

CAPÍTULO 6

Estaciones de bombeo para desagües pluviales

Cecilia Lucino, Facundo Ortiz y Sergio Liscia

Necesidad del bombeo en los desagües pluviales

Los desagües pluviales permiten el drenaje de las ciudades, conduciendo las aguas de las lluvias hacia sectores donde no ocasionen problemas, generalmente los mismos hacia los cuales el agua escurre naturalmente, pero con otra dinámica. El crecimiento permanente de las áreas impermeabilizadas, el continuo crecimiento de la población, las obras de infraestructura urbana y otros factores hacen que estas obras sean progresivamente menos eficientes y se produzcan escurrimientos y retenciones superficiales cada vez mayores, causando inundaciones.

Existen innumerables alternativas para mitigar estos efectos, pero se las puede dividir en dos grupos: uno, asociado a incrementar la red de drenaje, porque esta es insuficiente (este tema no será abordado en este libro); el otro, a proveer energía adicional por la incorporación del bombeo.

El bombeo permite, o bien acelerar la velocidad del escurrimiento del agua, disminuyendo el nivel en el extremo inferior y, consecuentemente, aumentando la capacidad del sistema de drenaje, o bien independizar al sistema de drenaje del nivel del agua del cuerpo receptor. Ambos casos son similares conceptualmente ya que se materializan con la incorporación de un sistema de bombeo en el extremo de aguas abajo del conducto pero, en el segundo caso, requiere la materialización de una protección (por ejemplo, un endicamiento) para impedir el ingreso del agua desde el cuerpo receptor hacia la ciudad.

El primer caso explica el comportamiento del sistema de drenaje ante un evento de lluvia sobre la cuenca urbana y podemos entenderlo con el esquema simplificado de la Fig. 6.1, en la que se muestra una red de conductos de drenaje urbano que inicialmente pueden conducir los caudales asignados, generalmente de recurrencias de 2, 5 o hasta 10 años (excepcionalmente, 50 años, aunque solo se ha dado en muy pocos lugares del mundo), representado en la etapa de la ciudad inicial o primera etapa.

En la situación de la ciudad actual, representada como segunda etapa, se han expandido las áreas impermeables y ha aumentado la densidad poblacional, la red de drenajes ya no alcanza a evacuar las lluvias de diseño y, por diferentes motivos, no es posible su ampliación.

En la tercera etapa, la incorporación de energía mecánica, con la instalación de una estación de bombeo, permite incrementar la pendiente de la línea de energía, permitiendo incrementar la

velocidad del agua y, con ello, la evacuación de mayores caudales, generando una mejora en el sistema de drenaje.

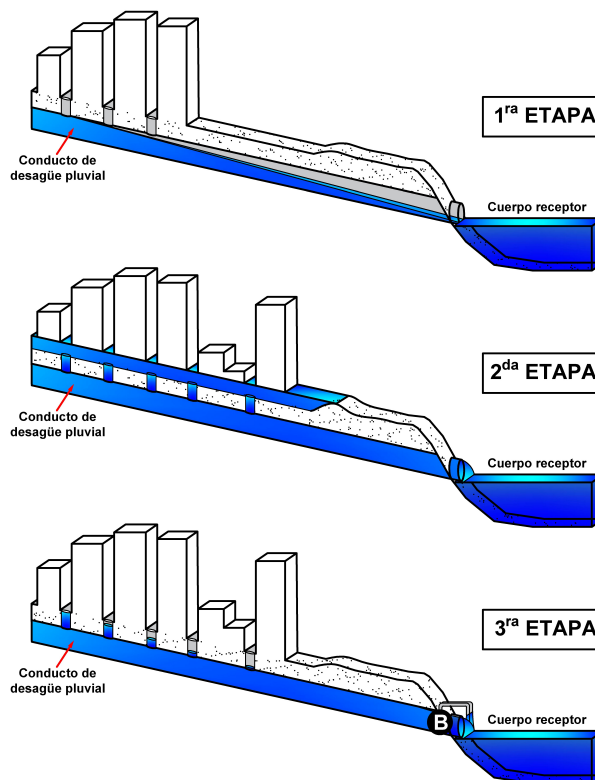


Figura 6.1: Etapas conceptuales de desarrollo de los desagües urbanos asociadas a eventos de lluvia en la cuenca urbana

En el segundo caso se incorpora como variable el nivel que puede adoptar el cuerpo receptor que, avanzando sobre la planicie de inundación, afecta las áreas bajas de la cuenca urbana. Siguiendo una secuencia de desarrollo de la urbanización similar a la descrita previamente, se pueden diferenciar las siguientes etapas (Fig. 6.2):

En la primera etapa, la población se mantiene alejada de las zonas de desborde del cuerpo receptor (lago, río) y se construyen conductos de desagüe por gravedad.

En la segunda etapa, la población se extiende sobre las proximidades del cuerpo receptor y las zonas bajas del terreno, donde se presentan inundaciones como consecuencia de los distintos fenómenos pluviales y por las crecidas del cuerpo receptor.

En la tercera etapa se construyen terraplenes que impiden las inundaciones debidas a niveles altos del cuerpo receptor. Generalmente en esta etapa se colocan compuertas automáticas que impiden el ingreso del agua hacia el área poblada a través del sistema de conductos.

Finalmente, en la cuarta etapa, para solucionar el problema que se origina cuando, en combinación con situaciones en las que el nivel del cuerpo receptor es elevado, llueve sobre la cuenca interna, se plantea la construcción de una estación de bombeo. Esta permite la evacuación de los volúmenes internos independientemente de los niveles externos.

Las razones por las cuales áreas que se encuentran naturalmente sometidas a crecidas, cercanas a los cuerpos receptores, se urbanizan, son múltiples:

- Cuando la frecuencia de este fenómeno es baja y no llega a integrarse claramente en la

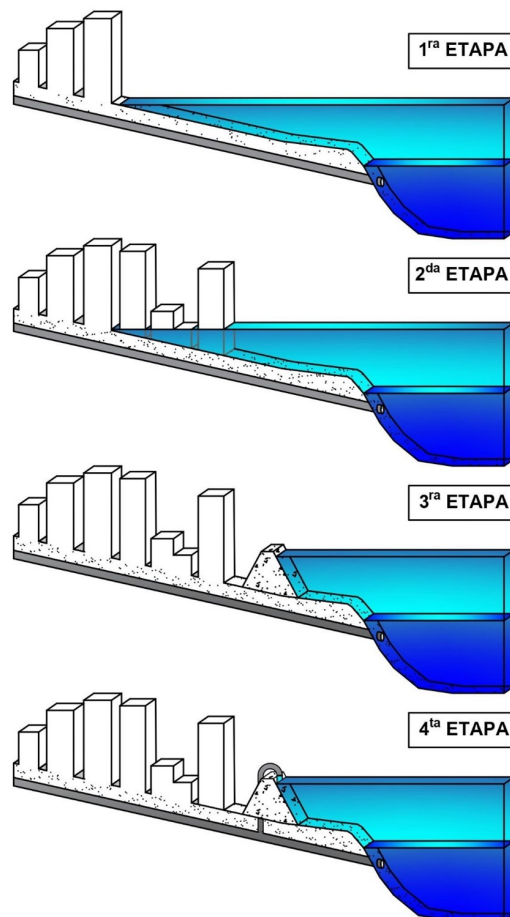


Figura 6.2: Etapas conceptuales del desarrollo de los desagües urbanos asociadas a la crecida del cuerpo receptor

memoria colectiva. Es el caso de poblaciones en las costas de lagos o lagunas tales como las de Mar Chiquita, en Córdoba o Carhué, en la provincia de Buenos Aires;

b) Cuando, al contrario que el caso anterior, las crecidas son frecuentes y se asumen por parte de la población como algo natural, y toma respecto a ello ciertas precauciones para que no produzcan daños de mucha gravedad. En estos casos la necesidad de proteger las áreas tiene como objeto mejorar la calidad de vida, generar inversiones y, en términos generales, evitar que estos sectores configuren zonas marginales. Es el caso de muchos de los sectores aledaños al Riachuelo (río Matanza), río de La Plata y río Reconquista;

c) Por último, debe contemplarse la eventualidad de que las áreas urbanas aumenten la respuesta hidrológica de la cuenca y la frecuencia de las inundaciones. En estos casos la alternativa de aumentar el tamaño del curso está impedida por el mismo crecimiento urbano.

Hipótesis de diseño de una estación de bombeo

Veamos ahora las situaciones que se plantean dentro de un área urbana enmarcada por terraplenes con un sistema de desagüe y estaciones de bombeo. La primera situación contempla un nivel de restitución relativamente bajo, que habilita al sistema de desagües a trabajar por

gravedad, prescindiendo de la estación de bombeo. En este caso el sistema funciona en forma tradicional, sin estación de bombeo, y su diseño responderá a los criterios habituales (Fig. 6.3a).

La segunda situación es la que emerge cuando el nivel de restitución impide la descarga por gravedad del sistema de desagües y debe operar la estación de bombeo. En este caso el sector urbano adyacente al curso tiene impedida toda descarga por superficie o a gravedad, y su seguridad depende exclusivamente de la capacidad de la estación de bombeo (Fig. 6.3b).

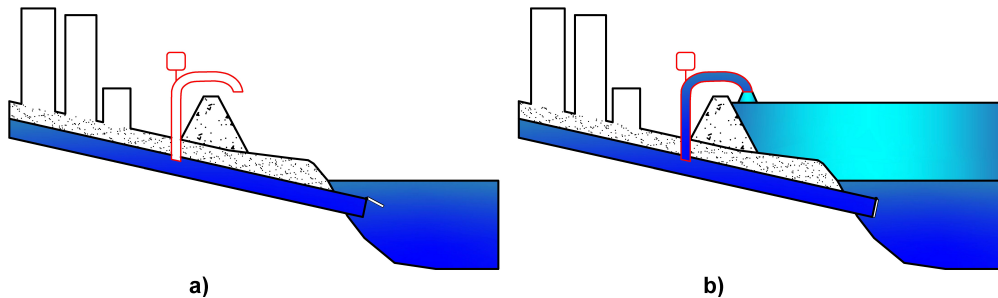


Figura 6.3: Esquema de endicamiento y estación de bombeo a) descarga por gravedad b) descarga por bombeo

Del mismo modo que el entubamiento de un curso natural dentro del casco urbano, las estaciones de bombeo, en general, aumentan la seguridad hasta ciertos valores del caudal o recurrencia, por encima de los cuales la capacidad de los conductos, diseñados para operar por gravedad, puede ser incluso menor que la propia del cauce (Fig. 6.4). El problema reside en la rigidez que la estación de bombeo exhibe para evacuar los caudales excedentes. Mientras que todo sistema que actúa por gravedad, entubado o no, está en condiciones de aumentar su capacidad con el solo hecho de elevar sus niveles piezométricos, en el caso de las estaciones de bombeo, en cambio, una vez definida su capacidad, no puede incrementarse frente a las condiciones externas. La diferencia entre los caudales ingresantes (cuando estos superan a los de diseño) y los bombeados, generan volúmenes que se acumularán en las zonas bajas, pero supuestamente protegidas.

Cuando, dentro de un casco urbano, se plantea la solución de endicamientos y bombeo como sistema de defensa, es necesario intentar algunas de las soluciones siguientes, que tienden a disminuir los requerimientos de capacidad de los equipos (Fig. 6.5):

- a) Si existen zonas urbanas con cota suficiente, destinarles un sistema de desagües exclusivamente por gravedad, que no recargue las zonas deprimidas;
- b) Si existe la posibilidad de que el sector urbano se siga desarrollando hacia zonas altas, es recomendable programar la construcción de colectores paralelos al curso cuya descarga se producirá a alguna distancia aguas abajo del cuerpo receptor.

En general, es necesario poner el acento en la necesidad de programar las obras de infraestructura urbana de pavimentos y desagües en conjunto. Los diferentes costos relativos de estas obras generan extensos programas de pavimentación que provocan cambios sustanciales en los coeficientes de escorrentía superficial y por lo tanto aumentos abruptos en el tiempo de los derrames superficiales. Todo esto lleva a la necesidad de plantear obras de altos costos y que conllevan riesgos potenciales a la población que en general los desconoce.

