

1.-INTRODUCCIÓN

Para diseñar adecuadamente la bomba de un sondeo se debe determinar la forma de las curvas características de la misma y el diámetro de la tubería de impulsión que garantiza el suministro de agua a la presión y caudal necesarios con el mínimo coste total. Estos aspectos están condicionados por la evolución de la demanda de agua y por las variaciones en el nivel dinámico de bombeo.

Utilizando MATLAB[®], se ha desarrollado un programa informático llamado DOS (Diseño Optimo de Sondeos) que permite realizar el dimensionamiento económico de la instalación (bomba y tubería), según el caudal y el tipo de curva caudal-presión (Q-H) de la bomba. Así, a partir del volumen de agua demandado, la longitud de la tubería de impulsión y el nivel dinámico de bombeo y su evolución, se pueden determinar las características de la bomba y de las tuberías que minimizan el coste total, inversión mas energía (Moreno *et al*).

2.-PASOS PARA UTILIZAR DOS

En primer lugar hay que hacer doble click en el ejecutable “DOS.exe”. Tras unos segundos aparece la siguiente pantalla; “Parámetros hidráulicos e hidrológicos”

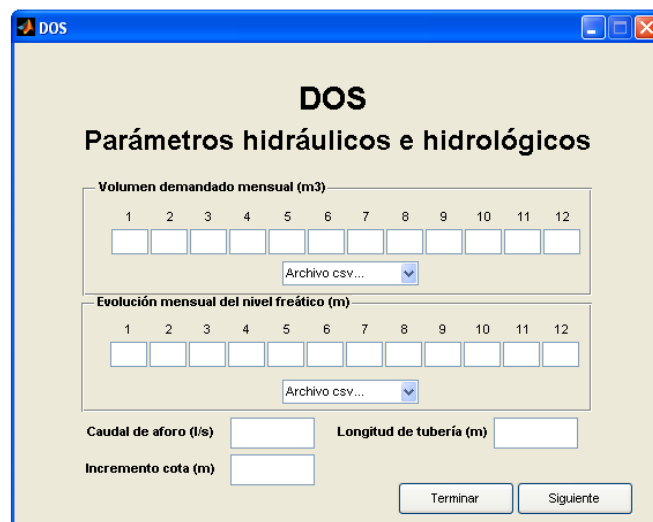


Figura 1.-“Interface” de parámetros hidráulicos e hidrológicos.

En primer lugar se debe introducir el volumen demandado mensual, en metros cúbicos y mes a mes; la casilla 1 hace referencia al mes de enero, la dos a febrero y así sucesivamente. Se pueden introducir los datos manualmente o cargando el archivo csv correspondiente.

A continuación se debe introducir los valores de la evolución mensual del nivel freático, en metros lineales y mes a mes. Al igual que en el apartado anterior, se puede hacer manualmente o cargando los valores a partir de un archivo csv.

Además, habrá que completar las casillas de caudal de aforo (l/s), longitud de tubería (m) (que corresponde a la longitud de ésta desde á boca del sondeo hasta el punto de descarga) y el incremento de cota (m), que hace referencia a la diferencia de

altura entre la boca sondeo y el punto de descarga. Estos datos se obtienen de la medida en campo.

Para pasar al siguiente apartado llamado “horas disponibles” de introducción de datos se hace click en “siguiente”, apareciendo el “interface” que se muestra a continuación:

The interface is titled "DOS Horas disponibles". It features three main input sections: "Horas valle", "Horas llano", and "Horas punta". Each section consists of a horizontal row of 12 small input boxes, numbered 1 through 12. To the right of each row is a button labeled "No usar". Below the "Horas punta" section is a button labeled "Archivo csv...". At the bottom of the window are three buttons: "Terminar", "Previo", and "Siguiente".

Figura 2.-“Interface” de horas disponibles.

En este caso se deberá completar el número de horas disponibles mes a mes (1 corresponde a enero, 2 a febrero y así sucesivamente), separando por una parte horas valle, por otra horas llano y por otra horas punta. Estos valores se pueden introducir directamente o a partir de un archivo csv.

