

VALORACIÓN ENERGÉTICA Y DISEÑO ÓPTIMO DE IMPULSIONES CON CAUDAL VARIABLE

R. López¹, J. Reza², E. Camacho², J. Roldán² y M. Alcaide²

¹ Departamento de Física Aplicada. Universidad de Córdoba

² Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba

RESUMEN: En este trabajo se presenta una metodología para la valoración energética de estaciones de bombeo que abastecen caudales variables. El caudal impulsado se caracteriza como variable estocástica mediante su función de densidad. Dada la dificultad de conocer dicha función en la realidad cuando no existen aforadores, se deberá estimar mediante la adopción de hipótesis racionales. Las hipótesis de Clément se han usado para caracterizar dicha función de densidad asociada al caudal distribuido en zonas regables a la demanda. Caracterizado el caudal, se determina el consumo energético a partir del conocimiento de las curvas características (altura-caudal y potencia-caudal) de cada uno de los impulsores. La metodología presentada permite la evaluación de cualquier sistema de bombeo teniendo en cuenta la variabilidad del caudal.

INTRODUCCIÓN

La valoración energética y el dimensionamiento de sistemas de impulsión en grandes zonas de riego se ha venido realizando tradicionalmente teniendo en cuenta el funcionamiento del sistema para el período de máximo consumo. Sin embargo, en el caso de que los caudales de bombeo sean variables se produce un error en la estimación del coste energético.

En este trabajo se presenta un modelo de valoración energética (diseño óptimo) de sistemas de bombeo que tiene en cuenta la distribución de caudales a lo largo de la campaña de riegos y el escalonamiento de los grupos motobomba. Dicha distribución se ha obtenido adoptando las hipótesis de Clément.

El diseño de sistemas de impulsión más habitual en la práctica considera grupos de bombeo con velocidad fija. El escalonamiento de los sucesivos grupos proporcionan los diferentes caudales solicitados por la red.

Dos partes se pueden distinguir en este trabajo. Por un lado se trata de caracterizar la distribución de caudales demandados por el sistema de impulsión, adoptando las hipótesis de Clément. Esta metodología se puede utilizar para el diseño de sistemas de los que desconocemos la función de distribución de caudal permitiendo, por tanto, determinar con mayor exactitud el coste energético del sistema de impulsión. La otra parte lo constituyen la valoración y el diseño óptimo de dicho sistema de impulsión. Finalmente, se aplica la metodología a la resolución de una aplicación práctica.

HIPÓTESIS DE TRABAJO EN RIEGO A LA DEMANDA

Clément (1979) y Granados (1990) introdujeron una serie de hipótesis que explicaban la ocurrencia de un riego a la demanda. Dichas hipótesis son las siguientes:

Artículo recibido el **6 de Febrero de 1995** y aceptado para su publicación el **3 de Marzo de 1995**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

a) El fenómeno aleatorio del riego sólo admite dos estados de ocurrencia, que son: boca de riego abierta, con probabilidad p , y boca de riego cerrada, con probabilidad $(1 - p)$. En este caso, la función que describe la probabilidad de que x bocas estén abiertas se ajusta a una distribución binomial dada por:

$$p(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x} \quad (1)$$

donde:

n = número de bocas totales.

x = número de bocas abiertas.

b) Si el número de bocas es muy grande, la función de distribución dada por la ecuación (1) se aproxima a una función normal cuya media viene dada por:

$$\mu = \sum_{i=1}^n d_i p_i \quad (2)$$

y la varianza por:

$$\sigma^2 = \sum d_i p_i (d_i - \mu)^2 \quad (3)$$

donde:

d_i = dotación correspondiente a la boca i .

p_i = probabilidad de funcionamiento de la boca i .

c) La probabilidad de funcionamiento es la misma para el período de horas disponibles de riego en un día.

OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN ASOCIADA AL CAUDAL DE BOMBEO EN UNA ZONA REGABLE

Para la obtención de la función de probabilidad asociada al caudal en toda la campaña de riego se divide ésta en períodos homogéneos (diarios, decenales, mensuales, etc.). Cada uno de estos períodos tiene unas determinadas necesidades de riego que son conocidas e inferiores a las necesidades del período punta para el que se ha diseñado el sistema de impulsión. Por tanto, las probabilidades de funcionamiento del sistema podrán ser diferentes en cada período.

Los parámetros de diseño del sistema establecidos por Clément para el período punta son los siguientes:

- *Grado de libertad:*

$$GL = \frac{t}{t'} \quad (4)$$

con:

t = tiempo disponible para riego.

t' = tiempo de riego en el período punta.