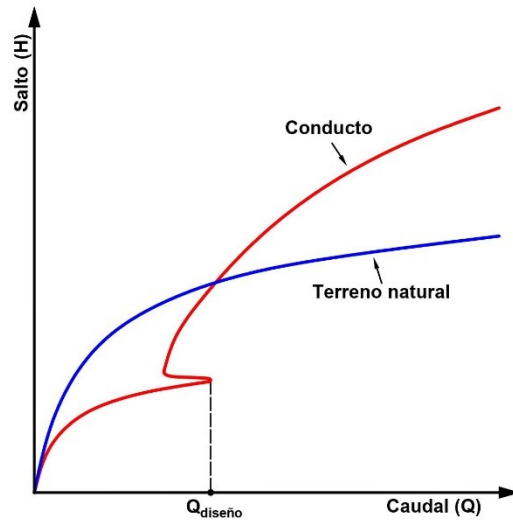


Figura 6.4: Cambio en las condiciones de escurrimiento con desagües pluviales que descargan a una estación de bombeo

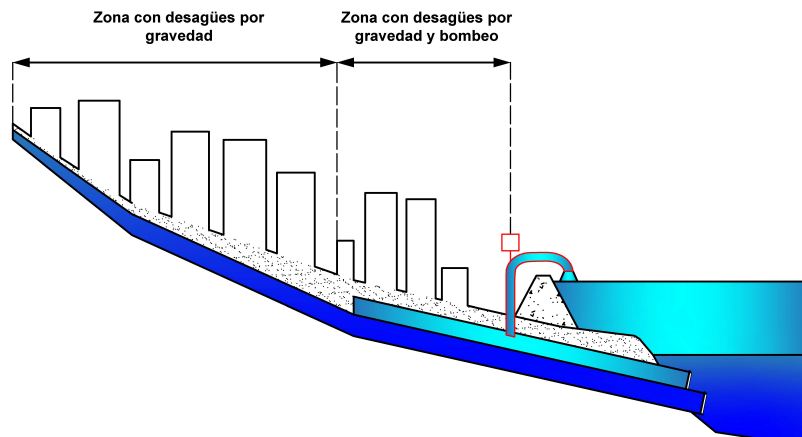


Figura 6.5: Alternativas de desagües por gravedad paralelos

Características generales de las estaciones de bombeo

Los tres grandes grupos en que podemos clasificar las estaciones de bombeo, de acuerdo con su funcionalidad, son: las destinadas a la evacuación de desagües pluviales; las orientadas a la impulsión de agua para acueductos y las estaciones de bombeo de líquidos cloacales. En este capítulo nos referiremos en general a las estaciones de bombeo de desagües pluviales y en el Capítulo 8 a las de acueductos, quedando las de líquidos cloacales para ser analizadas dentro de los temas pertenecientes a la especialidad de la Ingeniería Sanitaria.

En general, las estaciones de bombeo de desagües pluviales responden a una modalidad: que las bombas se encuentran dentro de la dársena de bombeo donde se va a realizar el traspaso del agua hacia un cuerpo receptor. En este caso se utilizan bombas dispuestas según dos configuraciones posibles: bombas con motor sumergido o bombas con motor en seco. También es usual que muchas de estas contribuyan a la evacuación que se da naturalmente por gravedad, bien sea en forma conjunta o bien alternadamente de acuerdo con las condiciones de la

restitución. Es decir, son sistemas mixtos: por gravedad y bombeo.

Por otro lado, cualquiera sea el modo de operación adoptado, estas estaciones de bombeo intervienen en forma intermitente, en respuesta a la necesidad de evacuar las crecidas que son producto de los períodos de lluvias más intensas. Estas normalmente tienen duraciones de poco tiempo. De manera que las bombas normalmente no están en operación. Este carácter de operación discontinua deberá ser tenido en cuenta por el proyectista y también exigirá un mantenimiento de los equipos que garantice que las bombas efectivamente funcionen cuando es necesario que lo hagan.

Por el contrario, las estaciones de bombeo de los acueductos, en general, operan prácticamente en forma continua, es decir que todo el tiempo están impulsando un cierto caudal, más allá de que mediante alguna cisterna pueda controlarse la cantidad de horas que operan las bombas. Es posible clasificar estas estaciones de bombeo según dos criterios. El primero de ellos concierne a las instalaciones en las que las estaciones de bombeo están asociadas a una cisterna, la cual a su vez puede adquirir dos configuraciones posibles: con cámara seca o cámara húmeda. Estas tipologías se identifican con las bombas: respectivamente, si estas se encuentran dentro del cuenco o cisterna donde se acumula el agua que será bombeada; o si se encuentran fuera del agua, o sea en seco, conectándose mediante las tuberías respectivas a la cisterna. El segundo criterio está asociado con el lugar donde se ubica la estación de bombeo. Es común utilizar dos posiciones bien diferenciadas: bombeo desde la cisterna o bombeo desde la misma tubería. En este último caso se las denomina 'en línea', haciendo referencia a que impulsan directamente sobre la línea de conducción de agua. A su vez, la configuración en línea es adaptable a la necesidad de disponer las bombas en paralelo o en serie. Las demás alternativas de bombeo, con dársenas –en los pluviales– o cisternas –en los acueductos–, usualmente solo admiten la disposición en paralelo.

Condiciones generales para el diseño de las estaciones de bombeo

Como norma general, el diseño debe obtener la operación deseada al mínimo costo posible. Los cálculos para evaluar la viabilidad de un diseño de estación de bombeo deben involucrar los costos anualizados, bien sean las inversiones iniciales como los costos de operación y de mantenimiento, además de los costos de repuestos empleados durante la vida útil asignada en el proyecto. Generalmente, el mínimo costo se obtiene con un mínimo número de bombas. De todas maneras, se recomienda un mínimo de dos bombas, y otras condiciones permiten que este número se eleve.

El dato inicial para contemplar en el diseño de una estación de bombeo es el caudal máximo que se debe impulsar. Este valor, en su origen, difiere en las estaciones de bombeo de desagües pluviales respecto de las de acueductos destinados a impulsar el agua para los consumos humanos y/o industriales (Fig. 6.6).

En las primeras, este valor proviene de los estudios de las lluvias sobre una cuenca, que

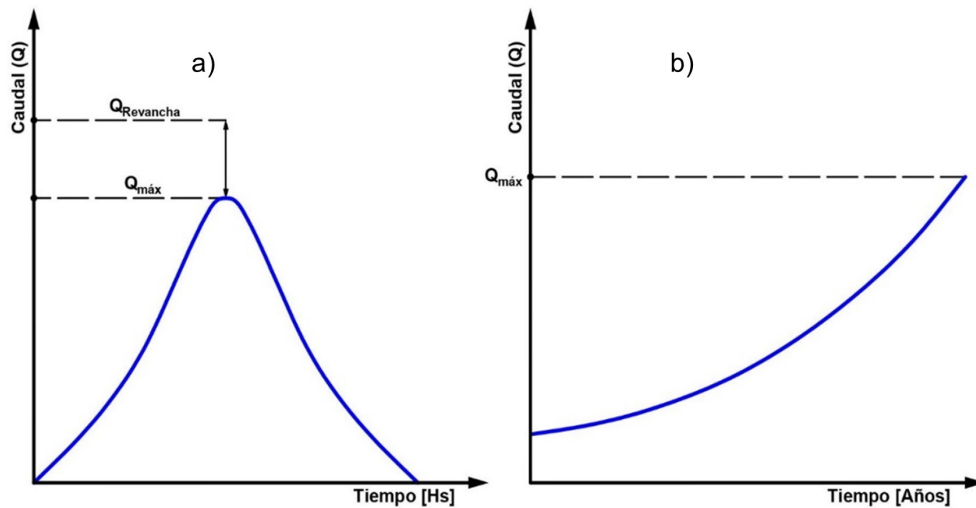


Figura 6.6: Caudal de diseño: a) EB para desagües pluviales; b) EB para acueductos

en la mayoría de ellos se plasman en un hidrograma de crecida, asociado a una recurrencia dada, en el que quedan de manifiesto los excedentes pluviales que deberán ser evacuados por la estación de bombeo. En este caso, el caudal de diseño se corresponde con el máximo valor del hidrograma, sin considerar el efecto de atenuación que la estación de bombeo puede producir debido a disponer de un volumen de operación. En algunas ocasiones este valor máximo se incrementa en una determinada proporción, a modo de revancha. Este caudal, junto con la altura de impulsión, permite seleccionar el tipo de bomba a utilizar; queda por resolver, no obstante, el número de bombas a seleccionar para la estación de bombeo. Cuando se trata de acueductos, el caudal de diseño se define a partir de la proyección de la demanda, usualmente entre 10 o 20 años.

Configuración general para estaciones de bombeo de desagües pluviales

En el caso de los proyectos de desagües pluviales con bombas, usualmente la estación de bombeo está constituida por una dársena de bombeo, donde se colocan las bombas, tal como muestra en los esquemas típicos de instalación de la Fig. 6.7 y la Fig. 6.8. La dársena deberá propender a la generación de las condiciones hidráulicas propicias al correcto funcionamiento de las bombas, de manera que con la obra más económica sea posible evacuar el caudal seleccionado, y las condiciones de mantenimiento permitan operar según el tiempo previsto.

La Fig. 6.7 representa, a la izquierda, una solución de bombeo en tubo de hormigón. Esta es una solución sencilla, de pocos requerimientos de instalación, adecuada a bombeos con nivel de descarga constante. En la Fig. 6.7 de la derecha se presenta una solución en la cual, para la impulsión, se emplea un caño camisa y los codos o accesorios necesarios, también para condiciones de descarga con nivel constante.

La Fig. 6.8 muestra, a la izquierda, una solución para situaciones de bombeo hacia una des-

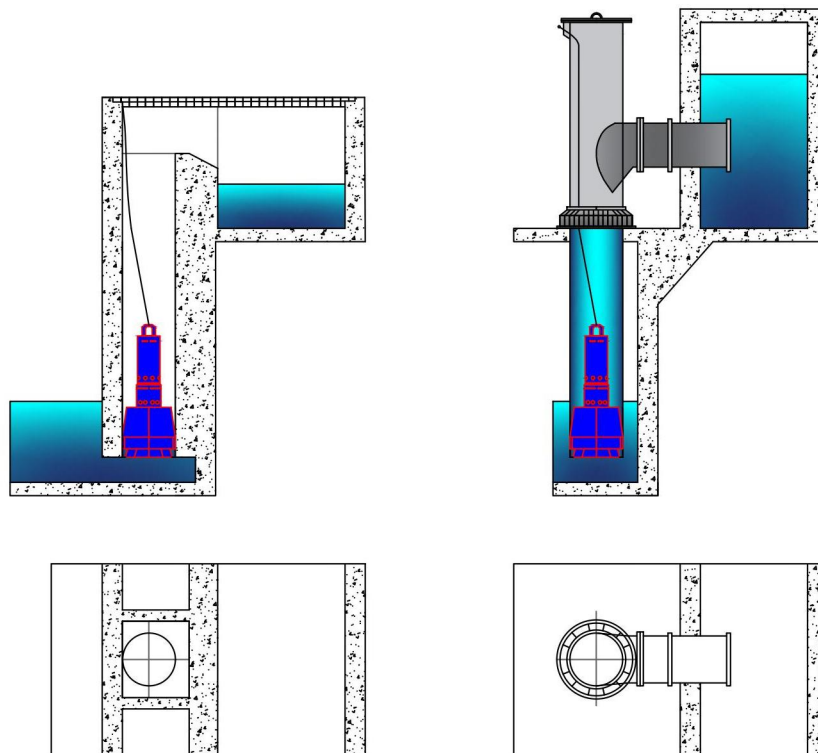


Figura 6.7: Esquemas de instalación de bombas en estaciones de bombeo para desagües pluviales

carga a superficie libre con niveles variables. Ante esto, la solución plantea el uso de un sifón para evitar el retroceso del flujo cuando las bombas están detenidas. La Fig. 6.8 de la derecha muestra una solución para evitar el retroceso del flujo mediante una válvula de clapeta. Esta segunda solución es aplicable a condiciones de descarga cerradas con niveles variables.

Las dársenas de bombeo constan de un recinto desde el que la bomba succiona el agua y de una instalación (metálica o de hormigón) que la conduce hasta el cuerpo receptor. Esta configuración puede ser diferente. En el caso de la instalación que se muestra en la Fig. 6.9a y b), las bombas seleccionadas son sumergibles, y erogan un cierto caudal a través de una tubería que desemboca posteriormente en el cuerpo receptor de los excesos superficiales.

Dimensiones principales de la estación de bombeo

Para definir las dimensiones principales en planta y corte, es necesario conocer los siguientes parámetros (Fig. 6.10): a) La cota del fondo de la estación de bombeo; b) El número de bombas; c) El área de la estación de bombeo.

La cota de fondo es un parámetro de diseño de gran relevancia, dado que se vincula en forma directa con uno de los costos mayores de la obra: la profundidad de excavación. La definición de la cota de fondo de la estación de bombeo es el producto de un proceso iterativo en el que interviene, entre otras verificaciones y condiciones, el nivel del conducto de llegada a la dársena y los niveles de operación, en particular, el nivel mínimo, que configura la situación más crítica tanto desde el punto de vista hidrodinámico –la formación de resaltos en la transición de entrada puede ser perjudicial y hasta prohibitivo–, como respecto de la seguridad de las bombas por efecto de la cavitación y la formación de vórtices. En cualquier caso, las condiciones a contemplar en relación

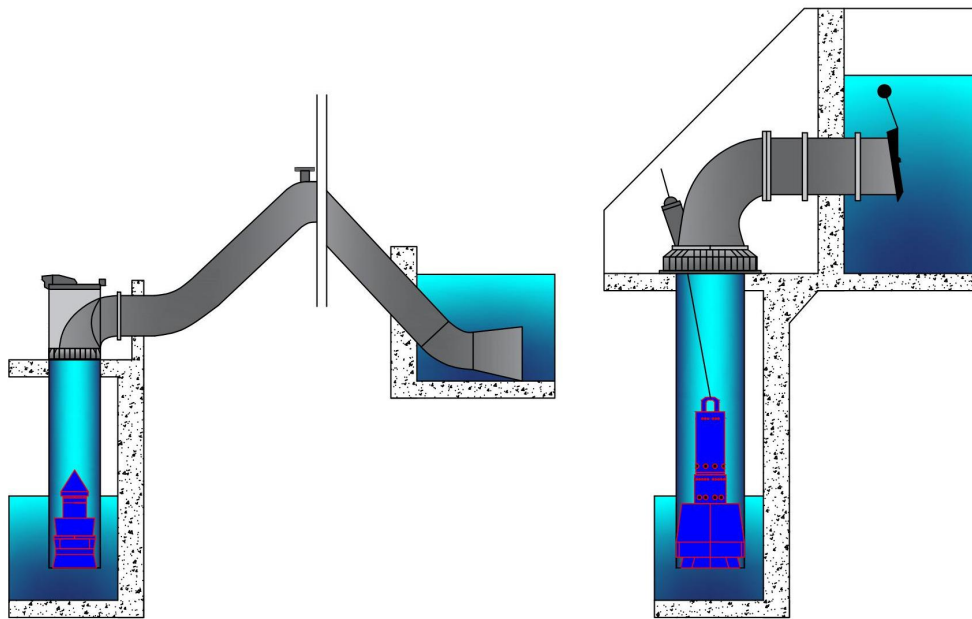


Figura 6.8: Esquemas de instalación de bombas en estaciones de bombeo para desagües pluviales

con la cavitación y la vorticidad son comunes a todas las estaciones de bombeo, por lo que serán analizadas más adelante.

