

**ANEJO 7. ESTUDIO HIDRÁULICO Y ECONÓMICO DE LA  
IMPULSIÓN A LA Balsa DE REGULACIÓN**

# ANEJO 7. ESTUDIO HIDRÁULICO Y ECONÓMICO DE LA IMPULSIÓN A LA Balsa DE REGULACIÓN

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>OBJETO DEL ANEJO .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL SELECCIONADO .....</b>	<b>1</b>
2.1	Normativa aplicable a la tubería de PEAD.....	2
<b>3</b>	<b>CÁLCULO DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN .....</b>	<b>3</b>
3.1	Perfil longitudinal de la impulsión .....	3
3.2	Determinación de Caudales.....	4
3.3	Datos generales de la impulsión .....	7
3.4	Costes totales de instalación de las tuberías propuestas .....	7
3.5	Cálculo hidráulico de la tubería de impulsión .....	11
3.5.1	Selección del diámetro.....	14
3.6	Solución final. Tubería de impulsión seleccionada.....	15
3.6.1	Hipótesis Filtros sucios. Máxima altura manométrica .....	15
3.6.2	Hipótesis Filtros limpios. Mínima altura manométrica .....	16
<b>4</b>	<b>EQUIPOS DE BOMBEO.....</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS. GOLPE DE ARIETE.22</b>	
5.1	Perfil longitudinal de la tubería .....	23
5.2	Material empleado .....	23
5.3	Cálculo hidráulico de la conducción .....	23
5.4	Cálculo del régimen transitorio .....	24
5.4.1	Método Clásico.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
5.4.2	Líneas piezométricas del fenómeno transitorio	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

- 5.4.3 Presiones en el fenómeno transitorio.....**¡Error! Marcador no definido.**
- 5.4.4 Soluciones estudio preliminar .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 5.4.5 Método de las características .....**¡Error! Marcador no definido.**
- 5.4.6 Estudio del transitorio con los filtros sucios;**¡Error! Marcador no definido.**
- 5.4.7 Estudio del transitorio con filtros limpios.**¡Error! Marcador no definido.**

## **1 OBJETO DEL ANEJO**

El objeto de este anejo es el diseño y cálculo de la instalación de impulsión de agua desde la obra de toma en el arroyo de Yegros (Prado Redondo) hasta la balsa de regulación ubicada junto a la E.D.A.R. del municipio de Mora.

La idea de funcionamiento del sistema es acumular agua en la balsa de regulación durante todo el año en condiciones suficientes de salubridad y bombearla hasta la balsa de cota que es de regulación diaria únicamente durante la campaña de riego

Una vez seleccionada la tubería de impulsión. Se calcularán los costes de instalación de la tubería y los costes energéticos anuales.

## **2 MATERIAL SELECCIONADO**

El material seleccionado para las tuberías de esta impulsión debido a su pequeño caudal que dará lugar a un pequeño diámetro es el Polietileno de Alta Densidad (PEAD).

Los tubos de PE tienen la condición de termoplásticos y están normalizados en normas UNE en dimensiones de hasta 1.600 mm de DN y presiones de 2,5 N/mm<sup>2</sup> (ésta última solo para diámetros pequeños).

Se componen de una resina de polietileno. El procedimiento de fabricación usual de los tubos suele ser la extrusión. Las piezas especiales se fabrican, en general, por inyección en moldes o bien mediante manipulación a partir de segmentos del tubo, no debiendo admitirse la fabricación por unión mediante pegamento de diversos elementos. En cualquier caso, se pueden emplear otros procedimientos, siempre que garanticen la homogeneidad y la calidad del producto acabado.

Los tubos de PEAD presentan ciertas ventajas frente a otros materiales, por ejemplo:

- Peso reducido, lo que conlleva una fácil instalación.
- Fácil transporte.
- Fácil montaje.
- Resistencia a suelos y agentes agresivos (no oxidación ni corrosión).
- Bajo coeficiente de rugosidad.
- Ausencia de sedimentos e incrustaciones.

- Insensibilidad a las heladas.
- Elevada resistencia a la propagación de fisuras lenta o rápida.
- Larga vida útil (mínimo 50 años).
- Bajos costes de mantenimiento.
- Múltiples sistemas de unión (soldadura, accesorios mecánicos, electrofusión, etc...).
- Reciclabilidad del material.

## **2.1 Normativa aplicable a la tubería de PEAD**

Los tubos de PEAD están fabricados de acuerdo a la norma UNE-EN 12201 y las piezas especiales de acuerdo a la norma UNE-EN 13244.

EN 12201. Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua. Polietileno (PE)

- Parte 1. Generalidades.
- Parte 2. Tuberías.
- Parte 3. Accesorios.
- Parte 4. Valvulería y equipo auxiliar.
- Parte 5. Idoneidad del Sistema.
- Parte 6. Recomendaciones para la instalación.
- Parte 7. Evaluación de la conformidad.

EN 13244. Sistemas de canalización en materiales plásticos, enterrados o aéreos, para suministro de agua en general y saneamiento a presión. Polietileno (PE).

- Parte 1. Generalidades.
- Parte 2. Tuberías.
- Parte 3. Accesorios.
- Parte 4. Valvulería y equipo auxiliar.
- Parte 5. Idoneidad del Sistema.
- Parte 6. Recomendaciones para la instalación.
- Parte 7. Evaluación de la conformidad.

### 3 CÁLCULO DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN

Se presenta a continuación el estudio detallado para el diseño y cálculo de la tubería de impulsión desde la obra de toma hasta la balsa de regulación ubicada junto a la E.D.A.R. de Mora.

#### 3.1 Perfil longitudinal de la impulsión

A partir de los datos topográficos disponibles tanto por los levantamientos topográficos realizados como por el modelo digital del terreno disponible, se ha realizado el perfil longitudinal de la impulsión.

La tubería de impulsión comienza en la obra de toma ubicada en el arroyo de Yegros (Prado Redondo) junto a la E.D.A.R. de Mora.

La tubería de impulsión termina en la balsa de regulación, cuyas principales características serían:

- Cota estimada de fondo: 684,10 a 685,60 m.s.n.m.
- Cota estimada de coronación: 698,75 m.s.n.m.
- Volumen útil estimado: 193.277 m<sup>3</sup>

El perfil longitudinal de la tubería de impulsión quedaría:

Nodo i-1	Nodo i	Distancia		Cota Terreno (m.s.n.m.)	Cota Cál. Eje hidráulico (m.s.n.m.)
		A origen real (m)	Parcial real (m)		
Anterior	Actual	(m)	(m)	(m.s.n.m.)	(m.s.n.m.)
0	0	0	0	686,85	684,55
0	1	10,5	10,5	687	685,39
1	2	33	22,5	687,10	685,45
2	3	89,3	56,3	690	687,62
3	4	170	80,7	691,4	689,7
4	5	407,42	237,42	696,65	694,9
5	6	443,71	36,29	696,85	697,75

El desnivel geométrico considerado es de 13,20 m.