Además, existe la posibilidad de anular el periodo con un tipo de horas con la pestaña “No usar”. Esto es muy común cuando no queremos regar en horas punta; en este caso sólo funcionaría el equipo de bombeo en horas valle y llano. Una vez completado hacemos click en siguiente y aparece el “interface Costes de inversión y explotación”:

The interface is titled "DOS Costes de inversión y explotación". It contains several input sections: "Coste bombas (€)" with three sub-inputs labeled 'a', 'b', and 'c'; "Coste tuberías (€/m)" with two sub-inputs and a "Curvas de costes" button; "Costes energía (cent€/kWh)" with three sub-inputs labeled "Coste Valle", "Coste llano", and "Coste punta"; and "Actualización del capital" with three sub-inputs labeled "Vida útil (años)", "Interés (%)", and "IVA (%)". There is a "Valores por defecto" button and three buttons at the bottom: "Terminar", "Previo", and "Calcula".

Figura 3.-“Interface” de costes de inversión y explotación.

Para determinar los parámetros básicos de diseño en la extracción de agua de un acuífero, se ha utilizado un proceso de optimización que tiene como función objetivo el minimizar los costes de inversión y de explotación de la instalación, variando los coeficientes de las curvas características de la bomba y el diámetro de la tubería de impulsión, garantizando el volumen demandado en las condiciones de presión y caudales adecuados (Moreno *et al*).

Es por lo anteriormente explicado por lo que es necesario introducir los coeficientes correspondientes para el coste de bombas (€) y para el coste de tuberías (€/m). En caso de no tener valores empíricos, se pueden utilizar valores que se ha considerado que pueden ajustarse bastante a la realidad, que son los valores por defecto, que aparecen al hacer click en la casilla correspondiente. Igualmente aparecen los valores por defecto en el resto de casillas de la interface a completar, si bien es más adecuado introducir los valores exactos de la “realidad estudiada”.

Una vez introducidos los datos y haciendo click en la pestaña curvas de costes aparecerán dos gráficas, una con la curva que refleja el coste de la bomba (€) en función de la potencia de ésta (kW) y la curva inferior que representa el coste de la tubería (€/m) en función de su diámetro (mm).

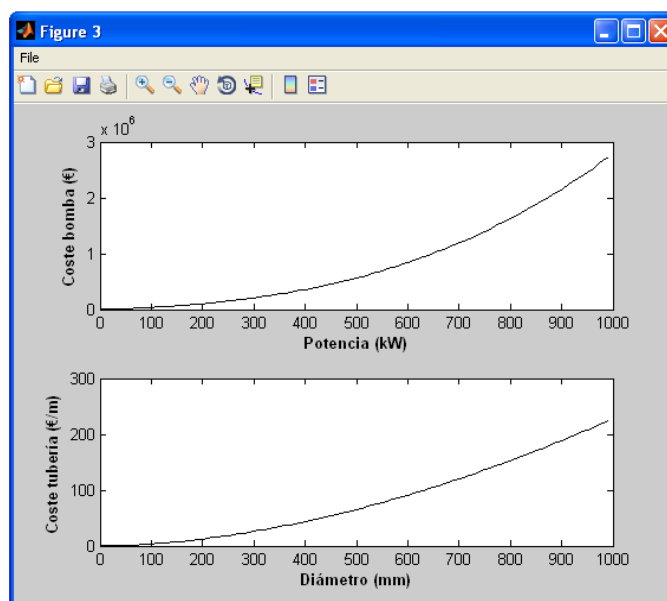


Figura 4.-Curvas de costes.

En el apartado costes energía se debe introducir el precio de las horas valle, llano y punta (en céntimos €/kW·h) y en actualización del capital se debe indicar los datos correspondientes a este término como son: vida útil (años), interés (%) e IVA (%).

Con la pestaña “calcula” aparece el “interface” Resultados en el que se pueden visualizar 3 apartados: curvas características, características principales de la bomba y horas usadas.



Figura 5.-Resultados.