Para determinar el número de bombas de las estaciones de bombeo de desagües pluviales, se debe considerar, en primer lugar, la disponibilidad de bombas en el mercado que pueden atender a las necesidades del proyecto en cuestión. Si existiera la posibilidad de que con una bomba se alcanzase el caudal máximo, se debería contemplar las consecuencias de que esta fallase. En general, en estaciones de bombeo para zonas urbanas, esto implicaría riesgos de inundación muy graves, cuyos costos económicos afectarían en gran medida el análisis de factibilidad de la estación de bombeo. Todo ello conforma las razones por las cuales la cantidad de bombas es, como mínimo, de dos.

Si las bombas disponibles tuvieran una capacidad menor al máximo caudal de la crecida de diseño, se pondría en evidencia la necesidad de un mayor número de bombas para la estación de bombeo, lo cual deberá satisfacer otra condición, asociada esta vez con el área de la dársena. Comúnmente, la selección del equipamiento debe adaptarse a las posibilidades que ofrece el mercado de bombas, condicionado, a su vez, por la tecnología del momento en que se desarrolla el proyecto. En caso de que la estación de bombeo fuera de una envergadura tal que demandara el análisis de un diseño especial del equipamiento hidromecánico, éste deberá encontrar justificación en una seria evaluación económica.

Otro de los aspectos para tener en cuenta, vinculado a la cantidad de bombas a instalar y al área de la estación de bombeo, está vinculado a la frecuencia con que las bombas arrancan y paran al hacer frente al ingreso de caudales dado por un hidrograma, es decir, un caudal variable en el tiempo de duración del evento. El análisis del número diario de arranques admisible por las bombas es la resultante del balance de volúmenes de agua entrante y saliente dentro de la dársena de bombeo frente al caudal de operación de la bomba. Las variables involucradas en el análisis están dadas por los caudales ingresantes (hidrograma de entrada), los caudales

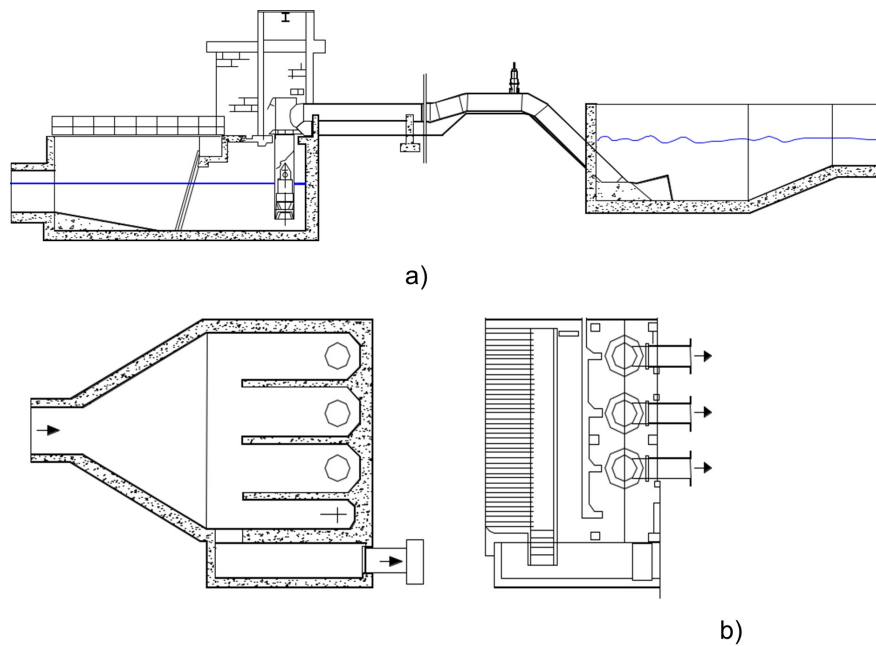


Figura 6.9: Estación de bombeo con descarga por tuberías

salientes (caudales bombeados) y el volumen de regulación o 'volumen operativo' definido por el área de la dársena y el desnivel permitido (entre el nivel máximo y el nivel mínimo).

De lo dicho hasta aquí se desprende la necesidad de conocer y definir el área de la dársena de bombeo. En este sentido, hemos visto que esta puede considerarse como una variable resultante de los requerimientos del número de bombas a instalar y el volumen de regulación requerido en la operación pero, por otro lado, la determinación del área de la dársena tiene una fuerte limitante en la disponibilidad de esta en el sitio de implantación de la obra previsto. En este aspecto, nos encontramos con que, en gran medida, los problemas de evacuación de los desagües pluviales se deben al fuerte incremento de las urbanizaciones generando el uso de casi toda superficie disponible y el desarrollo de fuertes presiones de interés sobre las mismas. Por ende, ante el requerimiento de un área de la dársena para la instalación de una estación de bombeo nos encontraremos con aspectos de orden económico, político, social y ambiental que definirán las limitaciones al área disponible para el proyecto.

Condiciones en la aducción

En el diseño y dimensionamiento de las estaciones de bombeo, las formas, dimensiones interiores y cota de fondo se definen en función de garantizar el buen funcionamiento del sistema. En este sentido, encontramos dos fenómenos hidráulicos principales que condicionan el funcionamiento: la cavitación y la vorticidad.

Cavitación

El fenómeno de cavitación ha sido detalladamente abordado en el Capítulo 4 de este libro, describiendo las causales del fenómeno y sus consecuencias. Del análisis allí planteado se desprende la incidencia que tienen las condiciones de instalación de la bomba, siendo la sumergen-

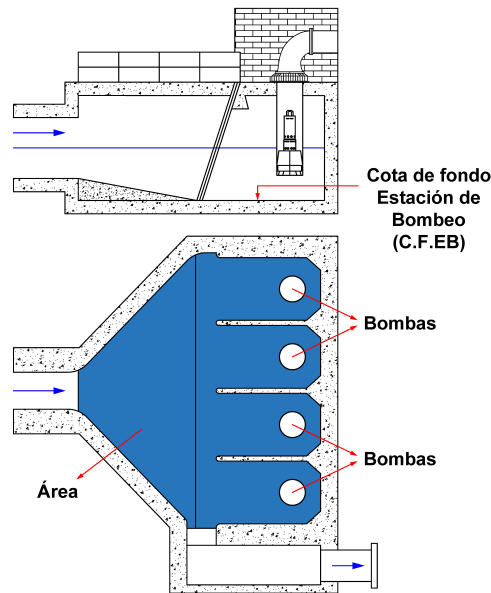


Figura 6.10: Variables principales de dimensionado

cia una de las variables más significativas en la definición de las condiciones de desarrollo o no del fenómeno, y de su intensidad. Ante lo planteado, la sumergencia mínima de la aspiración de la bomba debe seleccionarse con la intención de evitar el desarrollo de la cavitación. La cota de fondo de la dársena estará condicionada, por ende, no solamente por el mínimo nivel de agua en la succión sino también por el requerimiento mínimo de sumergencia.

Las condiciones de instalación de las bombas en la estación de bombeo definen, frente al fenómeno de cavitación, la altura neta positiva de aspiración en la sección de la aducción, del modo que sigue:

$$ANPA_d = H_{atm} + H_S - H_v - J_S \quad (6.1)$$

Expresión en la cual H_{atm} representa la altura de presión atmosférica; H_S , la sumergencia; H_v , la altura de presión de vaporización a una cierta temperatura y J_S , la altura de pérdidas en el tramo de conducción que une las secciones de toma y de aspiración. En todos los casos, las variables se expresan en metros de columna de agua. Nótese que, en el caso de las bombas sumergibles, como se ve en la Fig. 6.11, no existe el 'tramo de succión' como tal, sino simplemente una embocadura, generalmente de geometría acampanada (remarcada con un círculo en la Fig. 6.11) para minimizar las pérdidas localizadas. En el mismo esquema se indica la altura H_S , que en forma genérica se ha definido como 'altura de aspiración', pero que en el caso de las bombas sumergibles (o aquellas que no siendo sumergibles tienen la cota de instalación por debajo del nivel de la cisterna) se indica como 'sumergencia'.

Obteniendo, de la información provista por el fabricante de la bomba, el $ANPA$ requerido para que se eviten los problemas de cavitación (esto es, el $ANPA_r$ incrementado en una cierta revancha), es posible obtener el valor de la sumergencia crítica imponiendo una situación en la que $ANPA_d$ sea equivalente a aquel. O sea:

$$H_S = ANPA_d - H_{atm} + H_v + J_S \quad (6.2)$$

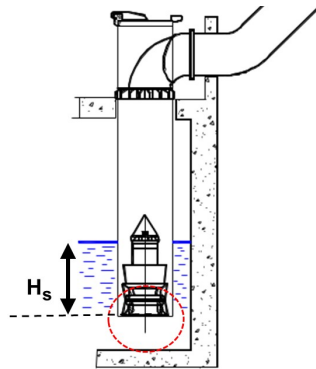


Figura 6.11: Aducción en las bombas sumergibles y sumergencia

Este valor permitirá conocer la situación límite y, a partir de allí, definir la cota de instalación de las bombas. Además, la cota de instalación de las bombas condiciona el diseño de los demás elementos de la estación de bombeo. Las bombas de cámara húmeda (sumergibles), en las que las pérdidas en la aspiración son despreciables, generalmente requieren una sumergencia cuya magnitud está definida por la necesidad de impedir la formación de vórtices que perjudique el guiado del flujo a la bomba. En instalaciones de bombeo con cámara seca, en las que las bombas se encuentran conectadas a la cisterna (o dársena de bombeo), las pérdidas en la aspiración se tornan fundamentales. El diseñador deberá contemplar necesariamente este fenómeno al momento de calcular la cota de instalación de las máquinas.

Vorticidad

Al margen de la cavitación, al diseñar estaciones de bombeo se debe tener especial cuidado en el posicionamiento de las unidades de bombeo y de las paredes divisorias en relación con las condiciones de entrada, con igual consideración que la dada a las dimensiones y la geometría de las dársenas individuales de cada bomba. Se han llevado a cabo numerosos experimentos que ponen en evidencia claramente los problemas que pueden resultar de un diseño pobre de las dársenas; en particular, allí donde no se contemplare la necesidad de eliminar o minimizar los siguientes fenómenos hidráulicos: vórtices superficiales; ingestión pulsante de aire; vórtices sobre las paredes y sobre el piso; entrada de aire; macroturbulencia y regiones de estancamiento dentro de las dársenas. Los vórtices superficiales no son particularmente perjudiciales cuando están caracterizados solamente por pequeñas depresiones de la superficie libre (Fig. 6.12a). Se vuelven inaceptables cuando inducen estelas intermitentes de burbujas (Fig. 6.12b), o se producen 'conductos' de ingreso de aire completamente desarrollados (Fig. 6.12c y Fig. 6.13). Cualquier asimetría o condición favorable al torbellino en el flujo que se aproxima a la aspiración de la bomba incrementa la probabilidad del desarrollo de vórtices superficiales con la subsecuente ingestión de aire.

