e) **Tableros según planos.** Corresponde a los sistemas de:

- Tanque hidroneumático.
- Presóstatos y manómetros.
- General de entrada a la planta.
- De iluminación y fuerza.

Para completar una planta de distribución de agua potable, en donde se ubique el tanque hidroneumático y los elementos anexos, se tienen los siguientes ítems:

- f) **Sala de máquinas.** Comprende estructuras, aberturas, pinturas, revestimientos, bases para los equipos, etc.
- g) **Sistema de energía eléctrica.** Comprende la entrada, iluminación y fuerza motriz de la planta.
- h) **Cisterna de agua.** Incluye estructuras, revestimientos, ventilaciones, tapas de acceso herméticas, drenaje, sistema de interruptor automático de los motores eléctricos de las bombas, etc.
- i) **Cercado y parqueizado de la planta.**
- j) **Equipo completo de cloración.**
- k) En el caso de una **fuentes de agua subterránea** debe presupuestarse el equipo de impulsión completo a la cisterna.

Los parámetros y características fundamentales que definen la elección de un equipo estándar son

Q_b = caudal de bombeo [m^3/h].

V_T = volumen total del pulmón [m^3].

N_b = número de electrobombas.

$p_{m\acute{a}x}$ = presión máxima de trabajo en el pulmón [kg/cm^2].

$P_{m\acute{i}n}$ = presión mínima de trabajo en el pulmón [kg/cm^2].

Δp = rango de presiones que acusa cada presóstato correspondiente al trabajo en cascada de las bombas. Cada presóstato tiene distintos valores límites pero dentro de los especificados para el pulmón ($p_{m\acute{a}x}$ y $p_{m\acute{i}n}$), material de las paredes del pulmón: chapa negra o inoxidable.

6.3.2.2. Verificación de un Equipo Comercial

Generalmente en el diseño de un abastecimiento de agua potable cuando se incluye un sistema con tanque hidroneumático, el proyectista debe recurrir a un sistema comercial.

Para la verificación de un equipo comercial ofrecido se deben cumplir los siguientes requerimientos o pasos:

- a) Determinar de acuerdo al diseño de la red de distribución:
 - $Q_{m\acute{a}xh}$ = caudal de cálculo o máximo horario futuro.
 - H_2 = altura mínima, calculada de acuerdo a 5.3.1.1.
 - P = presión de servicio máxima del caño adoptado o clase.

- b) Con $Q_{máxh}$ debe verificarse que el caudal de bombeo del equipo ofrecido Q_b está entre 1,15 y 1,25 $Q_{máxh}$.
- c) Calcular H_1 con el $p_{máx}$ del equipo pues $H_1 = p_{máx}$.
- d) Verificar si $r = p_{máx} / p_{mín} = H_1/H_2$ está dentro de la gama 1,5 a 2,0 siendo $H_2 = p_{mín}$ = presión mínima en el pulmón.
- e) Si se verifica la condición anterior, H_1 determina la cota o nivel estático del sistema.
- f) Con esa cota estática N_E y con la cota del terreno en el punto más bajo de la red, N_T , se calcula $H_E = N_E - N_T$ carga estática máxima de la red.
- g) Con H_E se verifica la clase de caño adoptada; de ser mayor se incrementa esa clase, o se disminuye H_1 pero siempre que se cumpla la condición d).
- h) Se determina la eficiencia $E_T = (100 - 1,05 \text{ a } 1,10 E_T) (r - 1)$, aplicando el rango de la condición d).
- i) Con el volumen V_T del equipo ofrecido, E_T y con el caudal Q_b , se calcula $s_{máx} = \frac{15Q_b}{V_T E_T}$ frecuencia horaria de arranques o paradas de las bombas que no debe superar el valor de 15, preferiblemente en el entorno de 11 ciclos horarios.
- j) Se tiene que $q_b = Q_b/N_b$ [m^3/s] caudal unitario de cada electrobomba elegida, siendo Q_b y N_b los valores del equipo.
- k) Con q_b se calcula J = pérdida de carga total del sistema aspiración-impulsión diseñado u ofrecido por el fabricante.
- l) Con H_1 , H_2 y J , se determinan las alturas manométricas.
- m) Se sustituyen en la fórmula $\eta = \frac{1000 q_b}{76,06 P} H_{man}$, por los parámetros del equipo adoptado, q_b caudal [m^3/s], potencia global P de la bomba [HP] y los valores máximo y mínimo de la altura manométrica H_{man} [m]. Se determinan de esa manera dos valores extremos de la eficiencia η de cada equipo impulsor.

