



ANEXO 10. COMPROBACIÓN HIDRÁULICA DEL EMISARIO

ÍNDICE

1. CAUDAL DE DISEÑO	2
2. MÉTODOS DE CÁLCULO	2
3. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL EMISARIO	3
3.1 DISPOSITIVO DIFUSOR.....	3
3.2 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO APOYADO EN EL LECHO MARINO.....	4
3.3 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO ENTERRADO EN ZANJA MARINA	4
3.4 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO TERRESTRE HASTA LA EDAR	4
4. CÁLCULOS HIDRÁULICOS	4
4.1 CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DISPOSITIVO DIFUSOR.....	4
4.2 CÁLCULO HIDRÁULICO GENERAL DEL EMISARIO	7
4.2.1 Pérdidas de carga totales para el caudal de diseño	7
5. CIRCULACIÓN DEL AIRE EN EL EMISARIO.....	7

ANEXO 10. COMPROBACIÓN HIDRÁULICA DEL EMISARIO

1. CAUDAL DE DISEÑO

El emisario tiene que poder desaguar un caudal máximo de 400 m³/h (111,11 l/s).

2. MÉTODOS DE CÁLCULO

Las conducciones a presión se calculan con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

- f: coeficiente de fricción
- L: longitud tubería
- D: diámetro interior tubería

El coeficiente de fricción f se calcula por la fórmula explícita de Swamee-Jain, que da un resultado prácticamente igual a Colebrook en este tipo de conducciones:

$$f = \frac{0,25}{\left(\log \left(\frac{r}{3,71 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right)^2}$$

$$Re = \frac{v \cdot D}{\eta}$$

- r: rugosidad
- Re: número de Reynolds
- η : viscosidad cinemática. Se toma = 1,3. 10-6 m²/s

$$h = k \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Singularidad	k
Codo 90º	1,26
Codo 45º	0,32
Codo 30º	0,16
Válvula de compuerta (abierta)	0,20
Entrada de tubería	0,50
Cambio de dirección 60º	0,40
Cambio de dirección 70º	0,46
Cambio de dirección Te	2,00

La pérdida en las piezas de cambio de diámetro se calcula por la expresión:

$$h = k \cdot \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} = k \cdot \left[\frac{D_2^2}{D_1^2} - 1 \right]^2 \cdot \frac{v_2^2}{2g}$$

Donde k=0,5 para contracciones, y k=1 para expansiones.

Las conducciones por gravedad, en lámina libre, se calculan por la fórmula de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2}$$

- v: velocidad media del fluido
- n: coeficiente de rugosidad de Manning
- R: radio hidráulico de la sección mojada
- J: pendiente de la conducción

3. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DEL EMISARIO

Desde aguas abajo hasta aguas arriba, el emisario se compone de:

- Dispositivo difusor (nuevo)
- Tubería principal. Tramo apoyado en el lecho marino (sin intervenciones relevantes)
- Tubería principal. Tramo enterrado en zanja marina (sin intervenciones relevantes)
- Tubería principal. Tramo terrestre hasta la EDAR (sin intervención en este proyecto)

3.1 DISPOSITIVO DIFUSOR

El nuevo tramo difusor está formado por 1 tubería de 100 m de longitud, de PEAD 100 PN10 SDR 17 DN500, con espesor 29,70 mm y diámetro interior 440,60 mm, apoyada sobre el fondo marino, entre las cotas -19,20 y -21,40 m y los PK 4+091 y 4+191, debidamente lastrada.

Dispone de 8 bocas de descarga de diámetro 7 cm, separadas 14,15 m entre ellas, con una distancia de 99,10 m entre la primera y la última boca.

En el extremo de la tubería hay una tapa ciega embreada, desmontable para operaciones de mantenimiento y limpieza.

La tubería difusora entronca con la tubería principal mediante pieza reductora DE478 mm x DE500 mm y bridas de acero inoxidable.

3.2 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO APOYADO EN EL LECHO MARINO

Está formado por 1 tubería de 552 m de longitud (sin contar el dispositivo difusor, 652 m incluyéndolo), de FC DN 400, con espesor 39,00 mm y diámetro exterior 478,00 mm, apoyada sobre el fondo marino, entre las cotas -9,00 y -19,20 m y los PK 3+540 y 4+091, debidamente lastrada.