Cuando la profundidad del flujo en el canal de aproximación o cámara de bombeo es escasa y está asociada con una distribución asimétrica de la velocidad a través del canal, puede ocasionarse una ingestión intermitente de aire de gran escala desde las regiones más severamente deprimidas de la superficie de agua adyacente a la aspiración de las bombas. El ingreso de ai-

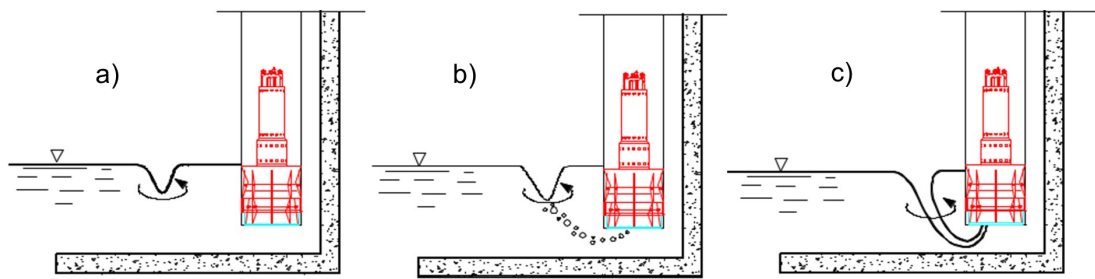


Figura 6.12: Tipología de vórtices superficiales

re afecta el funcionamiento de la bomba e induce vibraciones. Por otro lado, cuando la bomba impulsa el caudal a una tubería, es difícil predecir la evolución del aire que ingresa a esta y los potenciales efectos negativos (como la sobrepresión en un transitorio brusco), por esa razón debe evitarse su ingestión a través de la bomba. También suelen formarse vórtices que se desprenden de las paredes y del suelo: son estructuras que se identifican a veces con finas burbujas de aire y pueden conducir a distribuciones de presión severamente distorsionadas en el plano del rodete, ocasionando una reducción del rendimiento de la bomba y empujes desbalanceados. Esto es particularmente indeseable al tratarse con bombas de flujo axial.

La vorticidad de alta intensidad y la rotación de la masa de agua puede ocurrir en los canales de aproximación hacia la aspiración de las bombas sea como el resultado de cambios rápidos en la dirección del escurrimiento en la entrada a la estación, o bien de condiciones de entrada muy desbalanceadas que surgen, por ejemplo, de rejas parcialmente bloqueadas.

La entrada de aire en la entrada a las dársenas y el subsiguiente transporte de este hacia la aspiración de las máquinas está regida por el diseño de la transición entre el canal de suministro y la dársena de la bomba, y de la diferencia entre el nivel de la superficie del agua entre ambas. Particularmente, donde hay una descarga libre del canal de suministro en la dársena de las bombas, se requiere de una longitud considerable para permitir la estabilización del escurrimiento y la liberación del aire aguas arriba de la sección de aspiración.

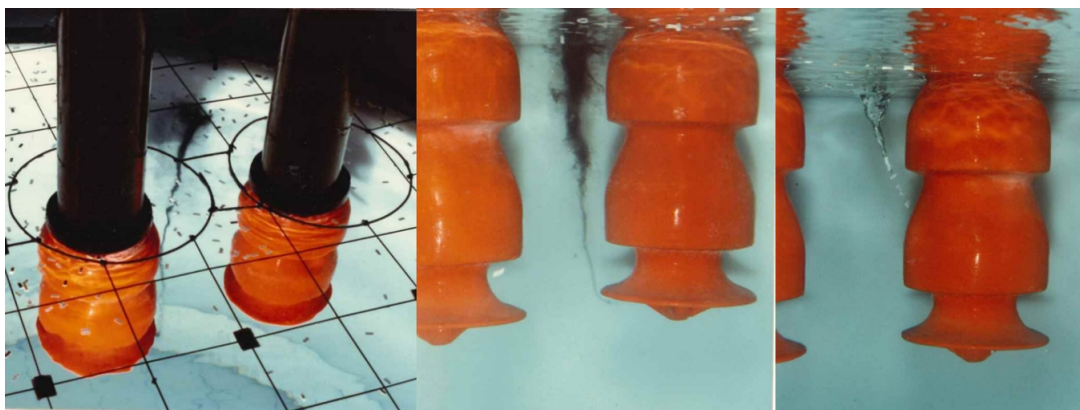


Figura 6.13: Vórtice superficial con ingreso de aire en forma continua

Grandes obstrucciones en el canal de aproximación, como en el caso de cubiertas estructurales o de soporte de pilares, pueden inducir la formación de estelas de vórtices que son llevados por el flujo hacia la aspiración de la bomba, especialmente si la obstrucción es adyacente a la bomba. Las estelas de vórtices son también un problema mayor donde varias bombas se posi-

cionan en línea una detrás de la otra en un canal angosto. Los vórtices generados en la primera bomba son conducidos a la segunda, y así sucesivamente, causando severas vibraciones en las máquinas, especialmente cuando la profundidad del escurrimiento para la última bomba es reducida.

Los vórtices superficiales y la ingestión asociada de aire ocurren en la interfase entre dos regímenes de escurrimiento. El crecimiento de las regiones de estancamiento dentro de las dársenas debe, por ende, ser minimizado por un diseño cuidado y, donde sea posible, deben eliminarse las áreas más críticas adyacentes a las bombas por un rellenado. La combinación de cualquiera de estos fenómenos puede resultar en la ingestión de aire en la aspiración de la bomba con las subsiguientes distorsiones en la distribución de velocidad y de presión en el plano del rodete. Cuando ello está acoplado a remolinos incipientes en la entrada, la confiabilidad y el rendimiento de la bomba pueden verse seriamente comprometidos. Los efectos potenciales incluyen:

1. Una reducción en el rendimiento de la bomba por debajo de los valores de ensayo provisto por los fabricantes, una caída en la curva característica salto-caudal y un incremento en la potencia consumida por la bomba;
2. Cavitación, aun si la bomba se encuentra operando nominalmente dentro del límite de *ANPA* para una determinada aplicación;
3. Un incremento en el ruido y vibración dentro de la estación con posible daño a los componentes de la bomba

Estos problemas podrían afectar dramáticamente la confiabilidad de la planta e incrementar los costos.

Dimensionado de las dársenas de aspiración

El criterio que debe guiar la definición del diseño de la estación de bombeo, tanto en lo referido a su modalidad de operación (sea solo por bombeo o, por gravedad, o mixta) como a su geometría, es el de minimizar las pérdidas de energía en todo el volumen de agua que debe guiar. A tal fin, se debe lograr un perfil de líneas de corriente armonioso, con mínimos cruces. Las dimensiones y proporciones geométricas recomendadas por las normas aspiran a ese objetivo, aun a pesar de las múltiples restricciones que pueden encontrarse en la práctica.

Los resultados experimentales indican que los parámetros que tienen mayor influencia en la formación de vórtices en el rodete de una bomba son principalmente la sumergencia, las velocidades de aproximación (patrón y magnitudes) y la prerrotación del flujo en la aspiración de la bomba.

Las dimensiones óptimas de las dársenas para bombas sumergibles han sido objeto de una gran cantidad de estudios sobre prototipos y sobre modelos. Inicialmente, se tradujeron en recomendaciones de diseño para bombas de eje vertical debido a su relevancia para unidades de bombeo sumergibles. Una dársena correctamente diseñada debe minimizar el riesgo de desarrollo de vórtices y de entrada de aire mientras, por razones económicas, debe limitar la sumergencia

en la aspiración y las dimensiones generales. En particular, deben considerarse los siguientes puntos:

1. La distribución de la velocidad del canal de aproximación debe ser simétrica;
2. Los efectos de las perturbaciones del escurrimiento generadas por las variaciones en el nivel del agua, en el gradiente o pendiente del fondo y las obstrucciones en el escurrimiento, deben ser disipados tan lejos como sea posible de la aspiración de las bombas;
3. Las regiones de estancamiento deben ser eliminadas por el relleno con hormigón;
4. El valor máximo de la velocidad media en el canal de aproximación aguas arriba de la bomba debe estar limitada entre 0,3 y 0,5 m/s.;
5. Es aconsejable perfilar obstrucciones en la dársena adyacentes a las bombas, tales como paredes de separación y pilares, para minimizar la generación de vórtices.

Los resultados, tanto de estudios sobre modelos de laboratorio como la confirmación en evaluaciones sobre prototipo, llevados a cabo en las instalaciones de los fabricantes, han mostrado que las dimensiones óptimas para una bomba de flujo axial sumergible pueden ser expresadas como una función de un solo parámetro: el diámetro de la campana de succión de la bomba.

Configuración de una dársena simple

En este sentido, la mejor orientación para una dársena simple es con el canal de aproximación alineado al canal de entrada a la estación, generando una transición desde el nivel de la entrada a la estación y el fondo de la dársena debajo de la bomba. Esta transición debe ser tan gradual como sea posible para evitar la entrada de aire y la turbulencia, con un gradiente del suelo máximo recomendado α de 15° y un gradiente preferido de entre 6° y 8° (Fig. 6.14).

A los fines de evitar potenciales problemas en la aducción, las dimensiones recomendadas para las dársenas de aspiración (ingreso frontal, no lateral) que se han obtenido de las experiencias antes mencionadas son las presentadas en la Fig. 6.14.

Cambios pronunciados en la dirección en la entrada a la estación (especialmente quiebres a 90°) deben ser evitados, del mismo modo que las descargas libres hacia la superficie libre de las dársenas y las grandes obstrucciones en el canal de aproximación a las bombas. Todas estas situaciones pueden resultar en condiciones de entrada a las bombas severamente perturbadas, aun cuando la velocidad media del canal es menor que el valor máximo recomendado.

Se observa que el canal debe tener un ancho del orden de dos veces el diámetro de aspiración (D) y que la longitud del canal con fondo plano debe ser mayor a cuatro veces el diámetro. Se pretende con esto garantizar la organización del flujo previo a alcanzar la aspiración de la bomba.

Por otro lado, se recomienda un relleno en las esquinas de las dársenas con un ángulo de 45° y un lado de $D/2$. Esto responde a que las experiencias indican que los rellenos de las esquinas no solamente previenen el desarrollo de regiones de estancamiento, sino que también minimizan los efectos de separación producidos por la conducción de descarga de la bomba. Además, se encontró que restringiendo el escurrimiento alrededor de la parte posterior de la conducción de

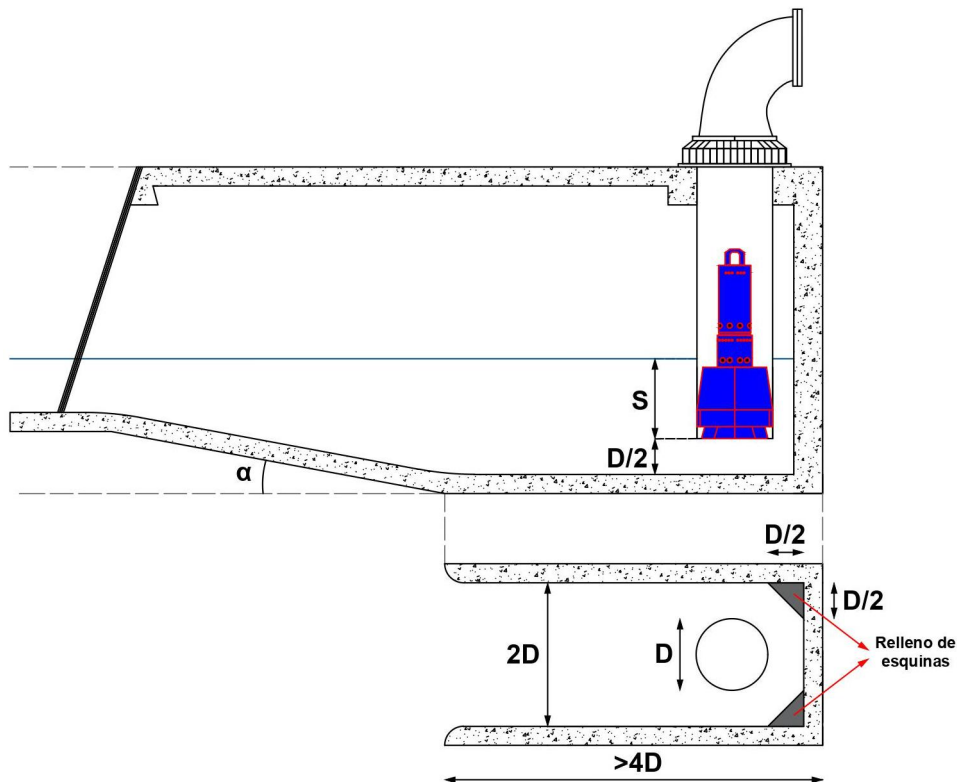


Figura 6.14: Dimensiones generales sugeridas de las dársenas de bombeo

descarga, el valor mínimo de la sumergencia requerida para prevenir los vórtices puede verse reducido.

Respecto al posicionamiento vertical de las bombas deberemos respetar un valor S de sumergencia por vorticidad. Si bien se debe satisfacer el requerimiento del $ANPA_d$ para evitar la cavitación, en las estaciones de bombeo pluviales suele ser más exigente el S por vorticidad que el H_s por cavitación. El valor de sumergencia mínima requerida es un valor dado por los fabricantes de forma específica para cada modelo de bomba, y de forma general se puede definir con la expresión propuesta por la norma ANSI, en función del número de Froude, F_D (ANSI, 1998)

$$\frac{S}{D} = 1,0 + 2,3F_D \quad (6.3)$$

Donde F_D se calcula en función de la velocidad $V = Q/A$ en la succión de la bomba:

$$F_D = \frac{V}{g\sqrt{D}} \quad (6.4)$$

Con una dársena o canal que tenga las dimensiones recomendadas, se encontró que la posición óptima de la conducción de descarga de la bomba es igual a $D/4$ desde la pared de atrás con una distancia respecto del fondo de $D/2$.

