

ANEJO Nº 9

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO	1
2.1	SUBSECTOR DE BOMBEO BAJO	2
2.2	SUBSECTOR DE BOMBEO ALTO	9
3	POTENCIA INSTALADA Y POTENCIA CONSUMIDA	16
4	DISEÑO DE LOS COLECTORES DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO	17
5	DETERMINACIÓN DE ALTURA PRESIÓN DEL BOMBEO	22
6	CÁLCULO DE ANCLAJES	23
7	CÁLCULO NPSH.....	25
8	CÁLCULO GOLPE DE ARIETE.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Rendimientos y valores de NPSH de la bomba de 210 l/s a 25 mca	8
Tabla 2.	Rendimientos y valores de NPSH de la bomba de 130 l/s a 50 mca	15
Tabla 3.	Potencias de los grupos de bombeo	16
Tabla 4.	Coeficientes K en codos	18
Tabla 5.	Coeficientes K en derivaciones	18
Tabla 6.	Coeficientes K en válvulas.....	19
Tabla 7.	Características y pérdidas de carga de las tuberías de la estación de bombeo	20
Tabla 8.	Pérdidas de carga totales de la estación de bombeo.....	22
Tabla 9.	Cálculo de anclajes en codo de cuello de cisne.....	25
Tabla 10.	Valores de la tensión de vapor según la temperatura	26

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca	3
Figura 2. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a distintas revoluciones	4
Figura 3. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.432 rpm.....	5
Figura 4. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.354 rpm.....	6
Figura 5. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.292rpm.....	7
Figura 6. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.249 rpm.....	8
Figura 7. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca	10
Figura 8. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a distintas revoluciones	11
Figura 9. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.442 rpm.....	12
Figura 10. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.405 rpm.....	13
Figura 11. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.377 rpm.....	14
Figura 12. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.356 rpm.....	15
Figura 13. Pérdidas de carga en codos	20
Figura 14. Pérdidas de carga en derivaciones.....	21
Figura 15. Pérdidas de carga en válvulas	21

1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se realiza la justificación y el dimensionamiento de las nuevas instalaciones de bombeo proyectadas. Se pretende optimizar el consumo energético y para ello se dividirá el sistema de bombeo en dos grupos independientes de bombas, que darán lugar a dos subsectores: subsector de bombeo bajo (BB) y subsector de bombeo alto (BA).

En el presente proyecto de la Fase II se instarán los grupos de bombeo que abastecerán al subsector de bombeo bajo (BB).

A continuación, se describen las actuaciones proyectadas en relación al bombeo de agua.

2 DISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO

En el Anejo nº 7 «Criterios de diseño y cálculos hidráulicos» se han determinado los caudales y presiones necesarias para el riego de los dos subsectores de bombeo. Son los siguientes:

- Subsector de bombeo bajo (BB).-
 - Caudal de bombeo: 413,91 l/s
 - Presión de bombeo: 25 mca (proporcionado por la bomba)
 - Superficie regada: 591,30 ha

- Subsector de bombeo alto (BA).-
 - Caudal de bombeo: 245,28 l/s
 - Presión de bombeo: 50 mca (proporcionado por la bomba)
 - Superficie regada: 350,40 ha

Para el diseño de los conjuntos de bombas se han analizado distintos modelos de bombas de distintos fabricantes hasta encontrar la mejor relación altura de bombeo-caudales-rendimiento. También se diseña el bombeo del subsector alto en esta fase, aunque no se vaya a ejecutar, pues es necesario para el diseño de la distribución de todas las bombas, colectores, etc.

Para la elección y diseño de las bombas se ha partido de las siguientes premisas:

- Las bombas serán de cámara partida y quedarán permanentemente en carga, pues reciben la presión existente en el colector de filtrado. Esta presión será de 35,21 mca (presión dinámica), considerando las pérdidas de carga en la tubería de transporte y en el filtrado, conforme a los cálculos realizados en la Fase I (página 118 de la Memoria

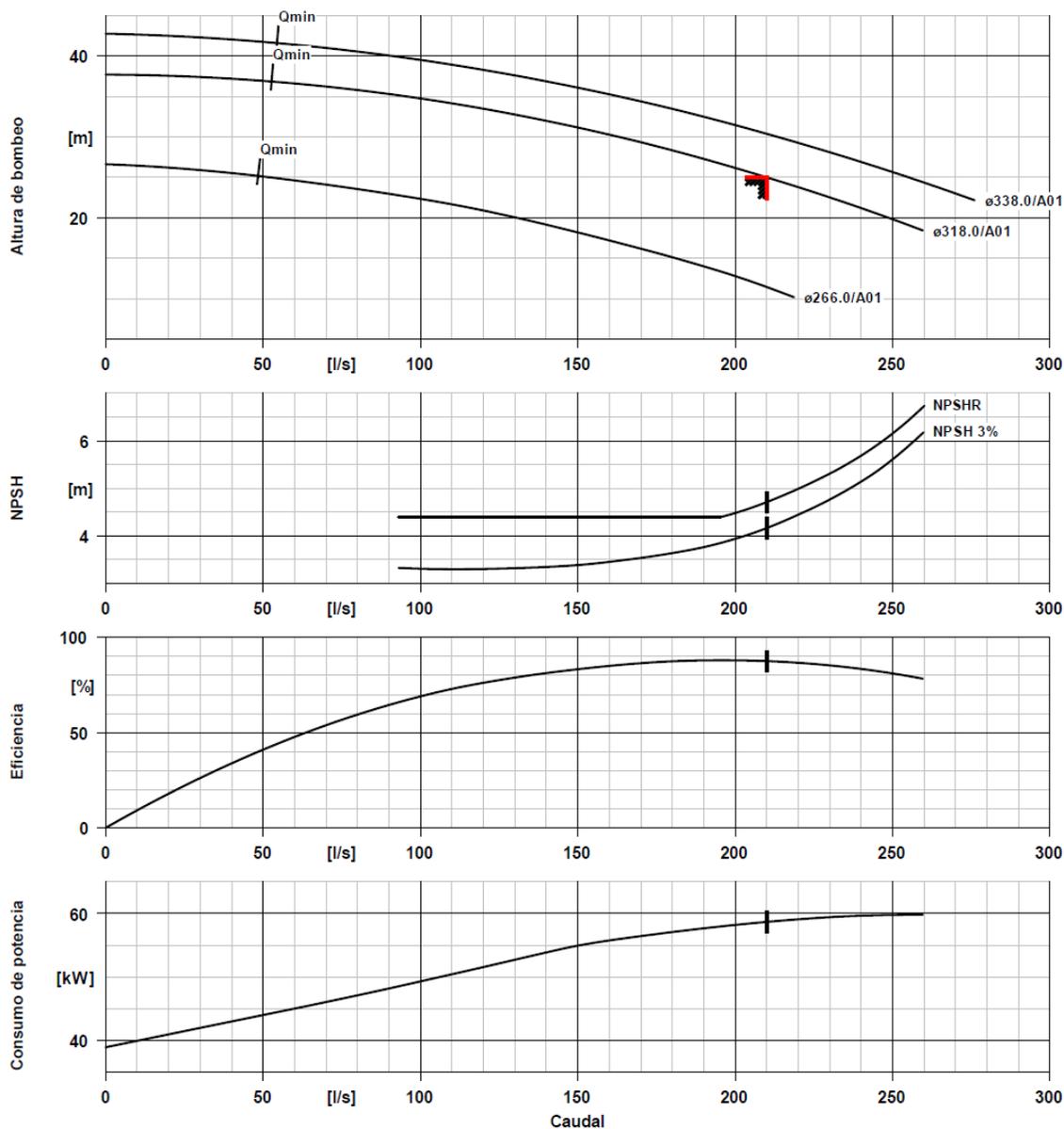
y página 24 del Anejo Nº 8 «Criterios de diseño y cálculos hidráulicos» del proyecto de la Fase I).

- Se diseña un conjunto de dos bombas más una de reserva para abastecer cada subsector.
- Las bombas deberán funcionar a distintos puntos de caudal y de presión de salida para poder ajustarlas a lo largo de la campaña a las necesidades de presión que demande la red de riego.

2.1 SUBSECTOR DE BOMBEO BAJO

Con base en lo indicado, se diseña un sistema de bombeo con una presión de funcionamiento de 25 mca, con una curva altura-caudal que permita que pueda operar a 20 mca y que con la regulación de variadores de velocidad se obtenga un rango de caudales importante. Se decide diseñar con 3 bombas (2 funcionando y una de reserva) que proporcionen 210 l/s cada una (la mitad del caudal necesario para todo el Subsector de bombeo bajo serían 206,96 l/s, por lo que se han tomado 210 l/s de caudal de bombeo para cada bomba) a 25 mca para fijar la hidráulica de la bomba.

A continuación se muestran las curvas de caudal (l/s) frente a altura manométrica (mca), el NPSH, el rendimiento (%) y la potencia hidráulica (kW) para el punto de diseño seleccionado.


