

Anejo VIII. Cálculo hidráulico

Proyecto básico de emisario submarino para la ampliación de la
desaladora Al-Gubrah (Omán)



ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. Diseño hidráulico..... | 3 |
| 1.1. Caracterización de la tubería | 3 |
| 1.2. Verificaciones pertinentes | 4 |
| 1.2.1. Velocidad..... | 4 |
| 1.2.2. Presión..... | 5 |
| 1.3. Pérdidas de carga..... | 6 |
| 1.4. Sobrepresiones debidas al golpe de ariete | 7 |
| 1.5. Resultados | 9 |
| 1.6. Simulación mediante EPANET..... | 10 |
| 1.7. Conclusiones | 13 |



ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: resultados para Ø1200..... | 9 |
| Tabla 2: Resultados para Ø900..... | 9 |
| Tabla 3: Resultados para Ø500..... | 9 |
| Tabla 4: Tabla de caudal y velocidad de salida en los difusores..... | 11 |
| Tabla 5: Velocidad en cada punto de la tubería principal | 12 |
| Tabla 6: Velocidad del fluido en los estrechamientos..... | 12 |
| Tabla 7: Presión en los nudos | 13 |
| Tabla 8: Presión en los estrechamientos | 13 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Representación estrechamiento del tramo difusor..... | 5 |
| Figura 2: Coeficiente K de pérdidas. | 7 |
| Figura 3: Curvas de obtención de k y c | 8 |
| Figura 4: curva de perdidas/caudal de válvula difusora..... | 10 |
| Figura 5: Simulación Epanet | 11 |



1. Diseño hidráulico

En el siguiente apartado, el de diseño hidráulico, el objetivo es verificar que la tubería diseñada en los apartados anteriores, cumpla los requisitos necesarios para soportar las solicitaciones de carga hidráulica que, el transporte de salmuera, exige. La referencia empleada para las comprobaciones pertinentes será, una vez más, la “guía técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión” respaldada por el CEDEX.

Para realizar las comprobaciones mencionadas, se ha crea un modelo mediante EPANET que simula, con un alto grado de realismo, el sistema de tuberías desde la impulsión del fluido hasta la salida por los difusores. Se ha decidido emplear un programa de simulación debido a que realizando los cálculos a mano, el margen de error es mucho mayor.

Sea como fuere, en este apartado del anejo se explican los medios e información requeridos para hacer, tanto los cálculos a mano, como la simulación, ya que ésta emplea los mismos medios para modelizar los diferentes sistemas de tuberías.

1.1. Caracterización de la tubería

Un emisario submarino es un sistema que sirve para transportar un vertido residual desde la planta hasta un punto del mar donde no afecte a la población civil, ni a la fauna o flora del entorno. El emisario submarino objeto de este proyecto básico, está formado por varios elementos.

La tubería principal, que sirve de vía del vertido desde la planta desaladora hasta el tramo difusor, consiste en una tubería, de 1200mm de diámetro, de polietileno de alta densidad (PEAD), cuya longitud es de aproximadamente 2300 metros.

El tramo difusor, es el tramo final del emisario. Consiste en una tubería de 250 metros de longitud, de diámetro variable. La característica principal del tramo difusor es la presencia de 25 orificios de salida de la salmuera espaciados 11 metros entre sí. Cada orificio es una bifurcación a una tubería de corta longitud, 20cm, y diámetro variable, que en su extremo tiene anclado, mediante pernos, un difusor.

Dicho difusor es una válvula de no retorno de goma, que tiene forma de pico de pato. Esta válvula se abre en función del caudal saliente, a un nivel proporcional, de forma que si el caudal es nulo, la válvula queda cerrada evitando la entrada del agua marina al sistema.

- El primer tramo del difusor, de 104 metros de longitud tiene un diámetro de 1200 mm de PEAD, idéntica a la tubería principal. Las bifurcaciones de cada 11



- metros, mencionadas anteriormente, derivan en una tubería de 90mm (por cada bifurcación) que, en su extremo, presenta un difusor de mismo diámetro.
- El segundo tramo del difusor, mide 110 metros de longitud, y es de diámetro 900mm, un poco más pequeña que la principal. Las 10 tuberías de la bifurcación son de 110mm de diámetro, con los pertinentes difusores (de mismo diámetro) en su extremo.
 - El último tramo difusor, de diámetro 500mm, mide 55 m. Este tramo tiene 5 bifurcaciones a las tuberías de los difusores de 140mm.

