



SISTEMA DE DISPOSICIÓN FINAL PARA LA ZONA OESTE DE MONTEVIDEO. PLAN DE SANEAMIENTO URBANO IV - ESTACIONES DE BOMBEO

Leticia Malán(*)

SEINCO SRL. Ingeniera Civil Op. Hidráulica y Ambiental (UdelaR). Ingeniera de la consultora SEINCO S.R.L. desde octubre 2004 a la fecha, habiendo participado en proyectos de agua potable y saneamiento, en particular en el subproyecto Estaciones de Bombeo del PSUIV.

Ing. Alberto Bracho

SEINCO SRL

Ing. Julio Molinolo

SEINCO SRL

Ing. Francisco Gross

SEINCO SRL

Ing. Juan Sanguinetti

ISTEC

Ing. Emilio García

IMM

Ing. María Mena

IMM

Ing. Lucas Blasina

IMM



Dirección del autor principal (*): Itzaingó 1256 – Montevideo – Uruguay. Código Postal 11100. Tel: 29161565 Fax: 29163962. e-mail: lmalan@seinco.com.uy

RESUMEN

El consorcio SEINCO-TAHAL fue contratado por la Intendencia Municipal de Montevideo para realizar el proyecto ejecutivo del sistema de disposición final para la zona oeste de Montevideo el cual es parte de la cuarta etapa del Plan de Saneamiento Urbano (PSUIV).

Las principales obras incluidas en el proyecto son:

- Estaciones de Bombeo y Conducciones
- Planta de Pretratamiento
- Emisario Subacuático

El presente trabajo presenta el Sistema de **Estaciones de Bombeo y las Conducciones** asociadas, con las particularidades implicadas a un proyecto de gran porte.

Se han proyectado cinco estaciones de bombeo con caudales comprendidos entre 95 y 4,400 L/s. El diseño de las mismas considera que la totalidad de los equipos de bombeo cuenten con variador de frecuencia. Este aspecto, sumado a la modulación de equipos de bombeo, garantiza un barrido continuo de caudales. Asimismo el uso de variadores de frecuencia, permite reducir el volumen útil del pozo de húmedo, con la consecuente reducción en la inversión de obras civiles.

La selección del diámetro de las conducciones fue realizada mediante criterios de velocidad y un análisis económico en términos de valor presente neto. Para la selección de los materiales de las conducciones fueron considerados criterios económicos y técnicos. En algunos casos, los materiales seleccionados están condicionados por la configuración de los elementos de protección contra transitorios hidráulicos.

Palabras clave: estación de bombeo, conducciones, variador de frecuencia.

INTRODUCCION

Desde hace cuatro décadas la Intendencia de Montevideo (IM) ha venido ejecutando los Planes de Saneamiento Urbano de Montevideo. Hasta la fecha se han completado las siguientes etapas:

- Etapa I: Saneamiento al Este de Punta Carretas, Colector Costero, Estaciones de Bombeo y Emisario Subacuático en Punta Carretas.
- Etapa II: Saneamiento al Oeste de Punta Carretas, Colector Costero, Estaciones de Bombeo, Saneamiento de Cuencas Chacarita, Canteras y Flor de Maroñas.
- Etapa III: Saneamiento en Cuencas Miguelete y Pantanoso, Carrasco Norte, Refuerzo del Colector Costero, Cuenca Paraguay, Rejas y Estaciones de Bombeo.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO

La Etapa IV del Plan de Saneamiento Urbano, consiste en el diseño del sistema de disposición final de la Zona Oeste de Montevideo y comprende principalmente a las cuencas de los arroyos Miguelete y Pantanoso que desembocan en la Bahía de Montevideo, así como sistemas independientes como ser los de Cerro, Casabó y en el futuro La Paz – Las Piedras (Depto. de Canelones) y otros como ser Santa Catalina.

El Sistema proyectado consiste en un conjunto de cinco Estaciones de Bombeo (EBs), y sus respectivas líneas de impulsión, que conducen a una Planta de Pretratamiento (PPT). La PPT descarga por medio de una conducción por gravedad forzada, conformada por un emisario terrestre y subacuático, en el Río de la Plata. El esquema global del Proyecto se ilustra en las Figuras 1 y 2.