La longitud de la tubería de impulsión a la balsa de regulación es de 443,71 m, como se indica en el plano 6.1 del presente proyecto.

La planta sobre el terreno quedaría:



### **3.2 Determinación de Caudales.**

El caudal de bombeo es el máximo de la concesión de agua que es 11,1 l/s., lo que equivale a un caudal máximo de 39,96 m<sup>3</sup>/h.

El volumen de agua necesario para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos considerando la estrategia de riego deficitario controlado es de 1.381,38 m<sup>3</sup>/ha año, puesto que la zona regable tiene una extensión de 214 ha, el volumen anual de agua necesario será de 295.615 m<sup>3</sup>/año. Se estima que la evaporación de agua en la balsa de almacenamiento será de, aproximadamente, el 10% del agua necesaria para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, esto supone que el volumen de agua necesaria será de 325.177 m<sup>3</sup>/año.

Con la dotación disponible de 11,1 l/s, captando agua los 365 días del año, 24 horas al día, se tiene un volumen de agua de 350.049,60 m<sup>3</sup>/año. Si se considera una captación de agua durante 360 días/año, 24 h/día se obtiene un volumen de 345.254,40 m<sup>3</sup>/año.

Se puede realizar el siguiente balance hídrico:

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MARZ	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AG	SEPT	TOTAL
ENTRADA	29.322,98	28.377,07	29.322,98	29.322,98	26.485,27	29.322,98	28.377,07	29.322,98	28.377,07	29.322,98	29.322,98	28.377,07	345.254,40
SALIDA	2.932,30	2.837,71	2.932,30	2.932,30	2.648,53	2.932,30	10.158,04	50.494,36	67.938,42	86.926,95	81.744,07	28.835,66	343.312,93
BALANCE	26.390,68	25.539,37	26.390,68	26.390,68	23.836,74	26.390,68	18.219,03	-21.171,38	-39.561,35	-57.603,97	-52.421,10	-458,59	
Máx. capacidad de regulación anual	26.390,68	51.930,05	78.320,72	104.711,40	128.548,15	154.938,82	173.157,85	151.986,47	112.425,13	54.821,16	2.400,06	1.941,47	
Volumen mínimo de balsa necesario	24.449,21	49.988,57	76.379,25	102.769,93	126.606,67	152.997,35	171.216,38	150.045,00	110.483,66	52.879,69	458,59	0,00	

El volumen mínimo de regulación necesario en la balsa sería de 171.216,38 m<sup>3</sup>.

Si se considera un resguardo del 10%, el volumen total sería de 188.338 m<sup>3</sup>.

### 3.3 Datos generales de la impulsión

Los datos generales de la impulsión serán:

- Altura geométrica de elevación: 13,20 m
- Longitud de la impulsión: 443,71 m
- Período de amortización de las instalaciones: 25 años
- Tasa de interés anual considerada: 5%
- Tasa de inflación anual considerada: 3%
- Tarifa de acceso considerada: 6.1TD
- Equipos de bombeo instalados: 1
- Equipos de bombeo de reserva: 1

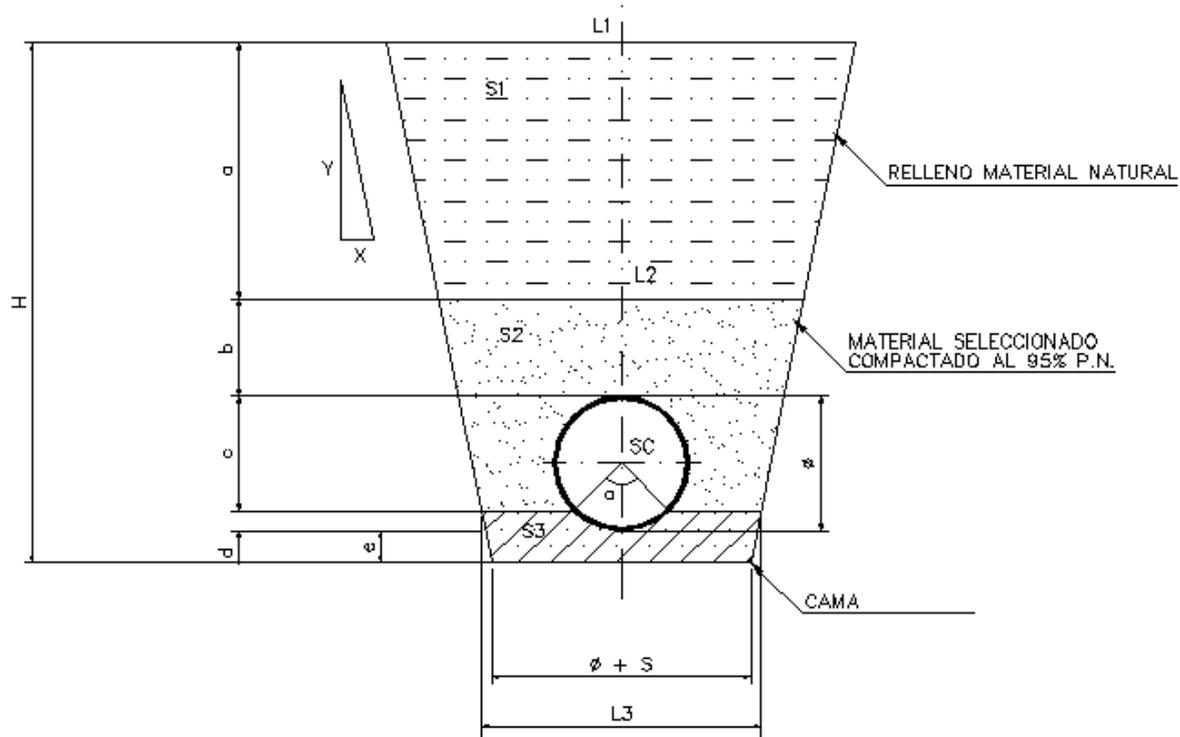
Los parámetros de velocidad recomendable adoptados son:

Velocidad máx. admisible (m/s):	2,00	Hasta DN:	500	mm
Velocidad máx. admisible (m/s):	2,22	Hasta DN:	1200	mm
Velocidad máx. admisible (m/s):	2,50	DN mayor de:	1200	mm
Velocidad mín. admisible (m/s):	0,50			

### 3.4 Costes totales de instalación de las tuberías propuestas

Tal y como ya se ha comentado, para el cálculo de las tuberías de impulsión tanteearemos tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PEAD).