Comienza al acabar el tramo marino enterrado y termina en el tramo difusor. No se interviene sobre este tramo más que para retirar los lastres no operativos y realizar reparaciones puntuales.

3.3 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO ENTERRADO EN ZANJA MARINA

Está formado por 1 tubería de 377 m de longitud, de FC DN 400, con espesor 39,00 mm y diámetro exterior 478,00 mm, entre las cotas -1,0 m y -9,0 m y los PK 3+162 y 3+540.

Comienza en la arqueta de conexión con el tramo terrestre y termina al inicio del tramo apoyado. No se interviene sobre este tramo.

3.4 TUBERÍA PRINCIPAL. TRAMO TERRESTRE HASTA LA EDAR

La sustitución del tramo terrestre del emisario es objeto del "Proyecto de sustitución y mejora de la red de saneamiento general de Formentera" redactado por GRADUAL INGENIEROS en 2018 y todavía sin ejecutar en la fecha de redacción de este proyecto, que prevé la instalación de una conducción de PEAD DN500 mm.

Así las cosas, en los cálculos hidráulicos y de dilución del presente proyecto se tendrá en cuenta este diámetro proyectado de 500 mm.

4. CÁLCULOS HIDRÁULICOS

4.1 CÁLCULO HIDRÁULICO DEL DISPOSITIVO DIFUSOR

Actualizar tablas con nuevos cálculos difusores

La pérdida de carga en el difusor se puede calcular a lo largo del flujo por cualquiera de sus bocas, debiendo ser la misma por cualquiera de los trayectos, teniéndose que considerar en el cálculo la presión diferencial de la columna de agua de mar (que es distinta en cada boca, si éstas están a diferente profundidad).

Haciendo el cálculo en la primera boca, la pérdida de carga se puede expresar como:

$$\Delta h = k \cdot \frac{v_1^2}{2g} + z_1 \cdot (\rho_m - \rho_a)$$

- v_1 es la velocidad del flujo por la primera boca

- k es un coeficiente para el que se adopta un valor de 1,5 en el caso de orificios laterales (perpendiculares al flujo principal)
- z_1 es la profundidad del centro de la boca 1
- ρ_m y ρ_a son las densidades del agua de mar (1.026 kg/m³) y del agua vertida (1.000 kg/m³) En las bocas siguientes:

$$\Delta h = h_{t,i} + k \cdot \frac{v_i^2}{2g} + z_i \cdot (\rho_m - \rho_a)$$

- $h_{t,i}$ es la pérdida de carga en la tubería entre la boca 1 la boca i

El procedimiento de cálculo adoptado consiste en tantear el valor del caudal que sale por la primera boca hasta que se verifique que el caudal que sale por la última boca sea igual al caudal que circula por el último tramo de la tubería.

A continuación, se muestran los resultados para un caudal máximo de 400 m³/h o 111,11 l/s.

REPARTICIÓN DE CAUDALES EN TUBERÍA DIFUSORA PARA Q = 43.06 L/s (Q max en escenario futuro)

Número de bocas (por tubería)	8	Número de tuberías	1	Caudal por tubería (L/s)	111,1111
Distancia entre bocas (m)	14,15	Caudal total (L/s)	111,11	Caudal medio por boca (L/s)	13,89
Profundidad primera boca (m)	19,20	Rugosidad (mm)	0,25	Longitud tubería (m)	99,1
Profundidad última boca (m)	21,40	Viscosidad cin. (m ² /s)	8,970E-07	K equivalente	38,8
Coefficiente pérdida carga boca	1,5			Coefficiente uniformidad	1,027