η_1 = rendimiento electro-mecánico de un motor de potencia P [HP].

η_2 = rendimiento total de una bomba de caudal q_b .

k = huelgo requerido para absorber el par de arranque. Se sugiere para P inferior a 2 HP, $k = 50\%$; para P entre 2 y 10 HP, $k = 30\%$.

Los valores extremos calculados para η deben estar en el entorno de $\eta = K_1 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2$, siendo $K_1 = 1 - k_1$.

6.3.3. Ejemplo de Diseño Adoptando un Tanque Comercial

6.3.3.1. Equipo Hidroneumático Elegido

$Q_b = 90 \text{ m}^3/\text{h}$, caudal total a bombear por la batería de electrobombas.

$N_4 = 4$ electrobombas centrífugas de eje horizontal.

$p_{\text{máx}} = 2,5 \text{ kg/cm}^2$, presión máxima de trabajo en el pulmón equivalente a $H_1 = 25 \text{ m.c.a.}$

$p_{\text{mín}} = 1,7 \text{ kg/cm}^2$, presión mínima de trabajo en el pulmón, equivalente a $H_2 = 17 \text{ m.c.a.}$

Los presóstatos de cada bomba están programados para las siguientes presiones límites:

1ª electrobomba se detiene a $p_1 = 2,5 \text{ kg/cm}^2$ y arranca cuando

$$p_2 = 2,3 \text{ kg/cm}^2$$

2ª electrobomba se detiene a $p_1 = 2,4 \text{ kg/cm}^2$ y arranca cuando

$$p_2 = 1,9 \text{ kg/cm}^2$$

3ª electrobomba se detiene a $p_1 = 2,35 \text{ kg/cm}^2$ y arranca cuando

$$p_2 = 1,8 \text{ kg/cm}^2$$

4ª electrobomba se detiene a $p_1 = 2,3 \text{ kg/cm}^2$ y arranca cuando

$$p_2 = 1,7 \text{ kg/cm}^2$$

$P = 5,5 \text{ [HP]}$, potencia nominal del motor de cada electrobomba.

$V_T = 4,5 \text{ [m}^3\text{]}$, volumen total del pulmón.

6.3.3.2. Parámetros de la Red de Distribución Proyectada

$Q_{\text{máxh}} = 75 \text{ m}^3/\text{h}$, caudal de diseño de la red (caudal máximo horario futuro).

$N_1 = 100,00 \text{ m}$, cota o nivel del terreno en el punto "C" (de menor carga piezométrica).

$N_2 = 96,00 \text{ m}$, cota o nivel del terreno en el punto "A" (eje de las electrobombas).

$N_3 = 80,00 \text{ m}$, cota o nivel del terreno o trasdós del caño en "B" (punto más bajo).

$h = 5,00 \text{ m}$, suma de las pérdidas de carga parciales o total de esa pérdida de carga desde "A" hasta "C".

$a = 8,00 \text{ m}$, carga piezométrica mínima adoptada en el punto "C".

Se tiene que $z = 100,00 - 96,00 = 4,00 \text{ [m]}$, suma de desniveles geométricos desde "A" hasta "C" que es positiva por ser mayores los desniveles con rampa (ascendente).

$H_2 = a + h + z = 8,00 + 5,00 + 4,00 = 17,00$ m, altura o columna de agua, cuyo equivalente de presión es $p_2 = 1,7 \text{ kg/cm}^2$, que coincide con el $p_{\min} = 1,7 \text{ kg/cm}^2$ del pulmón adoptado.

La cota o nivel piezométrico en "A" o sea el inicial para el cálculo es: $N_2 + H_2 = 96,00 + 17,00 = 113,00$ [m].

La cota o nivel piezométrico en "C" es: $N_2 + H_2 - h = 96,00 + 17,00 - 5,00 = 108,00$ [m].

6.3.3.3. Verificación de los Parámetros Básicos

1ª condición: $\frac{Q_b}{Q_{\max h}} = \frac{90 \text{ m}^3 / h}{75 \text{ m}^3 / h} = 1,20$ Se cumple la condición de estar entre 1,15 y 1,20.