Las características de la zanja considerada serán:



**Ancho mínimo de zanja**

DN (mm) ≤ 225	Dext (m) + 0,4
225 < DN (mm) ≤ 355	Dext (m) + 0,5

Anchura mínima de zanja: 0,9 m

**Características geométricas**

<b>Talud:</b>	H:	1
	V:	4

Ángulo cama	$\alpha$ :	90	°
-------------	------------	----	---

Para el caso de  $D \leq 250$  mm

- a = 0,80 m
- b = 0,30 m
- e = 0,10 m

Para el caso de  $D > 250$  mm

- a = 0,80 m

- $b = 0,30$  m
- $e = 0,15$  m

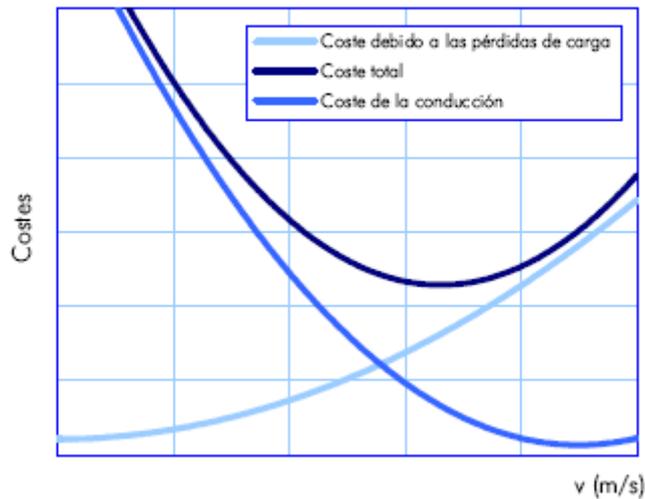
Para el cálculo de los costes de instalación se han empleado como precios unitarios de excavación, materiales y mano de obra los comprendidos en las Tarifas TRAGSA 2021. Para los diámetros y/o timbrajes no existentes en las Tarifas TRAGSA, se han utilizado precios de mercado solicitados a casas comerciales.

De acuerdo con estos parámetros, se obtiene los siguientes costes para la tubería de PEAD:

DN-PN	Material	D. int.	D. ext.	esp .	PVP tubo	Piez esp	Cost instal	Prueba tubería	Tub+Inst+Prueb	Excav.	Cama are	Relleno sel	Tap y ext	Mov. tierras	COSTE TOTAL	COSTE TOTAL
mm-atm.		mm	mm	m	(€/m.l.)	(€/m.l.)	(€/m.l.)	(€/m.l.)	(€/m.l.)	(m3/m.l.)	(m3/m.l.)	(m3/m.l.)	(m3/m.l.)	(€/m.l.)	(€/m.l.)	(€/m.l.)
90-6	PE AD 100	83,0	90,0	3,5	1,67	0,17	0,77	0,00	2,60	2,412	0,104	0,390	1,911	17,14	19,74	<b>19,74</b>
110-6	PE AD 100	101,6	110,0	4,2	2,35	0,24	1,18	1,33	4,86	2,448	0,107	0,408	1,924	17,50	22,59	<b>22,59</b>
125-6	PE AD 100	115,4	125,0	4,8	3,03	0,30	1,27	1,33	5,63	2,475	0,109	0,420	1,934	17,76	23,70	<b>23,70</b>

### 3.5 Cálculo hidráulico de la tubería de impulsión

Tantaremos los costes de instalación para cada uno de los diámetros y materiales propuestos, obteniendo una altura manométrica en cabecera que utilizaremos más adelante para calcular los costes energéticos. La solución óptima será en la que la suma de los costes de instalación y los costes energéticos actualizados para el período de amortización considerado sea mínima.



La pérdida de carga unitaria se calculará mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, por ser actualmente la de mayor aceptación, y cuya expresión es:

$$j = f \frac{1}{D} \frac{v^2}{2g} ; j = \frac{8fQ^2}{\pi^2 g D^5}$$

El factor adimensional f (factor de fricción) se determina recurriendo al análisis dimensional y estableciendo unos parámetros adimensionales en los que estén incluidos todos los factores de los que depende dicho factor de fricción, estos son:

- K/D relación entre la rugosidad absoluta del material y su diámetro, conocida como rugosidad relativa (Kr), que nos da la idea de la magnitud de las asperezas de la superficie interior de la conducción.
  - o Rugosidad absoluta PVC-O: 0,01 mm

- Re (número de Reynolds), refleja la influencia en las pérdidas de la viscosidad,  $\mu$  del fluido, causante de las tensiones cortantes y, por tanto, de las fuerzas de rozamiento.

En consecuencia, se tendrá definitivamente:

$$j = f(\varepsilon/D, \text{Re}) \frac{8Q^2}{D^5 g \pi^2}$$

Expresión denominada como ecuación fundamental de pérdidas.

En el caso de tratarse de un flujo laminar ( $\text{Re} < 2.000$ ), se obtiene  $f$  mediante la fórmula de Poiseuille que lo expresa con toda exactitud:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

En caso contrario, se obtendrá el factor de fricción mediante la fórmula de White-Colebrook, unánimemente aceptada en todos los tratados de hidráulica y que presenta la propiedad de que para tubos lisos ( $K=0$ ), los resultados coinciden con los de Von Karman, mientras que para  $\text{Re}$  elevados y tubos rugosos concuerda totalmente con la expresión de Nikuradse. El único inconveniente de esta fórmula reside en la necesidad de realizar sucesivas iteraciones por figurar el factor  $f$  de forma implícita; sin embargo, hoy día con el uso de ordenadores el problema está completamente resuelto. La fórmula en cuestión es la siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right)$$

Para el cálculo de la Pérdida de Carga Total, se considera un porcentaje correspondiente a singularidades del 10%, así mismo se han considerado las pérdidas existentes en los puntos de cambio de diámetro interior, las pérdidas de carga en bomba y válvulas y se ha descontado la altura de velocidad.

Así mismo se establece un margen de seguridad para el cálculo de los timbrajes de 10 m.c.a. con respecto a la máxima presión calculada en cada punto que en este caso será la presión dinámica.

La altura manométrica  $H_m$  se obtiene sumando a las pérdidas de carga totales el desnivel geométrico y la presión residual.

La potencia se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta}$$

El cálculo detallado de la tubería se realizará considerando todos los equipos de filtrado y desinfección necesarios para que la calidad del agua bombeada cumpla con el RD 1620/2007. Todos estos dispositivos introducen una pérdida de carga variable en función del estado de limpieza antes del lavado. Se realizará el cálculo de la tubería y su curva resistente en función del estado de limpieza de los equipos de filtrado.

El agua tomada del arroyo de Yegros o del Prado Redondo a lo largo de todo el año es bombeada y filtrada para su almacenamiento en la balsa de regulación ubicada junto a la E.D.A.R. de Mora. Durante los meses en los que no hay campaña de riegos el agua se mantiene acumulada en la balsa en unas condiciones de oxigenación y recirculación adecuadas. Cuando comienza la campaña de riegos, el agua es bombeada hasta la balsa de cota. Antes de ser bombeada, el agua debe ser filtrada y desinfectada. Al ser el requerimiento de filtrado muy elevado (unas 10 micras) el proceso de filtración debe realizarse en tres etapas, disponiendo los filtros en serie. Por lo tanto, es necesario considerar las pérdidas de carga que introducen estos equipos de filtración.