Datos de curvas

Velocidad de giro	1488 rpm	Eficiencia	87,6 %
Densidad del fluido	998 kg/m ³	Absorción de potencia	58,69 kW
Viscosidad	1,00 mm ² /s	NPSHR	4,71 m
Corriente volumétrica	210,000 l/s	NPSH 3%	4,16 m
Caudal bombeado	210,000 l/s		
requerido		Diámetro efectivo del rodete	318,0 mm
Altura de bombeo	25,00 m		
Altura de bombeo requerida	25,00 m		

Figura 1. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca

La bomba elegida para elevar presentará un rendimiento hidráulico $\eta_1=87,6 \%$, por lo que la potencia absorbida en ese punto de funcionamiento será:

$$P_{\text{absorbida}} = \frac{Q \times H}{75 \times \eta_1} = \frac{210 \times 25}{75 \times 0,876} = 79,91 \text{ CV} = 58,81 \text{ kW}$$

Siendo η_2 el rendimiento mecánico del motor (95 % rendimiento indicado por fabricante), en el punto de funcionamiento, la potencia total será:

$$P_T = \frac{PP_{\text{absorbida}}}{\eta_2} = \frac{58,81}{0,95} = 61,91 \text{ kW}$$

De la curva de funcionamiento de la bomba se deduce que el motor que se deberá instalar será de 75 kW (100 CV).

Las bombas funcionarán accionadas por variadores de frecuencia cada una de ellas y se rotarán por tiempo en su funcionamiento. Con la regulación de las revoluciones del motor se obtienen los distintos puntos de funcionamiento. Tendrán unas curvas similares a las siguientes:

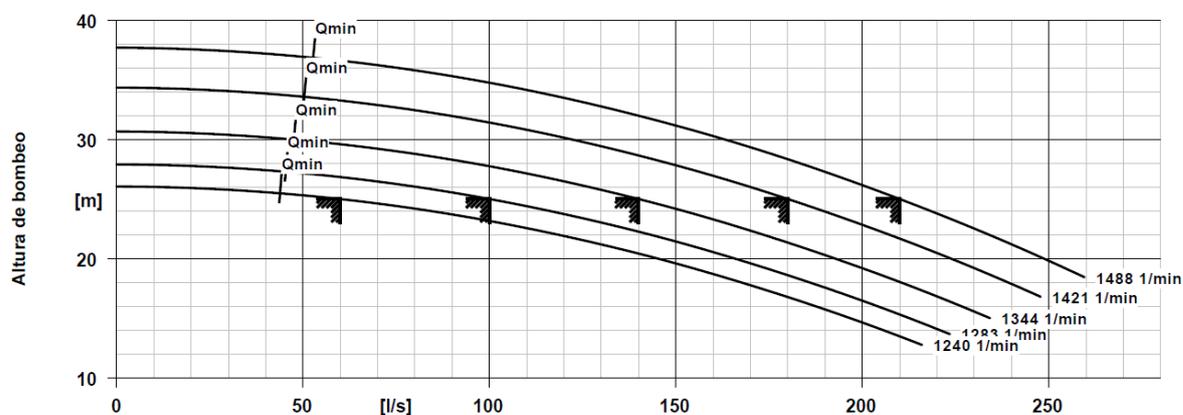


Figura 2. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a distintas revoluciones