- *Probabilidad de funcionamiento:*

$$p = \frac{1}{GL \cdot r} \quad (5)$$

con r = rendimiento de la red.

Si consideramos que r es igual a 1, la ecuación (5) se simplifica a:

$$p = \frac{t'}{t} \quad (6)$$

- *Dotación de la boca i :*

$$d_i = q S_i GL \quad (7)$$

siendo:

q = caudal ficticio continuo.

S_i = superficie asociada a la boca i .

El caudal ficticio continuo se puede definir como:

$$q = \frac{N}{t} \quad (8)$$

donde N son las necesidades del mes punta.

Si sustituimos las ecuaciones (8) y (4) en la expresión

(7):

$$d_i = \frac{N}{t} S_i \frac{t}{t'} = \frac{N}{t'} S_i \quad (9)$$

Para cualquier otro período de riego j , el tiempo de riego en la boca i se define como:

$$t'_{ij} = \frac{N_j S_i}{d_i} \quad (10)$$

donde N_j son las necesidades de riego en el período j . Sustituyendo la ecuación (9) en (10) tendremos:

$$t'_{ij} = \frac{N_j}{N} t' \quad (11)$$

por lo que el tiempo de riego, para cualquier período j , es independiente de la superficie de la agrupación, esto es:

$$t'_{ij} = t'_{kj} = \dots = t'_j$$

De la ecuación (11) se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{t'_j}{t'} = \frac{N_j}{N} \quad (12)$$

La probabilidad de funcionamiento en el período j se define como:

$$p_j = \frac{t'_j}{t} \quad (13)$$

Relacionando la ecuación (6) con la anterior resulta:

$$\frac{p_j}{p} = \frac{t'_j}{t'} \quad (14)$$

que, a su vez, se puede expresar como:

$$\frac{p_j}{p} = \frac{t'_j}{t'} = \frac{N_j}{N} \quad (15)$$

La ecuación (15) muestra la proporcionalidad existente entre las probabilidades de cada período, los tiempos de riego y las necesidades del mismo.

El caudal demandado para cada período se adapta también a funciones de distribución normal cuyas medias y varianzas se pueden determinar de la siguiente forma:

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n d_i p_j \quad (16)$$

Teniendo en cuenta (9) y (15) y simplificando la ecuación anterior:

$$\mu_j = \sum_{i=1}^n \frac{N_j}{t'} S_i p = \frac{N_j}{N} S_T \quad (17)$$

Como t' , p y N_j son constantes para todas las agrupaciones, (17) queda como:

$$\mu_j = p \frac{N_j}{t'} \sum_{i=1}^n S_i = \frac{t'}{t} \frac{N_j}{t'} S_T = \frac{N_j}{t} S_T \quad (18)$$

donde S_T es la superficie de riego total.

Como puede verse, la media no depende de la distribución superficial de las agrupaciones.

La varianza se puede obtener de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \sigma_j^2 &= \sum_{i=1}^n d_i^2 (p_j - p_j^2) = \\ &= (p_j - p_j^2) \sum_{i=1}^n \left(\frac{N}{t'} S_i \right)^2 = (p_j - p_j^2) \frac{N^2}{t'^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 \end{aligned} \quad (19)$$

La varianza depende, por tanto, de la distribución superficial de las agrupaciones en la zona regable.

Una vez conocidas las funciones de densidad (f.d.d.) asociadas al caudal en cada período:

$$f_j(Q) = N_j(\mu_j, \sigma_j^2) \quad (20)$$

la función de densidad asociada al caudal para toda la campaña de riego se obtendrá de la siguiente manera:

$$f(Q) = \sum_{j=1}^m \frac{f_j(Q) t(j)}{T} \quad (21)$$

siendo:

$f(Q)$ = f.d.d. para toda la campaña.

$t(j)$ = duración del período j .

m = número de períodos.

T = duración total campaña de riego.

Como se han considerado períodos homogéneos (misma duración), $f(Q)$ se obtiene como media de $f_j(Q)$.

ESTIMACIÓN DEL COSTE ENERGÉTICO PARA SISTEMAS DE IMPULSIÓN VARIABLE

La estimación del coste energético de un sistema de impulsión requiere el conocimiento de las curvas características del sistema y la caracterización de las demandas.

Curvas características del sistema

Dadas las curvas características de una bomba:

- Altura: $H = H(Q)$
- Potencia: $P = P(Q)$

Las curvas características para un sistema de r bombas en paralelo con funcionamiento según el caudal demandado y con unos umbrales de caudal $Q_1, Q_2, \dots,$

Q_{r-1} , viene dado por la suma horizontal de sus curvas características (ver Figura 1).