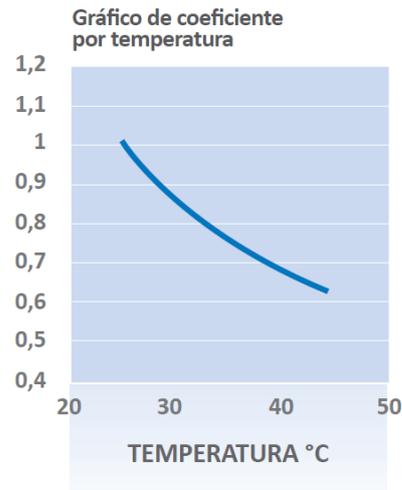
El proceso de lavado de los filtros puede ser por tiempo o por diferencial de presión entre la entrada y la salida del filtro. En este caso, consideraremos para estar del lado de la seguridad que el lavado se realiza en cada filtro cuando se alcanzan un diferencial de presión de 5 m.c.a.

En la hipótesis de filtros limpios se considerará una pérdida de carga de 1 m.c.a en cada uno de los filtros.

En el cálculo hidráulico de las tuberías plásticas en general y de PVC-O en particular hay que considerar el efecto de la temperatura en las tuberías. La Presión de Funcionamiento Admisible (PFA) de la tubería puede verse minorada con respecto a la Presión Nominal (PN) por temperaturas elevadas (superiores a 25 °C) o por aplicaciones exigentes o agresivas.

$$PFA = PN \cdot f_t$$

$f_t$  = Coeficiente de reducción por temperatura.



En este caso adoptaremos un  $f_t$  mínimo de 0,9 a la hora de considerar la PFA de los tubos.

A continuación, se muestran los resultados para cada uno de los diámetros ensayados:

### 3.5.1 Selección del diámetro

Considerando el caudal de 11,1 l/s se tantean una serie de diámetros.

Con la intención de respetar las limitaciones de velocidad establecidas, se tantearán los siguientes diámetros (mm): 90, 110 y 125.

D.N. (mm)	Timbraje (atm)	Velocidad (m/s)
90	6	2,05
110	6	1,37
125	6	1,06

El diámetro 90 mm queda descartado debido a la excesiva velocidad del agua para ese diámetro. La velocidad para el diámetro 125 mm estaría dentro de los límites aceptables, sin embargo, al ser un agua procedente de depuradora y de un arroyo, no conviene que tenga una velocidad baja para evitar sedimentaciones, depósitos u otros posibles problemas. Por lo tanto, para asegurar un correcto funcionamiento de la instalación se adopta el diámetro de 110 mm cuya velocidad se considera más adecuada.

### 3.6 Solución final. Tubería de impulsión seleccionada

La hipótesis establecida de funcionamiento será **bombeo en 24 horas** empleando tubería de **diámetro 110 mm de PEAD**.

Los resultados son los siguientes:

PK 0+000-PK 0+443,71 .....110 PEAD PN 6 atm.....L= 443,71 m

#### 3.6.1 Hipótesis Filtros sucios. Máxima altura manométrica

En esta simulación se ha calculado la altura manométrica máxima de bombeo considerando una pérdida de carga máxima de 5 m.c.a. en el filtro dispuesto en el inicio de la conducción, lo que supone considerar los filtros sucios, un instante anterior a que se inicie el lavado de éstos. Para simular esta pérdida se ha requerido, en el extremo final de la impulsión 6 m.c.a., de éstos, 5 m.c.a. corresponden a la pérdida de carga en el filtro y el metro restante es la carga que se solicita a la salida de la impulsión.

Los datos de partida son:

La cota del nudo origen (0) es 684,55 m.s.n.m. Se ha considerado una pérdida en singularidades del 5% respecto a la pérdida de carga lineal en las tuberías y un margen de seguridad para el dimensionado de los timbrajes de las tuberías de 10 m.c.a.

Nudo aguas arriba	Nudo aguas abajo	Longitud (m)	Cota del Nudo (m)	Identificación de la parcela	Dotación (l/s)	Presión. req. (m.c.a)
0	1	10,5	685,39			
1	2	22,5	685,45			
2	3	56,3	687,62			
3	4	80,7	689,7			
4	5	237,42	694,9			
5	6	36,29	697,75	Balsa almac.	11,1	6

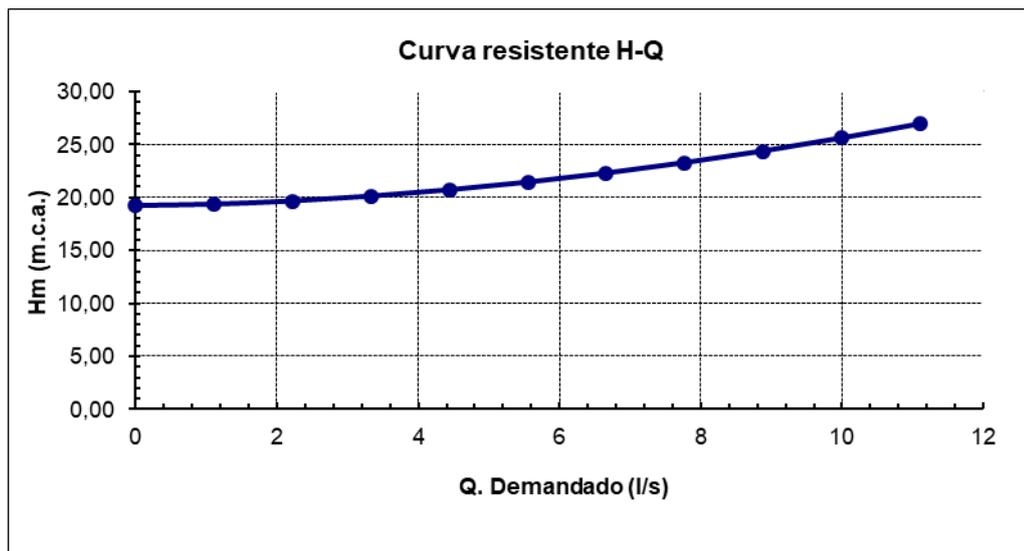
El resultado del dimensionamiento se recoge en la tabla siguiente:

Nudo aguas arriba	Nudo aguas abajo	Caudal (l/s)	Diámetro Nominal (mm)	Material	Presión Trabajo (atm.)	velocidad (m/s)	Presión dinámica (m.c.a.)	Presión estática (m.c.a.)	Holgura de Presión (m.c.a.)
0	1	11,10	110	PEAD	6	1,37	25,92	26,11	25,92
1	2	11,10	110	PEAD	6	1,37	25,46	26,05	25,46
2	3	11,10	110	PEAD	6	1,37	22,31	23,88	22,31
3	4	11,10	110	PEAD	6	1,37	18,81	21,80	18,81
4	5	11,10	110	PEAD	6	1,37	9,48	16,60	9,48
5	6	11,10	110	PEAD	6	1,37	6,00	13,75	0,00

El punto de funcionamiento requerido en la estación de bombeo será:

- Caudal: 11,1 l/s
- Altura manométrica: 26,95 m.c.a.