Figura 1: Planimetría esquema global del proyecto

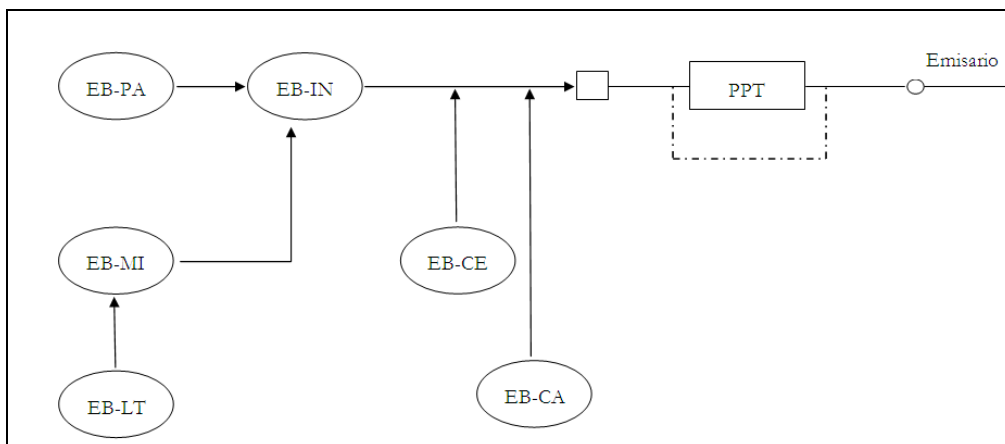


Figura 2: Esquema global del proyecto

Todas las Estaciones de Bombeo se ubican en puntos terminales de sistemas donde actualmente hay descargas existentes: Rejas Miguelete, Estación de Bombeo Pantanoso, descargas en Cerro, Casabó y La Teja. La entrada en operación del sistema conlleva a la eliminación de las mismas en tiempo seco, y se destaca que en el dimensionamiento del sistema se ha previsto una cuota parte importante para manejo de infiltración e intrusión pluvial.

Como se puede ver en Figuras 1 y 2, se trata de un sistema de bombeos en cascada, con la particularidad que las estaciones de bombeo Cerro y Casabó inyectan en la tubería de impulsión de la estación de bombeo Intermedia.

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESTACIONES DE BOMBEO

En la Tabla 1 se presentan los principales datos asociados a las EBs proyectadas, a saber: caudal de diseño, carga, número de bombas operativas, diámetro, material y longitud de la tubería de impulsión asociada.

Tabla 1: Características de las estaciones

Estación	Caudal (L/s)	Carga (mca)	Número de bombas operativas	Diámetro nominal impulsión (mm)	Material Impulsión	Longitud impulsión (m)
Intermedia	4,400	36.2	5	1,600	FD - PRFV	5,300
Miguelete	2,700	26.6	3	1,300	FD - PRFV	2,000
Cerro	120	57.2	2	350	FD	2,100
Casabó	150	48.3	2	400	PEAD	1,200
La Teja	95	9.3	1	250	FD	150

La EB Intermedia se ha diseñado con equipos de bombeo centrífugos de eje horizontal instalados en cámara seca. Las restantes estaciones de bombeo se han diseñado con equipos de bombeo de tipo sumergible. En la EB Miguelete los equipos de bombeo se instalaron en cámara seca, y en las restantes EBs se instalaron dentro del pozo húmedo.

La EB Intermedia estará emplazada en un predio lindero a la estación de bombeo Pantanoso. Esto tiene la ventaja de no agregar un nuevo elemento sensible en el entorno urbano de la ciudad.

Entre la cuenca de Miguelete y Pantanoso, la topografía presenta una divisoria de cuencas con una cota elevada ubicada frente al estadio Paladino (ver Figura 3). De forma de no perder la energía utilizada para elevar el caudal de Miguelete hasta este punto elevado, se diseña una estación de bombeo en línea con una chimenea de aproximadamente 14 metros de altura. Por lo anterior y para evitar el vaciado de la

línea de impulsión Miguelete, el nivel mínimo de agua en la chimenea deberá garantizar que la impulsión de Miguelete siempre esté llena de agua.

Por lo tanto, la estación de bombeo Intermedia se trata de un bombeo en línea (booster), aspecto del que no hay antecedentes en el Uruguay para estaciones de bombeo de líquidos residuales.