Otros experimentos para determinar el efecto de la distancia respecto de la pared de atrás indicaron que a valores menores que los recomendados, los vórtices superficiales son suprimidos, pero se promueve el desarrollo de vórtices nocivos sobre las paredes. Si la separación respecto de la pared de atrás se incrementa por encima del valor recomendado, la sumergencia mínima

requerida para suprimir el desarrollo de los vórtices superficiales se incrementa.

Configuración de dársenas múltiples

Los criterios de diseño de una dársena simple son también aplicables a instalaciones múltiples. La regulación del escurrimiento a cada una de las bombas debe conseguirse por la provisión de paredes divisorias entre unidades adyacentes. Las dársenas o celdas individuales creadas se dimensionan en relación con el diámetro de aspiración de la bomba, D . Estas dársenas permiten independizar las bombas en caso de requerir mantenimiento de una de ellas, mediante la colocación de compuertas en su ingreso. Debe evitarse la instalación en línea de las bombas (una tras otra) debido a los efectos nocivos de las estelas de vórtices generadas aguas abajo de las bombas de adelante, que son conducidos a las de atrás. A fin de asegurar una distribución uniforme de agua hacia todas las bombas debe evitarse una expansión brusca del escurrimiento en la entrada a la estación. El semiángulo β de la transición puede adquirir un valor máximo de 45° aunque, usualmente, el rango preferido es de entre 7° y 25° . Otras referencias especifican un ángulo máximo de 20° (ANSI, 1998).

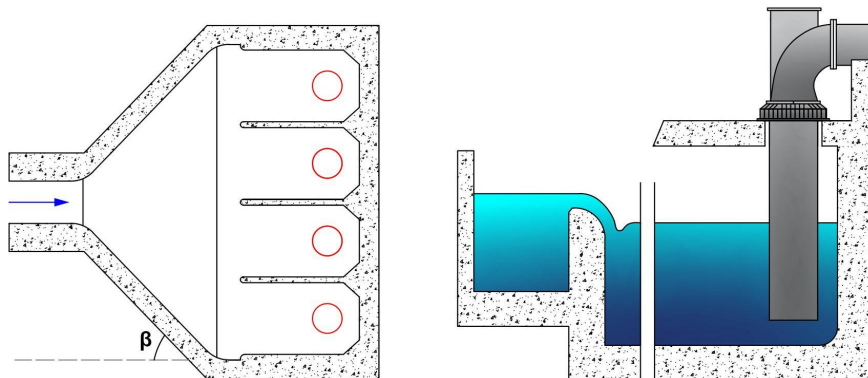


Figura 6.15: Dársenas de bombeo múltiples. Izq.: vista en planta; Der.: Corte

Donde existan condiciones pobres de ingreso a la estación de bombeo (por ejemplo, donde hay una alta velocidad de entrada a ángulos rectos hacia las líneas centrales de las celdas), deberán construirse paredes de guía a la entrada para distribuir y controlar uniformemente el escurrimiento hacia cada una de las bombas. Donde ello sea impracticable, una alternativa posible es proveer un vertedero lateral a lo largo del ancho completo de la dársena a la entrada. Debe tenerse especial consideración, sin embargo, a la longitud de la dársena necesaria para evitar la ingestión excesiva, por las bombas, del aire introducido sobre este vertedero (Fig. 6.15 derecha).

En la Fig. 6.16 se muestra un esquema típico de estación de bombeo para desagües pluviales, donde se identifican, además de la bomba sumergible, los dispositivos e infraestructura complementarios. Se ve el puente grúa, necesario para el izaje de los componentes de las bombas.

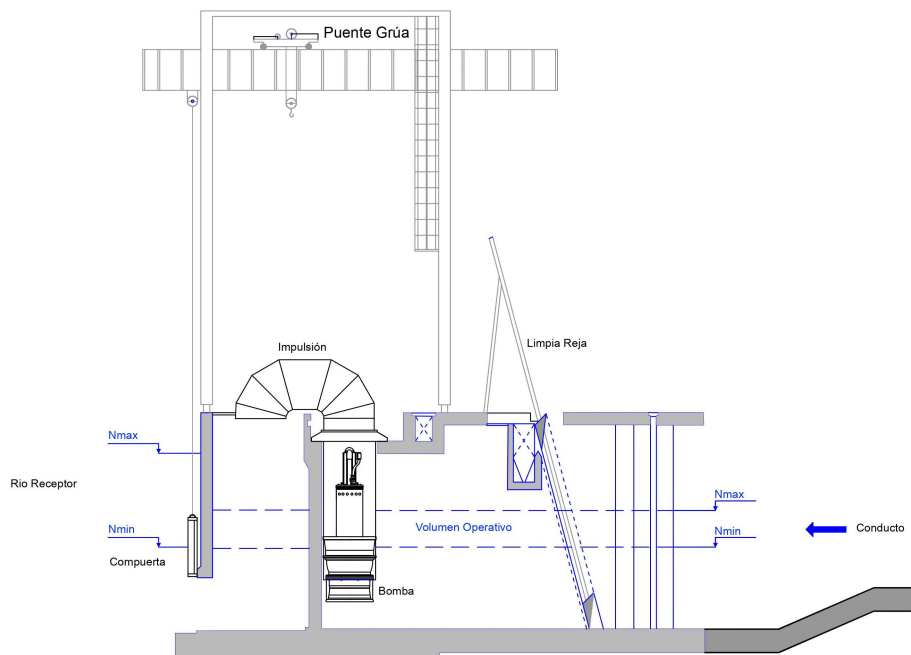


Figura 6.16: Instalación típica de bomba para estación de bombeo de desagües pluviales con reja de limpieza

Modelación física y matemática

Las restricciones del sitio donde deben emplazarse las estaciones de bombeo, las necesidades estructurales de la obra civil y las instalaciones de los elementos electromecánicos, entre otros factores, en el mejor de los casos, dejan poco margen para lograr condiciones satisfactorias de ingreso que atiendan a los requerimientos hasta acá descritos; en el peor, generan condiciones particulares de flujo cruzado. Ante tales escenarios, o cuando la magnitud y relevancia de la obra lo requiera, se deben realizar verificaciones y soluciones particulares para el proyecto. Este tipo de análisis se logra a partir de la modelación de las estaciones de bombeo.

Actualmente, se emplean dos tipos de modelación: la modelación matemática y la modelación física. Esta última es la técnica más ampliamente empleada en la práctica y sus resultados son los más confiables. Por su lado, la modelación matemática es una tecnología mucho más nueva y día a día incrementa su potencial. Dado que admite la simulación del escurrimiento en su escala real, permite sortear las distorsiones asociadas a los efectos de escala propios de los modelos físicos reducidos; ofrece, asimismo, ventajas de visualización difíciles de lograr en los modelos físicos.

La implementación de un modelo nos permite evaluar las condiciones de operación de la estación de bombeo antes de su construcción, pudiendo así reconocer potenciales problemas de ordenamiento del flujo o generación de vórtices y, de igual modo, evaluar optimizaciones de la geometría o efectividad de dispositivos de corrección. Nótese, en este sentido, que las modelaciones a las que se hace referencia corresponden a representaciones del funcionamiento hidráulico de las dársenas de aspiración y no al comportamiento de la bomba en sí misma. En este tipo de modelos, las bombas se plantean como aspiraciones que representan su capacidad de bombeo en términos de caudal así como el volumen físico que ocupan en la dársena y la

concentración y distribución de las velocidades en las campanas de aducción y generalmente se representan por medio de sifones.

Modelación física

La conformación y construcción del modelo físico de una estación de bombeo consiste en la construcción de una adecuada representación en escala de los fenómenos hidrodinámicos que pudiesen tener lugar en el prototipo, lo que se obtiene a partir de una representación de la geometría y condiciones de flujo a partir de las condiciones de semejanza hidráulica.

Analizando la geometría de la obra deberemos representar un dominio suficiente que abarque la totalidad de los fenómenos a estudiar sin mayor incidencia de las condiciones de borde. De forma general podemos decir que se han de representar: a) la geometría interna de la cámara de aspiración y cada una de las dársenas de bombeo; b) la geometría del contorno externo de la bomba considerada y, principalmente su campana de aducción; c) las condiciones de ingreso del flujo a la cámara.

Las características de las condiciones de flujo y los fenómenos posibles de producirse, tales como los escurrimientos de aproximación y la formación de vórtices, con flujos convergentes y divergentes tanto a superficie libre como a presión, determinan que las fuerzas predominantes en este tipo de flujo resultan ser la de gravedad (superficie libre) o de presión (escurrimientos a presión), y las fuerzas de inercia presentes toda vez que se produzcan aceleraciones y desaceleraciones del flujo.

Planteando un análisis de similitud y semejanza hidráulica, encontramos que en el caso del comportamiento del fluido a superficie libre, que se ve principalmente gobernado por las fuerzas de inercia y gravedad, el modelo físico ha de construirse empleando semejanza a partir del adimensional número de Froude (Ec. 6.4): Por su parte cuando el escurrimiento es a presión, y las fuerzas dominantes son las de presión e inercia, se considera para la semejanza el adimensional número de Euler:

$$Eu = \frac{V}{\sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho g}}} \quad (6.5)$$

Donde V la velocidad del flujo, Δp variación de la presión entre dos puntos y ρ es la masa específica del agua.

Bajo estas condiciones de similitud, ha de mantenerse constante entre prototipo y modelo el número de Froude, y por ende lo hará el número de Euler ya que, a nivel de escalas para fluidos incompresibles resulta la misma.

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{Dm} = F_{Dp} \\ Eu_m = Eu_p \end{array} \right. \quad (6.6)$$

donde los subíndices p y m corresponden al prototipo y al modelo, respectivamente.

Por otra parte, se han de respetar valores mínimos de los números de Reynolds y Weber, y de las escalas de longitudes necesarias para garantizar que los efectos derivados de no representar en escala las fuerzas viscosas y de tensión superficial resulten despreciables (ANSI, 1998).

Una vez construido el modelo (Figs. 6.17 y 6.18) es posible realizar la medición de las va-

riables hidráulicas de operación y sus variaciones, como son: el caudal, las velocidades y los niveles, pero fundamentalmente podremos observar el desarrollo o no de fenómenos de vorticidad, circulación del flujo, oscilaciones de niveles resonantes, etc. A tal fin, los modelos deben ser instrumentados con limnómetros, piezómetros, caudalímetros y velocímetros, y se deben aplicar diferentes técnicas de medición indirecta donde se destacan las mediciones de circulación del flujo que ingresa a las bombas mediante rotámetros y la medición de intensidad de vorticidad mediante un análisis cualitativo a partir de su observación directa y empleando trazadores como tintes y partículas.



Figura 6.17: Modelación física de la Estación de Bombeo número 5 del sistema de protección La Boca-Barracas, construido por la UIDET-Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata

Modelación matemática

La modelación matemática posee la capacidad de representar a través de las ecuaciones de Navier-Stokes el comportamiento hidráulico turbulento que tiene lugar en las estaciones de bombeo, con suficiente precisión para el diseño definitivo considerando criterios razonables para la discretización espacial y temporal. Este tipo de modelación plantea una representación de la física mediante relaciones matemáticas y no una reducción de escalas, lo cual nos permite analizar el proyecto y los fenómenos hidráulicos en su verdadera magnitud.

En estas modelaciones la turbulencia se esquematiza y resuelve mediante una simplificación a la hidrodinámica, empleando los modelos teóricos como el $\kappa - \epsilon$ y el *Large Eddy Simulation* (LES), que han sido corroborados mediante modelación física y mediciones realizadas en prototipos. La coherencia y similitud de resultados observada es suficientemente precisa como para establecer que la implementación de esta herramienta en una etapa temprana de los proyectos nos permitiría optimizar los diseños y evitar condiciones indeseadas de funcionamiento.

Los resultados obtenidos de este tipo de modelaciones son sumamente valiosos, principalmente, por su capacidad de caracterizar la totalidad del dominio analizado y describir completamente la tridimensionalidad de los fenómenos (Fig. 6.19). Mediante el análisis de las componen-

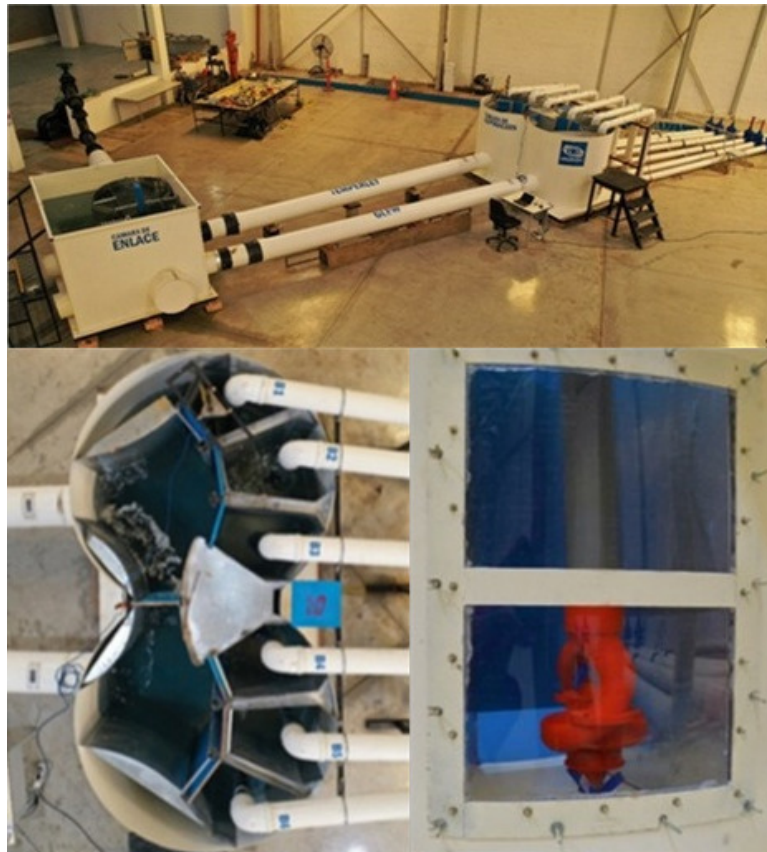


Figura 6.18: Imágenes del modelo físico de la estación de bombeo Lomas de Zamora, construido por la UIDET-Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata. Arriba: Imagen general del modelo físico; abajo, izq.: Cámara de aspiración bilobular de seis darsenas; abajo, der.: Dársena de aspiración con bomba de doble succión

tes de la velocidad y su procesamiento es posible graficar e identificar las trazas de circulación y la conformación de estructuras vorticosas (Fig. 6.20). Este tipo de modelaciones requiere de una gran pericia de quien lo desarrolle y de una importante capacidad de cálculo computacional para resolver los algoritmos implementados.