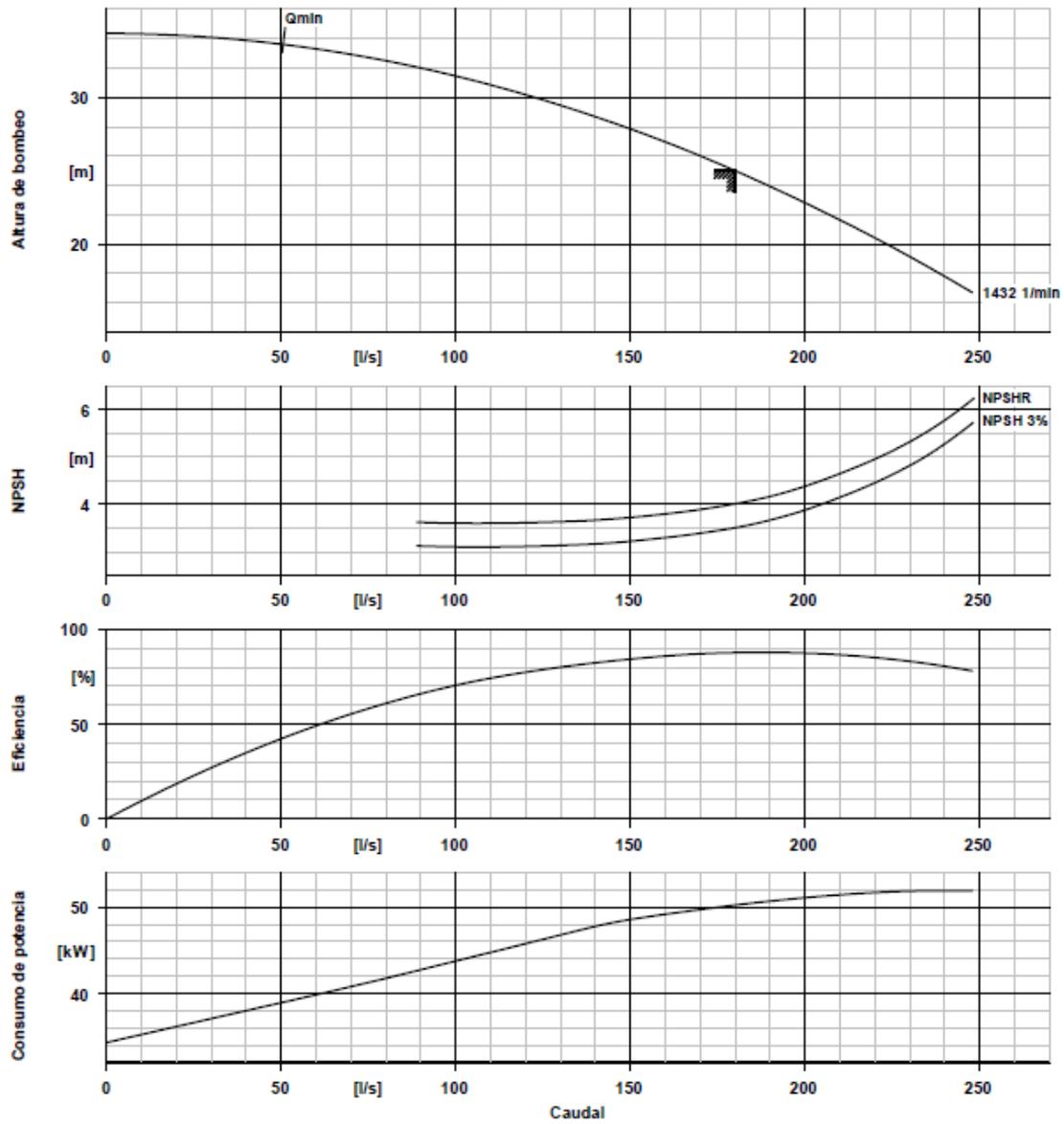


Figura 3. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.432 rpm

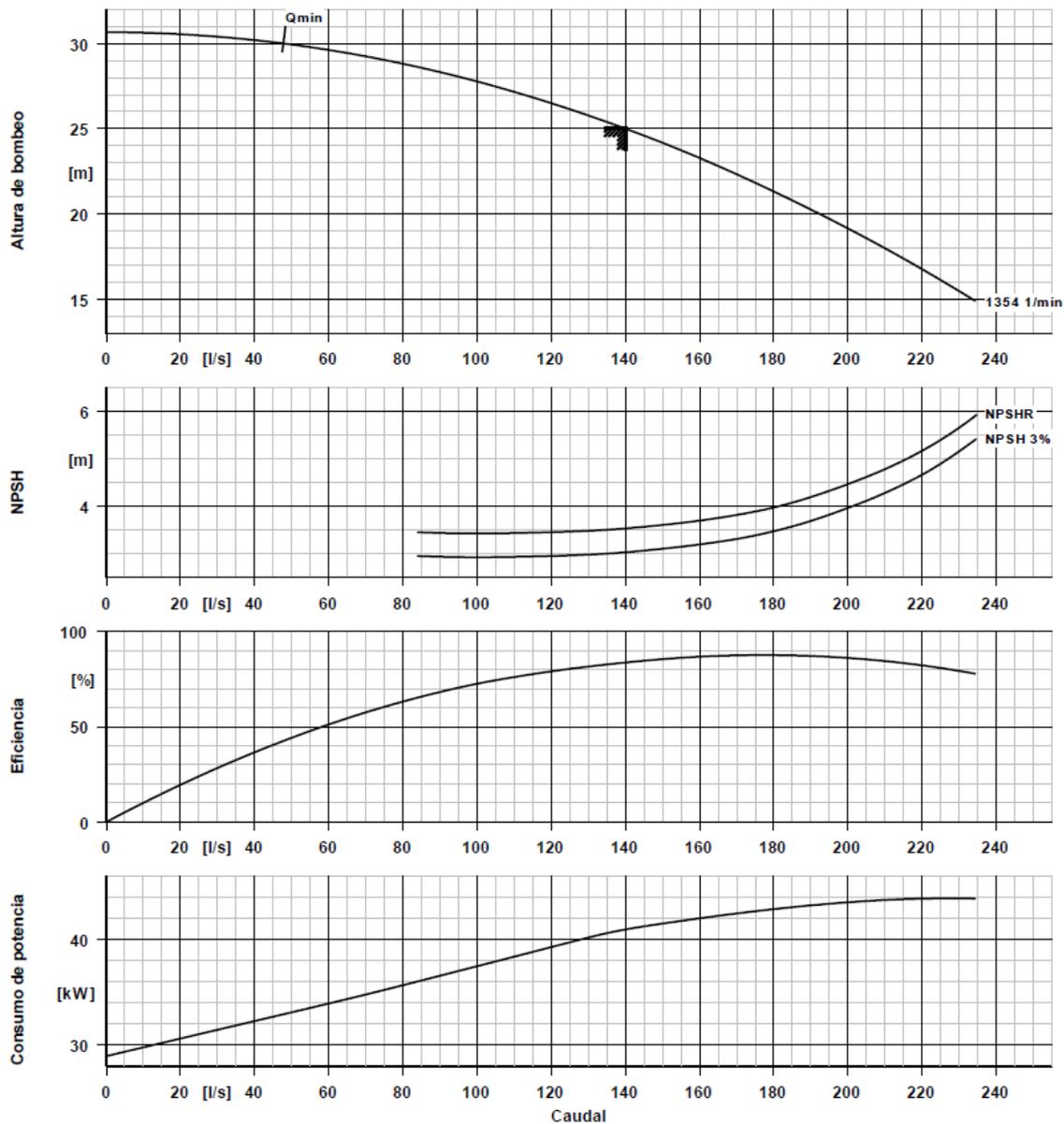


Figura 4. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.354 rpm

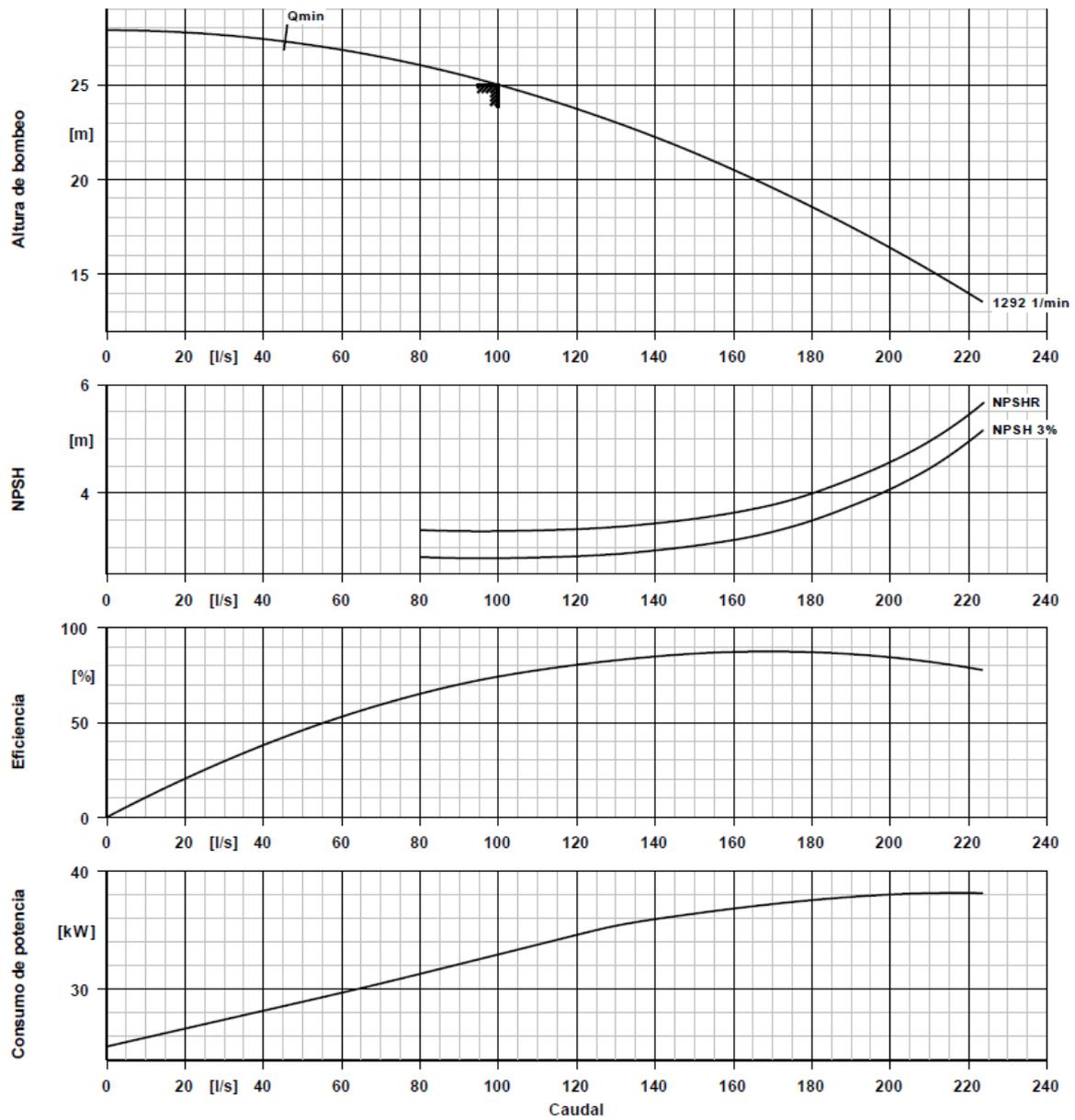


Figura 5. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.292 rpm

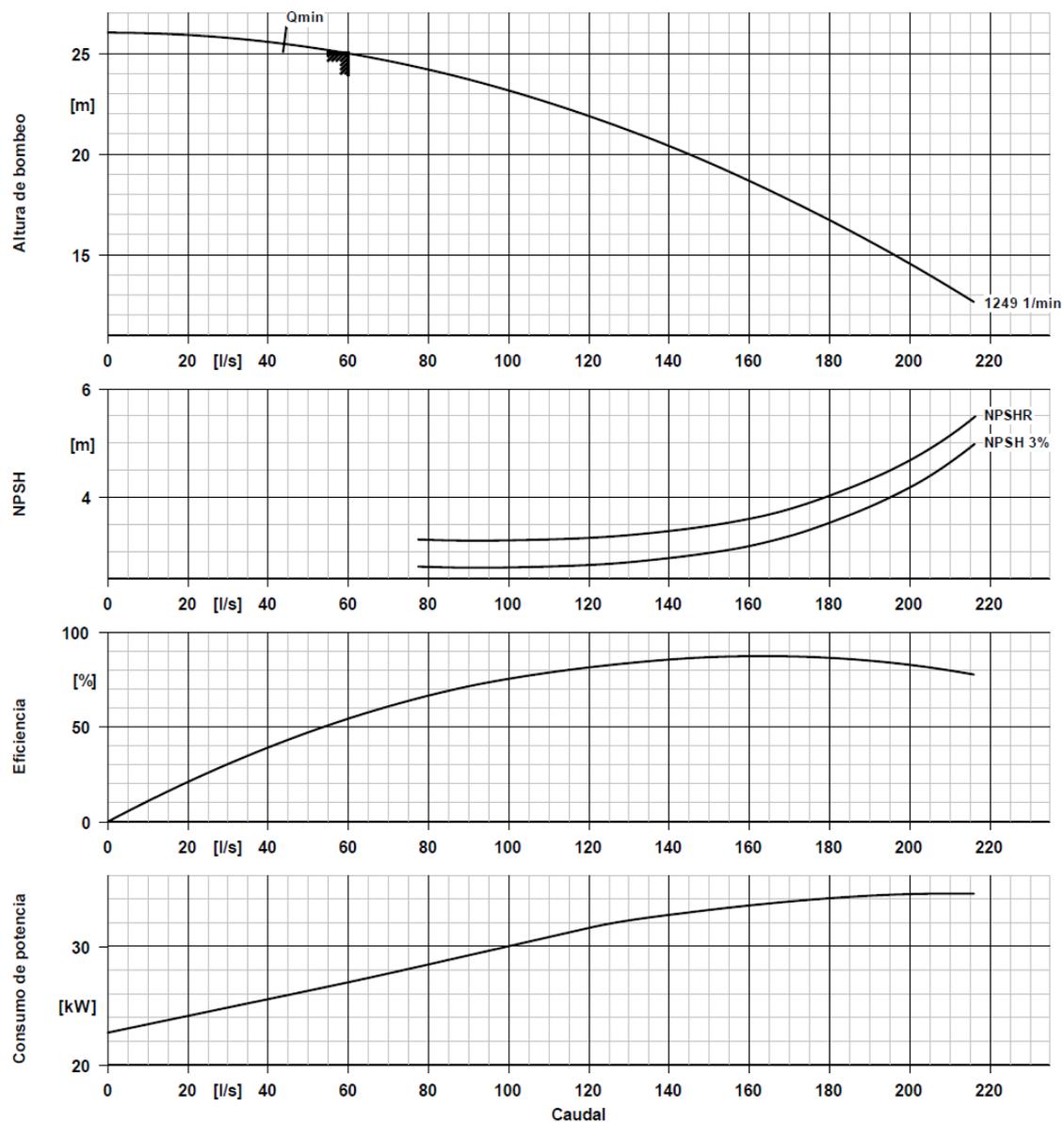


Figura 6. Curvas características de bomba de 210 l/s a 25 mca a 1.249 rpm

En la siguiente tabla, obtenidos de las anteriores curvas, se muestran para una altura de bombeo fija (25 mca), distintos valores de caudal obtenidos para distintas revoluciones, la potencia hidráulica consumida, su rendimiento y el valor de NPSH:

Tabla 1. Rendimientos y valores de NPSH de la bomba de 210 l/s a 25 mca

rpm	Q (l/s)	P Hidráulica (kW)	Rend hidr (%)	NPSHr (mca)
1488	210	58,81	87,6	4,71
1432	180	50,1	87,8	3,5
1354	140	40,7	84,1	3,0
1292	100	32,8	74,9	2,7
1249	60	26,6	55,1	2,7

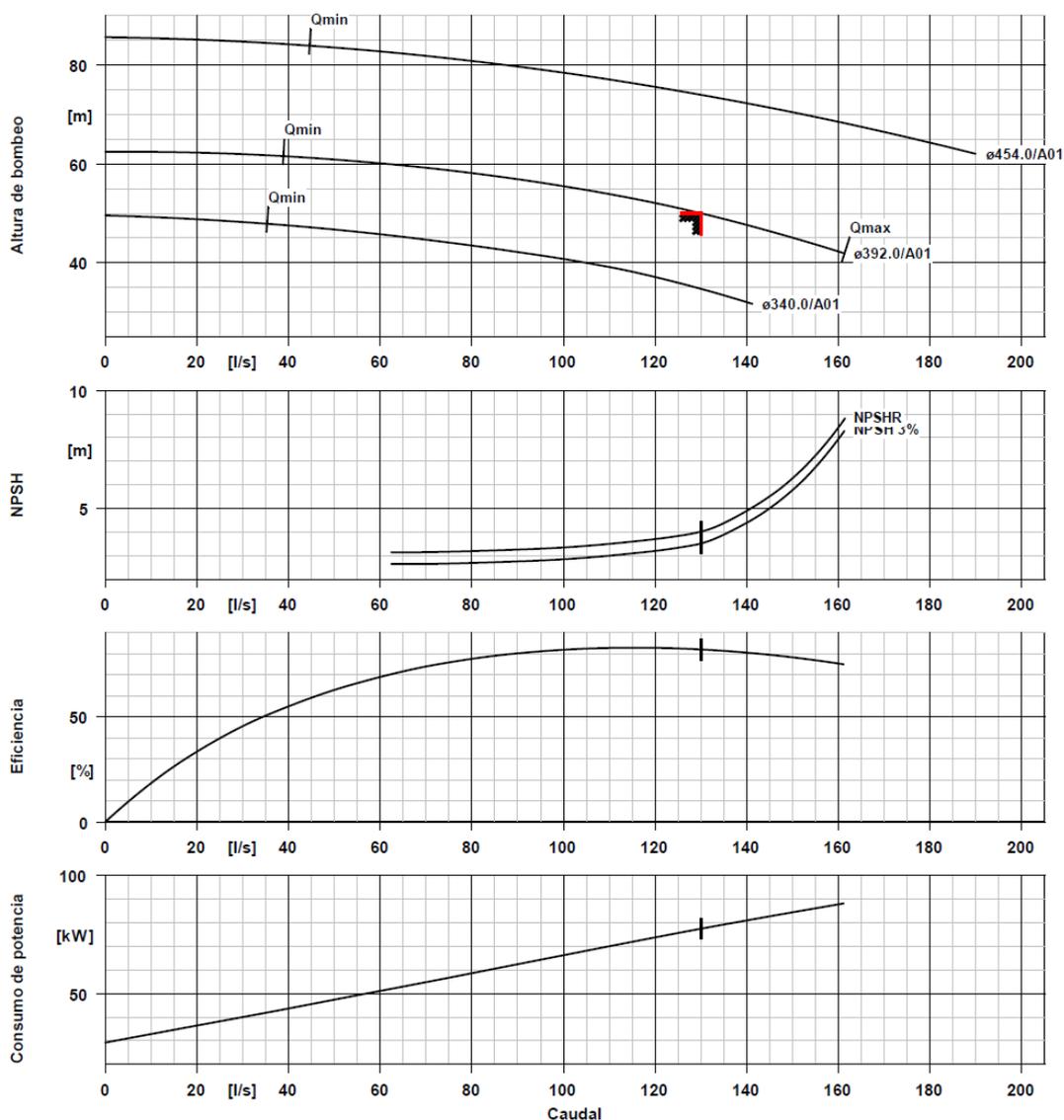
El caudal mínimo proporcionado (60 l/s) se considera suficiente tanto para el llenado y cebado de la red como para mantener el riego si solo una pequeña parte de la superficie se estuviera regando. Este caudal de 60 l/s equivale aproximadamente a que solo regara el 15 % de todo el subsector, siendo muy improbable que riegue menos de un 15 %, pues el sector de bombeo solo riega 8 horas al día y los cultivos son olivar y almendro, por lo que la demanda siempre debe ser bastante homogénea y superior siempre al 15 % de la superficie.

Las bombas tendrán las dimensiones del plano 4.2.1 «Planta general estación de bombeo y filtrado» con diámetro de aspiración de 250 mm y 200 mm de impulsión.

2.2 SUBSECTOR DE BOMBEO ALTO

Con base en lo indicado, se diseña un sistema de bombeo con una presión de funcionamiento de 50 mca, con una curva altura-caudal que permita que pueda operar a 40 mca y que con la regulación de variadores de velocidad se obtenga un rango de caudales importante. Se decide diseñar con 3 bombas (2 funcionando y una de reserva) que proporcionen 130 l/s cada una (la mitad del caudal necesario para todo el Subsector de bombeo bajo serían 122,64 l/s, por lo que se han tomado 130 l/s de caudal de bombeo para cada bomba) a 50 mca para fijar la hidráulica de la bomba.

A continuación se muestran las curvas de caudal (l/s) frente a altura manométrica (mca), el NPSH, el rendimiento (%) y la potencia hidráulica (kW) para el punto de diseño seleccionado.


Datos de curvas

Velocidad de giro	1487 rpm	Eficiencia	82,1 %
Densidad del fluido	998 kg/m ³	Absorción de potencia	77,69 kW
Viscosidad	1,00 mm ² /s	NPSHR	4,03 m
Corriente volumétrica	130,000 l/s	NPSH 3%	3,52 m
Caudal bombeado	130,000 l/s		
requerido			
Altura de bombeo	50,00 m		
Altura de bombeo requerida	50,00 m		

Figura 7. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca

La bomba elegida para elevar presentará un rendimiento hidráulico $\eta_1=82,1 \%$, por lo que la potencia absorbida en ese punto de funcionamiento será:

$$P_{\text{absorbida}} = \frac{Q \times H}{75 \times \eta_1} = \frac{130 \times 50}{75 \times 0,821} = 105,56 \text{ CV} = 77,69 \text{ kW}$$

Siendo η_2 el rendimiento mecánico del motor (95 %, proporcionado por fabricante), en el punto de funcionamiento, la potencia total será:

$$P_T = \frac{PP_{\text{absorbida}}}{\eta_2} = \frac{77,69}{0,95} = 81,78 \text{ kW}$$

De la curva de funcionamiento de la bomba se deduce que el motor que se deberá instalar será de 90 kW (125 CV).

Las bombas funcionarán accionadas por variadores de frecuencia cada una de ellas y se rotarán por tiempo en su funcionamiento. Con la regulación de las revoluciones del motor se obtienen los distintos puntos de funcionamiento. Tendrán unas curvas similares a las siguientes:

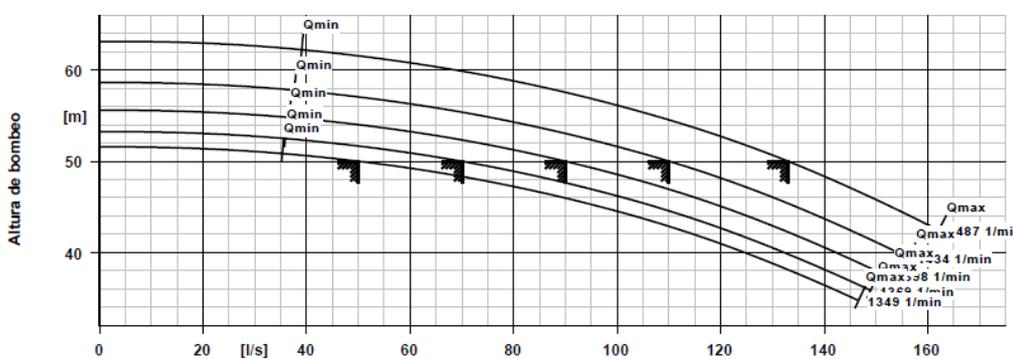


Figura 8. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a distintas revoluciones

