PERDIDA DE ENERGIA EN UNA CONDUCCION FORZADA, TENIENDO EN CUENTA LA VARIABILIDAD DE LOS CAUDALES

Por E. VALLARINO CANOVAS DEL CASTILLO
y G. SANCHO DE YBARRA,
Ingenieros de Caminos.

Los caudales variables que pasan por una conducción forzada de un salto de agua dan lugar a pérdidas de carga y energía proporcionales al cudrado del caudal instantáneo. En este trabajo se efectúa la integración de esas pérdidas con un criterio racional y se suministra el resultado en unos ábacos de sencillísimo manejo y de gran utilidad, dada la importancia del tema, para la estimación de la productividad de un aprovechamiento y, aún más, para el cálculo de las dimensiones óptimas de sus conducciones.

En el proyecto de un aprovechamiento hidroeléctrico se plantea siempre el problema de conocer la pérdida de energía total producida en la conducción forzada durante todo el año, teniendo en cuenta que la variabilidad de los caudales dará lugar a distinta pérdida en cada instante.

En los tratados clásicos sobre la materia se suele aconsejar al proyectista que adopte una pérdida de carga media, corrigiendo la correspondiente al caudal máximo por un coeficiente de reducción. Normalmente no se dan reglas sobre la manera de estimar este coeficiente o, al menos, nosotros no las hemos visto.

En el *Manual Hütte* (tomo II, pág. 1.465) trata de un problema análogo, que se plantea para las pérdidas de carga en las líneas eléctricas. Si tenemos en cuenta que el problema es muy semejante — la pérdida en la línea es proporcional al cuadrado de la intensidad y en una tubería al cuadrado del caudal — parece que el mismo criterio debería servir para las dos. Según dicho manual, el coeficiente de reducción con el que habría que afectar a la pérdida máxima sería:

$$\beta = \frac{\alpha}{2 - \alpha},$$

En dicha fórmula, α es la inversa del coeficiente de equipamiento, es decir, la relación entre la intensidad media y la máxima, y β, el coeficiente de reducción buscado.

Suponemos que esta fórmula ha sido hallada por un razonamiento intuitivo, partiendo de los casos extremos, en los que, para $\alpha = 0$, resulta $\beta = 0$ y para $\alpha = 1$, $\beta = 1$. Los otros puntos están en una hipérbola equilátera que pasa por esos dos extremos.

La fórmula ha sido usada por uno de nosotros durante bastante tiempo (e, incluso, contribuyendo a propagarla). Las características de los aprovechamientos a los que hasta ahora la habíamos aplicado no nos hicieron pensar que sus resultados no fueran correctos; pero su empleo en otro tipo de saltos nos ha dado unas consecuencias sospechosas que nos forzaron, primero, a revisar su aplicación y, luego, a emprender por nuestra cuenta la búsqueda de otro procedimiento menos empírico y más racional, y cuyos resultados — recogidos en un ábaco — son completamente satisfactorios.

Dada la carencia de fórmulas y métodos sobre este punto, entendemos es interesante dar a conocer este trabajo, no por lo que tenga de nuestro, sino por la generalidad y comodidad de empleo del ábaco obtenido.

* * *

Enfoquemos el problema de la pérdida de carga de una manera racional, sin empirismos. En primer lugar, digamos que, en lo sucesivo, vamos a llamar *pérdida eficaz* la que realmente se produce en la energía de un salto durante un tiempo unidad por efecto del paso de una serie de caudales instantáneos variables por una conducción forzada.

Según esto, cada caudal Q da lugar a una pérdida de carga $K' Q^2$ y a una pérdida de energía en el tiempo dt igual a $K' Q^2 \times K'' Q\, dt$, por lo que esta pérdida será, en la unidad de tiempo:

$$p_e = K \int_0^1 Q^3\, dt. \qquad [1]$$

En el mismo tiempo unidad, la cantidad total de agua que ha pasado por la conducción es:

