

COMPROBACION GRAFICA DE CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

Por JOSE ANTONIO GARCIA-DIEGO
y JOSE MARIA AGUIRRE DE SOLANO,
Ingenieros de Caminos.

Presentan los autores una aplicación del método de Schoklitsch al estudio de los tipos de chimeneas de equilibrio que más corrientemente se emplean, con interesantes simplificaciones que pueden ser de utilidad a los proyectistas.

I

No siendo integrales, salvo en casos muy particulares, las ecuaciones diferenciales que definen las oscilaciones del agua en una chimenea de equilibrio, suelen emplearse corrientemente en su estudio métodos de diferencias finitas. Son éstos de ejecución fatigosa y, por otra parte, los errores posibles de cálculo resultan difíciles de localizar hasta la terminación del trabajo. Además, sobre todo en los casos más complejos, no es fácil darse cuenta de la influencia relativa de los distintos datos y, por tanto, interrumpir el estudio en un momento dado para retocarlos.

Las razones antedichas han llevado a distintos investigadores a idear métodos gráficos con los que pueden obtenerse resultados equivalentes, ahorrando tiempo y mejorando a la vez la visión de conjunto del fenómeno. La escuela francesa ha producido dos bien conocidos — Calame & Gaden y Escande —, muy elegantes, pero con dificultades en su aplicación práctica. Por ello, el sistema cuya idea fundamental se debe a Schoklitsch, con las distintas adiciones y perfeccionamientos de que ha sido objeto desde su primera publicación, en 1923 (*), creemos sigue siendo actualmente el que permite resolver el problema con mejor rendimiento y aproximación.

En las páginas que siguen exponemos la aplicación del método de Schoklitsch a la serie de tipos de

chimenea de equilibrio que corrientemente se presentan al proyectista: chimeneas simples, con estrangulamiento inferior, con cámaras, con vertedero y diferenciales tipo Johnson. El sistema es también fácilmente adaptable a cualquier combinación de estos tipos. Consideramos, por último, el caso de una chimenea alimentada por dos conducciones, así como la influencia del tiempo de maniobra del regulador.

No podemos alegar ninguna originalidad en cuanto a los fundamentos del método: nos parece, en cambio, haber simplificado las construcciones, en comparación con los trabajos anteriores sobre el mismo tema. La aplicación del sistema a la chimenea diferencial creemos presenta algún interés especial, por ser su estudio por diferencias finitas bastante largo y sujeto a errores; no la hemos encontrado en la bibliografía técnica que nos ha sido posible consultar.

En la mayor parte de los casos corrientes, creemos que la comprobación gráfica permite alcanzar una aproximación suficiente, no sólo para los tanteos preliminares sino para el proyecto definitivo. Debemos recordar que en éste, como en la mayor parte de los cálculos ingenieriles, es más importante afinar en las hipótesis de funcionamiento que en el procedimiento puramente matemático. La imprecisión del cómputo de pérdidas de carga en la galería y en el estrechamiento inferior, obliga en la mayoría de

(*) Bibliografía:

A. Schoklitsch: *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 79, 1923/I, págs. 129-146.

A. Schoklitsch: *Der Wasserbau*, 1930. Versión española con el título de "Arquitectura Hidráulica" (1935), páginas 381-383.

T. Schiffmann: *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, marzo 1942.

A. del Campo y M. A. Hacar: *REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS*, agosto 1945, págs. 351-364.

Del Felice: *Energia Elettrica*, 4 de mayo de 1947.

Ch. Jaeger: *Technische Hydraulik*, Birkhaeuser, Basel, 1949, págs. 232-245.

M. Bouvard y J. Molbert: *La Houille Blanche*, septiembre-octubre 1950, págs. 535-554.

K. E. Sorensen: *Proceedings of the A.S.C.E.*, vol. 78, septiembre, núm. 116, febrero 1952, págs. 12-16.

los casos, a trabajar con valores cuya margen de seguridad cubre sobradamente las pequeñas diferencias que pueden derivarse del empleo de uno u otro método. Por tanto, la mayor exactitud de una solución analítica con muchas cifras decimales resulta más aparente que real.