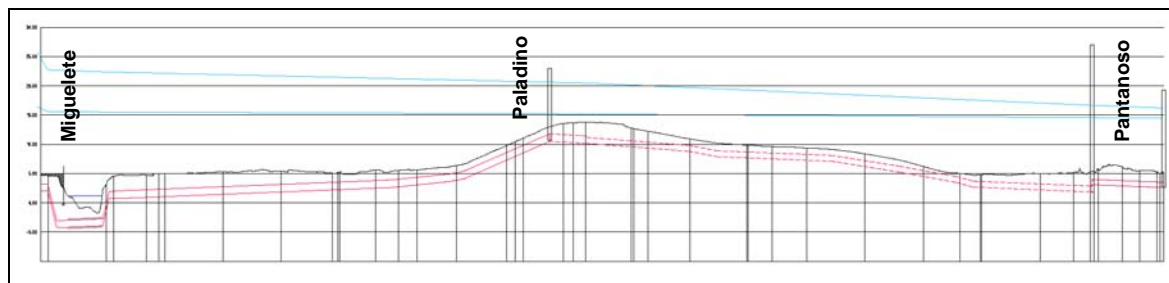


Figura 3: Perfil EB Miguelete

USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA

Todas las estaciones de bombeo estarán dotadas de variadores de frecuencia. Este tipo de operación tiene la ventaja principal de que cada estación “copiará” el caudal afluente, lo cual es de fundamental importancia en sistemas de bombeo en cascada como el presente. La modulación con múltiples unidades y el trabajo en “fajas de operación” permiten realizar un barrido continuo de todos los caudales afluentes, con cada equipo trabajando en rangos razonables, tal como se explica a continuación.

Cuando el nivel en el pozo húmedo está a un mínimo, todos los equipos de bombeo permanecerán apagados. Una vez que se alcance el nivel de encendido del primer equipo de bombeo, éste se encenderá y la frecuencia se ajustará de forma de buscar mantener un nivel constante dentro del pozo de bombeo.

Cuando la frecuencia alcance la velocidad plena o la máxima recomendada, y el nivel de agua siga subiendo dentro del pozo húmedo, significa que el equipo de bombeo no es capaz de erogar el caudal afluente. De esta forma, se alcanza un nivel que indica que se encienda un segundo equipo de bombeo.

Una vez que se encienda el segundo equipo de bombeo, el primero que encendió bajará la frecuencia de modo que ambos equipos funcionando a la misma frecuencia, eroguen el 50% del caudal afluente cada uno. Al aumentar el caudal afluente, ambos equipos en paralelo irán aumentando su frecuencia de operación, de forma de copiar el caudal afluente y mantener así el nivel constante en el pozo húmedo.

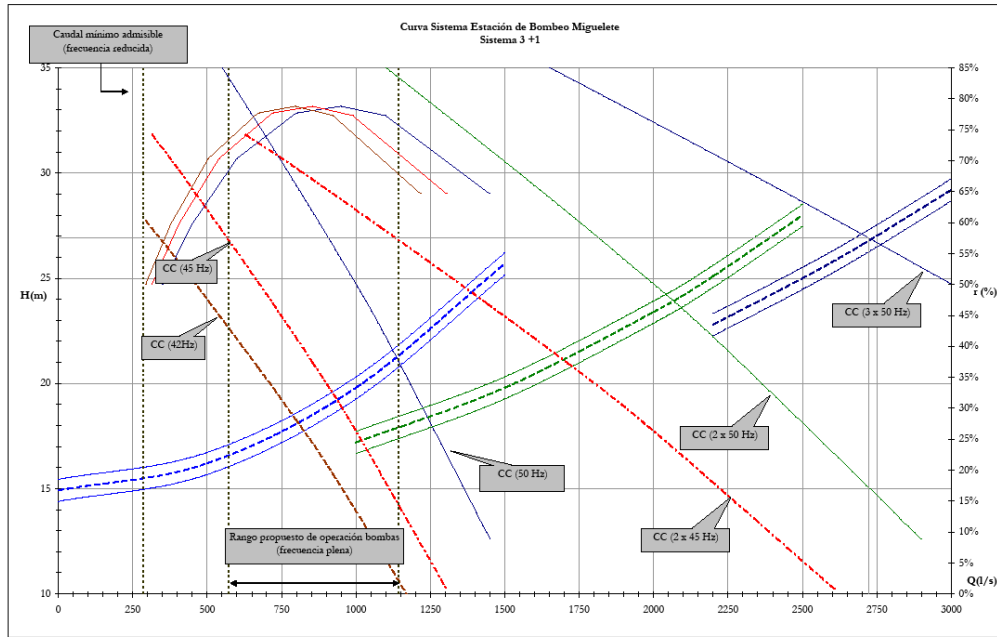
Cuando corresponda, a partir del tercer equipo y sucesivos a ser encendidos, estos entran a frecuencia plena mientras que los dos equipos que están variando su frecuencia, modificarán la misma de forma de copiar el caudal afluente y mantener así el nivel constante en el pozo húmedo.