Número de boca o tubo	Diámetro boca (mm)	Profundidad boca (m)	Diámetro tubo (mm)	Caudal		Velocidad		Pérdida de carga			
				tubo (L/s)	boca (L/s)	tubo (m/s)	boca (m/s)	en tubo (m)	en boca (m)	por densidad (m)	Total (m)
1	70	19,20	440,6	111,111	14,26	0,73	3,70	0,00	1,05	0,50	1,55
2	70	19,51	440,6	96,853	14,12	0,64	3,67	0,01	1,03	0,51	1,55
3	70	19,83	440,6	82,735	14,00	0,54	3,64	0,02	1,01	0,52	1,55
4	70	20,14	440,6	68,735	13,90	0,45	3,61	0,03	1,00	0,52	1,55
5	70	20,46	440,6	54,837	13,81	0,36	3,59	0,03	0,99	0,53	1,55
6	70	20,77	440,6	41,024	13,74	0,27	3,57	0,03	0,98	0,54	1,55
7	70	21,09	440,6	27,285	13,67	0,18	3,55	0,04	0,97	0,55	1,55
8	70	21,40	440,6	13,612	13,61	0,09	3,54	0,04	0,96	0,56	1,55

Se observa un reparto bastante uniforme de caudales por bocas, entre 14,26 y 13,61 l/s. Además, las velocidades de salida del agua están entre 3,70 y 3,54 m/s. Son altas, lo que es adecuado para dificultar la colonización de las bocas.

En conjunto, la pérdida de carga en el dispositivo difusor se compone de una pérdida independiente del caudal (0,56 m, debida a la diferencia de densidades) y otra dependiente del caudal de 1,05 m, para un caudal de 400 m³/h.

Para un caudal intermedio de 98 m³/h o 27,31 l/s, tendríamos:



REPARTICIÓN DE CAUDALES EN TUBERÍA DIFUSORA PARA Q = 23,61 L/s (máximo Q escenario actual)

Número de bocas (por tubería)	8	Número de tuberías	1	Caudal por tubería (L/s)	27,31
Distancia entre bocas (m)	14,15	Caudal total (L/s)	27,31	Caudal medio por boca (L/s)	3,41
Profundidad primera boca (m)	19,2	Rugosidad (mm)	0,25	Longitud tubería (m)	99
Profundidad última boca (m)	21,4	Viscosidad cin. (m ² /s)	8,970E-07	K equivalente	56,2
Coefficiente pérdida carga boca	1,5			Coefficiente uniformidad	1,236

Número de boca o tubo	Diámetro boca (mm)	Profundidad boca (m)	Diámetro tubo (mm)	Caudal		Velocidad		Pérdida de carga			
				tubo (L/s)	boca (L/s)	tubo (m/s)	boca (m/s)	en tubo (m)	en boca (m)	por densidad (m)	Total (m)
1	70	19,20	440,6	27,31	4,22	0,18	1,10	0,00	0,09	0,50	0,59
2	70	19,51	440,6	23,09	4,01	0,15	1,04	0,00	0,08	0,51	0,59
3	70	19,83	440,6	19,08	3,79	0,13	0,98	0,00	0,07	0,52	0,59
4	70	20,14	440,6	15,29	3,56	0,10	0,93	0,00	0,07	0,52	0,59
5	70	20,46	440,6	11,73	3,33	0,08	0,87	0,00	0,06	0,53	0,59
6	70	20,77	440,6	8,40	3,08	0,06	0,80	0,00	0,05	0,54	0,59
7	70	21,09	440,6	5,32	2,81	0,03	0,73	0,00	0,04	0,55	0,59
8	70	21,40	440,6	2,51	2,51	0,02	0,65	0,00	0,03	0,56	0,59

Se observa de nuevo un reparto bastante uniforme de caudales por bocas, entre 4,22 y 2,51 l/s. Además, las velocidades de salida del agua están entre 1,10 y 0,65 m/s, por encima de los 0,6 m/s recomendado.

La pérdida de carga en el dispositivo difusor independiente del caudal es de 0,56 m y la dependiente del caudal de 0,09 m, para un caudal de 98 m³/h.