II

La notación necesaria para establecer las ecuaciones del movimiento del agua en una chimenea simple, aparece en la figura 1.^a. Las alturas de oscilación se expresan en función de los caudales, siendo Q el que toman las turbinas, q_c el que circula por la galería hacia la chimenea y q_e el que sale de ésta. Tenemos así:

$$z = \frac{\Delta t}{S} q_e \quad [1]$$

$$q_e = - \frac{g S_c \Delta t}{L} (z - f) \quad [2]$$

Siendo la pérdida de carga total:

$$f = f_c + f_e = K_c (Q - q_e) | Q - q_e | - K_e q_e | q_e | \quad [3]$$

y K_c , K_e , respectivamente, los coeficientes de pérdida de carga en la conducción y en el estrechamiento inferior, caso de existir. Naturalmente, en la ecuación [3] se substituirá Q por su valor al final de la maniobra, tanto en el caso de cierre como en el de apertura instantáneos: queda, por tanto, f en función sólo de q_e .

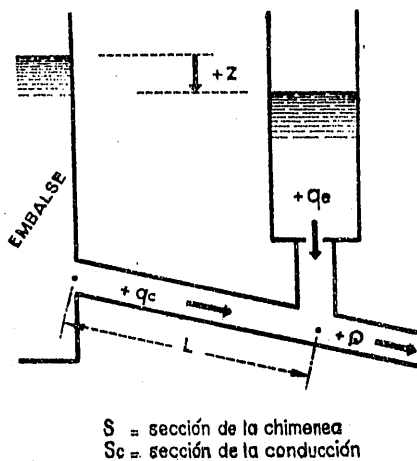


Figura 1.^a

Las curvas correspondientes a las tres ecuaciones citadas se dibujan en un sistema de ejes ortogonales, midiéndose las variables en la forma indicada en la figura 2.^a. Damos a continuación el procedimiento operativo:

a) *Cierre instantáneo* (fig. 3.^a). — El valor inicial de q_e es $(q_e)_1 = Q_1 - (q_e)_1$, diferencia entre el caudal que toman las turbinas después de la maniobra y el que circulaba antes por la conducción. Toman-

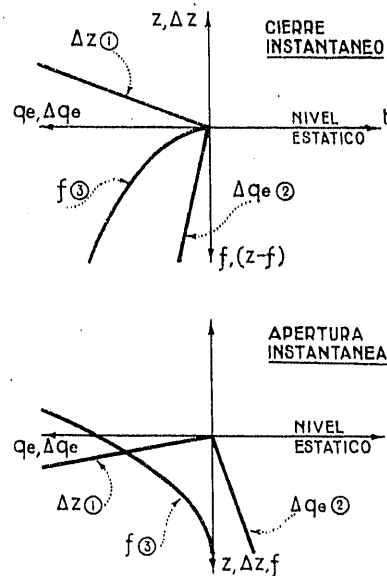


Figura 2.^a

do su magnitud en el eje de caudales y subiendo una ordenada, se lee directamente en la recta [1] el valor inicial de Δz , Δz_1 . Llevando éste a partir del nivel de régimen y a una distancia horizontal del origen igual al incremento de tiempo elegido, tendremos el primer punto, A, de la curva $z = \phi(t)$, que nos representa las oscilaciones de nivel en la chimenea.

El valor de q_e correspondiente al segundo intervalo de tiempo, se halla trazando una paralela a la

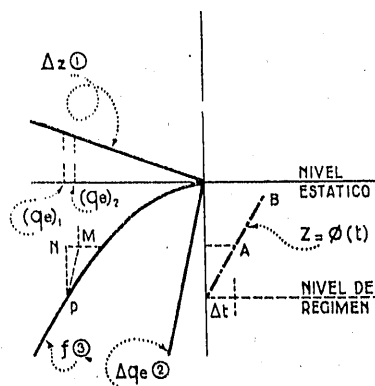


Figura 3.^a

recta [2], desde el punto P, de abscisa $(q_e)_1$ en la parábola [3] de pérdidas de carga, hasta alcanzar el nivel del agua en la chimenea, que es, en este instante, el del punto A. Subiendo una vertical desde el punto de intersección M hasta el eje de abscisas,

tenemos $(q_e)_2$, caudal correspondiente al segundo intervalo, y con él Δz_2 y el segundo punto, B , de la curva de oscilación. El proceso se repite sucesivamente hasta terminar de dibujar ésta.

están sobre la misma vertical, subiendo la ordenada desde M tenemos el nuevo caudal $(q_e)_n$, y así sucesivamente.