Según la normativa española, que regula el asunto de vertidos procedentes de estaciones depuradoras de aguas residuales, especifica que la separación entre los difusores debe ser de, al menos, 0.3 veces la profundidad en el punto de vertido. Esta condición se realiza bajo la premisa de que la densidad del vertido es menor que la del ambiente receptor, de forma que el vertido asciende desde el fondo a la superficie, incrementándose la dilución inicial cuanto más distancia haya entre difusores y entre el punto de vertido y la superficie marina.

En el caso de las salmueras, por el contrario, el fluido desalojado tiene una densidad mayor que el medio receptor, por lo que una vez expulsado tenderá a sumergirse. Es a sabiendas de este hecho, que se ha decidido colocar los difusores con una inclinación de 45º respecto de la horizontal, de modo que la impulsión de vertido se realiza con trayectoria ascendente, con la mayor velocidad posible, procurando una mayor dilución inicial. Está formado por 25 puertos de vertido, separados 10 metros entre sí. Con esta separación quedamos del lado de la seguridad respecto de la normativa española garantizando una mayor dilución inicial.

Esta caracterización de la tubería, se ha establecido considerando un caudal de diseño de 2.400 l/s.

1.2. Verificaciones pertinentes

Hay una serie de condiciones que se deben tener en cuenta para realizar tanto el diseño como las comprobaciones de viabilidad y correcto funcionamiento del sistema.

1.2.1. Velocidad

La **velocidad** del fluido es un condicionante que influye tanto en la durabilidad la conducción como en la efectividad del sistema de vertido de salmuera. La velocidad mínima del fluido en la conducción es de 0,6 m/s. Esta velocidad está definida por la autolimpieza de ésta evitando así incrustaciones.



La velocidad máxima recomendable en este tipo de conducciones oscila entre los 2 y 2,5 m/s, velocidad a partir de la cual se incrementan las pérdidas, lo que implica una mayor demanda de energía para alcanzar estas velocidades. El inconveniente de superar esta velocidad es meramente económico, ya que estructuralmente, la tubería soporta velocidades muy elevadas sin daños.

En el proceso de vertido, el fluido llega al tramo difusor con una energía, sin embargo, el fluido pierde velocidad después de cada bifurcación, por este motivo en el diseño de algunos emisarios submarinos, se plantea, el decremento progresivo de diámetro en la tubería, para mantener la velocidad mínima en todas las secciones.

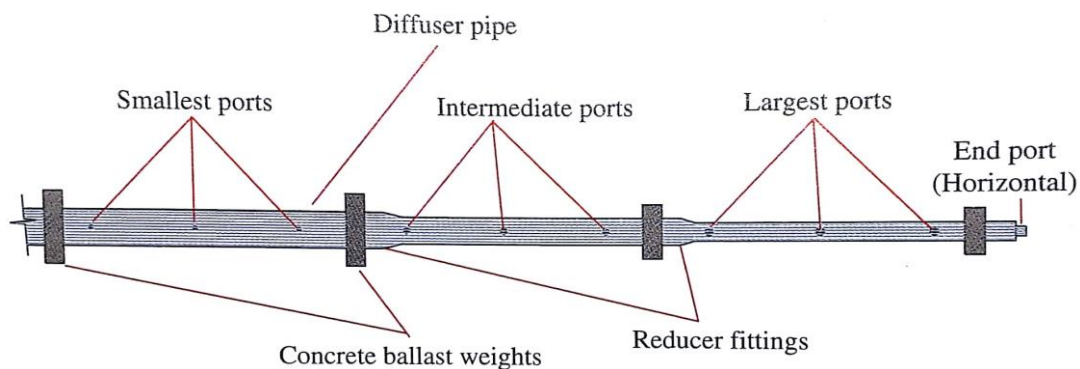


Figura 1: Representación estrechamiento del tramo difusor

La diferencia entre el diseño con una única sección y de sección variable es que en el de sección simple se requiere mucha más energía para mantener la velocidad mínima en todo el trayecto. Sin embargo, hay situaciones en que debido a las condiciones constructivas puede ser más rentable la construcción de un emisario de sección simple.