La curva resistente de la conducción sería:



### 3.6.2 Hipótesis Filtros limpios. Mínima altura manométrica

En esta simulación se ha calculado la altura manométrica máxima de bombeo considerando una pérdida de carga máxima de 1 m.c.a. en el filtro dispuesto en el inicio de la conducción, lo que supone considerar que los filtros están limpios. Para simular esta pérdida se ha requerido, en el extremo final de la impulsión 2 m.c.a., de éstos, 1 m.c.a. corresponden a la pérdida de carga en el filtro y el metro restante es la carga que se solicita a la salida de la impulsión.

Los datos de partida son:

La cota del nudo origen (0) es 684,55 m.s.n.m. Se ha considerado una pérdida en singularidades del 5% respecto a la pérdida de carga lineal en las tuberías y un margen de seguridad para el dimensionado de los timbrajes de las tuberías de 10 m.c.a.

Nudo aguas arriba	Nudo aguas abajo	Longitud (m)	Cota del Nudo (m)	Identificación de la parcela	Dotación (l/s)	Presión. req. (m.c.a)
0	1	10,5	685,39			
1	2	22,5	685,45			
2	3	56,3	687,62			
3	4	80,7	689,7			
4	5	237,42	694,9			
5	6	36,29	697,75	Balsa almac.	11,1	2

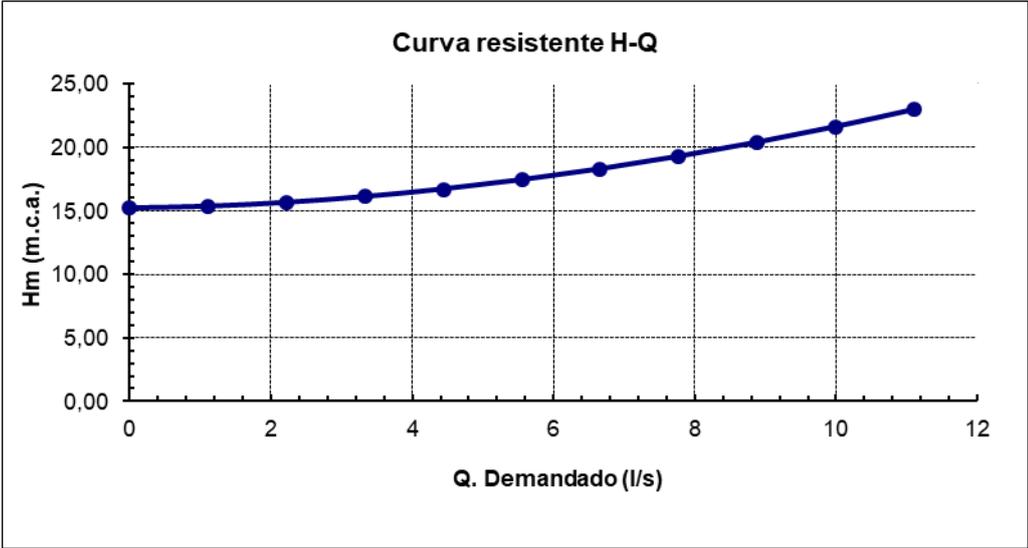
El resultado del dimensionamiento se recoge en la tabla siguiente:

Nudo aguas arriba	Nudo aguas abajo	Caudal (l/s)	Diámetro Nominal (mm)	Material	Presión Trabajo (atm.)	velocidad (m/s)	Presión dinámica (m.c.a.)	Presión estática (m.c.a.)	Holgura de Presión (m.c.a.)
0	1	11,10	110	PEAD	6	1,37	21,92	22,11	21,92
1	2	11,10	110	PEAD	6	1,37	21,46	22,05	21,46
2	3	11,10	110	PEAD	6	1,37	18,31	19,88	18,31
3	4	11,10	110	PEAD	6	1,37	14,81	17,80	14,81
4	5	11,10	110	PEAD	6	1,37	5,48	12,60	5,48
5	6	11,10	110	PEAD	6	1,37	2,00	9,75	0,00

El punto de funcionamiento requerido en la estación de bombeo será:

- Caudal: 11,1 l/s
- Altura manométrica: 22,95 m.c.a.

La curva resistente de la conducción sería:



## 4 EQUIPOS DE BOMBEO

Se contempla la construcción de una estación de bombeo para impulsar el agua desde la obra de toma en el arroyo de Yegros (Prado redondo) hasta la balsa de regulación ubicada junto a la EDAR de Mora.

A partir de los datos obtenidos para la tubería de 110 PEAD podemos establecer las características que deben tener los equipos de impulsión.

Dado que se trata de una impulsión a una balsa de regulación y no se necesita una amplia regulación de caudal y, además, el caudal punta a elevar es reducido con una altura manométrica baja, se decide emplear un único grupo de bombeo principal y otro grupo idéntico de reserva, es decir una disposición de 1+1. Las características físicas de la instalación en la que el agua se debe elevar desde una cántara situada en la toma realizada en el arroyo hasta la balsa de regulación, hacen que la instalación sea idónea para el empleo de bombas de eje vertical, que son bombas con rendimientos hidráulicos superiores a los de las bombas sumergidas que serían la otra opción disponible con la idea de minimizar la excavación y obra civil a ejecutar. Además, el no fraccionar más el caudal nos permitirá reducir los costes de mantenimiento y reparación de los equipos, así como reducir el coste de la obra civil al requerir menos espacio.