Se entiende por rango razonable de operación para los equipos de bombeo, al comprendido entre 60 a 120% del caudal de máximo rendimiento a frecuencia plena. Este rango de variación citado en la bibliografía especializada (Tsutiya y Alem, 1999), (Metcalf & Eddy, 2003), busca eliminar problemas de recirculación de flujo dentro de los rotores cuando se opera a bajos caudales, y eliminar problemas de cavitación cuando se opera a caudales por encima del caudal óptimo de operación. Como caudal mínimo admisible, se considera el 30% del caudal de máximo rendimiento cuando se opera a frecuencia reducida (Tsutiya y Alem, 1999), o el caudal correspondiente a la autolimpieza.

A modo de ejemplo del trabajo realizado para todas las estaciones de bombeo, en la Gráfica 1 se presenta el análisis correspondiente a la estación de bombeo Miguelete. Se incluyen las curvas de una, dos y tres bombas operando en paralelo a frecuencia plena; curva de una bomba a una frecuencia

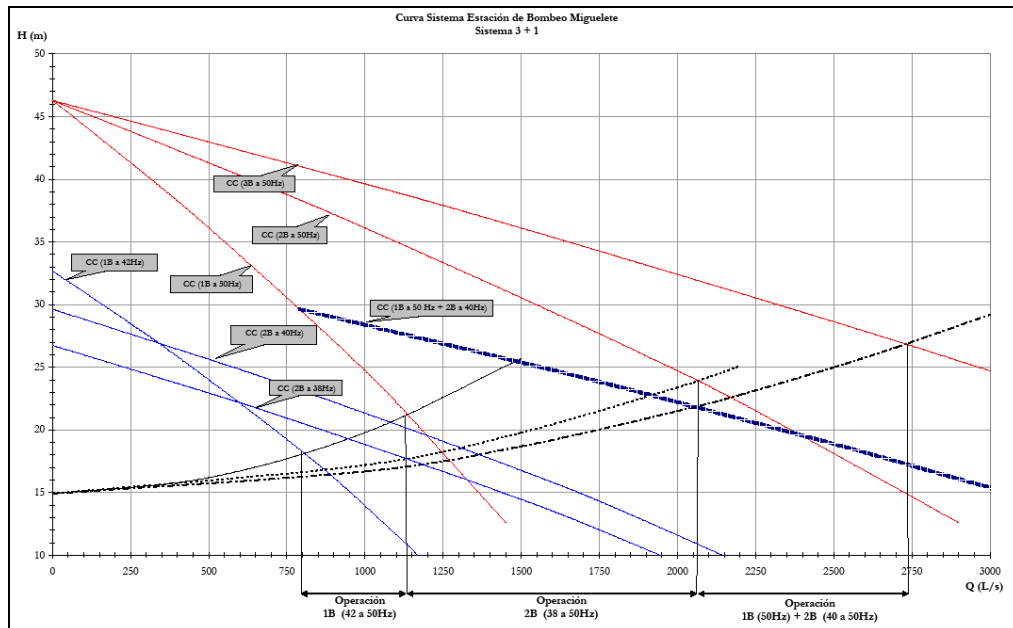
mínima; curva de dos bombas a frecuencia reducida, curvas de rendimiento y curvas del sistema para cuando opera una, dos y tres bombas en paralelo.

Gráfico 1: Curvas Características EB Miguelete



De forma de poder visualizar el barrido continuo de caudales, y los rangos de frecuencia de operación de los equipos de bombeo para EB Miguelete, se presenta el Gráfico 2.

Gráfico 2: Rangos de variación de frecuencia en EB Miguelete



En el mismo se puede ver que un solo equipo operará entre un caudal mínimo establecido (caudal de autolimpieza) con la frecuencia variando entre 42 y 50Hz; dos equipos en paralelo operarán a la misma frecuencia con un rango de variación de 38 a 50Hz; tres equipos en paralelo operarán con uno a frecuencia plena y dos variando la frecuencia entre 40 a 50Hz.