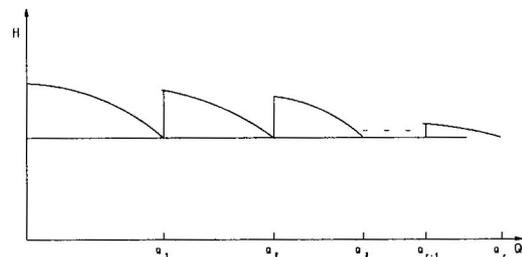


Figura 1. Bombas en paralelo

Analíticamente, las curvas características para el sistema $H_s = H_s(Q)$ y $P_s = P_s(Q)$ se podrán describir de la siguiente forma (Mataix, 1975):

$$H_s(Q) = \begin{cases} H(Q) & \text{si } Q \in [0, Q_1] \\ H(Q/2) & \text{si } Q \in [Q_1, Q_2] \\ \vdots & \\ H(Q/r) & \text{si } Q \in [Q_{r-1}, Q_r] \end{cases} \quad (22)$$

$$P_s(Q) = \begin{cases} P(Q) & \text{si } Q \in [0, Q_1] \\ 2 P(Q/2) & \text{si } Q \in [Q_1, Q_2] \\ \vdots & \\ r P(Q/r) & \text{si } Q \in [Q_{r-1}, Q_r] \end{cases} \quad (23)$$

Caracterización de la demanda

La caracterización de la demanda como variable aleatoria, realizada mediante su función de densidad (ecuación (21) del apartado anterior), permite establecer la igualdad:

$$p[Q \leq q \leq Q + dQ] = \int_Q^{Q+dQ} f(Q) dQ - f(\xi) dQ = \frac{dt}{T} \quad (24)$$

(con: $Q \leq \xi \leq Q + dQ$) que, en modo diferencial, expresa el hecho de que la probabilidad de ocurrencia del caudal comprendido en el intervalo $[Q, Q+dQ]$ (Meyer, 1974) se puede determinar como cociente entre el tiempo dt de ocurrencia de dicho caudal y el tiempo T total de funcionamiento del sistema.

Determinación del coste energético

El coste energético C_E se puede evaluar por:

$$C_E = \frac{1}{\eta} \int_0^T P_E P_s(Q) dt \quad (25)$$

siendo:

P_E = precio de la energía (pta/kw-h).

η = rendimiento del motor.

Teniendo en cuenta la expresión (24), (25) se podrá expresar como:

$$C_E = \frac{1}{\eta} \int_0^{Q_r} T P_E P_s(Q) f(Q) dQ \quad (26)$$

integral que se descompone en:

$$C_E = \frac{T P_E}{\eta} \left[\int_0^{Q_1} P(Q) f(Q) dQ + \dots + \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} k P(Q/k) f(Q) dQ + \dots + \int_{Q_{r-1}}^{Q_r} r P(Q/r) f(Q) dQ \right] \quad (27)$$

donde se ha tenido en cuenta que $P_s(Q)$ presenta diferente definición analítica según los intervalos considerados en (22) y (23).

Aceptando que la curva característica de potencia se puede ajustar por una parábola de segundo grado en la forma:

$$P(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 \quad (28)$$

es inmediato establecer:

$$k P(Q/k) = k a_0 + a_1 Q + a_2 \frac{Q^2}{k} \quad (29)$$

y, por tanto, cada uno de los sumandos de (27) se podrá expresar del modo:

$$\begin{aligned} & \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} k P(Q/k) f(Q) dQ = \dots \\ & \dots = \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} \left(k a_0 + a_1 Q + a_2 \frac{Q^2}{k} \right) f(Q) dQ = \dots \quad (30) \\ & \dots = a_0 k [F(Q_k) - F(Q_{k-1})] + a_1 \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} Q f(Q) dQ + \dots \\ & \dots + a_2 \frac{1}{k} \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} Q^2 f(Q) dQ \end{aligned}$$

en la que $F(Q)$ es la función de distribución asociada al caudal.