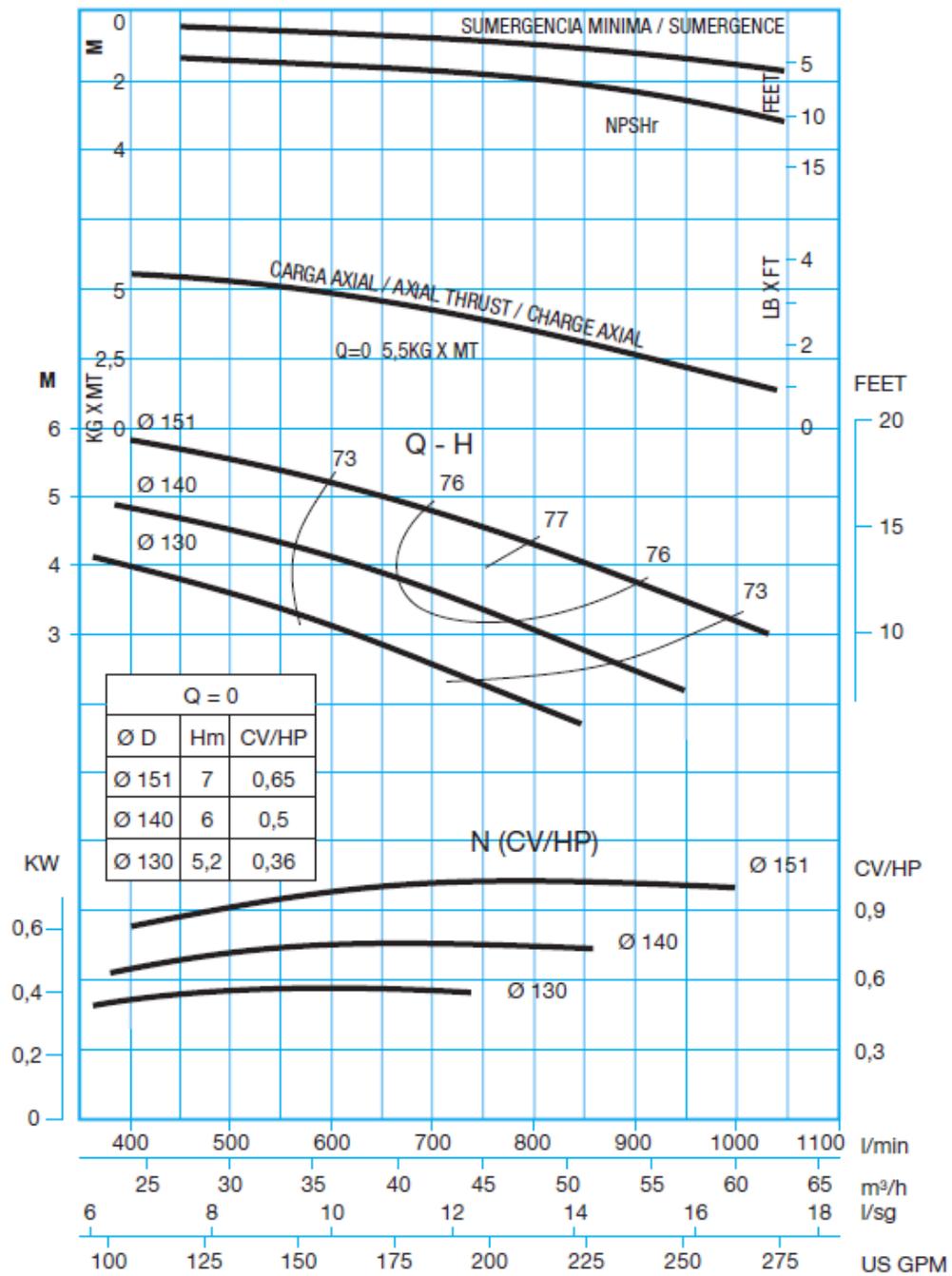
Por todo lo anterior, se dispondrá 1 grupo principal de bombeo y otro grupo idéntico de reserva, en disposición 1+1 con las siguientes características:

Nº de grupos de bombeo :	1+1		
Caudal unitario de bombeo :	11	l/s	
Altura manométrica de impulsión :	27	m.c.a.	
Peso específico del Fluido :	1.000	kg/m <sup>3</sup>	
Rendimiento Hidráulico de la bomba :	75,00%		
Rendimiento Eléctrico del motor :	0,95		
Rendimiento conjunto del grupo motor-bomba :		0,71	
Potencia absorbida por el Motor Eléctrico de la Red :		4,2	kW
Potencia máxima consumida en curva bomba:	4,5	kW	

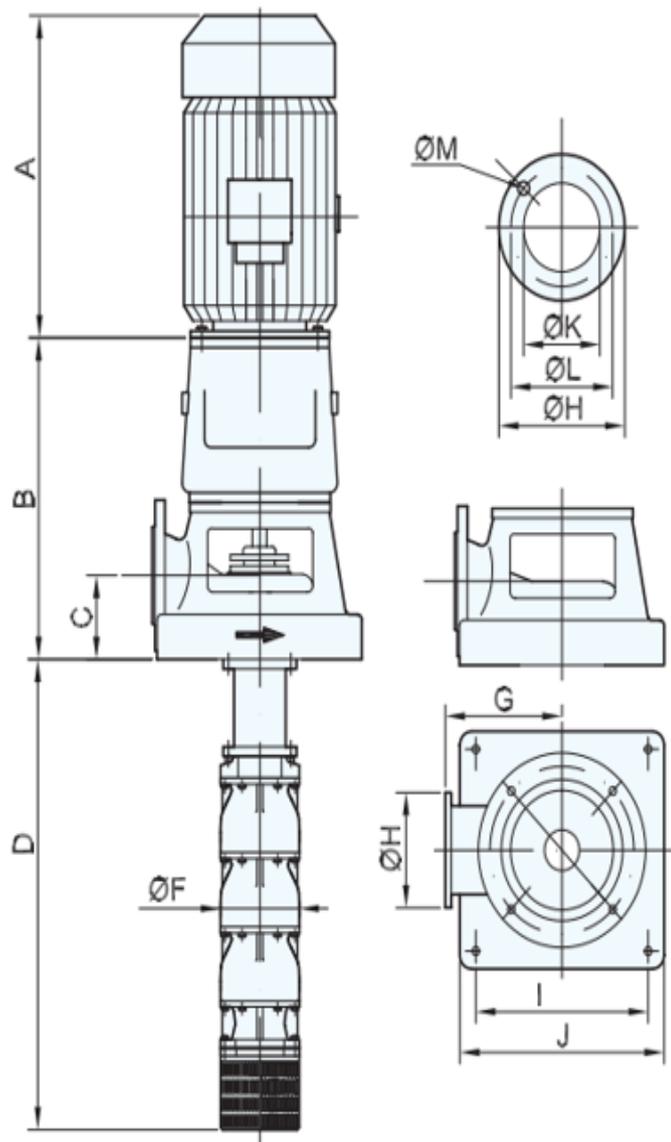
Potencia motor comercial:

5,5 kW

Una vez consultadas diferentes casas comerciales se muestra, a modo de ejemplo, una bomba con las siguientes curvas de funcionamiento:



Se muestran las curvas para una fase. En este caso serían necesarias 6 fases.



A	B	C	D	F	G	H	I	J	K	L	M
435	443	110	5000	190	175	220	290	340	100	180	4xM16/4xØ18

Dimensiones aproximadas en mm.

**Notas**  
 Las bombas verticales se suministran montadas siempre que la longitud desde el colador hasta la placa base sea igual o menor a 8 m.  
 Para mayores longitudes se suministran desmontadas. El motor siempre desmontado.