Una bomba trabajando a frecuencia reducida tiene capacidad para erogar el caudal correspondiente al medio inicial. En este caso, el caudal medio inicial es de aproximadamente 900 L/s y se eroga con un equipo trabajando a 45Hz.

Del análisis de los gráficos 1 y 2, se concluye que los equipos de bombeo seleccionados operan dentro de un rango adecuado, y barriendo de forma continua los caudales afluentes a la estación de bombeo.

Durante el desarrollo del proyecto ejecutivo, se utilizaron los gráficos para verificar los puntos de funcionamiento de los equipos de bombeo, frecuencias de operación, rendimientos, NPSH requerido y potencia consumida.

Otras ventajas asociadas al uso de variadores de frecuencia son:

- menor número de arranques y paradas de los equipos de bombeo, prolongando así su vida útil,
- minimización de volúmenes útiles de los pozos húmedos, y
- minimización de los tiempos de retención del agua residual y por tanto menores problemas de septicidad y olores.

Esta filosofía de diseño no tiene como objetivo optimizar el consumo energético, no obstante la penalización asociada a un aumento en el consumo de energía es relativamente menor, del orden del 7.5% (Manual of Practice FD-4: Design of Wastewater and Stormwater Pumping Stations de la Water Environment Federation). Esta penalización solamente aplica en los casos en que la altura estática es una fracción importante de la altura manométrica total, tal es el caso de las estaciones de bombeo que integran el sistema.

En el caso de EB Miguelete, para erogar el caudal medio a inicio de periodo (900 L/s), se debe trabajar con un equipo a una frecuencia de 45Hz. Para erogar el caudal medio a fin de periodo (1430 L/s), se debe trabajar con dos equipos a una frecuencia de 43Hz. En ambos casos, no hay una diferencia significativa en los rendimientos de los equipos de bombeo, estando el mismo en ambos casos en el entorno del 78%. De acuerdo a estos resultados, se puede decir que en las principales estaciones de bombeo (Miguelete e Intermedia), la penalización energética por tener altura estática elevada respecto a la altura manométrica total, estará por debajo de lo indicado en la bibliografía consultada.

CRITERIO DE DISEÑO PARA DETERMINACIÓN DE VOLUMEN ÚTIL

El volumen útil se determina considerando que todos los equipos de bombeo contarán con variador de frecuencia. Asimismo se considera la alternancia de los equipos normalmente operativos, por ejemplo en un sistema 2+1, la alternancia se considera entre dos equipos de bombeo.

El volumen de almacenamiento entre los niveles de arranque/parada por cada bomba en operación, se determina por medio de la siguiente ecuación (Tsutiya y Alem, 1999):

Fórmula 1: Cálculo de volumen útil

$$V = \frac{1}{4} \times Q(b) \times T_{\min} \times \frac{1}{n}$$

donde: V = Volumen útil (m³)

Q(b) = Máximo entre caudal erogado por un equipo de bombeo operando a la frecuencia mínima admisible y caudal mínimo de autolimpieza de la tubería de impulsión (m³/min)

T_{\min} = Duración mínima de un ciclo de bombeo (min)
 n = Número de equipos de bombeo operativos; no se consideran los equipos de respaldo

DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE LAS CONDUCCIONES

El diámetro de las conducciones se determina en función de criterios de velocidad y del análisis económico (diámetro económico).

La velocidad deberá estar comprendida entre un mínimo de 0.60 m/s y un máximo cercano a los 2.00 m/s. El valor de velocidad mínima es para evitar sedimentación, mientras que el valor máximo es para limitar las pérdidas de energía por fricción.

El análisis para determinar el diámetro económico considera un periodo de 25 años, y toma en cuenta los siguientes aspectos:

- costos de inversión en suministro e instalación de tuberías;
- costos de inversión en suministro e instalación de equipos de bombeo. Asimismo, se considera que al año 25, se deberán comprar nuevos equipos;
- costo de inversión en la compra de tableros eléctricos y control de equipos de bombeo;
- costo de consumo eléctrico. En particular se hace un análisis de sensibilidad, considerando costos de energía eléctrica comprendido entre 0.10 y 0.15 U\$S/Kw.h.

El resultado económico se realiza en términos de valor presente neto, con una tasa de interés del 10%. Los diámetros y materiales seleccionados de las tuberías son presentados en la Tabla 1.

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN CONTRA TRANSITORIOS HIDRÁULICOS

De manera general, el caso más comprometido para el estudio de los transitorios hidráulicos resulta ser el apagado brusco del equipo impulsor, cuando el sistema se encuentra operando en alguna de las diferentes configuraciones posibles.