La aproximación varía inversamente con la mag-

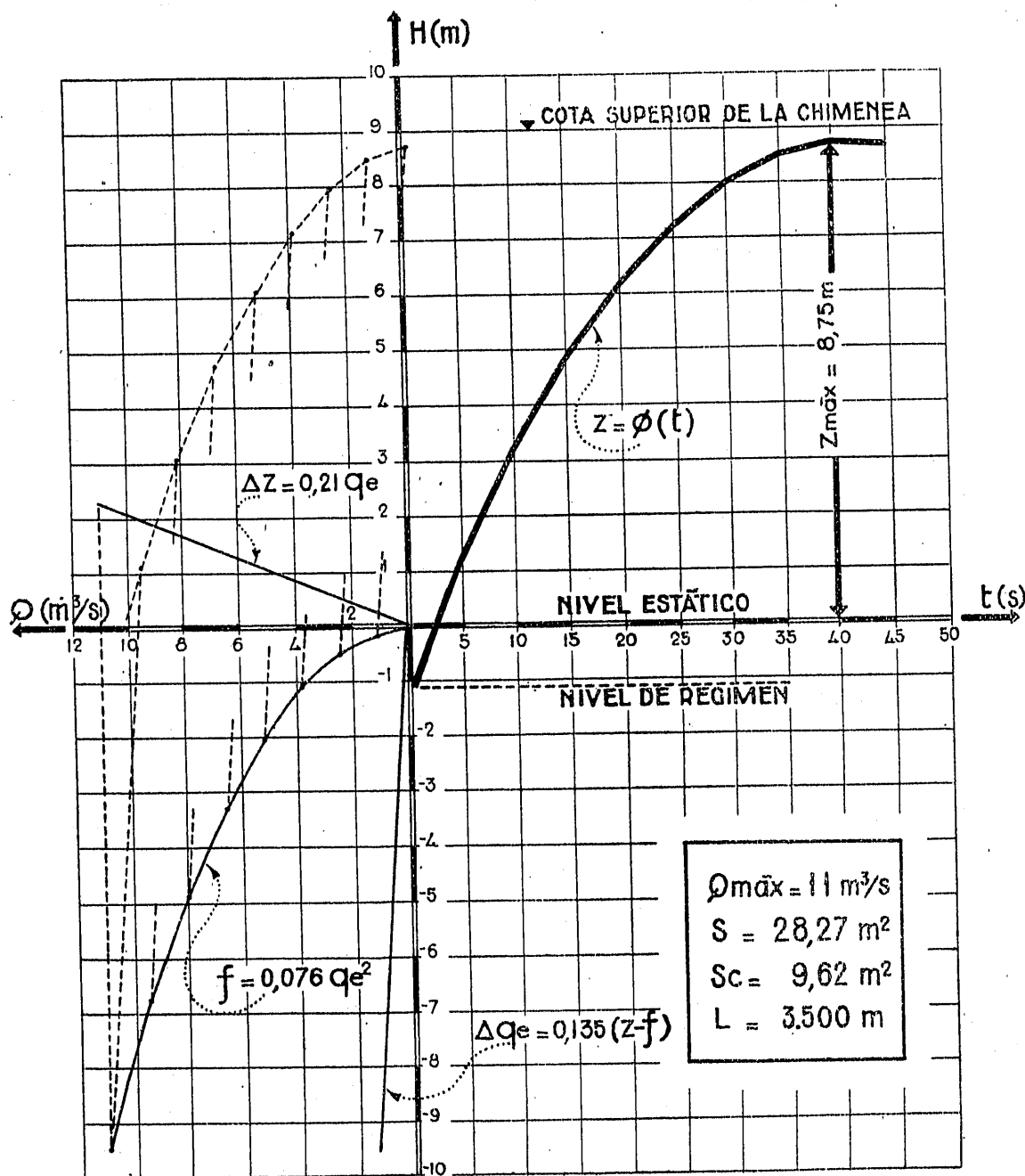


Figura 4.^a

La justificación de la construcción anterior es elemental. En el triángulo MNP , $NP = z - f$, y como el coeficiente angular de PM (paralela a $[z]$), es $-\frac{g S_c \Delta t}{L}$, NM representa el incremento negativo de caudal en el intervalo. Como N y $(q_e)_1$