## **5 ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS TRANSITORIOS. GOLPE DE ARIETE.**

En un sistema hidráulico funcionando en régimen permanente, los transitorios se pueden generar por las maniobras de los elementos activos del sistema. Este régimen transitorio significa un cambio en el espacio y en el tiempo de las condiciones de funcionamiento del sistema, cuando pasa del régimen permanente inicial al régimen permanente final tras las maniobras de los elementos activos. Desde este punto de vista las maniobras que generan transitorios son, principalmente, la puesta en marcha y la parada de bombas, así como la apertura y el cierre de válvulas.

Durante el transitorio, y mientras el sistema se va adaptando de un régimen permanente a otro, se producen intercambios de energía cinética a energía de presión, y de ésta a energía cinética, con las consiguientes oscilaciones de caudal, velocidad y presión en el interior de las conducciones. Las oscilaciones de caudal y velocidad no tienen consecuencias directas sobre el sistema, pero las oscilaciones de presión producen cambios de presión entre valores máximos y mínimos. Son los valores máximos de presión los que pueden romper las conducciones del sistema, y ello si no se dispone de resistencia mecánica suficiente o no se protege adecuadamente la instalación.

Por lo tanto, es fundamental en toda impulsión estudiar las posibles sobrepresiones o depresiones que pudieran producirse como consecuencia de la parada brusca de los equipos de bombeo, tal caso puede presentarse ante un corte inesperado de la energía eléctrica.

Primeramente, se calcularán los fenómenos transitorios empleando las ecuaciones de la mecánica clásica con el método de Allievi y posteriormente se comprobarán los resultados empleando el método de las ecuaciones características y se propondrán diferentes soluciones a los problemas.

La tubería de impulsión parte de la estación de bombeo situada en la obra de toma en el arroyo, y presenta una longitud de 443,71 m.

El desnivel máximo considerado desde el nivel mínimo de la balsa de regulación hasta la coronación de la balsa de cota es de 13,20 m.

El caudal de bombeo punta se ha establecido en 11 l/s y la altura manométrica requerida en la estación de bombeo es de 27 m.c.a.

Se ha considerado la instalación de 1+1 grupos de bombeo con un caudal de 11 l/s y una altura manométrica de 27 m.c.a. con un motor de 5,5 kW, funcionando a 1.480 r.p.m. en régimen nominal.

### **5.1 Perfil longitudinal de la tubería**

Se ha efectuado un perfil longitudinal del trazado de la conducción desde la estación de bombeo hasta la balsa de cota.

El perfil es favorable para el golpe de ariete al ser relativamente llano en sus tramos iniciales y elevándose al final, lo que minimiza los efectos de las depresiones en la conducción.

El perfil longitudinal de la tubería de impulsión se puede ver en el plano 6.1

### **5.2 Material empleado**

El material seleccionado para la tubería de impulsión el Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

### **5.3 Cálculo hidráulico de la conducción**

En el cálculo hidráulico de la tubería se ha seleccionado la tubería de 110 PEAD PN 6 atm para toda la longitud de la conducción. Se ha considerado un margen de seguridad en timbrajes de 10 m.c.a. y además se ha considerado un coeficiente reductor de la PFA por temperatura de 0,9. También se ha tenido cuenta una máxima pérdida de carga en la estación de filtrado de 5 m.c.a.

<b>p.k. Inicial</b>	<b>p.k. Final</b>	<b>DN (mm)</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>TIMBRAJE (atm)</b>	<b>LONG. REAL (m)</b>
0+000	0+433,71	110	PEAD	6	433,71

- Altura manométrica: 26,95 m.c.a.
- Margen de seguridad en timbrajes: 10 m.c.a.

## 5.4 Cálculo del régimen transitorio

Se analiza en este caso la hipótesis de cálculo que marca la altura manométrica máxima en el régimen permanente que sería considerar los filtros con la máxima suciedad antes de comenzar el lavado.

Para el cálculo del transitorio se ha considerado la impulsión dividida en los siguientes tramos:

Tramo	DN (mm)	Dext (mm)	D interior (mm)	Timbraje (atm)	Espesor tubo (mm)	Espesor total (mm)	Velocidad (m/s)	Longitud (m)	Material
1	100	121,5	114,30	40	3,6	3,6	1,08	10,50	ACERO
2	110	110	101,60	6	4,2	4,2	1,37	22,50	PEAD
3	110	110	101,60	6	4,2	4,2	1,37	56,30	PEAD
4	110	110	101,60	6	4,2	4,2	1,37	80,70	PEAD
5	110	110	101,60	6	4,2	4,2	1,37	237,42	PEAD
6	110	110	101,60	6	4,2	4,2	1,37	36,29	PEAD

Las características principales del material son:

DN (mm)	MRS (N/mm <sup>2</sup> =MPa)	$\sigma_s$ Esfuerzo de diseño (N/mm <sup>2</sup> =MPa)	Coef.
100	410	136,67	3
110	10	8	1,25

Se obtiene la siguiente celeridad de onda:

Material	PFA max (atm)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	K	DN (mm)	Di (mm)	e total (mm)	a (m/s)	Longitud (m)
ACERO	40	2.100.000	0,48	100	114,30	3,6	1.243	10,50
PEAD	6	10.000	100,00	110	101,60	4,2	199	433,21

De estos valores se obtiene una impulsión equivalente de las siguientes características:

LONGITUD TOTAL:	444	m
DIÁMETRO INTERIOR EQUIVALENTE:	101,92	mm
VELOCIDAD EQUIVALENTE:	1,36	m/s
ESPESOR EQUIVALENTE:	4,18	mm
MÓDULO DE ELASTICIDAD EQUIVALENTE:	5,95E+04	Kg/m <sup>2</sup>

### TIEMPO DE PARADA

Resulta éste de la siguiente expresión de Mendiluce: 
$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot v}{g \cdot Hm}$$
 en la que:

T = Tiempo de parada, en segundos:

C = Coeficiente adimensional que toma los siguientes valores:

C = 1,0	cuando Hm / L < 0,2	C = 0,4	cuando Hm / L = 0,35 aprx.
C = 0,8	cuando Hm / L = 0,25 aprox.	C = 0,2	cuando Hm / L = 0,37 aprox.
C = 0,6	cuando Hm / L = 0,35 aprox.	C = 0	cuando Hm / L = 0,4 aprox.

K= Coeficiente experimental adimensional, cuyo valor depende de la longitud de la impulsión y vale:

K=2	para L<500 m
K=1,75	para L=500 m
K=1,5	para 500<L<1500 m
K=1,25	para L=1.500 m aprox.
K=1	para L>1.500 m

L = Longitud de la impulsión, en metros.

v = Velocidad de circulación del fluido, en m/s.

g = aceleración de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

Hm = Altura manométrica total, en m.c.a.