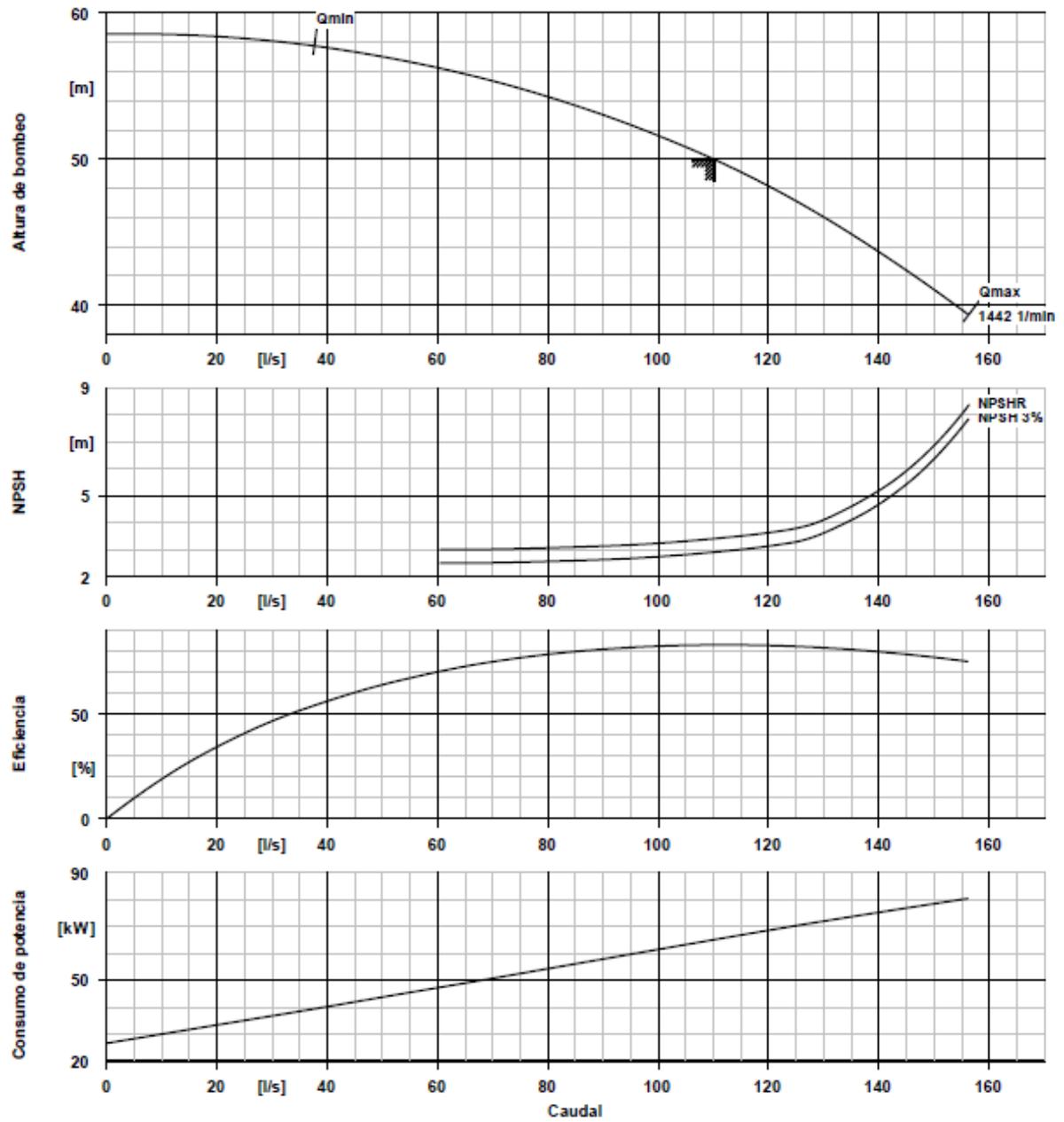


Figura 9. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.442 rpm

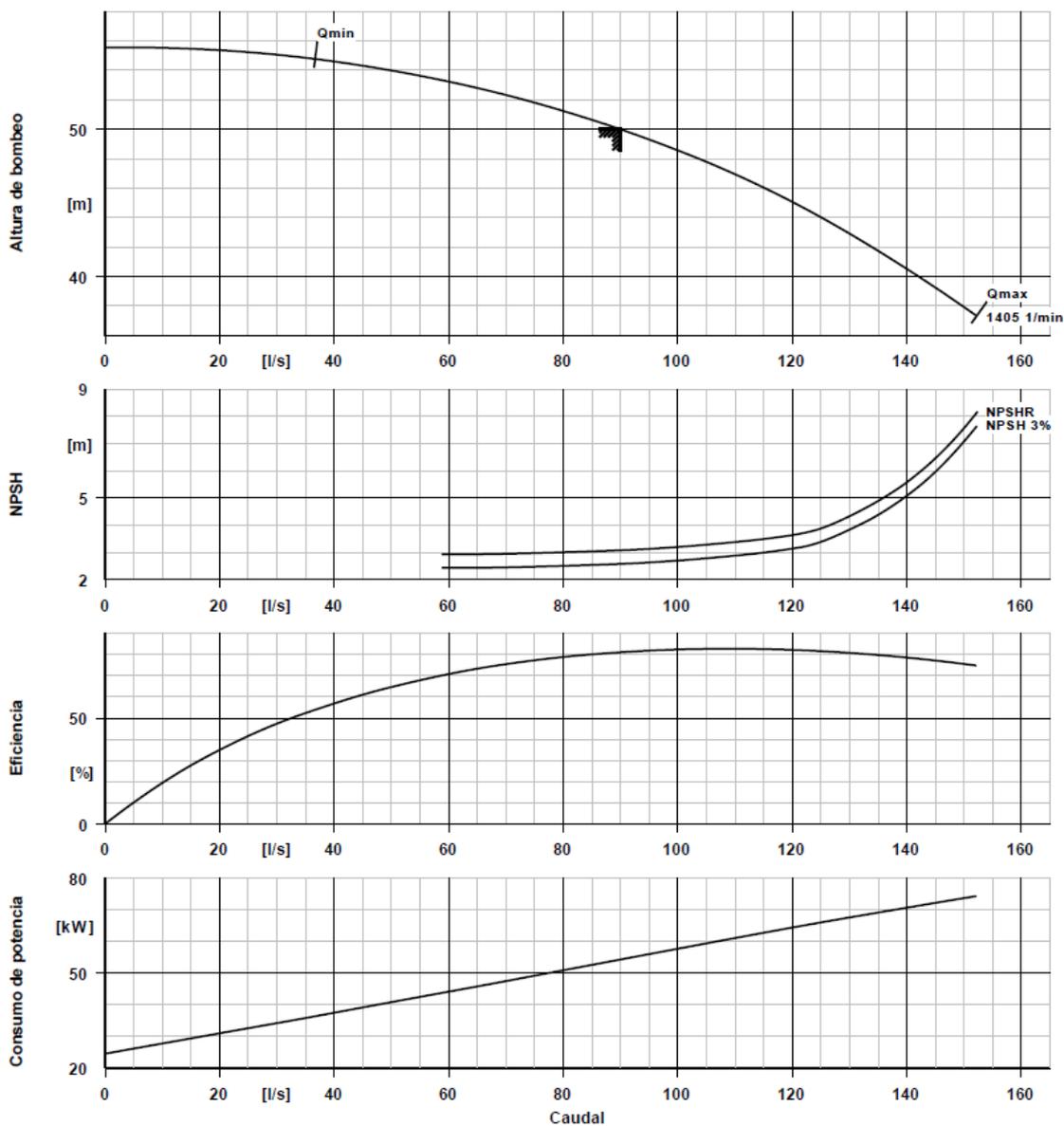


Figura 10. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.405 rpm

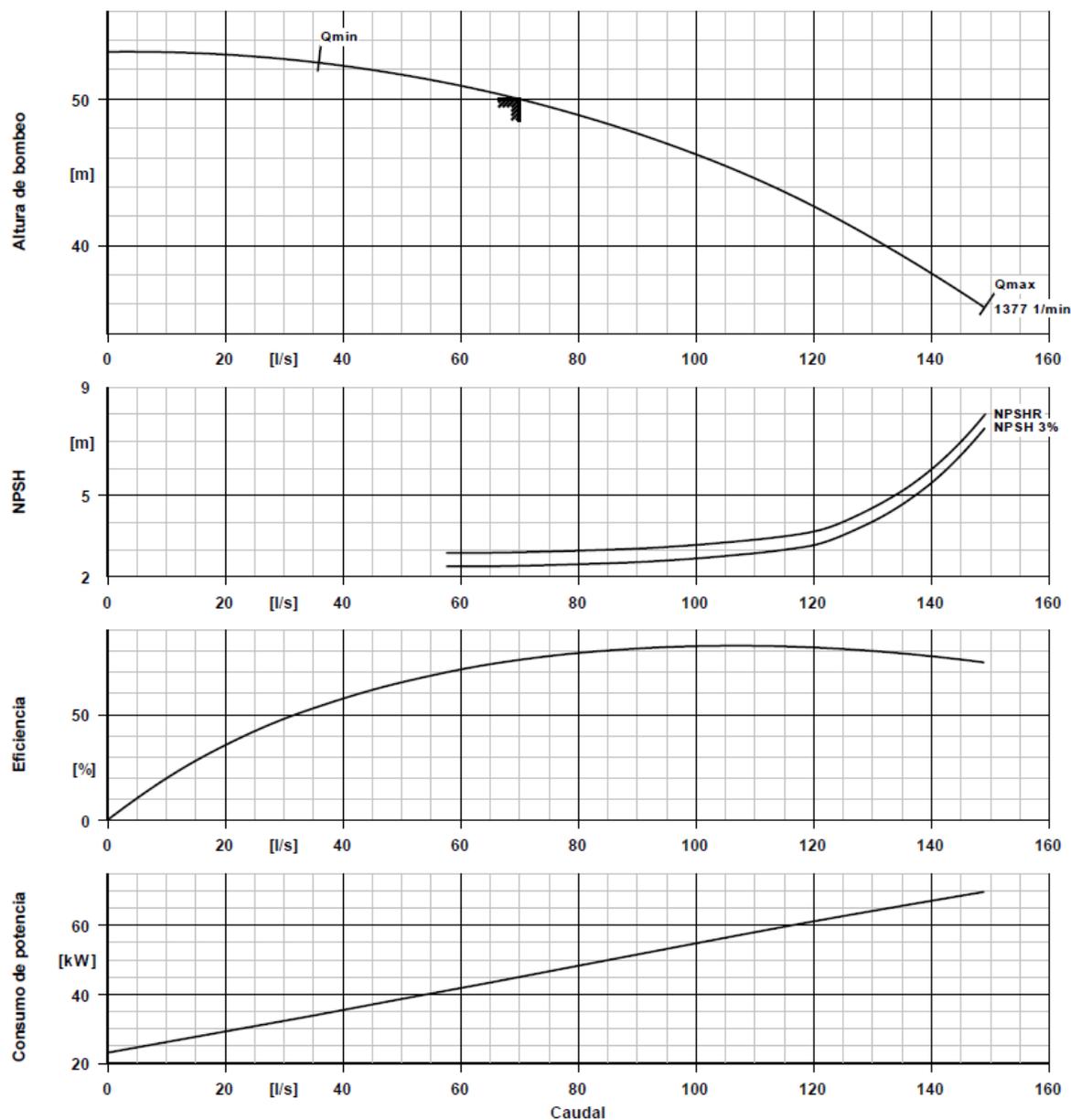


Figura 11. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.377 rpm

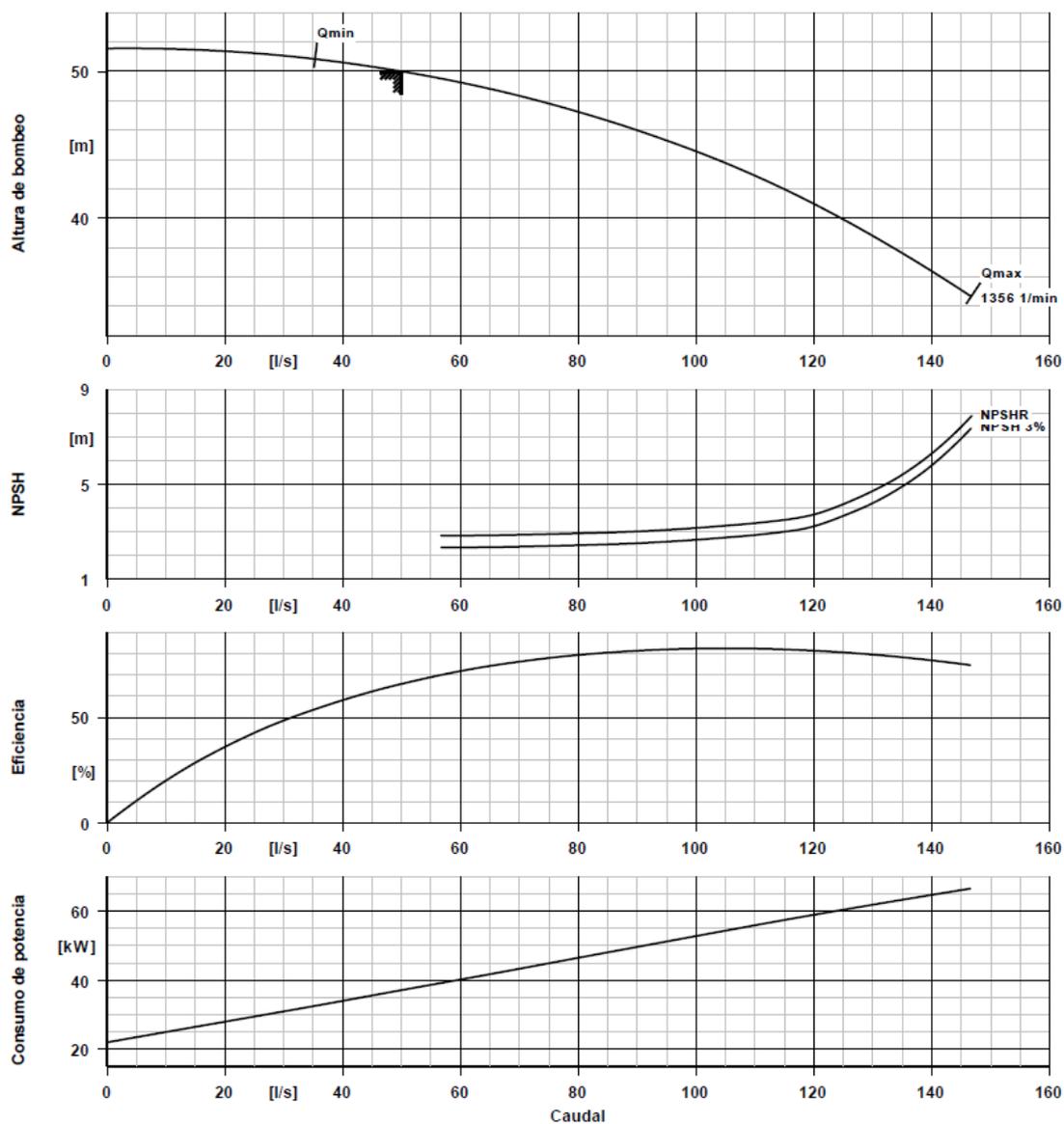


Figura 12. Curvas características de bomba de 130 l/s a 50 mca a 1.356 rpm

En la siguiente tabla, obtenidos de las anteriores curvas, se muestran para una altura de bombeo fija (50 mca), distintos valores de caudal obtenidos para distintas revoluciones, la potencia hidráulica consumida, su rendimiento y el valor de NPSH:

Tabla 2. Rendimientos y valores de NPSH de la bomba de 130 l/s a 50 mca

rpm	Q (l/s)	P Hidráulica (kW)	Rend hidr (%)	NPSHr (mca)
1488	130	77,69	82,1	4,03
1442	110	64,9	82,9	2,9
1405	90	54,2	81,2	2,6
1377	70	45,0	76,2	2,4
1356	50	37,1	66,0	2,3

El caudal mínimo proporcionado (50 l/s) se considera suficiente tanto para el llenado y cebado de la red como para mantener el riego si solo una pequeña parte de la superficie se estuviera regando. Este caudal de 50 l/s equivale aproximadamente a que solo regara el 19 % de todo el subsector, siendo muy improbable que riegue menos de un 19 %, pues el sector de bombeo solo riega 8 horas al día y los cultivos son olivar y almendro, por lo que la demanda siempre debe ser bastante homogénea y superior siempre al 19 % de la superficie.