nitid del incremento de tiempo, Δt , que se elija, Existe un error sistemático procedente de considerar q_e constante en cada intervalo, con el mismo valor que tenía al comenzar éste; puede corregirse tomando en cada caso el Δz que corresponde al q_e medio del intervalo, obteniendo éste con los dos valores ex-

tremos hallados por el proceso antes indicado. Sin embargo, aun con valores de Δt no exageradamente pequeños, el error es de tan reducida magnitud que no compensa el necesario aumento de trabajo.

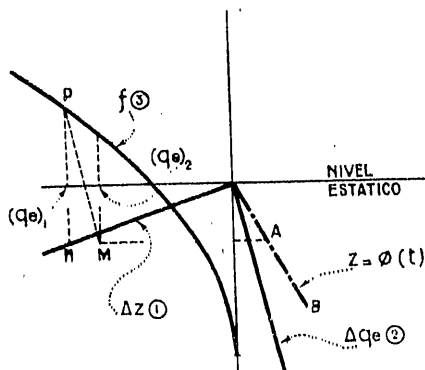


Figura 5.a

Un ejemplo completo aparece en la figura 4.^a, tomado del proyecto de un salto para Energía e Industrias Aragonesas, S. A.

b) *Apertura instantánea* (fig. 5.^a). — El proceso es análogo al anterior. Desde el punto $(q_e)_1$ correspondiente al caudal inicial que sale de la chimenea, se traza una vertical hasta cortar, en el punto N, a la recta [1] y en el P, a la parábola de pérdidas de carga. La ordenada de N nos da el valor de Δz_1 correspondiente al primer intervalo, iniciándose así, con el punto A, la curva $z = \phi(t)$ a partir del nivel de régimen inicial (en el caso de la figura, el nivel estático, por suponerse apertura partiendo de cero).

Trazando por el punto P una paralela a la recta [2] hasta cortar al nivel de oscilación (en nuestro caso el del punto A), tenemos el punto M. Una vertical levantada por él nos determina, en el eje de abscisas, el nuevo caudal $(q_e)_2$, y la distancia vertical desde éste a la recta [1], el valor de Δz_2 correspondiente al segundo intervalo. Repitiendo el proceso, obtendremos los distintos puntos correspondientes a una oscilación completa. La justificación del método es la misma que en el caso de cierre.

III

Con pequeñas modificaciones, las construcciones anteriores son aplicables a otros tipos de chimeneas. Así, por ejemplo, caso de proyectarse cámaras o ser variable el diámetro del pozo, basta sustituir la recta [1] por un haz de tantas rectas como secciones distintas existan. Para cada valor de q_e se hallará Δz entrando en la recta que corresponde al tramo en que, en aquel instante, se encuentra el nivel de oscilación. Esto presupone, desde luego, que la sección

horizontal es constante en cada tramo, lo que no suele ser exacto, especialmente en el caso de cámaras. El error resultante de esta simplificación, que también se hace corrientemente en el cálculo analítico por diferencias finitas, suele ser despreciable.

En chimeneas con vertedero, al alcanzar el agua la cota de éste, la curva de oscilación se convierte en una horizontal (despreciando la sobre elevación de la lámina vertiente) hasta que, después de un cierto período, comienza a descender. El cálculo gráfico es el mismo que en el caso de chimenea simple, salvo que no es necesario hallar los valores de Δz desde que se alcanza el nivel del vertedero hasta que pasan de negativos a positivos. Si se desea, para aumentar el grado de exactitud, tener en cuenta la sobre elevación del agua en el vertedero, basta dibujar, en el cuarto cuadrante del gráfico, la curva que liga ésta con el caudal vertido. Para cada valor de q_e se obtiene así la correspondiente altura de lámina vertiente, que se lleva sobre el punto correspondiente del tramo horizontal de la curva de oscilación.