Las curvas características caudal-presión (Q-H) y caudal-rendimiento (Q- η) de la bomba (figura 6) vienen definidas mediante las ecuaciones (1) y (2).

$$H = a + bQ + cQ^2 \quad (1)$$

$$\eta = eQ + fQ^2 \quad (2)$$

Donde Q es el caudal (m^3/s), H la altura manométrica (m) y η el rendimiento (como decimal), y “a”, “b”, “c”, “e”, y “f” los coeficientes que determinan la forma de las curvas. En este estudio el coeficiente “b” se considera cero para evitar tener dos posibles puntos de funcionamiento en la bomba.

Los coeficientes “e” y “f” pueden formularse en función de los coeficientes “a” y “c”.

Así, cuando H y η son igual a cero:

$$H = 0 \Rightarrow a = -c Q_{\max}^2 \Rightarrow Q_{\max} = \left(\frac{-a}{c} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$\eta = 0 \Rightarrow e Q_{\max} = -f Q_{\max}^2 \quad (4)$$

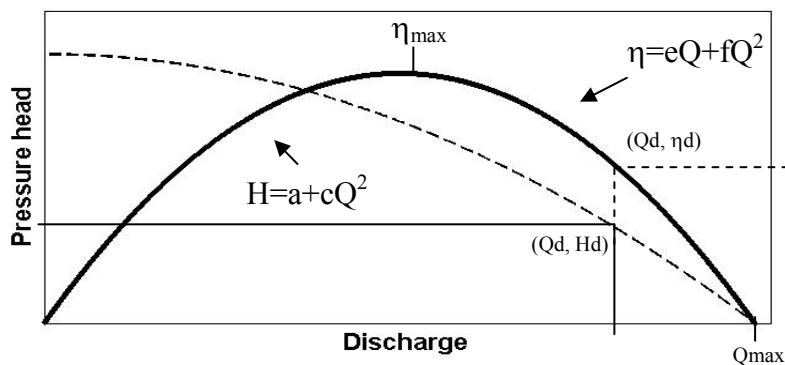


Figura 6.-Esquema teórico de las curvas características de las bombas.
Así, el coeficiente “e” viene determinado por la ecuación (5):

$$e = -f \left(-\frac{a}{c} \right)^{0.5} \quad (5)$$

Las ecuaciones (6) y (7) relacionan “f” con “a” y “c”

$$\eta_{\max} \Rightarrow \frac{d\eta}{dQ} = 2fQ + e = 0 \Rightarrow Q = -\frac{e}{2f} \quad (6)$$

$$\eta_{\max} = f \left(-\frac{e}{2f} \right)^2 + e \left(-\frac{e}{2f} \right) = -\frac{e^2}{4f} \quad (7)$$

Considerando las ecuaciones (5) y (7):

$$f = \frac{4 \cdot \eta_{\max}}{\left(\frac{a}{c} \right)} \quad (8)$$

El máximo rendimiento (η_{\max}) se puede determinar a partir de la información suministrada por los fabricantes. En este caso, se ha considerado un rendimiento máximo teórico de un 80%.

El proceso de optimización utiliza el método Simplex (Nelder, J.A. and R. Mead, 1965) para minimizar la función objetivo descrita en la ecuación (9).

$$\text{MIN}(C_{\text{inv}} + C_{\text{exp}}) \quad (9)$$

Donde, C_{inv} es el coste anual de inversión (coste de la bomba (C_b) más coste de la tubería (C_t)) y C_{exp} es el coste de explotación. Los costes de bomba y tubería se definen en las ecuaciones (10) y (11), respectivamente.

$$C_b = g N_b^3 + h N_b^2 + k N_b \quad (10)$$

$$C_t = l D^m \quad (11)$$

Donde, “g”, “h” y “k” son los coeficientes de la polinomial de tercer grado de mejor ajuste de C_b en función de la potencia de la bomba (N_b , en kW), “l” y “m” son los coeficientes del mejor ajuste de C_t en función del diámetro (D, en m) de la tubería.

La anualidad de la inversión se obtendrá al multiplicar C_{inv} por el factor de recuperación del capital (CRF), definido por la ecuación (12).

$$\text{CRF} = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} = 0.13 \quad (12)$$

Donde “n” es la vida útil del proyecto (10 años) y “r” es la tasa de interés considerada (5%).