Las bombas tendrán las dimensiones del plano 4.2.1 «Planta general estación de bombeo y filtrado» con diámetro de aspiración de 200 mm y 150 mm de impulsión.

3 POTENCIA INSTALADA Y POTENCIA CONSUMIDA

Con base en las bombas diseñadas, se determina la potencia total, tanto instalada (potencia de motor) como consumida (potencia demandada en el punto de funcionamiento de la bomba), que servirá para el dimensionamiento de la instalación eléctrica y de las instalaciones de generación de energía (campo fotovoltaico y centro de transformación).

Tabla 3. Potencias de los grupos de bombeo

	Q (l/s)	H (mca)	Potencia hidráulica (kW)	Potencia eléctrica (kW)	Potencia eléctrica mayorada (kW) (*)	Potencia motor (kW)
BOMBEO BAJO	210	25	58,81	61,91	65	75,00
BOMBEO ALTO	130	50	77,69	81,78	85,87	90,00

(*) Se mayor a un 5 % la potencia eléctrica absorbida en el punto de funcionamiento

La potencia máxima instalada será:

$$\text{Potencia máxima instalada} = 75 \text{ kW} \times 2 \text{ bombas} + 90 \text{ kW} \times 2 \text{ bombas} = \mathbf{330 \text{ kW}}$$

La potencia máxima demandada en el punto de funcionamiento de la bomba:

$$\text{Potencia máxima demandada} = 65 \text{ kW} \times 2 \text{ bombas} + 85,87 \text{ kW} \times 2 \text{ bombas} = \mathbf{301,74 \text{ kW}}$$

Como potencia máxima demandada (absorbida realmente por la bomba) se tomará 305 kW para compensar las pérdidas en cableados interiores de la estación de bombeo hasta los variadores de frecuencia.