Sustituyendo el valor dado por (30) en la ecuación (27) se obtiene:

$$\begin{aligned} C_E = \frac{P_E T}{\eta} & \left[a_0 \sum_{k=1}^r k [F(Q_k) - F(Q_{k-1})] + \dots \right. \\ & \dots + a_1 \sum_{k=1}^r \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} Q f(Q) dQ + \dots \quad (31) \\ & \left. \dots + a_2 \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} Q^2 f(Q) dQ \right] \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^r k [F(Q_k) - F(Q_{k-1})] = \\ & = r F(Q_r) - \sum_{k=0}^{r-1} F(Q_k) = r - \sum_{k=1}^{r-1} F(Q_k) \quad (32) \end{aligned}$$

dado que: $F(Q_0) = 0$; $F(Q_r) = 1$, al ser Q_0 y Q_r sus valores extremos, y que:

$$\sum_{k=1}^r \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} Q f(Q) dQ = \int_{Q_0}^{Q_r} Q f(Q) dQ = \bar{Q} \quad (33)$$

siendo \bar{Q} el caudal medio, se obtiene:

$$\begin{aligned} C_E = \frac{P_E T}{\eta} & \left[a_0 \left[r - \sum_{k=1}^{r-1} F(Q_k) \right] + a_1 \bar{Q} + \dots \right. \\ & \left. \dots + a_2 \sum_{k=1}^r \frac{1}{k} \int_{Q_{k-1}}^{Q_k} Q^2 f(Q) dQ \right] \quad (34) \end{aligned}$$

APLICACIÓN PRÁCTICA

Se va a aplicar la metodología expuesta al diseño de un sistema de bombeo para una zona regable a la demanda, cuya alternativa de cultivos es la siguiente:

- Algodón: 20%
- Girasol: 20%
- Remolacha: 20%
- Trigo: 20%
- Melón/sandía: 20%

Determinación de la función de densidad para el caudal en la campaña de riego

Las necesidades de riego de dicha alternativa se han determinado para las condiciones climáticas medias del valle del Guadalquivir en periodos decenales (ver Figura 2).

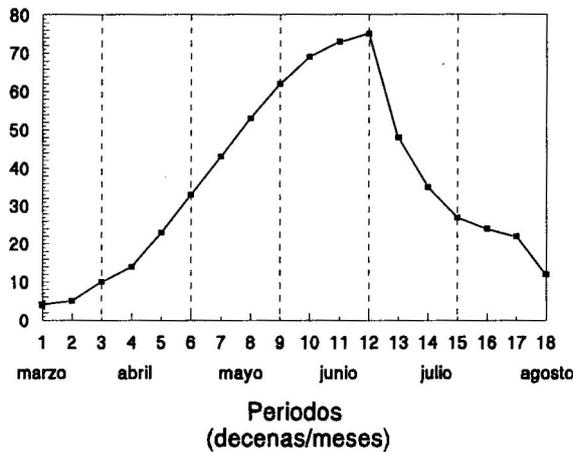


Figura 2. Necesidades de riego

Datos básicos

La zona regable tiene las siguientes características:

- Superficie de riego: 500 ha
- Distribución de agrupaciones de riego:
 - 2 de 50 ha
 - 10 de 20 ha
 - 20 de 10 ha
- Parámetros de diseño:
 - Necesidades período punta: 0'075 m/decena
 - Tiempo disponible para riego (t): 16 horas
 - Tiempo de riego en el período punta (t'): 8 horas
 - Grado de libertad (t/t'): 2
 - Rendimiento red: 1
 - Probabilidad (t'/t): 0'5
 - Caudal ficticio continuo 0'0013 m³/s y ha
 - Dotaciones:

Agrupaciones de 50 ha = 0'130 m³/s

Agrupaciones de 20 ha = 0'052 m³/s
 Agrupaciones de 10 ha = 0'026 m³/s

Obtención de probabilidades (p), medias y varianzas de las f.d.d. normales correspondientes a cada decenio

En la Figura 3 se representan las f.d.d. de algunas decenas y la f.d.d. asociada a la distribución de caudales para toda la campaña, calculadas de acuerdo a lo expresado anteriormente.

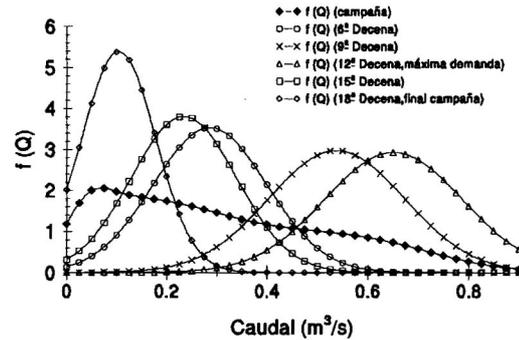


Figura 3. Funciones de densidad

Diseño óptimo del sistema de bombeo

Datos básicos

Otros datos de partida son los siguientes:

- H = 40 m.c.a.
- Q_{máx} = 3.240 m³/h
- T_{total} = 2.880 h
- T_{efect} = 999'64 h
 (tiempo necesario para elevar el volumen requerido, si siempre funcionase con el caudal máximo).
- P_E = 8 pta/kW-h
- η = 0'8
- Tasa de interés = 10%
- Vida útil = 25 años

Se dispone del conjunto de curvas características para un catálogo comercial de bombas (ITUR, 1992).