Operación de las estaciones de bombeo

Definida la geometría general de la estación de bombeo y estimado el número de bombas, se deberán verificar las condiciones de operación de esta. Si se trata de estaciones de bombeo de desagües pluviales, debemos contar con el hidrograma de ingreso a la estación de bombeo, que define los caudales ingresantes a la dársena de bombeo.

Luego se deben determinar los niveles máximos y mínimos operativos de la estación de bombeo, contemplando todas las consideraciones efectuadas en los incisos anteriores, esto es, con el objetivo de evitar la cavitación y la formación de vórtices.

El nivel máximo deberá respetar la cota de los conductos que traen el agua a la estación de bombeo, de manera que se evite, en lo posible, y para las condiciones de diseño, el ahogado de estos. En cualquier caso, la cota máxima debe ser tal que no se produzcan desbordes en la zona a proteger.

Por último, con el área en planta de la dársena de bombeo y las diferencias de cotas, es

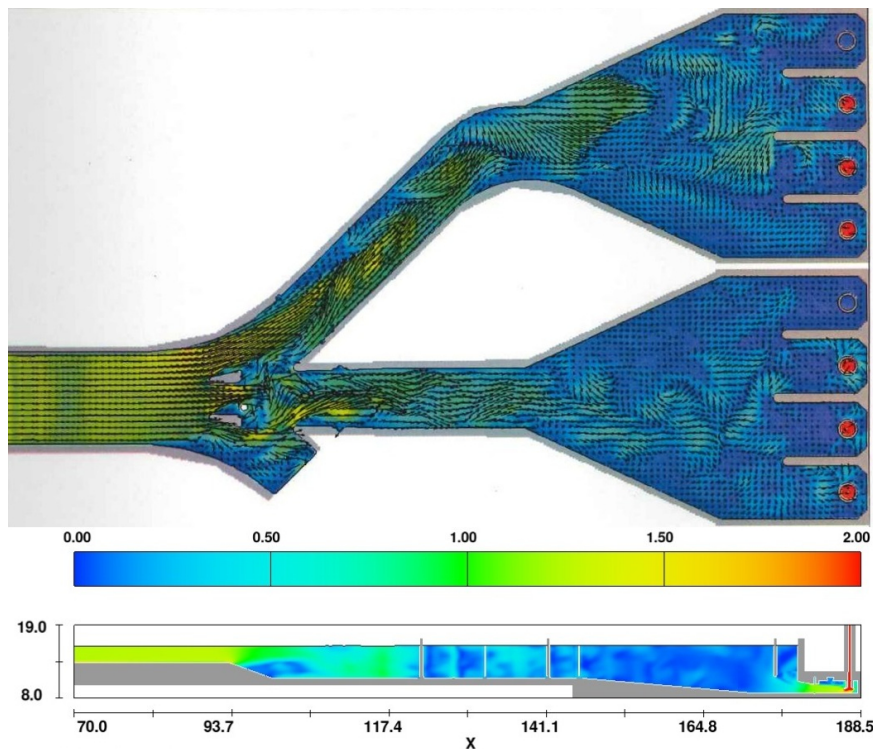


Figura 6.19: Simulación matemática de una estación de bombeo con dársenas de aducción (para el proceso de prediseño, con optimización de escurrimiento), desarrollada por la UIDET-Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata. Arriba: Distribución de velocidades en planta; abajo: Distribución de velocidades campos vorticosos de la aducción, a lo largo de un corte longitudinal

posible obtener el volumen de agua que la estación de bombeo es capaz de regular. En presencia de todas estas condiciones iniciales, es posible calcular, mediante un modelo de operación, la secuencia de prendido y apagado de bombas, a fin de evacuar el hidrograma de diseño.

El nivel máximo se transforma en el nivel de arranque de las bombas, mientras que el nivel mínimo se transforma en el nivel de parada de estas. De esta manera cada vez que el nivel llega al máximo se arranca una bomba, con lo que el caudal de salida se incrementa en un módulo de bombeo. Así procederá la estación de bombeo hasta encender todas las bombas operativas, mientras que cuando se reduce el caudal ingresante, se bombeará más agua que la que ingresa de manera que a medida que el nivel descienda y llegue al mínimo se irán apagando las bombas.

Además, el nivel mínimo puede ser diferente para cada una de ellas, con el objeto de reducir los caudales cuando los niveles descienden a fin de mejorar las condiciones de ingreso a la estación de bombeo, para poder evitar velocidades elevadas en el ingreso de las dársenas.

Selección de cotas

La selección del nivel máximo operativo de la dársena debe respetar el nivel más elevado del tirante en los conductos que descargan hacia ella, en el momento en que se eroga el caudal máximo del hidrograma. Este nivel es el que denominaremos N_{max} (Fig. 6.21).

En estas condiciones, el equipamiento hidromecánico estará encendido y, si el caudal de bombeo es mayor o igual al máximo caudal del hidrograma, el nivel de agua dentro de la estación de bombeo comenzará a descender. Esta situación se prolongará hasta tanto el nivel del agua descienda hasta el mínimo admisible en la dársena de bombeo. La elección de este nivel mínimo,

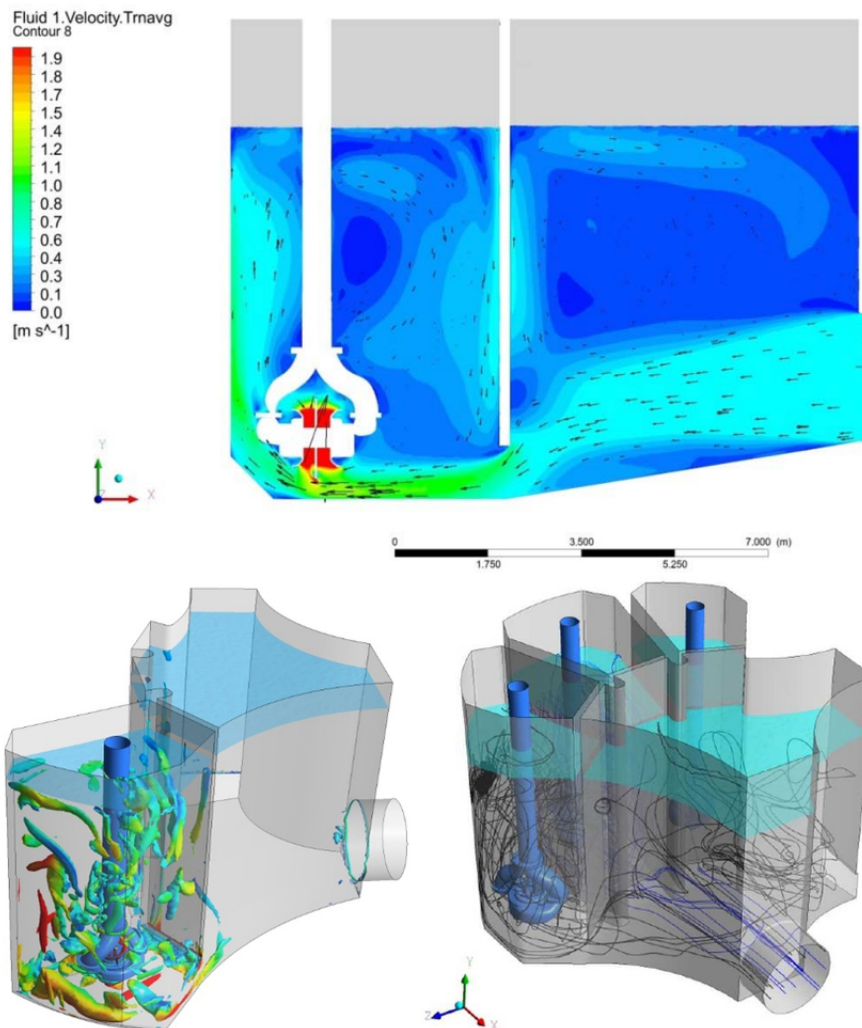


Figura 6.20: Simulación matemática de la estación de bombeo Lomas de Zamora, desarrollada por la UIDET-Hidromecánica de la Universidad Nacional de La Plata. Arriba: Distribución de velocidades en un plano transversal de la cámara de aspiración; abajo, izq.: Líneas de corriente del escurrimiento en un lóbulo de aspiración; abajo, der.: Representación de estructuras vorticosas con el uso de isosuperficies de *Q-criterion* constante

N_{min} , de manera análoga al nivel máximo, deberá observar las condiciones de escurrimiento en el canal de ingreso. En particular, debe evitarse por todos los medios la generación de un escurrimiento supercrítico en alguna de las secciones anteriores a la aspiración de las bombas, pues de otro modo se induciría un resalto hidráulico y, con él, una macroturbulencia altamente perjudicial para la operación de las máquinas (Fig. 6.22). Esta representa una situación extrema, ya que para lograr buenas condiciones de admisión a las dársenas de bombeo se deberá contar con un número de Froude bastante menor que la unidad. Claro que todo ello dependerá de la geometría general de la estación de bombeo. Si por consideraciones generales, el nivel mínimo es tal que se produce de todos modos un resalto dentro de la cámara, debe proveerse una longitud suficiente para garantizar una distribución uniforme de la velocidad y la desaparición del aire incorporado en la sección de aspiración.

Cálculo de los ciclos de arranque y parada de las bombas instaladas

La frecuencia de los ciclos de arranque y parada a la que se encuentre sometido el equipamiento hidromecánico es una variable restrictiva en el diseño de las estaciones de bombeo, por cuanto, de ser muy elevada, es capaz de poner en peligro la integridad de los motores ante el sobrecalentamiento de los cables que conducen la electricidad al pasar una mayor corriente. Debe preverse el número de arranques calculando la secuencia en función del hidrograma de diseño, de los caudales bombeados y del volumen operativo que se dispone en la cámara de bombeo.

En la Fig. 6.24 se representan, en abscisas, el tiempo y los niveles en la cisterna, en ordenadas. Durante el período T_1 el nivel asciende porque el caudal ingresante a la cámara, dado por el hidrograma de diseño, es superior al de bombeo. Dicho de otro modo, la cantidad de bombas en operación es insuficiente para evacuar los volúmenes de agua provenientes de los desagües en la misma proporción con que estos son aportados. Como consecuencia de ello, el nivel en las dársenas aumenta. Por su parte, T_2 indica el período durante el cual la capacidad de la estación de bombeo supera al caudal del hidrograma. Cada lapso $T_1 + T_2$ se produce el arranque o parada de una bomba.

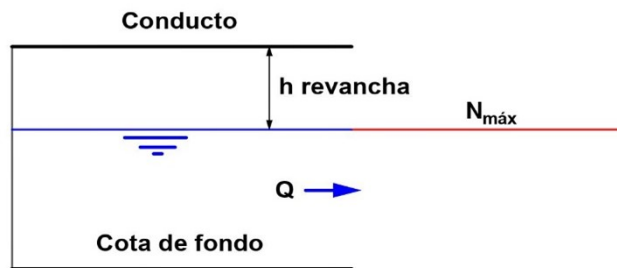


Figura 6.21: Definición de Nivel Máximo en la estación de bombeo

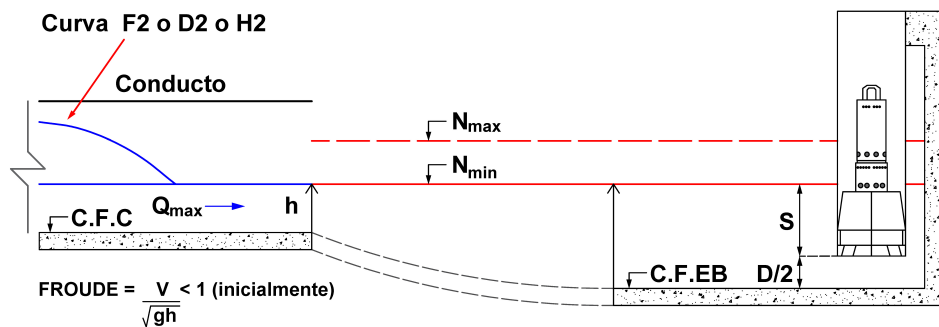


Figura 6.22: Definición de Nivel Mínimo en la estación de bombeo

El volumen operativo disponible en la cámara (V_{disp}) en el intervalo T_1 , asumiendo una variación lineal del nivel, es:

$$V_{disp} = (Q_e - Q_s) T_1 \quad (6.7)$$

Donde Q_e es el caudal de entrada a la dársena y viene dado por el hidrograma, y Q_s es el caudal de salida de la dársena que viene dado por la capacidad de bombeo instalada y operativa.