En este proyecto, se parte de la hipótesis de que es más rentable el diseño de una tubería de sección variable, motivo por el cual se considera una tubería de sección variable.

En el apartado siguiente se analizan las pérdidas de carga que hacen de la velocidad un factor a estudiar.

1.2.2. Presión

El otro factor que condiciona el correcto funcionamiento de la conducción es la **presión**. Cada tubería de una escala normalizada, está diseñada para soportar una presión máxima que, si se supera, podría haber daños irreversibles ya sea por pandeo o por una presión negativa.

En lo que a la presión respecta se debe tener especial cuidado con el llamado golpe de ariete. El golpe de ariete es una sobrepresión producida por un cambio repentino en el



caudal entrante, por ejemplo, por el cierre de una válvula. Más delante de este apartado de cálculo hidráulico se realiza el cálculo del golpe de ariete producido en fase de construcción y en fase de funcionamiento.

1.3. Pérdidas de carga

Las pérdidas totales de carga en una tubería se describen por las pérdidas de carga continuas y pérdidas de carga puntuales. El valor de las pérdidas de carga por rozamiento con la tubería, consideradas continuas, se pueden obtener con la formula empírica de darcy-weissbach que para un tramo de tubería de diámetro constante es:

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

Donde:

H_f es la perdida de carga en el tramo en m.c.a.

L es la longitud del tramo en metros

D es el diámetro interior de la tubería

V es la velocidad del agua en m/s

g es la gravedad

f es el coeficiente de fricción definido por la ecuación de colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Donde:

Re es el número de Reynolds = $v \cdot D / \nu$

ν equivale a $1,01 \times 10^{-6}$

$\varepsilon = 0,0025$ es la rugosidad absoluta de la pared de la tubería para el PE

En puntos singulares como y accesorios como válvulas, codos entradas, salidas, etc.. se producen perdidas de carga puntuales que se calculan a partir de la expresión:

$$h = k \frac{V^2}{2g}$$

Donde k es el coeficiente de perdida de carga del elemento que depende del tipo de elemento. En este caso pueden ser influyentes el de bifurcación y el de estrechamiento.



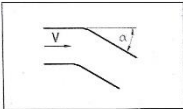
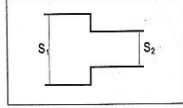
| Elemento | Coeficiente k_i | | | | | |
|---|-------------------|------|------|------|------|------|
| | α | 20° | 40° | 60° | 80° | 90° |
| Codos segmentados | | | | | | |
|  | k_i | 0,05 | 0,20 | 0,50 | 0,90 | 1,15 |
| Disminución de sección | S_2/S_1 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 |
|  | k_i | 0,5 | 0,43 | 0,32 | 0,25 | 0,14 |

Figura 2: Coeficiente K de pérdidas.

El coef debido a un codo, no se contempla debido a que el ángulo es muy pequeño para ser influyente.

1.4. Sobrepresiones debidas al golpe de ariete

Se denomina golpe de ariete en tuberías a la variación brusca de presión que se produce cuando varía la velocidad en una tubería que está funcionando en régimen permanente.

Esta situación se produce por la operación de una válvula o la parada de una bomba, hecho que produce una variación de caudal y de la presión del agua que circula por la tubería en el punto donde se encuentra la válvula o la bomba.

El resultado de esta variación de presión y caudal en un punto es una variación de presión y caudal que se desplaza por toda la masa de agua como movimiento ondulatorio, cuya velocidad de propagación se llama celeridad siendo su valor el dado por la fórmula de Allievi:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}}$$

Donde:

a es la celeridad de la onda de propagación en m/s

k =113 es la constante variable con el material (PEAD)

El valor del incremento de presión máximo depende del tiempo T que se puede calcular según la expresión:



$$T = c + \frac{k \cdot L \cdot V}{g \cdot H_m}$$

Donde:

K y c se obtienen de las siguientes gráficas

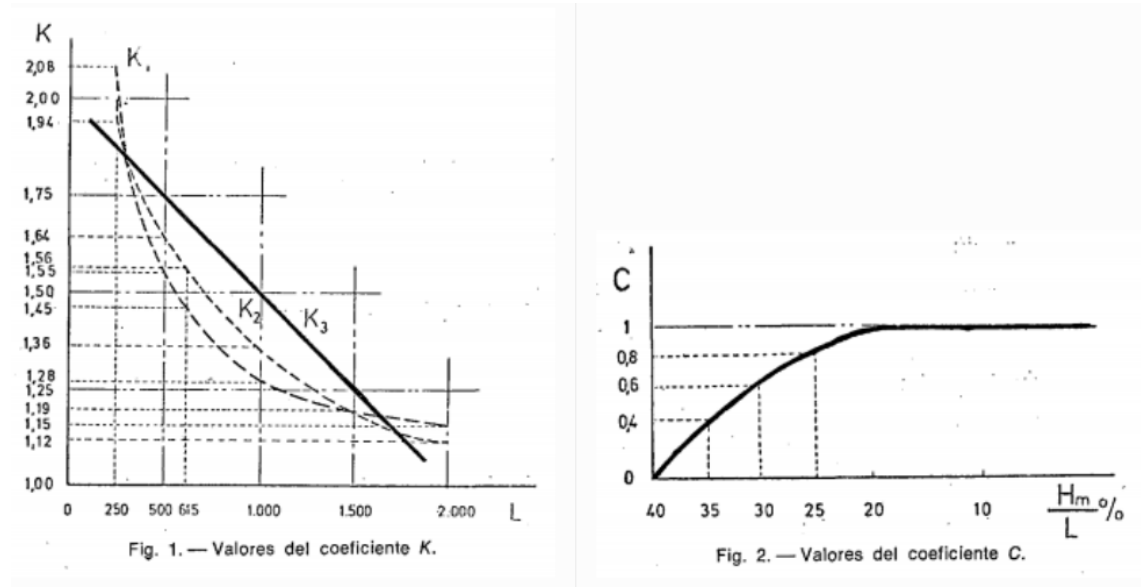


Figura 3: Curvas de obtención de k y c

El incremento de presión lo calculamos con la siguiente expresión:

$$\Delta H = \mp \frac{2LV}{gt} \quad \text{si } t \geq \frac{2L}{a}$$

$$\Delta H = \mp \frac{aV}{g} \quad \text{si } t \leq \frac{2L}{a}$$

Donde:

ΔH : es el máximo incremento de presión en la tubería en mca

L : es la longitud de la tubería medida desde el punto de desagüe en metros

t : es el tiempo que transcurre hasta que se anula el caudal en la tubería.



1.5. Resultados

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos:

Ø1200

| | |
|-------------|-------|
| AH lenta288 | 15,47 |
|-------------|-------|

| | |
|--------------|-------|
| AH lenta2600 | 31,15 |
|--------------|-------|

| Id | Valor |
|--------------|--------|
| Dn (m) | 1,20 |
| e (m) | 0,05 |
| a(celeridad) | 187,88 |
| T288 | 9,49 |
| K288 | 1,85 |
| L | 288,00 |
| Hm | 16,00 |
| C | 1,00 |
| V | 2,50 |
| g | 9,81 |

Tabla 1: resultados para Ø1200

| Id | Valor |
|---------------|---------|
| T2600 | 37,63 |
| K2600 | 1,00 |
| L | 2300,00 |
| Hm | 16,00 |
| AH lenta288 | 15,47 |
| AH lenta2600 | 31,15 |
| AH rapida288 | 47,88 |
| AH rapida2300 | 47,88 |
| comprob t288 | 3,07 |
| comprob t2600 | 24,48 |

Ø900

| | |
|-------------|-------|
| AH lenta100 | 12,46 |
|-------------|-------|

| Id | Valor |
|--------------|-------|
| C | 1,00 |
| V | 2,50 |
| g | 9,81 |
| AH lenta100 | 12,46 |
| AH rapida100 | 47,86 |
| comprob t100 | 1,06 |

Tabla 2: Resultados para Ø900

| Id | Valor |
|--------------|--------|
| Dn (m) | 0,90 |
| e (m) | 0,03 |
| a(celeridad) | 187,81 |
| T100 | 4,09 |
| K100 | 1,94 |
| L | 100,00 |
| Hm | 16,00 |