La ecuación (13) relaciona el coeficiente “a” con los valores correspondientes al punto de funcionamiento de la bomba (H_d , Q_d):

$$a = H_d - c (Q_d)^2 \quad (13)$$

Donde, H_d es la presión de diseño y Q_d el caudal de diseño.

La potencia de la bomba (N_b , en kW) viene determinada por la ecuación (14):

$$N_b = \frac{9,81 Q H}{\eta} \quad (14)$$

Donde las unidades son: Q (m³/s), H (m) y η (como decimal).

Así los costes de explotación se estiman mediante la ecuación (15).

$$C_{\text{exp}} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^3 (N_b)_i T_{ij} P_{ij} \quad (15)$$

siendo “T” el tiempo de funcionamiento mensual de la instalación (en h), P el precio de la energía eléctrica (en €/kW), y los subíndices “i” y “j” los indicadores del mes y el correspondiente periodo de tarificación (suponiendo que hay tres periodos) respectivamente.

Las variables a optimizar son el caudal suministrado (Q), la inclinación de la curva característica Q-H de la bomba a través del coeficiente “c” y el diámetro de la tubería de impulsión (D) (Moreno *et al*).

Una vez conocido el proceso de cálculo del programa, se indica a continuación las salidas de los resultados que nos posibilita la aplicación informática DOS.

Si se hace click en “figuras de curvas características”, aparecerá la siguiente figura:

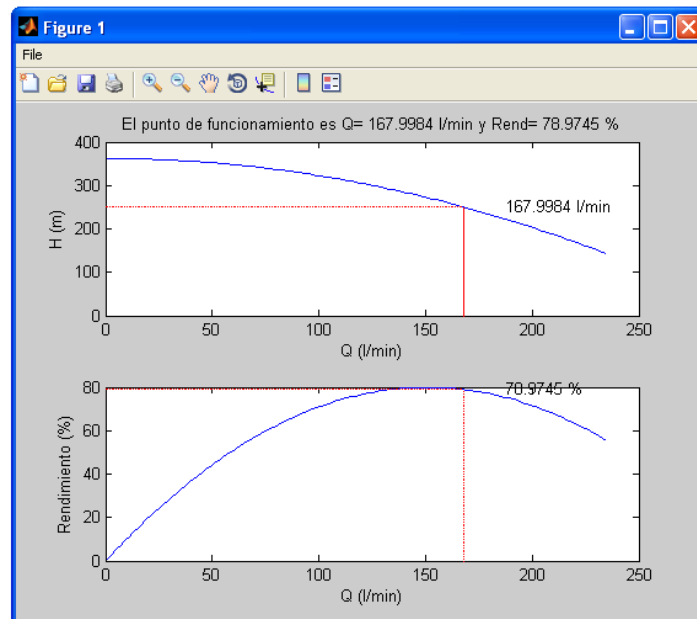


Figura 7.-Punto de funcionamiento de la bomba.

En ella se puede observar la presión y el caudal del punto de funcionamiento de la bomba para obtener el máximo rendimiento posible.

Si se clicka sobre resultados del apartado características principales de la bomba, se rellenarán automáticamente los huecos correspondientes a caudal (l/s), Potencia (kW) y diámetro de tubería (mm).

Finalmente, haciendo click en la pestaña figuras, del apartado horas usadas, aparecerá una figura del estilo a la mostrada a continuación:

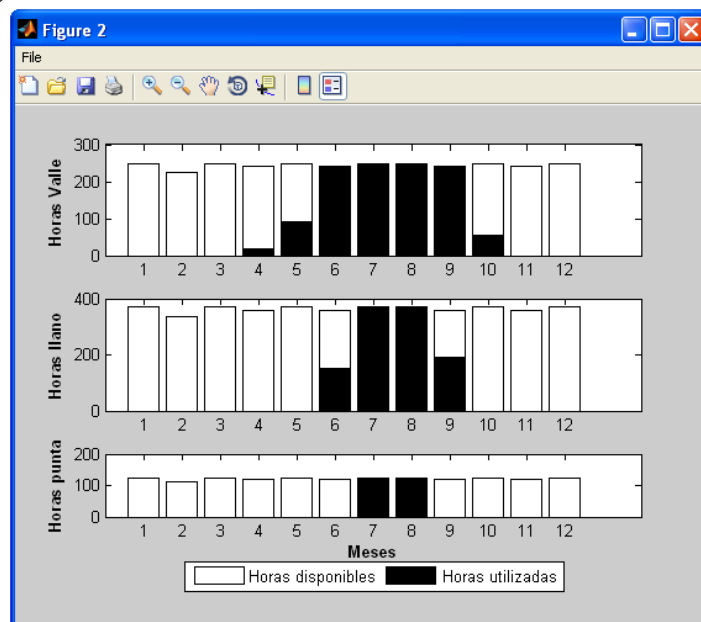


Figura 8.-Horas usadas para el funcionamiento de la bomba.

Se muestra un gráfico para cada tipo de horas: uno para horas valle, otro para horas llano y otro para horas punta. En todos ellos aparece el número de horas disponible y el número de horas utilizadas en el funcionamiento de la bomba, por meses. Si en algún caso, como en este ejemplo, algún mes solo tiene una barra negra (meses 7-julio- y 8 –agosto-) quiere decir que todas las horas disponibles son utilizadas, mientras que el caso contrario, una barra totalmente en blanco significa que no se ha utilizado ninguna hora de las que había disponibles.

Una vez vistas todas las posibilidades de la aplicación informática, para cerrar el programa, se debe hacer click en la pestaña “Terminar” del “interface” RESULTADOS.

3.-EJEMPLO REAL

Comunidad de regantes de “la Grajuela”.

El ejemplo puede aclarar algún paso que no haya quedado suficientemente claro y sobre todo dará idea de los ordenes de magnitud de un ejemplo real a partir de los valores que aparecen en cada una de las capturas que se muestran a continuación. Además, se omitirá la explicación de cada paso para no ser repetitivo y únicamente se harán comentarios cuando se crea que es conveniente realizar alguna aclaración.

En primer lugar se introducen los parámetros hidráulicos e hidrogeológicos:

DOS

Parámetros hidráulicos e hidrológicos

Volumen demandado mensual (m3)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	3910.0	17680	75492	18188	17322	83442	11028	0	0

Archivo csv...

Evolución mensual del nivel freático (m)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
98.65	97.92	98.35	97.67	98.55	99.19	100.98	101.56	100.58	99.48	98.65	98.65

Archivo csv...

Caudal de aforo (l/s) 250 Longitud de tubería (m) 500

Incremento cota (m) 20

Terminar Siguiente

Figura 9.-“Interface” de parámetros hidráulicos e hidrológicos del ejemplo.

A continuación se introducen las horas disponibles, descartando horas punta (ya que su uso en la práctica dispara los costes energéticos del regadío, siendo esta “modalidad” la más frecuente). Para ello, una vez cargado el archivo csv correspondiente, se ha hecho doble click en la pestaña “No usar” que hay a la izquierda del apartado Horas punta, quedando el “interface” como se muestra a continuación:

DOS

Horas disponibles

Horas valle

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
368	320	407	584	712	432	392	664	560	481	360	424

No usar

Horas llano

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
156	152	240	136	32	228	264	72	160	220	210	156

No usar

Horas punta

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Archivo csv...

Terminar Previo Siguiente

Figura 10.-“Interface” de horas disponibles del ejemplo usando horas valle y llano.

En este caso, se van a considerar las opciones de descartar únicamente horas punta, aunque también se podría descartar conjuntamente tanto horas llano como horas punta para ver la diferencia y contrastar los resultados.

El siguiente paso será introducir los valores de los coeficientes de las curvas de costes que debe facilitar el fabricante. También se debe rellenar los valores de los costes de energía y los de actualización del capital. En este caso se ha clickado la pestaña

“Valores por defecto”, rellenando de esta manera todas las casillas con valores genéricos estimados (se utiliza cuando nos falta algún dato del caso real que se está analizando).