Por último, para el caudal menor de 69 m³/h o 19,17 l/s, tendríamos:

REPARTICIÓN DE CAUDALES EN TUBERÍA DIFUSORA PARA Q = 6,67 L/s (Q temporada baja escenario actual)

Número de bocas (por tubería)	8	Número de tuberías	1	Caudal por tubería (L/s)	19,16667
Distancia entre bocas (m)	14,15	Caudal total (L/s)	19,17	Caudal medio por boca (L/s)	2,40
Profundidad primera boca (m)	19,2	Rugosidad (mm)	0,25	Longitud tubería (m)	99
Profundidad última boca (m)	21,4	Viscosidad cin. (m ² /s)	8,970E-07	K equivalente	77,4
Coefficiente pérdida carga boca	1,5			Coefficiente uniformidad	1,451

Número de boca o tubo	Diámetro boca (mm)	Profundidad boca (m)	Diámetro tubo (mm)	Caudal		Velocidad		Pérdida de carga			
				tubo (L/s)	boca (L/s)	tubo (m/s)	boca (m/s)	en tubo (m)	en boca (m)	por densidad (m)	Total (m)
1	70	19,20	440,6	19,17	3,48	0,13	0,90	0,00	0,06	0,50	0,56
2	70	19,51	440,6	15,69	3,23	0,10	0,84	0,00	0,05	0,51	0,56
3	70	19,83	440,6	12,46	2,96	0,08	0,77	0,00	0,05	0,52	0,56
4	70	20,14	440,6	9,50	2,68	0,06	0,70	0,00	0,04	0,52	0,56
5	70	20,46	440,6	6,82	2,36	0,04	0,61	0,00	0,03	0,53	0,56
6	70	20,77	440,6	4,46	2,00	0,03	0,52	0,00	0,02	0,54	0,56
7	70	21,09	440,6	2,46	1,55	0,02	0,40	0,00	0,01	0,55	0,56
8	70	21,40	440,6	0,91	0,91	0,01	0,24	0,00	0,00	0,56	0,56

Se observa de nuevo un reparto bastante uniforme de caudales por bocas, entre 3,48 y 0,91 l/s. Las velocidades de salida del agua están entre 0,90 y 0,24 m/s. Son velocidades bajas, pero asumibles teniendo en cuenta que se trata del caudal más bajo en el estado actual, que va a ser poco frecuente.

La pérdida de carga en el dispositivo difusor independiente del caudal es de 0,56 m y la dependiente del caudal de 0,06 m, para un caudal de 69 m³/h.



Comprobación de la ratio entre el área total de las bocas y el área de la sección del tubo

Según la Instrucción se recomienda que esta ratio sea inferior a 0,6 para asegurar la estabilidad hidráulica del flujo, y que no salga toda el agua por las primeras bocas.

En nuestro caso la ratio es $0,20 < 0,6$, que se considera adecuado.

4.2 CÁLCULO HIDRÁULICO GENERAL DEL EMISARIO

4.2.1 Pérdidas de carga totales para el caudal de diseño

PÉRDIDAS DE CARGA TOTALES PARA EL CAUDAL DE DISEÑO			
DATOS GENERALES			
Gravedad (m/s ²)	9,8	Densidad agua vertida (kg/m ³)	997,10
Viscosidad agua vertida (kg/m.s)	0,000894	Densidad agua mar (kg/m ³)	1026
Altura máxima s.n.m.m. (m)	15,00	Altura de marea considerada (m)	0,50
Caudal de diseño (L/s)	111,11	Caudal de diseño (m ³ /h)	400,00
DATOS TUBERÍA TRAMO TERRESTRE		CÁLCULOS TUBERÍA TRAMO TERRESTRE	
Características	PEAD 500	Nº Reynolds	358.115,65
Longitud (m)	3190,00	Factor fricción f	0,01
Diámetro interior (m)	0,44	Pérdida de carga continua (m)	2,59
Velocidad (m/s)	0,73	Pérdidas de carga localizadas (m)	0,207
		Pérdida de carga tubería tramo terrestre	2,805
DATOS TUBERÍA TRAMO MARINO		CÁLCULOS TUBERÍA TRAMO MARINO	
Características	FC 400	Nº Reynolds	394.464,39
Longitud (m)	1029,00	Factor fricción f	0,01
Diámetro interior (m)	0,40	Pérdida de carga continua (m)	2,92
Velocidad (m/s)	0,88	Pérdidas de carga localizadas (m)	0,04
		Pérdida de carga tubería tramo Marino	2,96
		CÁLCULOS DISPOSITIVO DIFUSOR	
		Pérdida de carga en difusor (m)	1,23
ALTURA DISPONIBLE VERTIDO (m)	14,50	PÉRDIDA DE CARGA TOTAL (m)	7,00