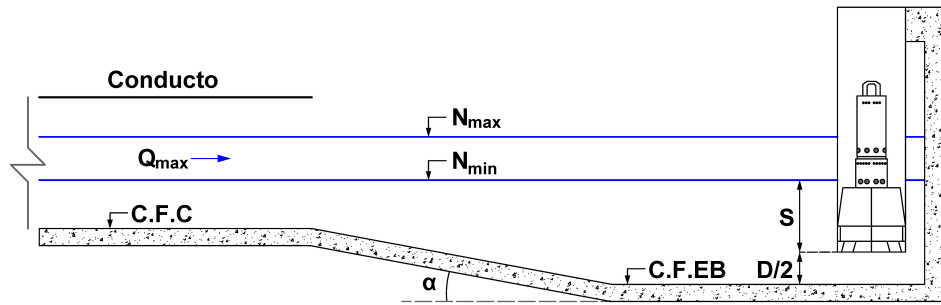


Figura 6.23: Esquema en corte con variables principales

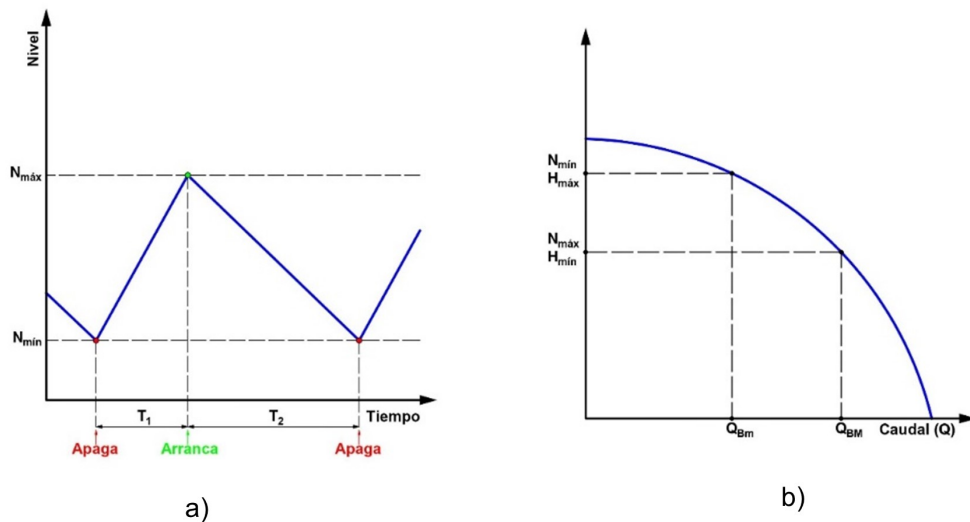


Figura 6.24: a) Esquema de arranques y paradas en función de los niveles. b) Rango de caudales correspondiente a los niveles

Ante la variación de niveles que se produce en un intervalo de tiempo, se puede aproximar al caudal de bombeo (Q_b) como un valor medio al correspondiente para los distintos saltos de funcionamiento, considerando un intervalo de tiempo suficientemente pequeño para que esta aproximación no genere errores significativos.

Para un valor de volumen operativo disponible conocido, se puede despejar el tiempo que tarda en alcanzarse el nivel máximo, asumiendo que la variación es lineal:

$$T_1 = \frac{V_{disp}}{Q_e - Q_s} \quad (6.8)$$

Mediante un planteo similar, T_2 queda determinado como:

$$T_2 = \frac{V_{disp}}{Q_b - Q_e} \quad (6.9)$$

Finalmente, si consideramos un caudal de entrada constante, la cantidad de arranques por unidad de tiempo T (por ejemplo, un día) de cada bomba resulta:

$$N_{arr} = \frac{1}{N_b} \frac{T}{T_1 + T_2} \quad (6.10)$$

Donde N_b representa el número de bombas instaladas en la estación de bombeo.

Para un proyecto particular, la relación entre el número o cantidad de arranques diarios N_{arr} es inversamente proporcional al volumen operativo V_{disp} ; o sea:

$$N_{arr} \propto \frac{1}{V_{disp}} \quad (6.11)$$

Esta expresión indica que el volumen operativo, que es aquel ubicado entre los niveles máximo (o de arranque) y mínimo (o de parada) de las bombas, tiene una relación inversa con la cantidad de arranques media diaria (Fig. 6.25).

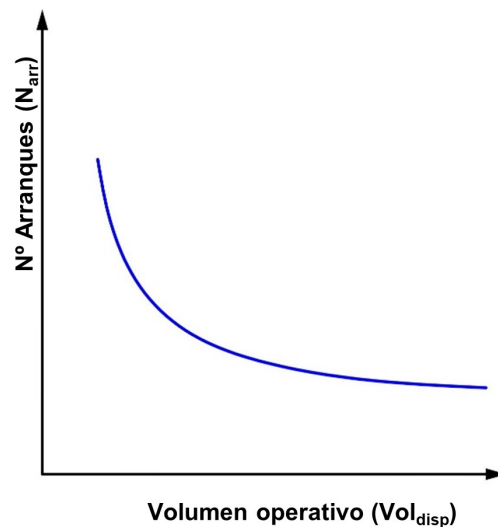


Figura 6.25: Relación entre el número de arranques y el volumen operativo disponible de la cámara de bombeo

Entonces, el volumen puede afectar la selección de los tamaños y el número de las bombas, y viceversa, si se respeta el mínimo ciclo operativo deseable (o el número máximo de arranques, puesto que se trata de una expresión equivalente). Para un tamaño de dársena dado, el número y tamaño de las bombas debe ser tal que el ciclo operativo mínimo sea del orden de 6 minutos para bombas sumergibles, 20 minutos para bombas de cámara húmeda (*wet-pit*) con tamaño de motor de hasta 75 kW (100 hp), y 30 minutos para bombas de más de 75kW (100 hp). Las unidades de bombeo de más de 375 kW (500 hp) deben encenderse de acuerdo con los datos provistos por el fabricante.

Cuando evaluamos los encendidos de las bombas en una estación de bombeo pluvial, es necesario considerar la variabilidad de los caudales de ingreso y, al mismo tiempo, discretizar la capacidad de bombeo para que esta responda de forma proporcional, óptima y factible a la demanda. En este sentido, la resolución de la secuencia de encendidos resulta de un modelo de embalse en el que se evalúa un hidrograma de diseño ante condiciones de volumen de operación, números de bombas y capacidad de bombeo predefinidos. El modelo de embalse a resolver consiste en un planteo de continuidad entre el caudal que ingresa (hidrograma de diseño), el caudal de salida, como producto de las bombas encendidas, y un volumen de almacenamiento

(∇). Para cada intervalo de tiempo evaluado se plantean las siguientes expresiones:

$$\begin{cases} \Delta V_i = Q_{e_i} - Q_{s_i} \\ V_i = V_{i-1} + \Delta V_i \end{cases} \quad (6.12)$$

Como hemos establecido, el volumen de operación es una variable predefinida a partir de la disposición de espacio y niveles operativos o mediante un valor propuesto para su evaluación. El volumen de operación puede expresarse como una función del nivel, y viceversa, acotado entre un valor de nivel mínimo y máximo.

$$N_i = f(V_i) \quad (6.13)$$

El caudal de entrada en el modelo viene dado por el hidrograma de diseño, o a evaluar, establecido en función de los análisis de drenaje. Se tiene en cada intervalo de tiempo un caudal variable que se define como valor medio del intervalo de discretización.

$$Q_{e_i} = \frac{Q_{inicial} - Q_{final}}{2} \quad (6.14)$$

El caudal de salida se define a partir de la capacidad de bombeo del sistema y en función del nivel operativo, el nivel de descarga y el caudal de ingreso. En este sentido, la capacidad de bombeo se define por las características de las bombas seleccionadas y la cantidad y disposición adoptada. Los niveles operativos incidirán de dos formas diferentes sobre el caudal de salida, por un lado tendremos a los niveles extremos como indicadores de arranque y parada de las bombas, y, por otro lado, la variación de niveles de operación puede traducirse en una variación del salto de funcionamiento de la bomba. Asimismo, el nivel de descarga del sistema puede alterar el salto de funcionamiento en que operan las bombas. Por último, el caudal de ingreso representa la demanda al sistema de bombeo, definiendo la fracción de la capacidad de bombeo que se empleará en cada intervalo.

La capacidad de bombeo ha de satisfacer el punto de máxima demanda, es decir, el caudal máximo del hidrograma de diseño. La materialización de la capacidad de las estaciones de bombeo se obtiene, en general, por múltiples bombas dispuestas en paralelo. En cada intervalo de tiempo opera una fracción de la capacidad de bombeo, la que se discretiza a partir del número de bombas encendidas.

$$Q_{s_i} = N_{b_i} Q_b \quad (6.15)$$

Un primer cálculo de la secuencia de encendidos requerida para nuestro proyecto puede realizarse considerando que la variación de los niveles de la dársena y de restitución no alteran de forma significativa el punto de funcionamiento de las bombas. En otras palabras, esta simplificación implica que las bombas instaladas impulsan un caudal constante. Bajo estas suposiciones, la secuencia de encendidos y apagados de bombas en nuestro modelo se obtiene de la resolución de una secuencia condicional en cada intervalo de tiempo. El primer grupo de condiciones a evaluar refiere a los niveles en la dársena de bombeo, donde evaluaremos si el nivel alcanza el nivel de encendidos de las bombas, que es el nivel máximo de la capacidad de bombeo, y por

otro lado evaluaremos si el nivel de la dársena alcanza el nivel de apagado de las bombas. En el segundo grupo de condiciones consideraremos la tendencia del nivel, evaluaremos en los casos que el nivel máximo es superado si el nivel continúa incrementando donde deberemos encender una nueva bomba, y evaluaremos en los casos que el nivel mínimo es alcanzado si se debe apagar una nueva bomba.

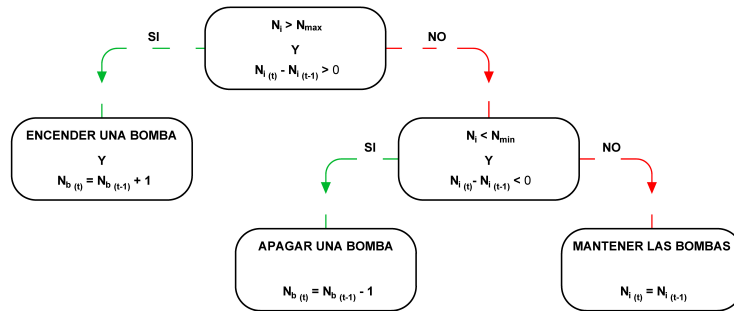


Figura 6.26: Secuencia condicional de encendidos de las bombas para una EB pluvial

La aplicación de las condiciones de encendidos puede verse esquematizada en la Fig. 6.26. En este procedimiento de cálculo se deben establecer las condiciones de borde del modelo y se debe verificar que el número de bombas encendidas no supere al número de bombas instaladas. La resolución de un modelo de operación de una estación de bombeo como el propuesto arroja resultados como los observados en la Fig. 6.27, donde se puede observar cómo el caudal de salida va copiando al caudal del hidrograma en todo el paso del tiempo. En este caso particular, donde tenemos siete bombas operativas en el modelo, vemos en la rampa creciente del hidrograma los escalones en el caudal de salida que corresponden al encendido consecutivo de las bombas.