2ª condición: $\frac{p_{\max}}{p_{\min}} = \frac{2,5 \text{ kg/cm}^2}{1,7 \text{ kg/cm}^2} = 1,47 \cong 1,5$ Se cumple la condición de coincidir con el valor límite inferior de 1,5 siendo el superior de 2,0.

3ª condición: se adopta $V_1 = 1,05 E_T$; se tiene que $E_T = (100 - 1,05 E_T) (1,47 - 1)$; o sea que $E_T = 31,47 \%$ de V_T .

Como $s_{\max} = \frac{15 Q_b}{V_T E_T}$ y reemplazando en esta fórmula $Q_b = 90 \text{ m}^3/h$, $V_T = 4,5 \text{ m}^3$ y

$E_T = 31,47$, se tiene: $s_{\max} = \frac{15 \cdot 90}{4,5 \cdot 31,47} = 9,5$ frecuencias horarias teóricas del conjunto,

que es algo inferior al valor normal $s_{\max} = 11$. Se cumple esa condición.

4ª condición: Haciendo $H_1 = 25$ m de columna máxima, equivalente a la presión máxima $p_{\max} = 2,5 \text{ kg/cm}^2$ en el pulmón, se tiene: $N_E = N_2 + h_1 = 96,00 + 25,00 = 121,00$ m = nivel estático del sistema, $H_E = N_E - N_2 = 121,00 - 80,00 = 41,00$ m = carga estática máxima sobre el caño de clase 6 (presión de servicio de 6 kg/cm^2). Como este caño admite una columna $H_E = 60$ m, equivalente a esa presión de servicio, se cumple esa condición o sea que es correcto el caño adoptado en el sector del punto "B".

5ª condición: Como $\eta = \frac{1000 q_b}{76,06 p} H_{\text{man}}$ y reemplazando en esta fórmula

$q_b = 22,5 \text{ m}^3/h = 0,00625 \text{ m}^3/s$, $P = 5,5 \text{ HP}$, se tiene:

$\eta = \frac{1000 \cdot 0,00625}{76,06 \cdot 5,5} H_{\text{man}} = 0,01494 H_{\text{man}}$ = rendimiento total de la electrobomba.

La altura manométrica varía desde un máximo para $H_1 = 25,00$ m hasta un mínimo para $H_2 = 17,00$ m, es decir:

$H_{\text{man}} \text{ máxima} = H_1 + h = 25,00 + 8,00 = 33,00$ m, altura manométrica máxima.

$H_{\text{man}} \text{ mínima} = H_2 + h = 17,00 + 8,00 = 25,00 \text{ m}$, altura manométrica mínima.

Entonces: $\eta_{\text{máx}} = 0,01494 \cdot 33,00 = 0,493$, rendimiento global máximo.

$\eta_{\text{mín}} = 0,01494 \cdot 25,00 = 0,374$, rendimiento global mínimo.

$\eta_1 = 0,815$, rendimiento electro-mecánico de un motor de potencia (estimado) $P = 5,5 \text{ HP}$.

$\eta_2 = 0,565$ = rendimiento total de una bomba centrífuga de $q_b = 6,23 \text{ lts/s}$.

$k_1 = 30\%$, huelgo por el par de arranque de un motor de $P = 5,5 \text{ HP}$.

Entonces $\eta_t = \eta_1 \cdot \eta_2 (1 - k_1) = 0,815 \cdot 0,565 (1 - 0,30) = 0,332$, rendimiento global del motor de una electrobomba de esas características.

En resumen: el equipo comercial se adapta a las condiciones de proyecto.

6.4. OPERACIÓN NORMAL DE UN EQUIPO HIDRONEUMÁTICO

6.4.1. Parámetros a Considerar en el Funcionamiento

Los parámetros fundamentales a considerar en el funcionamiento de un tanque hidroneumático son:

Q = demanda o caudal de consumo de todo el sistema, red de distribución y pulmón [m^3/h].

N = nivel líquido dentro del pulmón que debe variar entre un límite superior ó $N_{\text{máx}}$ y un límite inferior $N_{\text{mín}}$.

p = presión de trabajo del pulmón en un instante dado, en kg/cm^2 .

La presión p es acusada por cada uno de los presóstatos que regulan el funcionamiento de la correspondiente electrobomba.

Cada presóstato está programado dentro de dos límites, el superior p_1 que provoca la detención de la electrobomba correspondiente y el inferior p_2 que produce el arranque de la misma. Los presóstatos pueden programarse dentro de la gama $0\text{-}4 \text{ kg/cm}^2$.