The screenshot shows the 'costes2' application window. The title bar says 'costes2'. The main window has a title 'DOS' and a subtitle 'Costes de inversión y explotación'. It contains several input fields and buttons. At the top, there are three columns labeled 'a', 'b', and 'c'. Below these are input fields for 'Coste bombas (€)' (0.0016, 0.924, 268.28) and 'Coste tuberías (€/m)' (0.0009, 1.8013). There is a button labeled 'Curvas de costes'. Below these are two sections: 'Costes energía (cent€/kWh)' with inputs for 'Coste Valle' (4.55), 'Coste llano' (7.97), and 'Coste punta' (15.95); and 'Actualización del capital' with inputs for 'Vida útil (años)' (10), 'Interés (%)' (5), and 'IVA (%)' (16). At the bottom, there is a button 'Valores por defecto' and three buttons: 'Terminar', 'Previo', and 'Calcula'.

Figura 11.-“Interface” de costes de inversión y explotación del ejemplo.

Estas son las curvas de coste de bombas y coste de tuberías que se generan a partir de los coeficientes genéricos estimados al hacer click en la pestaña “curva de costes”.

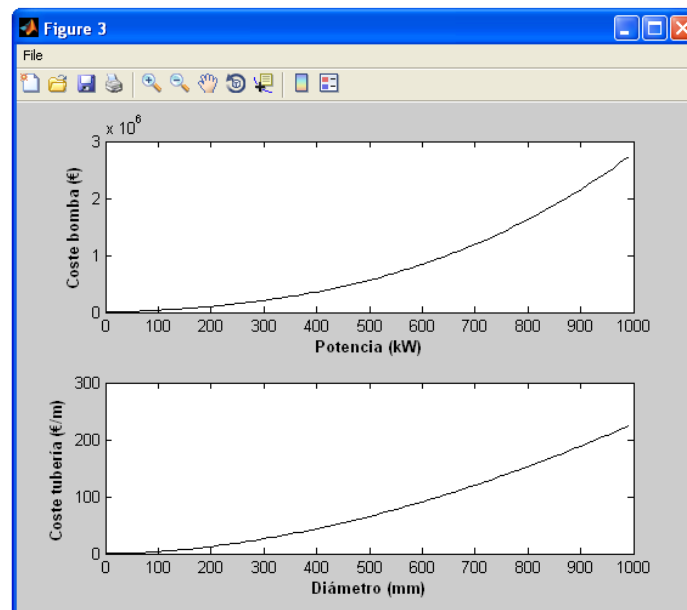


Figura 12.-Curvas de costes del ejemplo a partir de los coeficientes estimados por defecto.

Con la pestaña “calcula” se obtienen los resultados, que son los que la aplicación informática calcula como óptimos a partir de los datos introducidos:

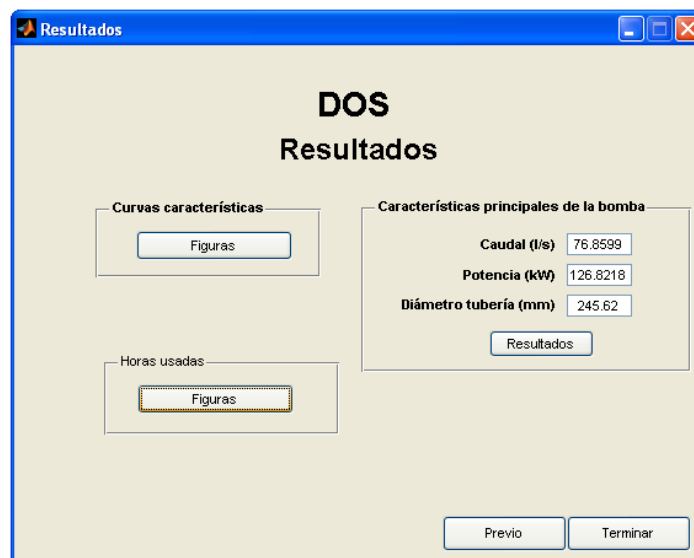


Figura 13.-Resultados del ejemplo.

Siguiendo con el ejemplo, en “Figuras” del apartado curvas características se muestra el punto de funcionamiento en el que trabaja la bomba.