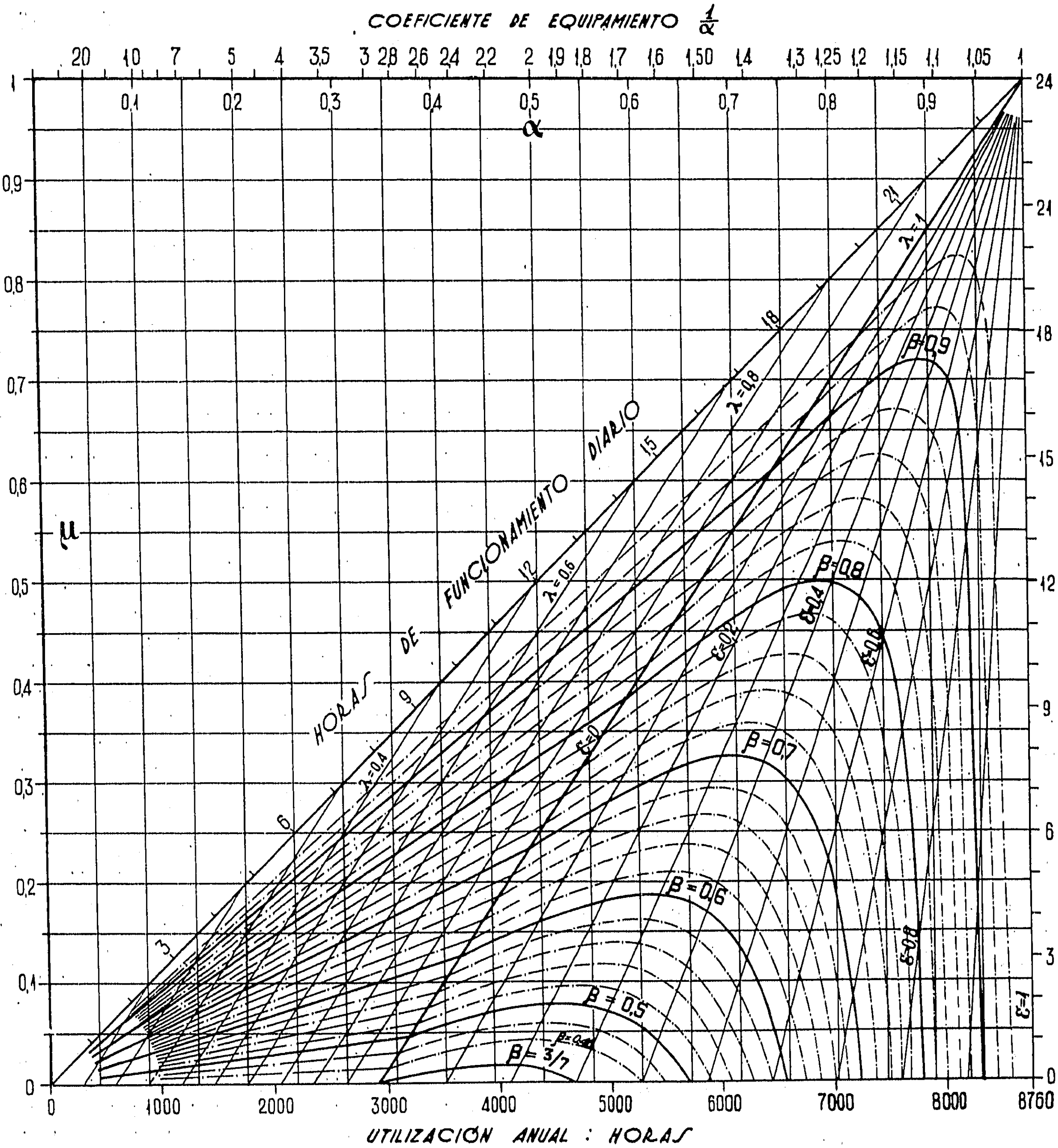
$$A = \int_0^1 Q\, dt. \qquad [2]$$

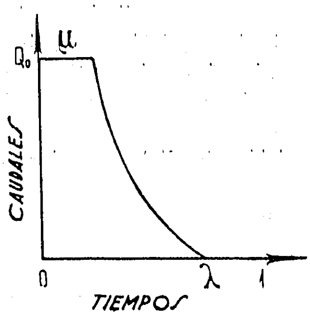
Según la definición del coeficiente α:

$$\alpha = \frac{\int_0^1 Q\, dt}{Q_0}. \qquad [3]$$

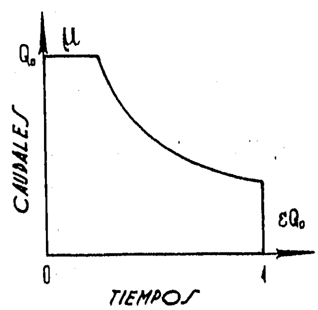
Y, también por definición, se tiene:

$$p_e = \beta K A.$$





CENTRAL DE PUNTAS



CENTRAL FLUYENTE

Luego:

$$\beta = \frac{\int_0^1 Q^3 \, d\,t}{\int_0^1 Q \, d\,t}. \qquad [4]$$

Para hallar un resultado concreto, vamos a suponer una cierta forma de variación de caudales a lo largo del tiempo. La sucesión cronológica de estos caudales no interesa y sí, en cambio, su frecuencia, porque es la que realmente afecta a la integral de la fórmula [4]. Para ello, vamos a suponer que durante el tiempo unidad (un día, un año), la curva de clasificación de caudales conste de una recta de caudales máximos (punta) con una duración total μ, y una serie de caudales clasificados de mayor a menor, desde el máximo Q_0 hasta 0. Esta curva, para mayor sencillez en la integración, supondremos es una parábola con vértice en el eje de tiempos. Llamamos λ a la duración total del funcionamiento de la Central en esa unidad de tiempo, quedando, pues, todavía sin funcionar durante un tiempo $1 - \lambda$.

Esta distribución que acabamos de describir correspondería a una Central de puntas. Pero para las de puntas menos pronunciadas y para las de agua fluyente, esta distribución no sirve. En este caso, suponemos otra, en donde los caudales oscilan entre un máximo Q_0 y un mínimo $\varepsilon \, Q_0$, siendo la curva de empalme también una parábola de eje vertical. Uno y otro tipo de curvas de caudales clasificados puede verse en el ábaco que se acompaña.

Hacemos gracia al lector de los cálculos matemáticos — por otra parte bien sencillos — y exponemos directamente los resultados de la utilización de las fórmulas [3] y [4]. Desarrollando las integrales y haciendo las sustituciones debidas obtenemos:

Para una Central de puntas ($\lambda \leqq 1$):

$$\beta = \frac{6\,\mu + \lambda}{7}; \qquad \alpha = \frac{2\,\mu + \lambda}{3}.$$

Para una Central de agua fluyente ($\varepsilon > 0$):

$$\beta = \frac{1}{\alpha}\left[\mu + (1 - \alpha)\,\frac{16\,\varepsilon^3 + 8\,\varepsilon^2 + 6\,\varepsilon + 5}{35}\right];$$

$$\alpha = \mu + (1 - \mu)\,\frac{2\,\varepsilon + 1}{3}.$$

Para mayor comodidad, hemos traducido estas fórmulas a un ábaco que no necesita explicación, pues su manejo es claro y que permite obtener el coeficiente de reducción de la pérdida máxima para obtener la eficaz en cualquier caso de centrales que se presente, bien sea de puntas o de base. El proyectista debe pensar en cada caso la hipótesis de clasificación de caudales que más convenga al que está estudiando, eligiendo con criterio los coeficientes μ (de duración de las puntas), λ (de funcionamiento de la Central), ε (de caudal mínimo), etc.

Para mayor eficacia en el proyecto, el coeficiente α viene expresado en dos formas, ambas habituales: por una parte, dando la proporción entre el caudal medio y el máximo y, por otra, las horas de utilización anual correspondientes al caudal máximo considerado. Aparece, también, la escala $\frac{1}{\alpha}$, que da el coeficiente de equipamiento del salto. Asimismo, los parámetros μ y λ se expresan en tanto por uno y en horas diarias; esto último, suponiendo que la curva de clasificación de caudales corresponda a los utilizados por la Central en un día tipo.

De esta manera, el proyectista tiene todos los elementos en su mano para, en cualquier caso, determinar de una manera segura la pérdida de carga eficaz que le ha de servir para conocer la productividad de un aprovechamiento. Este ábaco resulta también muy útil en el cálculo de la sección óptima económica de una conducción. Y de una manera derivada, aunque también interesante, se puede utilizar para obtener cualquiera de los parámetros α, μ, λ, ε, conocidos dos de ellos.

Nos permitimos sugerir al lector que compare los resultados de nuestros ábacos con la fórmula del *Hütte* antes reseñada y observará que en algunos casos — precisamente los más corrientes en la práctica, con utilizaciones de 3.000 a 4.000 horas — la diferencia es notable, dando dicha fórmula pérdidas de carga eficaz del orden del tercio de las que realmente deben resultar.

Haremos observar, por último, que las curvas-tipo de clasificación de caudales adoptados aquí son muy ajustadas a las reales. Y si en algún caso la curva difiriera bastante de la parábola, los resultados de β y α no serán muy distintos de los aquí obtenidos. Y, dada la imprecisión que siempre se tiene en el proyecto sobre los valores de μ, λ, ε, el error posible por diferencia en la forma de la curva — tampoco conocida al proyectar — es menor que el derivado de la imprecisión de dichos parámetros.