En uno de los presóstatos $p_1 = p_{\text{máx}}$ mientras que en los restantes, p_1 tiene valores decrecientes. En otro presóstato $p_2 = p_{\text{mín}}$ mientras que en los restantes, p_2 tiene valores crecientes.

6.4.2. Ejemplo. Análisis de la Operación de un Equipo Hidroneumático

Ejemplo

Equipo Adoptado

$Q_b = 90 \text{ m}^3/\text{h}$, caudal total de bombeo.

$N_b = 4$ electrobombas centrífugas de eje horizontal.

$q_b = 22,5 \text{ m}^3/\text{h}$, caudal nominal de cada electrobomba.

$p_{\text{máx}} = 2,5 \text{ kg/cm}^2$, presión de trabajo máxima en el pulmón.

$P_{\text{mín}} = 1,7 \text{ kg/cm}^2$, presión de trabajo mínima en el pulmón.

Electrobomba N° 1: presóstato regulado para $p_1 = 2,5 \text{ kg/cm}^2$ y $p_2 = 2,3 \text{ kg/cm}^2$.

Electrobomba N° 2: presóstato regulado para $p_1 = 2,4 \text{ kg/cm}^2$ y $p_2 = 1,9 \text{ kg/cm}^2$.

Electrobomba N° 3: presóstato regulado para $p_1 = 2,35 \text{ kg/cm}^2$ y $p_2 = 1,8 \text{ kg/cm}^2$.

Electrobomba N° 4: presóstato regulado para $p_1 = 2,30 \text{ kg/cm}^2$ y $p_2 = 1,7 \text{ kg/cm}^2$.

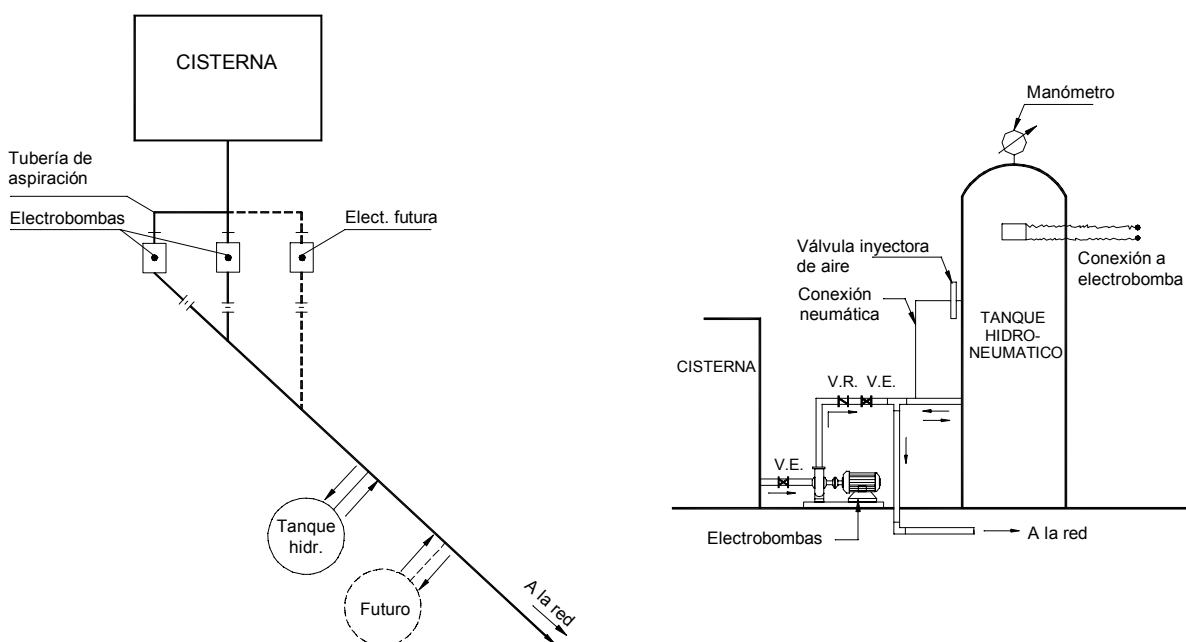


Figura 30. Esquema de la instalación

Funcionamiento de las Electrobombas para Demanda Creciente y Sostenida

Esto ocurre cuando la demanda de la red domiciliaria comienza a aumentar desde un valor nulo hasta el máximo horario. Al mismo tiempo las electrobombas comienzan a suministrar caudales crecientes entrando a funcionar en cascada. Así se tiene:

- Cuando $p = p_{\text{máx}} = 2,50 \text{ kg/cm}^2$ ($Q = 0$). Todos los equipos detenidos.
- Cuando $p_2 = 2,30 \text{ kg/cm}^2$ (Q llega a $22,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Arranca bomba N° 1. Detenidas N° 2, 3 y 4.
- Cuando $p_2 = 1,90 \text{ kg/cm}^2$ (Q llega a $45 \text{ m}^3/\text{h}$). Arranca bomba N° 2. Detenidas N° 3 y 4.
- Cuando $p_2 = 1,80 \text{ kg/cm}^2$ (Q llega a $67,5 \text{ m}^3/\text{h}$). Arranca bomba N° 3. Detenida N° 4.
- Cuando $p_2 = 1,70 \text{ kg/cm}^2$ (Q llega a $90 \text{ m}^3/\text{h}$). Arranca bomba N° 4.

Funcionamiento de las Electrobombas para Demanda Decreciente y Sostenida

Este caso se produce cuando la demanda de la red domiciliaria comienza a disminuir desde un máximo hasta un mínimo. Las electrobombas comienzan a suministrar caudales decrecientes deteniéndose en cascada. Así se tiene:

- Cuando $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$, $p = 1,7 \text{ kg/cm}^2 = p_{\text{mín}}$. Todos los equipos funcionando.
- Cuando Q baja hasta $66,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $p_1 = 2,3 \text{ kg/cm}^2$. Se detiene bomba N° 4. Funcionan N° 1, 2 y 3.
- Cuando Q baja hasta $45 \text{ m}^3/\text{h}$, $p_1 = 2,35 \text{ kg/cm}^2$. Se detiene bomba N° 3. Funciona N° 1 y 2.
- Cuando Q baja hasta $22,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $p_1 = 2,40 \text{ kg/cm}^2$. Se detiene bomba N° 2. Funciona N° 1.
- Cuando Q baja hasta 0, $p_1 = 2,50 \text{ kg/cm}^2 = p_{\text{máx}}$. Se detiene bomba N° 1. Funciona ninguna.

Conclusiones de la operación

- La electrobomba N° 1 trabaja mayor número de horas, mientras que la N° 4 es la que tiene menor número de horas funcionando.
- Periódicamente el operador debe cambiar la conexión de los presostatos con las electrobombas a fin de posibilitar que todas tengan iguales horas trabajadas durante el año y evitar por consiguiente el desgaste prematuro de alguna de ellas.
- Cuando se bombea hay que cubrir la demanda de la red de distribución y permitir el almacenamiento E_T .

7. BOMBAS DE VELOCIDAD VARIABLE PARA REGULAR PRESIONES

Las bombas son máquinas de fluido hidráulicas y que transforman energía mecánica en hidráulica, es decir son máquinas generadoras.

En ellas están comprendidas las denominadas rotodinámicas, que comprenden a las radiales o centrífugas, las de flujo mixto y las axiales las que fundamentalmente utilizan la energía cinética (en primer término) para producir un aumento de la presión (altura manométrica) a un determinado caudal.

Son diseñadas para operar a una velocidad de rotación (la nominal) de donde surgen los estados de cargas estáticas y dinámicas que actúan sobre sus elementos componentes, los que fundamentalmente comprenden:

- Caja espiral o voluta.
- Rotor o impulsor con alabes.
- Eje de accionamiento.
- Sellos mecánicos y/o prensa estopa.
- Cojinetes de empuje radial y/o axial.
- Tubo difusor.
- Corona directriz.

Es decir, dichos elementos trabajando a velocidades inferiores a la nominal se hallan dentro de las tolerancias y tensiones, de acuerdo a los diferentes materiales que los componen.

Desde el punto de vista operacional no existe limitación alguna en que una bomba rotodinámica trabaje con una velocidad de giro del impulsor inferior a la nominal.

La relación entre la velocidad de rotación y las alturas y caudales responden a las siguientes expresiones de acuerdo a las leyes de semejanza, manteniendo el diámetro del impulsor constante:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

donde:

H = altura manométrica de elevación

Q = caudal

n = número de revoluciones

En la **Figura 31** se observan las relaciones H/Q para diversos números de revoluciones del impulsor así como los valores del rendimiento para una bomba (obtenida de un folleto de una firma proveedora de bombas).