Elección del sistema de bombeo y valoración energética

El diseño se hace eligiendo la combinación de grupos de bombeo que minimice la función:

$$C_r = a(n+1)(P_M + P_B) + P_E T_{efect} n P\left(\frac{Q_{máx}}{n}\right)$$

siempre que:

$$H\left(\frac{Q_{\text{máx}}}{n}\right) \geq 40 \text{ m.c.a}$$

donde:

- a = factor de amortización.
- n = número de bombas.
- P_M = precio del motor.
- P_B = precio del cuerpo de bomba.
- P(Q) = potencia requerida por una bomba en función del caudal.
- H(Q) = altura elevada por una bomba en función del caudal.

Lo que corresponde a un método clásico de dimensionado, es decir, considerando un único punto de funcionamiento en la curva característica.

La combinación encontrada, según este método clásico, fue la compuesta por cuatro grupos con cuerpo de bomba 250/400 con rodete de 380 mm, a 1.450 r.p.m. y potencia nominal de 150 C.V.

Dicha combinación, evaluada según la nueva metodología, conduce a los siguientes costes:

$$C_A = 1.014.262 \text{ pta/año}$$

$$C_E = 2.773.499 \text{ pta/año}$$

$$C_T = C_A + C_E = 3.787.761 \text{ pta/año}$$

Mientras que evaluando y diseñando, con la metodología presentada en este trabajo, la combinación más favorable se obtuvo con ocho grupos con cuerpo 150/400 con rodete de 397 mm, a 1.450 r.p.m. y potencia nominal de 100 C.V., dando lugar a los siguientes costes:

$$C_A = 1.193.385 \text{ pta/año}$$

$$C_E = 1.318.986 \text{ pta/año}$$

$$C_T = 2.512.371 \text{ pta/año}$$

Como se puede ver, el coste de la solución encontrada con la nueva metodología representa el 66% del que se obtiene para la solución encontrada por el método clásico, lo que supone un importante ahorro.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La metodología que se expone para la generación de la función de densidad, a partir de las hipótesis de Clément, presenta como ventaja el hecho de tener en cuenta la evolución temporal de las necesidades. No

obstante, adolece de las mismas carencias, reconocidas ya, de dichas hipótesis, entre las que destaca el hecho de no tener en cuenta en la determinación de las probabilidades el efecto de concentración de las demandas en determinados momentos de la jornada de riego, debido a la diferenciación en la tarificación horaria, o bien el de no tener en cuenta el comportamiento diferencial entre días festivos o laborables.

No obstante, en el diseño de regadíos donde no existe experiencia que haga prever el comportamiento de los regantes, las hipótesis de Clément han mostrado ser de suma utilidad. La metodología presentada es mejorable en el sentido de que la función de densidad asociada al caudal debiera, en muchos casos, desglosarse en función del precio horario de la energía y considerar estos precios en lugar de un precio medio.

En cuanto a la evaluación del sistema de impulsión cabe señalar como ventaja más apreciable el tener en cuenta la variabilidad en el caudal demandado durante toda la campaña. Es por ello que la evaluación, y por tanto el diseño y optimización, se realiza de un modo más aproximado que el ofrecido por las metodologías "tradicionales" basadas en un único punto de funcionamiento de los impulsores. Además, esta metodología es aplicable a cualquier caracterización empírica de la función de demanda que puede hacerse en sistemas reales.

BIBLIOGRAFÍA

Clément, R. y Galand (1979) Irrigation par aspersion et réseaux collectifs de distribution sous pression. Editorial Eyrolles.

Granados, A. (1990) Infraestructura de regadíos: redes colectivas de riego a presión (2ª edición). E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.

ITUR (1992) Catálogo comercial de bombas.

López Luque, R. (1991) Optimización de sistemas de impulsión y distribución de agua para riego, Riegos y Drenajes XXI. 50:29-33.

Mataix, C. (1975) Turbomáquinas hidráulicas. ICAI.

Meyer, P.L. (1974) Introductory probability and statistical applications. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachussets.

Unidad Docente Mecánica de Fluidos (1992) Curso de ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua. Universidad Politécnica de Valencia.