4 DISEÑO DE LOS COLECTORES DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO

En este apartado se realiza el cálculo hidráulico de la estación de bombeo completa, desde la toma en colector de filtrado, su paso por el bombeo y su impulsión, para calcular las pérdidas de carga que se producirán tanto en la aspiración como en la impulsión.

Para los cálculos se tomarán los caudales más elevados que se puedan dar en la instalación para el colector principal que distribuye el agua tanto para las bombas del subsector alto como para el bajo (680 l/s en total, 420 l/s para subsector bajo y 260 l/s subsector alto, correspondientes con los caudales máximos proporcionado por las bombas). En la presente Fase II solo se calcularán los colectores del bombeo del subsector bajo, pues el colector del alto no se ejecutará en esta fase.

Los cálculos hidráulicos se dividirán en dos partes: pérdidas en las tuberías y colectores, y pérdidas localizadas (codos, derivaciones y válvulas). Al mismo tiempo se separan en pérdidas en la aspiración y en la impulsión.

1 Pérdidas en tuberías.

La fórmula de pérdidas de carga en tuberías de Hazen-Williams, empleada en el dimensionamiento, es la siguiente:

$$J(\text{m/m})=10,62 \cdot C^{-1.85} \cdot D^{-4.87}(\text{m}) \cdot Q^{1.85}(\text{m}^3/\text{s})$$

donde C depende del material de la conducción y del diámetro de la misma. Para acero y diámetros que se manejan, se adopta un valor de C = 150.

2 Pérdidas localizadas.

Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas solo se pueden determinar de forma experimental y, puesto que son debidas a una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico K.

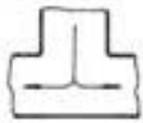
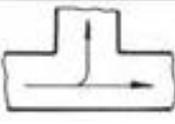
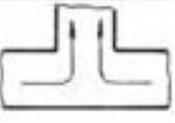
$$H= K \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (\text{m})$$

El coeficiente K es adimensional y depende del tipo de singularidad y de la velocidad media en el interior de la tubería. En la práctica se suelen adoptar los siguientes valores aproximados de K:

1.- Codos
Tabla 4. Coeficientes K en codos

Θ	Coef K
11,25	0,045
15	0,06
22,5	0,15
30	0,16
45	0,32
60	0,7
90	1,26

2.- Derivaciones
Tabla 5. Coeficientes K en derivaciones

	Coef K
	1,5
	2
	3

3.- Válvulas

Tabla 6. Coeficientes K en válvulas

Válvulas	Coef K
Válvula ángulo recto abierta 100%	2
Válvula ángulo recto abierta 75%	2
Válvula ángulo recto abierta 50%	3
Válvula ángulo recto abierta 25%	6
Válvula globo abierta 100%	4
Válvula globo abierta 75%	4
Válvula globo abierta 50%	6
Válvula globo abierta 25%	15
Válvula retención	2
Válvula compuerta abierta 100%	0,2
Válvula compuerta abierta 75%	1,15
Válvula compuerta abierta 50%	5,6
Válvula compuerta abierta 25%	24
Válvula mariposa abierta 100%	0,4
Válvula mariposa abierta 75%	1
Válvula mariposa abierta 50%	13
Válvula mariposa abierta 25%	120

Las pérdidas de carga que se producirán en esta estación de bombeo serán:

A) Pérdidas en tuberías.

Se distingue entre las que se producen en la aspiración (usadas para el cálculo de NPSH) y las que se producen en la impulsión (usadas para determinar la presión en el punto de entrega). Se puede comprobar que tanto las velocidades en la aspiración como en la impulsión son adecuadas (máximo de 1,5 m/s en aspiración y 2 m/s en impulsión).

Tabla 7. Características y pérdidas de carga de las tuberías de la estación de bombeo

NI	NF	L (m)	Q (l/s)	DN (mm)	espesor (mm)	Di(mm)	v(m/s)	Hf(m)	Hfac.
Aspiración DN 800	Colector DN 813	9,2	680	813	7,1	798,8	1,36	0,014	0,014
Aspiración DN 450	Carrete DN 450	0,45	210	457	5,4	446,2	1,34	0,001	0,015
Cono reduct. DN 450-250	Cono DN 457 - DN 273	0,9	210	365	5	355	2,12	0,008	0,023
							TOTAL		0,023
NI	NF	L (m)	Q (l/s)	DN (mm)	espesor (mm)	Di(mm)	v(m/s)	Hf(m)	Hfac.
Cono amplia. DN 200-400	Cono DN 219,1 - DN 419	0,8	210	319	5	309	2,80	0,014	0,014
Impulsión DN 400	Carrete DN 419	0,8	210	419	5	409	1,60	0,003	0,017
Impulsión DN 600	Colector DN 610	13,22	420	610	6,3	597,4	1,50	0,033	0,050
							TOTAL		0,050

B) Pérdidas localizadas.

1.- Codos (salida impulsión)

Datos de la instalación		Ø	Coef K	Unidades	Pérdida
Caudal (l/s)	210	11,25	0,045	0	0
Diám. int. (mm)	409	15	0,06	0	0
Velocidad del fluido		22,5	0,15	0	0
1,60 m/s		30	0,16	0	0
Término cinético		45	0,32	1	0,04
0,130 m		60	0,7	0	0
CODOS INCORPORACIÓN		90	1,26	0	0,00
				TOTAL	0,04
Datos de la instalación		Ø	Coef K	Unidades	Pérdida
Caudal (l/s)	420	11,25	0,045	0	0
Diám. int. (mm)	597,4	15	0,06	0	0
Velocidad del fluido		22,5	0,15	0	0
1,50 m/s		30	0,16	0	0
Término cinético		45	0,32	2	0,07
0,114 m		60	0,7	0	0
CUELLO DE CISNE		90	1,26	0	0,00
				TOTAL	0,07

Figura 13. Pérdidas de carga en codos

2.- Derivaciones (entrada aspiración)

Datos de la instalación		Coef K	Unidades	Pérdida
Caudal (l/s)	210	2	1	0,184
Diám. int. (mm)	446,2			
Velocidad del fluido				
	1,34 m/s			
Término cinético				
	0,092 m			

Figura 14. Pérdidas de carga en derivaciones

3.- Válvulas de mariposa

ASPIRACION					
Datos de la instalación		Válvulas	Coef K	Unidades	Pérdida
Caudal (l/s)	210	Válvula mariposa abierta 100%	0,4	1	0,036
Diám. int. (mm)	450	Válvula mariposa abierta 75%	1	0	0,000
Velocidad del fluido		Válvula mariposa abierta 50%	13	0	0,000
	1,32 m/s	Válvula mariposa abierta 25%	120	0	0,000
Término cinético				TOTAL	0,036
	0,089 m				
IMPULSION					
Datos de la instalación		Válvulas	Coef K	Unidades	Pérdida
Caudal (l/s)	210	Válvula mariposa abierta 100%	0,4	1	0,057
Diám. int. (mm)	400	Válvula mariposa abierta 75%	1	0	0,000
Velocidad del fluido		Válvula mariposa abierta 50%	13	0	0,000
	1,67 m/s	Válvula mariposa abierta 25%	120	0	0,000
Término cinético				TOTAL	0,057
	0,142 m				

Figura 15. Pérdidas de carga en válvulas

En resumen, las pérdidas de carga totales en la estación de bombeo (subsector bajo) se distinguen en función de la bomba y de aspiración o impulsión. Son las siguientes:

Tabla 8. Pérdidas de carga totales de la estación de bombeo

ASPIRACION	
Elemento	Pérdidas (mca)
Tuberías	0,023
Derivaciones	0,184
Válvulas	0,036
TOTAL	0,243
IMPULSIÓN	
Elemento	Pérdidas (mca)
Tuberías	0,050
Codos	0,110
Válvulas	0,057
TOTAL	0,217

Se tomarán las más desfavorables en cada caso para el dimensionamiento:

1. Para el cálculo del NPSH se tomará 0,243 mca correspondiente a la aspiración.
2. Para el cálculo de las pérdidas de carga de la impulsión se tomará 0,46 mca.

5 DETERMINACIÓN DE ALTURA PRESIÓN DEL BOMBEO

Una vez calculadas las pérdidas de carga que se producen en el sistema de bombeo del subsector bajo y la presión disponible a la salida del filtrado (o entrada colector de bombeo), se determinará la presión que existirá a la salida del bombeo que se tendrá que considerar para los cálculos hidráulicos de la correspondiente red de riego (subsector de bombeo bajo).

- Presión a la entrada de colector bombeo o salida de filtrado: 35,21 mca (determinado en proyecto Fase I).
- Pérdidas de carga bombeo = 0,46 mca
- Presión a la salida de bombas (teniendo en cuenta que estas proporcionan 25 mca):
 $35,21 - 0,46 + 25 = 59,75$ mca

Con estos datos se podrá calcular la presión disponible al comienzo de la red de riego para el caudal más desfavorable del nuevo bombeo, que será 59,75 mca.