Ø500

| | |
|-------------|-------|
| AH lenta288 | 10,01 |
|-------------|-------|

| Id | Valor |
|--------------|--------|
| Dn (m) | 0,50 |
| e (m) | 0,02 |
| a(celeridad) | 187,75 |
| T50 | 2,54 |
| K50 | 1,94 |
| L | 50,00 |

Tabla 3: Resultados para Ø500

| Id | Valor |
|--------------|-------|
| Hm | 16,00 |
| C | 1,00 |
| V | 2,50 |
| g | 9,81 |
| AH lenta50 | 10,01 |
| AH rapida50 | 47,85 |
| comprob t100 | 0,53 |



Las tuberías de esta conducción soportan 65 mca, y la presión máxima en el funcionamiento es de 17.4 mca por lo que podría soportar una sobrepresión de hasta 47.6m.c.a.

1.6. Simulación mediante EPANET

En la simulación de EPANET se colocan una serie de elementos que simulan las características de la realidad. En Las tuberías colocadas se especifica la cota de los puntos de salida y llegada, unidos por nudos, nudos a partir de los que sale una tubería secundaria de menor diámetro (también especificada) hasta el difusor. La simulación se ha llevado a cabo con una presión de diseño de impulsión de 10 m.c.a. y un caudal de diseño de 2400l/s

El difusor de pico de pato se ha implementado mediante una curvatura de pérdidas, que relaciona el caudal saliente con las pérdidas en m.c.a. generadas. La curva empleada es La del difusor Duckbill de 12" de la empresa CLA-VAL. El difusor empleado en este proyecto será de Ø90mm Ø110mm y Ø140mm, sin embargo, en ausencia de una curvatura más ajustada, se empleara la de este difusor a modo de referencia.

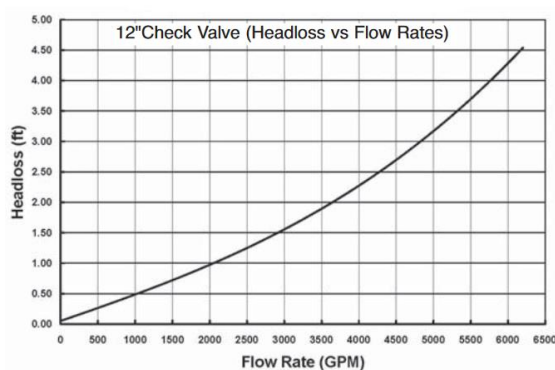


Figura 4: curva de perdidas/caudal de válvula difusora

En la práctica, los difusores estarán sometidos a la presión del mar, esta situación se ha aplicado en la simulación colocando en cada válvula un embalse con una diferencia de cota equivalente a la diferencia de cota entre el difusor y la superficie marina.

En la siguiente figura se muestra la distribución de tuberías expresando su leyenda para la interpretación y comprensión de las tablas siguientes.