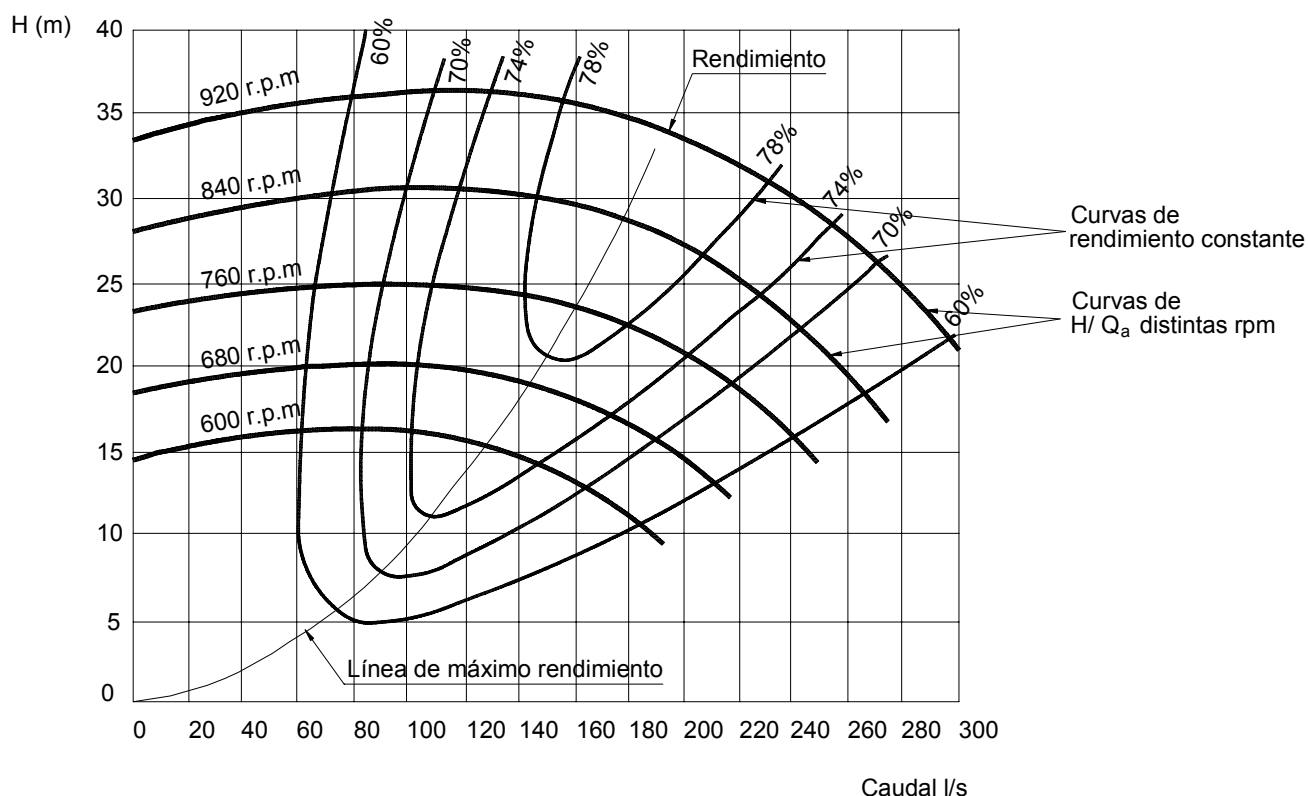


Figura 31. Curva de funcionamiento H/Q y rendimientos a diversos números de revoluciones n

Fijado el caudal máximo a suministrar a la red y las presiones máximas y mínimas se debe proceder, en base a las curvas suministradas por el fabricante, a seleccionar un equipo que para dichos valores suministre rendimientos aceptables dentro de las posibilidades que ofrecen los fabricantes.

En la **Figura 32**, para un equipo de velocidad nominal 1500 r.p.m, con presiones máximas y mínimas a suministrar a la red de 20 y 25 m y un caudal máximo de $1150 \text{ m}^3/h$, se observa una zona delimitada por la figura A B C D donde la bomba cumple la consigna de diseño establecida.