6 CÁLCULO DE ANCLAJES

Será necesario el anclaje de del colector de salida de la impulsión en los puntos de cambio de dirección: codo del cuello de cisne.

Si se trata de un codo, donde las alineaciones de entrada y salida forman un ángulo α al empujar desde cada extremo del codo, se tendrá una suma vectorial en la dirección de la bisectriz de valor:

$$F = 2 \cdot P \cdot S \cdot \text{sen} (\alpha/2)$$

donde:

- F = empuje total hacia fuera expresado en Tn
- P = presión máxima de trabajo expresada en metros
- S = superficie de la sección interior del tubo en m^2
- α = ángulo que forman los dos tramos de tubería

Como además, el flujo se encuentra en movimiento, también se debe componer el empuje generado por la cantidad de movimiento, de forma que el empuje real será:

$$F = 2 \cdot (P \cdot S + \rho \cdot Q \cdot V) \cdot \text{seno} (\alpha/2)$$

donde:

- ρ = peso específico del agua ($0,1 \text{ Tn} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$)
- Q = caudal circulante en la tubería en m^3/s
- V = velocidad del agua en la tubería en m/s

En redes a presión las velocidades suelen ser relativamente bajas y normalmente inferiores a 3 m/s , por lo que este empuje dinámico suele resultar despreciable.

Las fuerzas resistentes consideradas en los cálculos son la fuerza de rozamiento y el empuje pasivo del terreno. Así, la fuerza de rozamiento adopta la siguiente formulación:

$$F_r = N \cdot \text{tg} (\varphi)$$

con N el peso del macizo y φ el ángulo de rozamiento interno del terreno.

Por su parte, el empuje pasivo del terreno:

$$F_t = \sigma \cdot A \cdot H$$

con σ resistencia admisible del terreno sobre una pared vertical, $A \cdot H$ = superficie de la cara del anclaje ortogonal al empuje.

Para el cálculo se supone que el macizo soporta los esfuerzos debidos a los empujes hidráulicos por el rozamiento con el suelo (F_r) y por el apoyo de este con la pared de la zanja (F_t). Se supone que en la zanja la pared está sana y es capaz de transmitir esfuerzos sin producir un desplazamiento. Consideramos un valor homogéneo de resistencia del terreno en lugar de considerar el empuje pasivo de este. Así lo recomiendan los expertos que consideran que para contar con el empuje pasivo es necesario un desplazamiento del macizo que lo movilice, y esto en realidad no es lo que ocurre.

Así pues, el cálculo se materializa en el equilibrio de las fuerzas actuantes de la siguiente forma:

$$F = F_r + F_t = N \cdot \text{tg}(\varphi) + \sigma \cdot A \cdot H$$

donde:

- F = empuje hidráulico
- N = peso del macizo (densidad del hormigón 2,4 t/m³)
- φ = ángulo de rozamiento interno del terreno (en este caso 26°)
- σ = resistencia admisible del terreno (en este caso 10 Tn/m²)
- $A \cdot H$ = superficie de la cara del anclaje ortogonal al empuje en m²

Se comprobará en todos los casos que el empuje hidráulico (F) mayorado un 30 % es menor que la resistencia que ofrece el anclaje ($F_r + F_t$):

$$F_r + F_t > 1,3 \times F$$

De acuerdo con la metodología anteriormente expuesta, se exponen los cálculos efectuados para el dimensionamiento de los anclajes de hormigón para codos. Los anclajes envolverán a las piezas de calderería de forma que además servirán como protección ante la corrosión.

Tabla 9. Cálculo de anclajes en codo de cuello de cisne

D (mm)	MATERIAL	Hest (kg/cm ²)	Dint (mm)	CAUDAL (l/s)	VEL (m/s)	Longitud (a)	Altura (b)	VOLUMEN	ÁNGULO	F (Tn)	Fr (Tn)	Ft (Tn)	Fr+Ft	L1	L2	a	h
600	ACERO	6	597,4	410	1,46	1	1,1	1,1	45	12,92	1,40	16,50	17,90	1	1	1,0	1,1

Resultando un dado de unas dimensiones mínimas de 1 x 1 x 1,1 m de HM-20 (se ejecutará de mayores dimensiones, de 1,8 x 1,8 x 1,9 m para proteger la pieza enterrada frente a corrosión).

7 CÁLCULO NPSH

NPSH son las siglas formadas con las iniciales de la frase anglosajona: *Net Positive Suction Head*. En castellano se traduce como **altura neta positiva de aspiración** y se trata de la diferencia entre la presión del líquido en el eje del impulsor y la presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo, o dicho de otra forma, es la presión absoluta mínima que debe haber a la entrada de la bomba para evitar fenómenos de cavitación y representa una de las características más importantes para una bomba.

Se distingue entre NPSH de la instalación o disponible (NPSHdisp) y NPSH de la bomba o requerido (NPSHreq).

Para que una bomba funcione sin cavitación debe de cumplirse la relación siguiente, en la que se añade 0,5 metros de seguridad:

$$NPSH_{disp} \geq NPSH_{req} + 0,5$$

- **NPSH de la bomba o requerido (NPSHreq)**

El valor de NPSHreq solamente depende de las características de la bomba y no de las características de la instalación. Es variable para cada bomba, siempre es positivo y cambia según el caudal y el número de revoluciones del motor. Los valores y las curvas son suministrados por la casa fabricante. El valor de NPSHreq informa sobre la capacidad de aspiración de una bomba en un punto determinado de su curva característica de funcionamiento: cuanto menor es el valor de NPSHreq tanto mayor es su capacidad de aspiración.

- **NPSH de la instalación o disponible (NPSHdisp)**

El valor de NPSHdisp depende de las características de la instalación y equivale a la reserva total de presión por encima de la tensión de vapor del fluido y que se encuentra disponible en la zona de la brida de aspiración de la bomba. Debemos de calcularlo. Este valor resume en un

solo concepto todas las características de la instalación que influyen en la altura de aspiración de una bomba.

Una instalación de bombeo puede serlo en aspiración o bien en carga, dependiendo de si el nivel de líquido a bombear se sitúa por debajo o por encima del eje de la bomba.

Los cálculos de $NPSH_{disp}$ que se llevarán a cabo serán para una instalación en carga, debido a que el nivel de líquido a bombear se encuentra por encima del propio eje de la bomba (procedente de la balsa de cabecera a través de la tubería de transporte).

$$NPSH_{disp} = 10^5 \times \frac{P_l - P_v}{\rho \times g} + H_a - h_a$$

donde:

- P_l = presión sobre el líquido en el depósito de aspiración.
- P_v = presión de vapor líquido a una determinada temperatura (en este caso 20°)
- ρ = densidad del líquido (agua: 1.000 kg/m³)
- g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- H_a = altura de aspiración en m (35,21 mca por ser la presión que existe a la salida del filtrado y, por tanto, en la aspiración de las bombas)
- h_a = pérdida de carga en el caso más desfavorable producida en el tramo de aspiración (en dicho caso sería de 0,24 mca)

Teniéndose en cuenta que se desprecia la altura de la bomba sobre el nivel del mar (dada la presión que ya reciben las bombas por estar en carga desde el colector de filtrado), la presión sobre el líquido de aspiración (P_l) equivale a la presión atmosférica, es decir, 10 mca (1 bar).

En cuanto a la presión de vapor líquido, a una temperatura de 20°, le corresponde una tensión de vapor de 0,24 mca (0,024 bar).

Tabla 10. Valores de la tensión de vapor según la temperatura

Temperatura (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
Tensión de vapor (mca)	0,06	0,08	0,12	0,24	0,43	0,75	1,26	2,03	4,83	10,33

De tal forma, el valor de NPSH_{disp} es el siguiente:

$$\text{NPSH}_{\text{disp}} = 10^5 \times \frac{1 - 0,024}{1.000 \times 9,81} + 35,21 - 0,24 = 44,92 \text{ m}$$

Esto implica que cualquier bomba con un valor de NPSH_{req} < 44,42 puede ser utilizada en esta Instalación. De las bombas diseñadas, la que tiene un mayor NPSH corresponde con la del subsector del bombeo bajo, de 210 l/s a 25 mca, que presenta un NPSH_{req} de 4,71 m (ver Figura nº 1), luego no existirá ningún problema para ser empleadas en esta instalación, por lo que no existe ningún problema de posible cavitación con el diseño realizado (lo cual es lo normal en unas bombas de cámara partida funcionando en carga desde un colector con una presión significativa como es el caso de este proyecto).

8 CÁLCULO GOLPE DE ARIETE

Al ser una red de bombeo muy ramificada que llega a multitud de tomas de parcela y la presión añadida por el bombeo es reducida (25 mca), el efecto de una parada de bombas no tendrá incidencia alguna en la instalación. En cualquier caso, las bombas estarán previstas de válvulas de retención a su salida por lo que quedan protegidas y el timbraje mínimo de las tuberías de la red primaria es de 12,5 atm (con lo que hay un margen importante frente a los aproximadamente 60 mca del bombeo).