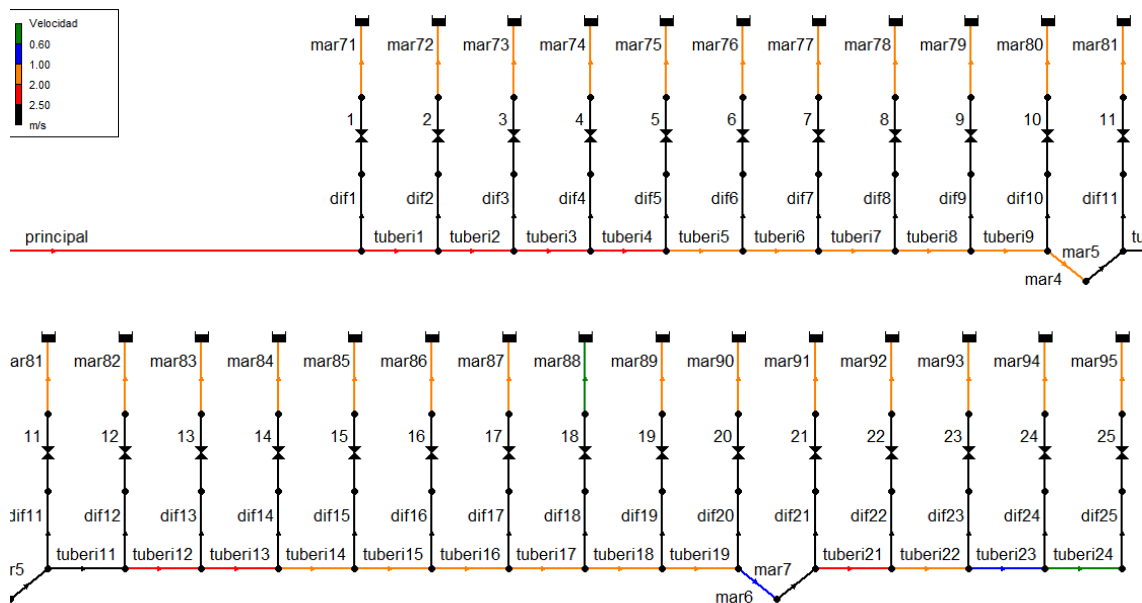


Figura 5: Simulación Epanet

A continuación se muestra la distribución de caudal saliente por cada difusor así como su velocidad de salida.

| ID Línea | Caudal LPS | Velocidad m/s | ID Línea | Caudal LPS | Velocidad m/s |
|------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|
| Válvula 0 | 2400.00 | 2.48 | Válvula 13 | 115.38 | 14.69 |
| Válvula 1 | 98.58 | 19.61 | Válvula 14 | 111.08 | 14.14 |
| Válvula 2 | 96.63 | 19.22 | Válvula 15 | 107.45 | 13.68 |
| Válvula 3 | 94.80 | 18.86 | Válvula 16 | 104.44 | 13.30 |
| Válvula 4 | 93.09 | 18.52 | Válvula 17 | 102.01 | 12.99 |
| Válvula 5 | 91.50 | 18.20 | Válvula 18 | 39.35 | 5.01 |
| Válvula 6 | 90.02 | 17.91 | Válvula 19 | 98.35 | 12.52 |
| Válvula 7 | 88.64 | 17.64 | Válvula 20 | 97.04 | 12.36 |
| Válvula 8 | 87.38 | 17.38 | Válvula 22 | 95.95 | 7.82 |
| Válvula 9 | 86.22 | 17.15 | Válvula 23 | 86.72 | 7.07 |
| Válvula 10 | 85.15 | 16.94 | Válvula 24 | 82.40 | 6.71 |
| Válvula 11 | 126.25 | 16.07 | Válvula 25 | 81.18 | 6.61 |
| Válvula 12 | 120.43 | 15.33 | Válvula 21 | 119.97 | 9.78 |

Tabla 4: Tabla de caudal y velocidad de salida en los difusores

A continuación se muestra una tabla con la distribución de velocidades a lo largo de la tubería principal.



| ID Línea | Velocidad m/s | ID Línea | Velocidad m/s |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Tubería tuber1 | 2.38 | Tubería tuber13 | 2.08 |
| Tubería tuber2 | 2.28 | Tubería tuber14 | 1.87 |
| Tubería tuber3 | 2.18 | Tubería tuber15 | 1.67 |
| Tubería tuber4 | 2.08 | Tubería tuber16 | 1.48 |
| Tubería tuber5 | 1.99 | Tubería tuber17 | 1.29 |
| Tubería tuber6 | 1.90 | Tubería tuber18 | 1.22 |
| Tubería tuber7 | 1.81 | Tubería tuber19 | 1.04 |
| Tubería tuber8 | 1.71 | Tubería tuber21 | 2.08 |
| Tubería tuber9 | 1.63 | Tubería tuber22 | 1.51 |
| Tubería tuber11 | 2.51 | Tubería tuber23 | 0.98 |
| Tubería tuber12 | 2.29 | Tubería tuber24 | 0.49 |

Tabla 5: Velocidad en cada punto de la tubería principal

Cabe destacar las velocidades en los estrechamientos, ya que son puntos críticos:

| ID Línea | Velocidad m/s | ID Línea | Velocidad m/s |
|--------------|------------------|--------------|------------------|
| Tubería mar4 | 1.54 | Tubería mar6 | 0.86 |
| Tubería mar5 | 2.74 | Tubería mar7 | 2.81 |