Las premisas utilizadas para el dimensionado en régimen transitorio fueron las siguientes:

- En las líneas principales del sistema, no se consideran aplicables en este proyecto soluciones basadas en dispositivos tales como válvulas anticipadoras de onda, válvulas de aire o similares. Este criterio busca minimizar problemas en la operación relacionados con eventos que requieren mantenimiento inmediato con probabilidad de ocurrencia relativamente alta.
- En las líneas principales del sistema se minimizará la ocurrencia de ingreso de aire en régimen transitorio, con lo que se minimiza el riesgo de problemas asociados a la presencia de aire en el sistema principal.
- Presión negativa mínima admisible -4 m, se obtiene un margen de seguridad aceptable respecto a la posibilidad de cavitación así como no se exige la tubería y sus juntas frente a depresiones importantes.
- En las líneas principales del sistema, se minimizará el riesgo de falla estructural por fatiga de materiales plásticos, evitando el uso de estos materiales en tuberías donde sean sometidas a ciclos de presión relativamente importantes con alta frecuencia.

Para el estudio de los transitorios hidráulicos se utilizó el modelo matemático para flujo transitorio en tuberías a presión llamado HiTrans, que resuelve las ecuaciones del movimiento por el método de las características.

Para el diseño de protecciones contra transitorios hidráulicos, se estudiaron las distintas combinaciones de escenarios de falla, sobre todo en el caso de las impulsiones interconectadas (Intermedia, Cerro y Casabó)

En la siguiente tabla se presentan los principales dispositivos de protección utilizados en cada estación de bombeo.

Tabla 2: Dispositivos de protección contra transitorios hidráulicos

Estación	Dispositivo en EB		Dispositivo en línea	
	Intermedia	Volantes de inercia	300kgm ²	Chimenea de equilibrio
Miguelete	Tanque Hidroneumático	70m ³	Chimenea de equilibrio	Progresiva +930m
Cerro	Tanque Hidroneumático	5.4m ³	No requiere	
Casabó	Tanque Hidroneumático	5.0m ³	No requiere	
La Teja	No requiere		No requiere	

CONCLUSIONES

Actualmente las cuencas de saneamiento de la zona oeste de Montevideo vierten a la bahía en puntos terminales: Miguelete, Pantanoso, Cerro, Casabó y La Teja. De forma de captar estos vertidos y conducirlos a una Planta de Pretratamiento, se han diseñado estaciones de bombeo en todos los puntos terminales indicados.

El sistema de bombeo incluye estaciones con capacidades entre 95 a 4,500 L/s, lo que implica que se está frente a estructuras de mediano a gran porte.

Se ha diseñado un sistema de estaciones de bombeo en cascada, con la particularidad que las EB “menores” EB Cerro y EB Casabó inyectan en la tubería de impulsión de EB Intermedia. En este punto se destaca que el estudio de los transitorios hidráulicos incluye a las tres estaciones de bombeo indicadas, y considera distintas combinaciones del apagado accidental de equipos de bombeo.

La principal estación de bombeo del sistema es la que se ha denominado Intermedia. El diseño de la misma contempla la optimización del consumo energético del sistema; principalmente evita perder la energía suministrada al caudal elevado desde la EB Miguelete mediante la implementación del bombeo en línea. Se aclara que el caudal de la cuenca Miguelete (2,700 L/s), representa aproximadamente el 60% del caudal afluente a EB Intermedia (4,400 L/s).

El desarrollo del proyecto ejecutivo, ha considerado criterios para:

- determinar los coeficientes de pico para cálculo de caudales máximos afluentes a las distintas estaciones de bombeo;
- cálculo del volumen útil cuando se tienen equipos de bombeo equipados con variador de frecuencia;
- determinar rangos y frecuencias aceptables para el funcionamiento de equipos de bombeo;
- determinar el diámetro económico de las conducciones;
- selección de sistemas robustos de protección contra transitorios hidráulicos;
- minimización de la presencia de aire en tuberías;
- estaciones de bombeo de cámara seca para EB Intermedia y EB Miguelete, atendiendo a las facilidades de mantenimiento que presentan instalaciones de este tipo.

Se destaca que se ha realizado un análisis pormenorizado de las condiciones de funcionamiento de los distintos sistemas de bombeo proyectados, mediante la ayuda de gráficos generados por el Consultor.