Suponiendo una rugosidad de las tuberías de 0,25 mm y considerando los coeficientes de pérdidas de carga localizadas indicados en el apartado de métodos de cálculo, el emisario podrá verter por gravedad los 111,11 l/s, es decir, 400 m³/h, por lo que no es necesario recurrir a la utilización de bombas.

5. CIRCULACIÓN DEL AIRE EN EL EMISARIO

Para que no se vaya acumulando aire en el punto alto previo a un tramo descendente, o bien hay que colocar una ventosa en dicho punto alto, o bien el agua tiene que llevar cierta velocidad para arrastrarlas burbujas de aire hacia aguas abajo.

Según la fórmula de HR WALLINGFORD (2005), la velocidad de arrastre necesaria es:

$$\frac{v_{arr}}{\sqrt{g \cdot D}} = a + 0,56\sqrt{\sin \alpha}$$

Donde “a” es un valor comprendido entre 0,45 y 0,61, dependiendo del volumen de aire a arrastrar, lo que a su vez depende de varios factores (cantidad de aire que entra en la conducción, cantidad de aire o gases que se liberan de su solución en el agua, frecuencia con la que se alcanza una velocidad de arrastre, etc).

α es el ángulo del tramo descendente de la tubería con la horizontal.

Otra referencia es la fórmula, más antigua, de Wisner, Mohsen y Kouwen (1975), computada por Wheeler en una tabla que da las velocidades necesarias de arrastre en función del diámetro y la pendiente, sin considerar el parámetro “a”. Son velocidades más altas que las que se obtienen por la fórmula de HR WALLINGFORD, que es más actual.

Las velocidades de arrastre, para ser efectivas, han de ser frecuentes (se han de dar una vez al día, casi todos los días). También han de ser lo suficientemente duraderas para arrastrar el aire hasta el final de la tubería. Si no, el aire vuelve hacia el punto alto.

En este caso, en el tramo PHD marino-terrestre, tenemos:

CAUDAL NECESARIO PARA ARRASTRAR AIRE HACIA AGUAS ABAJO			
Datos		Resultados	
Gravedad (m/s ²)	9,8	Velocidad arrastre 1 (m/s)	0,90
Diámetro int. tub. (mm)	400,00	Velocidad arrastre 2 (m/s)	1,22
Pendiente (%)	1%	Caudal arrastre 1 (m ³ /s)	0,113
		Caudal arrastre 2 (m ³ /s)	0,153

La velocidad del efluente debe ser mayor a las velocidades de arrastre. En este caso, se tiene:

$$V. \text{ efluente} = 0,88 \text{ m/s} < V. \text{ arrastre} = 1,22 \text{ m/s}$$

No se cumple la premisa, por lo que no queda garantizado el arrastre de las burbujas de aire. No obstante, la arqueta de conexión actual dispone de ventosas para evitar la acumulación de aire en la conducción.

Para el tramo terrestre, tenemos:

CAUDAL NECESARIO PARA ARRASTRAR AIRE HACIA AGUAS ABAJO			
Datos		Resultados	
Gravedad (m/s ²)	9,8	Velocidad arrastre 1 (m/s)	0,90
Diámetro int. tub. (mm)	400,00	Velocidad arrastre 2 (m/s)	1,22
Pendiente (%)	1%	Caudal arrastre 1 (m ³ /s)	0,113
		Caudal arrastre 2 (m ³ /s)	0,153



La condición quedaría:

$$V. \text{ efluente} = 0,73 \text{ m/s} > V. \text{ arrastre} = 1,22 \text{ m/s}$$

No se cumple la premisa, por lo que no queda garantizado el arrastre de las burbujas de aire. No obstante, la arqueta de conexión actual dispone de ventosas para evitar la acumulación de aire en la conducción.