Tabla 6: Velocidad del fluido en los estrechamientos

En la siguiente tabla se muestra la distribución de presiones en m.c.a. en los nudos de bifurcación, ya que son los puntos más desfavorables.



| ID Nudo | Presión m | ID Nudo | Presión m |
|-------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| Conexión valvulaentrada | 7.22 | Conexión bifurc13 | 15.87 |
| Conexión bifurc1 | 15.17 | Conexión bifurc14 | 15.92 |
| Conexión bifurc2 | 15.22 | Conexión bifurc15 | 15.93 |
| Conexión bifurc3 | 15.28 | Conexión bifurc16 | 16.09 |
| Conexión bifurc4 | 15.34 | Conexión bifurc17 | 16.25 |
| Conexión bifurc5 | 15.40 | Conexión bifurc18 | 16.42 |
| Conexión bifurc6 | 15.46 | Conexión bifurc19 | 16.59 |
| Conexión bifurc7 | 15.53 | Conexión bifurc20 | 16.76 |
| Conexión bifurc8 | 15.59 | Conexión bifurc21 | 16.89 |
| Conexión bifurc9 | 15.66 | Conexión bifurc22 | 16.98 |
| Conexión bifurc10 | 15.73 | Conexión bifurc23 | 17.13 |
| Conexión bifurc11 | 15.78 | Conexión bifurc24 | 17.29 |
| Conexión bifurc12 | 15.82 | Conexión bifurc25 | 17.47 |

Tabla 7: Presión en los nudos

Cabe destacar las presiones en los estrechamientos, ya que son puntos críticos:

| ID Nudo | Presión m | ID Nudo | Presión m |
|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Conexión estrechamiento1 | 15.76 | Conexión estrechamiento2 | 16.85 |

Tabla 8: Presión en los estrechamientos

1.7. Conclusiones

Como conclusión, es importante verificar que los máximos y mínimos en esta simulación están dentro de los parámetros aceptables:

- Caudal:
El caudal estudiado, en este caso, es el caudal saliente por cada difusor respecto a los 2.400 l/s entrantes a la tubería principal. Lo idóneo sería una distribución igualada de caudales de vertido, sin embargo debido a las diferentes presiones y a los cambios de sección se aprecian ciertas diferencias entre caudales salientes. El caudal mínimo saliente (como caso aislado) es de 39,35 l/s en la válvula 18, a partir de este, la válvula siguiente con caudal mínimo es la 25 (ultima) con un caudal saliente de 81,18 l/s, un 35% más bajo respecto del caudal máximo saliente, 126,25 l/s en la válvula 11. Es una diferencia asumible y que no condiciona el resultado final.



- Velocidad:

El objetivo del diseño hidráulico es obtener un sistema de tuberías con un rango de velocidades (en la tubería principal) entre 0,6 y 2,5 m/s. Esta condición se ha cumplido en la mayor parte del sistema. En los estrechamientos la velocidad se excede en un leve porcentaje hasta un máximo de 2,81 m/s, en el resto de sistema se cumplen los máximos recomendados.

Respecto al mínimo, existe un punto del sistema en la tubería 24 en el que la velocidad del fluido es de 0,49 m/s, ligeramente por debajo del mínimo recomendado para autolimpieza de la conducción.

Pese a estas dos excepciones, se concluye que la distribución de velocidades a lo largo del trazado es aceptable, ya que el margen de error no es significativo.

- Presiones

Como se muestra en la tabla de resultados, la presión máxima se encuentra en el nudo 24 y equivale a 17,47 m.c.a.. Las tuberías de este sistema tienen una PN de 65 mca aproximadamente, por lo que las presiones debidas a la impulsión de vertido son soportadas. La situación se puede dar debido al golpe de ariete que puede presentar una sobrepresión máxima de 47 mca (en el peor de los casos). Teniendo en cuenta la sobrepresión crítica por el golpe de ariete aplicada sobre la presión máxima del sistema, las tuberías soportarían dicha sobrepresión, motivo por el cual se considera aceptable la presión máxima en el sistema.