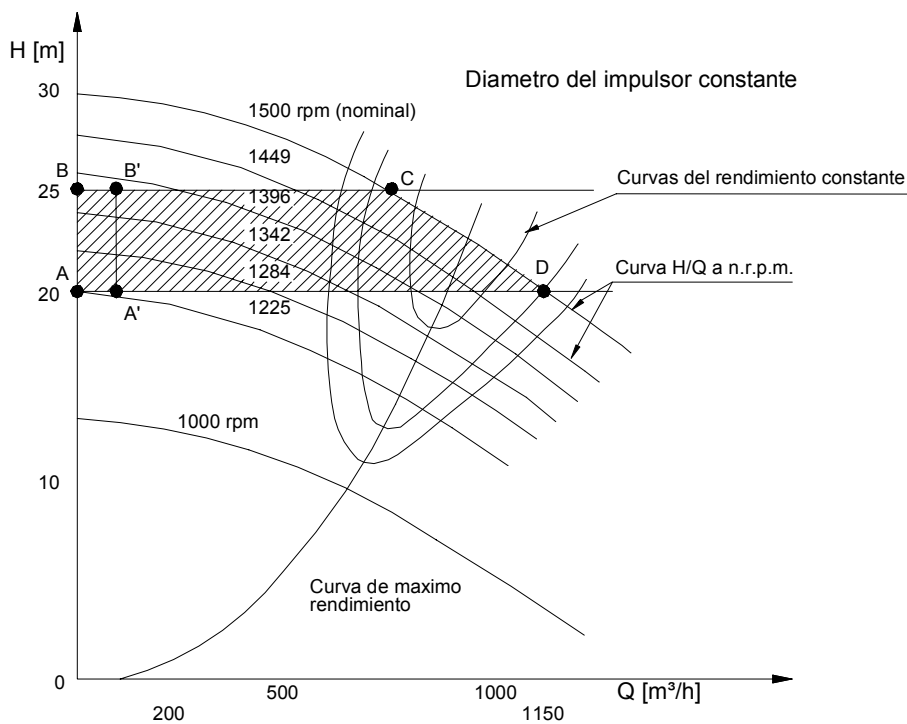


Figura 32. Curvas H/Q rendimiento para una bomba de velocidad variable

El cambio en el número de revoluciones del motor de accionamiento debe estar comandado por un sensor de presión ubicado en la tubería de impulsión próximo a la brida de salida de la bomba.

Una unidad inteligente puede además seleccionar dentro de la zona de operación A B C D la pareja H/Q a la cual corresponda el rendimiento máximo y la mínima potencia consumida.

Asimismo es recomendable establecer con el fabricante un caudal mínimo operativo para evitar posibles recalentamientos de anillos rozantes, prensaestopas, sellos mecánicos y/o cojinetes, tal como el indicado por la figura A' B' C D.

Se hace notar que, como en toda instalación de bombeo, con el fin de aumentar el caudal a suministrar se pueden conectar diversos equipos en paralelo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- American Water Works Association (AWWA). Curso de Abastecimiento en la Distribución de Agua. New York, USA, 1962.
- Davis, Victor. Tratado de Hidráulica Aplicada. Editorial Labor. Madrid, España, 1956.
- Fair G., Geyer J. Y Okun D. Abastecimiento de Aguas y Remoción de Aguas Residuales. Tomo I. Editorial Limusa, México, 1968.
- National Board of Fire Underwriters. Standar schedule for Grading Cities and Towns of the United States with Reference to their Fire Defenses and Physical Conditions. New York, USA, 1956.
- Organización Panamericana de la Salud. Manual de Operación y Mantenimiento de Instalaciones y Equipos de un Acueducto. Documento N° ES 7. Washington, USA, 1970.
- Rippl W. The Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply. Proc. Institute of Civil Engineers, 71, 270. USA, 1983.
- SNAP. Manual del Curso para Operadores Supervisores de Operación y Mantenimiento. Tomo II. Bs. As., Argentina, 1972.
- SNAP. Normas de Estudios, Diseño y Presentación de Proyectos de Provisión de Agua Potable para Poblaciones entre 15.000 y 30.000 habitantes. Bs. As., Argentina, 1984.
- SNAP. Normas de Estudios, Diseño y Presentación de Proyectos. Tomo II. Bs. As., Argentina, 1972.
- Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Instituto de Ingeniería Sanitaria. Abastecimiento de agua potable a comunidades rurales. Publicación N° 7, 1971.
- Valdez Enrique C. Abastecimiento de Agua Potable – Universidad Nacional Autónoma de México. 1994.
- Wagner E. y Lanoix J. Abastecimiento de Agua en las zonas Rurales y en Pequeñas Comunidades. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza, 1961.