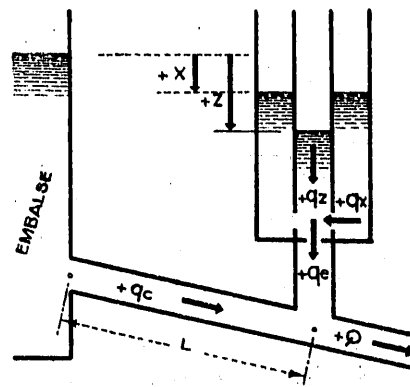
IV

Para la comprobación de chimeneas de equilibrio diferenciales tipo Johnson, no podemos basarnos únicamente en las tres ecuaciones fundamentales que hasta ahora hemos considerado. Dos de ellas se conservan en la misma forma:

$$\Delta q_e = \frac{-g S_c \Delta t}{L} (Z - f); \quad [2]$$

$$f = K_c (Q - q_e) + Q - q_e + K_e q_e + q_e. \quad [3]$$

Pero en cambio, la ecuación [1], al tener que considerar separadamente los caudales y niveles en la



S_c = sección de la conducción
 S = sección de la cámara
 s = sección del tubo elevador

Figura 6.a

cámara y en el tubo elevador, ha de sustituirse por las tres siguientes, cuyas variables se definen en la figura 6.^a:

$$\Delta x = \frac{\Delta t}{S} q_x ; \quad [4]$$

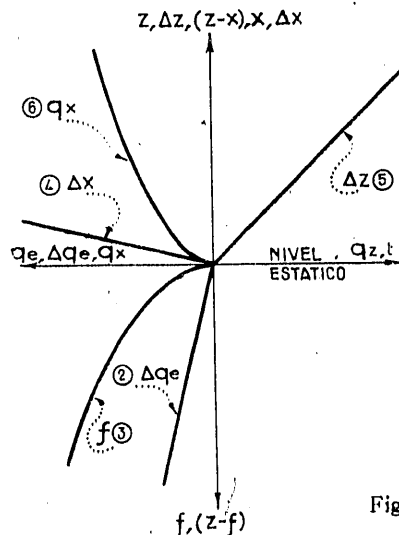
$$\Delta z = \frac{\Delta t}{s} q_z ; \quad [5]$$

$$q_x = + c \frac{z - x}{\sqrt{|z - x|}} . \quad [6]$$

el primer valor de Δz , y la distancia MN el de Δx . Podemos, pues, situar, considerando eje horizontal el nivel de régimen, los dos primeros puntos, A y B , de las curvas de oscilación del agua en el elevador y en la chimenea. Y, con el nivel estático como eje de abscisas, el punto C , de la curva $z - x = \phi_3(t)$, diferencia entre los dos valores obtenidos.

Para hallar el valor de q_e correspondiente al segundo intervalo, se baja una ordenada desde el punto $(q_e)_1$ hasta cortar a la parábola [3] en el punto G . Desde éste trazamos una paralela a [2], hasta al-

• CIERRE INSTANTÁNEO •



• APERTURA INSTANTÁNEA •

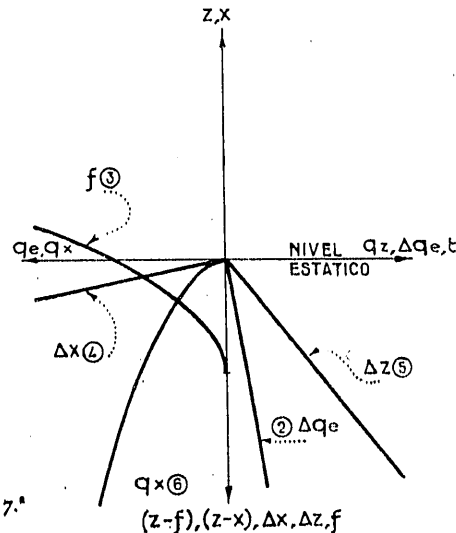


Figura 7.^a

Cumplíndose en todos los casos la relación $q_z + q_x = q_e$ y siendo c el coeficiente de pérdidas de carga en las troneras del tubo elevador.