En nuestro caso se obtienen: C = 1 y K = 2

Resultando un tiempo de parada de: T = 5,57 s

### TIEMPO DE PARADA

Resulta éste de la siguiente expresión de Mendiluce: 
$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot v}{g \cdot Hm}$$
 en la que:

T = Tiempo de parada, en segundos:

C = Coeficiente adimensional que toma los siguientes valores:

C = 1,0	cuando Hm / L < 0,2	C = 0,4	cuando Hm / L = 0,35 aprx.
C = 0,8	cuando Hm / L = 0,25 aprox.	C = 0,2	cuando Hm / L = 0,37 aprox.
C = 0,6	cuando Hm / L = 0,35 aprox.	C = 0	cuando Hm / L = 0,4 aprox.

K= Coeficiente experimental adimensional, cuyo valor depende de la longitud de la impulsión y vale:

K=2	para L<500 m
K=1,75	para L=500 m

K=1,5	para 500<L<1500 m
K=1,25	para L=1.500 m aprox.
K=1	para L>1.500 m

L = Longitud de la impulsión, en metros.

v = Velocidad de circulación del fluido, en m/s.

g = aceleración de la gravedad, en m/s<sup>2</sup>.

Hm = Altura manométrica total, en m.c.a.

En nuestro caso se obtienen: C = 1 y K = 2

Resultando un tiempo de parada de: T = 5,57 s

### **CELERIDAD DE LA ONDA DE PROPAGACIÓN**

Para conocer la forma de calcular la sobrepresión; es decir, para elegir la fórmula que se debe emplear, es preciso conocer el valor de la celeridad de la onda, para lo que emplearemos la siguiente expresión de Allievi:

$$a = \frac{9,900}{\sqrt{48,3 + K \cdot \frac{D_m}{e}}} \quad \text{en la que:}$$

a= Velocidad de propagación de la onda, en m/s

Dm= Diámetro de la fibra media del tubo, en mm

e= Espesor del tubo, en mm

K= 10<sup>10</sup>/ E ; siendo E, el Módulo de elasticidad del material.

En este caso se tiene a = 4,793 m/s

**LONGITUD CRÍTICA. SOBREPRESIÓN**

La longitud crítica es aquella distancia que separa el final de la impulsión del punto crítico o de coincidencia de los valores de Michaud y Allievi y nos determina si la impulsión es "corta" o "larga". Viene dada por la siguiente expresión:

$$L_c = \frac{a \cdot T}{2}$$

Si  $L_c > L$  la impulsión es "corta" y el máximo golpe de ariete vendrá dado por la siguiente expresión de Michaud:

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T}$$

Si  $L_c < L$  la impulsión es "larga" y la sobrepresión que origina el golpe de ariete se obtiene mediante a fórmula de Allievi:

$$\frac{a \cdot v}{g}$$

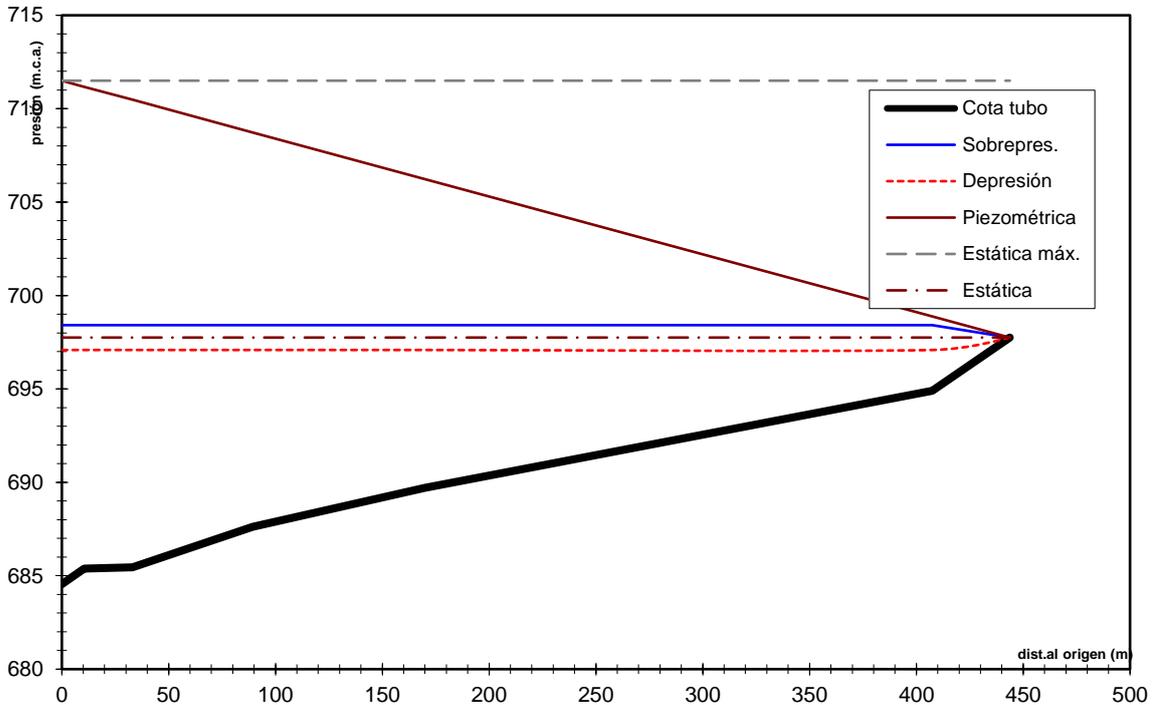
en todo el tramo que exceda de la longitud crítica, mientras que en el resto de la tubería, el golpe de ariete será el dado por la fórmula de Michaud, decreciente con la distancia al final.

En nuestro caso resulta:  $L_c = 13,34$  m. con lo que la impulsión es larga.

La máxima sobrepresión que se alcanzará en el origen de la impulsión es de: 0,66 m.c.a.

y por consiguiente la máxima presión a soportar por la tubería en dicho punto será de: 13,86 m.c.a.

**Perfil de la impulsión**



### ANÁLISIS DEL PERFIL DE LA IMPULSIÓN

<u>Dist. parcial</u>	<u>Dist acum.</u>	<u>Cota tubo</u>	<u>Pres.max.tub.</u>	<u>Pres.min.tub.</u>	<u>P.T. tubo</u>	<u>Observaciones</u>
0	0	684,55	26,95	12,54	400	-
10,5	10,5	685,39	26,11	11,70	400	-
22,5	33	685,45	26,05	11,64	60	-
56,3	89,3	687,62	23,88	9,47	60	-
80,7	170	689,7	21,80	7,39	60	-
237,42	407,42	694,9	16,60	2,19	60	-
36,29	443,71	697,75	13,75	0,00	60	-

A la vista de los resultados del gráfico de líneas piezométricas se observa como en ningún caso las depresiones llegan a la cavitación. Respecto a las sobrepresiones son inexistentes y no hay puntos en los que la presión máxima del golpe de ariete supere la Presión de Funcionamiento Admisible de la tubería (PFA) ni mucho menos la Presión Máxima Admisible (PMA) de la conducción.

Por lo tanto, no es necesario disponer ningún elemento adicional para atenuar el golpe de ariete.