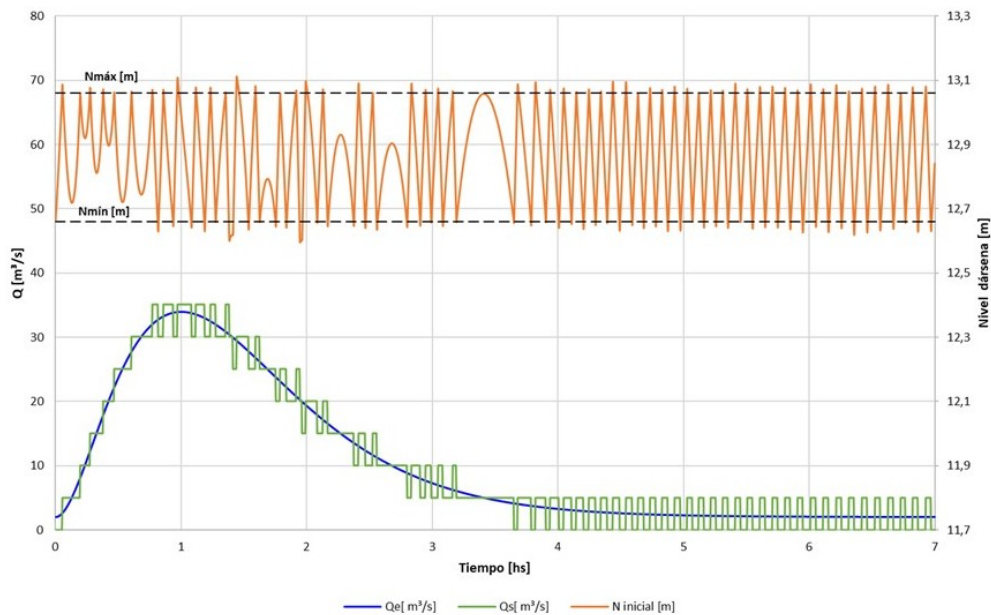


Figura 6.27: Modelo de operación de la estación de bombeo ante condiciones de diseño

Puede verse que en el tramo final de este hidrograma se da la condición más exigente en

cuanto a la cantidad de encendidos y apagados de las bombas, cuando el caudal ingresante es del orden de la mitad del caudal de una bomba. Para evaluar, en condiciones de caudales variables, si el número de encendidos de las bombas se ajusta a las restricciones de funcionamiento que plantea el fabricante, podemos computar el mayor número de encendidos por hora y dividirlo por la cantidad de bombas instaladas. Otra opción que nos ofrece el modelo es determinar cuándo se enciende y apaga cada bomba durante el transcurso del hidrograma y, con ello, determinar los tiempos de funcionamiento o el menor tiempo existente entre el encendido y apagado de la misma bomba.

Integración de los conductos a la cámara de carga

En algunos proyectos especiales de estaciones de bombeo de desagües pluviales, sobre todo en lugares donde la disponibilidad de espacio se encuentre restringida, la superficie de las dársenas puede hallarse acotada y con ello el volumen de regulación de las crecidas. Desde luego, el volumen de regulación necesario puede reducirse aumentando la cantidad de unidades de la estación de bombeo, pero ello conduciría a un incremento de los costos de instalación, en algunos casos inadmisibles. En estos casos, si los conductos que descargan a la estación de bombeo son de dimensiones importantes, es posible emplear su volumen disponible para almacenar los excesos del agua proveniente de los desagües (Fig. 6.28). Para determinar estas condiciones se deberá conocer el escurrimiento en los conductos durante el transitorio de la crecida, es decir modelar flujos impermanentes a superficie libre, con una estación de bombeo en uno de los extremos. Esto es un trabajo adicional para el proyecto, además que se deberán conocer los detalles de la red de desagües, por lo que solo en algunos casos esto será justificable.

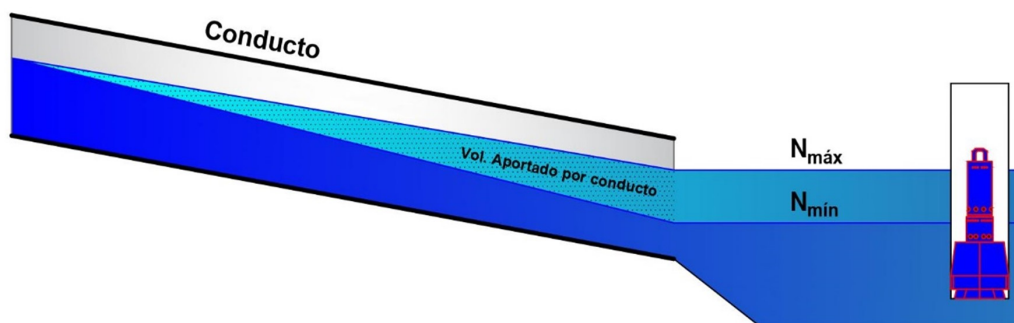


Figura 6.28: Incorporación de la capacidad de los conductos al volumen operativo

Combinación con descarga por gravedad

Es usual que las estaciones de bombeo de desagües pluviales pasen a funcionar por bombeo si las condiciones del cuerpo receptor no permiten la descarga por gravedad, o esta no resulta suficiente. Por tal motivo existen configuraciones que combinan ambas situaciones, como se ve en la Fig. 6.29, donde en la misma dársena se encuentran integradas las dos funciones: descarga

por gravedad y por bombeo. Esta alternativa de diseño optimiza el espacio ocupado por la estación de bombeo frente a la alternativa de tener por separado una descarga por gravedad (canal conducto) que opere cuando los niveles del cuerpo receptor y de los conductos son suficientes para erogar la crecida por lluvias en la cuenca que atienden estas obras.

Para materializar esta alternativa, se recurre al diseño de un descargador de fondo que puede ser obstruido por medio del cierre de una compuerta ubicada aguas abajo de la dársena, como se ve en la Fig. 6.29, cuando la operación deba ser por bombeo. La operación de las compuertas debe estar adecuadamente controlada y relacionada con el arranque de las bombas, ya que en un transitorio como es el de la afluencia de caudales provenientes de los desagües durante una tormenta, no deben darse tiempos 'muertos' en los cuales ninguno de los dos sistemas funcione. Usualmente, para estaciones de bombeo de gran envergadura, se programa la secuencia lógica de accionamiento automático del cierre de compuertas y arranque de bombas, con los tiempos mínimos posibles y requeridos para que el nivel máximo no sea superado para la condición de diseño. Esto se obtiene a partir de simulaciones matemáticas que permiten anticipar la variación instantánea de los niveles en el transitorio de la crecida y del pasaje de escurrimiento por gravedad a bombeo.

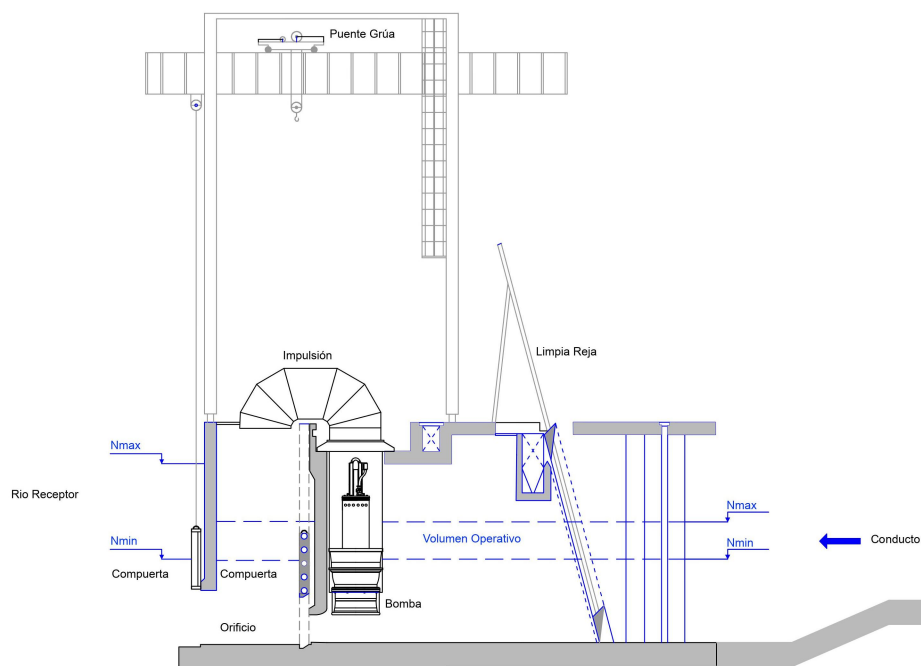


Figura 6.29: Diseño de dársena de bombeo con ambas funciones: descarga por gravedad y por bombeo (La Boca-Barracas, CABA)

Instalaciones auxiliares

En el desarrollo de una estación de bombeo de gran magnitud se deben considerar una serie de instalaciones auxiliares que constituyen un complemento necesario a las bombas y sus motores. Entre estas instalaciones las principales, o que se presentan con mayor frecuencia, son:

- las instalaciones eléctricas y electrónicas;
- las instalaciones de ensamblaje y mantenimiento;



Figura 6.30: Descarga al Riachuelo de la Estación de Bombeo número 2, con 8 bombas, en La Boca-Barracas, CABA

- las instalaciones de operación.

Las instalaciones eléctricas y electrónicas constituyen el sistema de alimentación de los motores de bombeo, los sistemas de aire comprimido, el alumbrado y sistemas de monitoreos, entre otros. Junto a esto se requiere que en las estaciones de bombeo se construyan una sala de mando o de control, equipada con tableros eléctricos de potencia y de control de la operación de cada bomba, ya sea en forma manual o automática. El tablero tiene la función entregar o cortar el suministro eléctrico a los motores, así como a los equipos auxiliares (ventilación, puente grúa, limpia rejillas, válvulas). Están provistos de un PLC (Controlador Lógico Programable) mediante el cual se comanda la operación automatizada de las bombas, que debe ser diseñado atendiendo a los requerimientos particulares de cada estación de bombeo. La lógica de arranques y paradas está asociada a la lectura de los sensores de nivel dispuestos en la cámara de bombeo, a los tiempos de espera necesarios para la estabilización de los niveles, a la combinación de operación por bombeo y gravedad, si es que fuera el caso, etc. Estos tableros también alojan distintos tipos de protecciones (relés e interruptores) para proteger los equipos del sobrecalentamiento y fallas de origen eléctrico.

Bajo el nombre de instalaciones de ensamblaje y mantenimiento agrupamos a la infraestructura y equipamiento requerido para la instalación de las bombas, así como para su desmontaje y montaje ante la necesidad de reparaciones. Estas instalaciones se conforman de una componente civil/arquitectónica, que se conforma de espacios de acceso y circulación, tanto para el personal como las maquinarias requeridas, dotado de las características pertinentes. Ejemplo de esto son los accesos de personal a los distintos recintos donde se disponen las bombas y los motores, los accesos para camiones y montacargas, un pañol para el guardado de herramientas y repuestos, etc. Por otro lado, tenemos los equipamientos mecánicos de mantenimiento donde se distingue principalmente los sistemas de carga como el puente grúa, las plumas o algún otro tipo de sistema de izajes.

Por último, cuando nos referimos a instalaciones de operación buscamos referirnos a aquellas instalaciones complementarias que nos permiten realizar distintas maniobras del funcionamiento de la estación de bombeo. En este grupo de instalaciones nos referimos a los sistemas de

compuertas de acceso a la estación de bombeo o a aquellas requeridas para la vinculación a los sistemas de descarga por gravedad, a los sistemas de reja y limpieza para la retención de sólidos en el acceso del flujo a la dársena, a los sistemas de válvulas o múltiples de impulsión, etc.

Referencias

La bibliografía recomendable para ampliar los contenidos de este capítulo es amplia y diversa. Ante esta situación las recomendaciones que haremos son acotadas en función de su especificación y relevancia en la aplicación de la técnica.

1. La primera área temática que podemos englobar es la de la gestión de los drenajes urbanos. Una referencia fundamental, en este sentido, el libro *Hidrología aplicada* donde hallaremos las referencias técnicas de los procesos de precipitación, abstracción y escurrimiento. La segunda referencia que queremos destacar es el *Manual para el diseño de planes maestros para la mejora de la infraestructura y la gestión del drenaje urbano* que publicó la Secretaría de Obras Públicas de la Nación Argentina el año 2013. Este manual brinda los lineamientos necesarios para gestionar la problemática de los drenajes urbanos e información técnica de las distintas áreas disciplinarias que deben intervenir en el proceso de gestión. Esta última referencia es tanto más relevante cuanto establece los lineamientos a considerar en el territorio argentino.
2. Las referencias principales en relación al funcionamiento hidráulico de las bombas ya han sido citadas en capítulos anteriores. Cabe mencionar los libros *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* y *Pumping station design* como las referencias más significativas.
3. El tercer grupo temático que encontramos en este capítulo refiere al diseño de una dársena de bombeo para efluentes fluviales. Aquí, la norma ANSI/HI 9.8, *Pump Intake Design*, es una de las principales referencias a considerar. Esta normativa brinda gran cantidad de información respecto a las condiciones generales en las que se han de construir las dársenas de bombeo, las condiciones de instalación de las bombas y los parámetros y variables que se deben evaluar para garantizar un correcto funcionamiento. Digna de mención es, también, la información que los propios fabricantes publican. En este sentido, vale destacar el libro *The Complete Guide to Stormwater Management* que publica la compañía Xylem o *Wastewater Pumps - Engineering Manual*, publicado por la compañía Grundfos, entre otros ejemplos.

A continuación se detallan las obras mencionadas:

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1994), *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.

Jones, G.M., Sanks, R.L., (2008), *Pumping Station Design*. Burlington: Butterworth-Heinemann.

Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, 2da. ed.* Madrid: Ediciones del Castillo S.A.

Grundfos A/S (2002), *Wastewater Pumps - Engineering Manual*. Denmark: OFFSET.

Hydraulic Institute Standards (1998). ANSI/HI 9.8. *American National Standard for pump Intake Design*. United States of America: Hydraulic Institute.

Presidencia de la Nación, Secretaría de Obras Públicas (2013), *Manual para el diseño de planes maestros para la mejora de la infraestructura y la gestión del drenaje urbano*. Argentina.

Xylem, Inc. (2018), *The Complete Guide to Stormwater Management*. Recuperado de www.xylem.com.