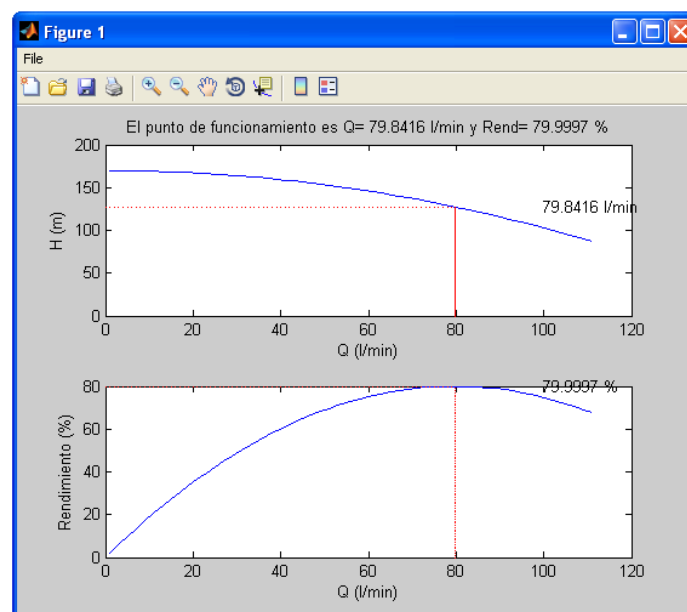


Figura 14.-Punto de funcionamiento de la bomba del ejemplo.

Por último, falta por destacar los diagramas de barras que genera el programa DOS con la opción “Figuras” del apartado “Horas usadas”, que resultan muy interesantes.

Como se puede ver en la siguiente figura, para cada tipo de horas se muestra un diagrama. En blanco aparecen las horas disponibles (que son las mismas que se han introducido en la figura 10, sin considerar que no tienes en cuenta las horas punta). Con el concepto horas utilizadas (en negro), la aplicación informática si que tendrá en cuenta el hecho de que no se desea usar las horas punta, y como consecuencia de esto en horas punta no aparecerá ninguna barra que indique horas utilizadas. En cuanto al resto de

horas, DOS “rellenará” primero para un determinado mes todas las horas disponibles valle como ocurre en los meses de abril, mayo, junio, agosto, septiembre y octubre. Si existe algún caso en que las horas disponibles valle son inferiores a las horas utilizadas para un determinado mes, completa las valle y continúa con las llano hasta que “gasta” todas las horas utilizadas para ese mes.

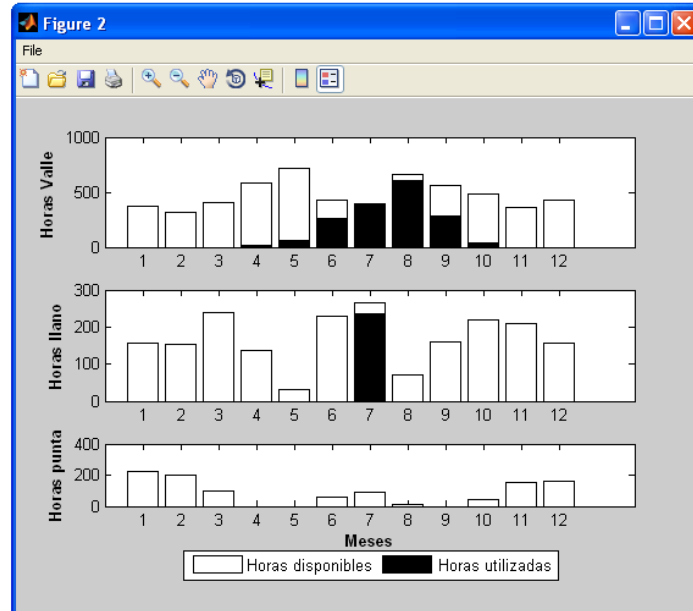


Figura 15.-Horas usadas para el funcionamiento de la bomba del ejemplo.

3.-BIBLIOGRAFÍA

- Moreno M.A., Planells P., Moraleda D.A., Córcoles J.I., Neumeister C., Tarjuelo J.M., 2007. Herramientas de diseño y análisis de infraestructuras de riego colectivas. XXV Congreso Nacional de Riegos. Pamplona.