En el método gráfico, las curvas correspondientes a las cinco ecuaciones del sistema se representan también sobre unos mismos ejes rectangulares. Su disposición, en los casos de cierre y apertura instantánea, aparece en la figura 7.^a. En ambos, las ordenadas de la parábola [6] se miden a partir de la recta [4].

Lo mismo que hicimos en el caso de chimeneas simples, detallamos a continuación, en los dos casos (cierre y apertura instantánea), el proceso operativo. Ahora, además de la curva, $x = \phi_1(t)$, que nos da la oscilación del nivel en la chimenea, hemos de considerar la $z = \phi_2(t)$, de oscilación del nivel en el elevador, así como la diferencia entre las dos, $z - x = \phi_3(t)$, que interviene para poder separar el caudal q_e en sus componentes correspondientes a cámara y elevador.

a) *Cierre instantáneo* (fig. 8.^a). — Tomamos en el eje correspondiente el valor $(q_e)_1$ y desde él se traza una paralela a la recta [5] hasta cortar a la parábola [6] en el punto P . La ordenada de este punto nos da

canzar el nivel anterior (B) de la curva $z = \phi_2(t)$. La abscisa correspondiente al punto H de intersección nos da el nuevo caudal $(q_e)_2$. Operando con él

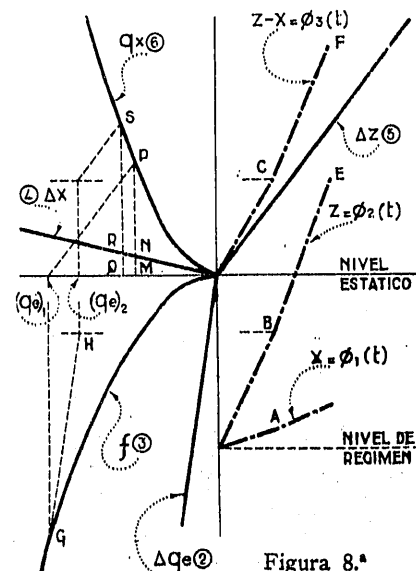


Figura 8.^a

en forma idéntica a como lo hicimos con $(q_c)_1$, tendremos:

$$\bar{Q} \bar{S} = (\Delta z)_2; \quad \bar{Q} \bar{R} = (\Delta x)_2.$$

Y se pueden situar los nuevos puntos D, E, F en las tres curvas de oscilación. Cualquier otro punto se obtiene, partiendo del inmediatamente anterior, en la misma forma.

En este proceso llegaremos a un instante en el cual el nivel z en el tubo elevador llega a la cota superior de éste y el agua empieza a verter sobre la cámara. En el primer intervalo en que esto se verifique habrá que añadir al nivel x el incremento correspondiente al caudal vertido. En los siguientes, todo el caudal q_c entra en la cámara (por las troneras o vertido por el tubo elevador), y por tanto, el valor de Δx , en cada caso, se obtiene directamente en la recta [4] para cada valor de q_c , sin necesidad de hacer intervenir en la construcción a la parábola [6] ni a la recta [5]. La construcción sigue, pues, en esta forma simplificada, hasta que el nivel en el tubo elevador empiece a descender: ello ocurrirá cuando la intersección de la ordenada por q_c con la horizontal del nivel correspondiente en la curva $z-x=\phi_3(t)$ quede en el lado cóncavo de la parábola [6]. Desde el momento en que esto se verifique la construcción seguirá como al principio, hasta terminar de dibujar las curvas.

Cuando las troneras se proyecten por encima del nivel de régimen, se comenzará como en el caso de una chimenea simple, y sólo se aplicará la construcción anterior al alcanzar la oscilación el nivel de ellas.

b) *Apertura instantánea.*— El proceso es análogo al del caso anterior y puede seguirse fácilmente en la figura 9.^a cuya notación es la misma de la figura 8.^a No es posible prescindir, como en el cierre, de considerar el tubo elevador durante buena parte de la construcción. En cambio, sí se puede llegar a agotar el agua de la cámara, desde cuyo momento, hasta que

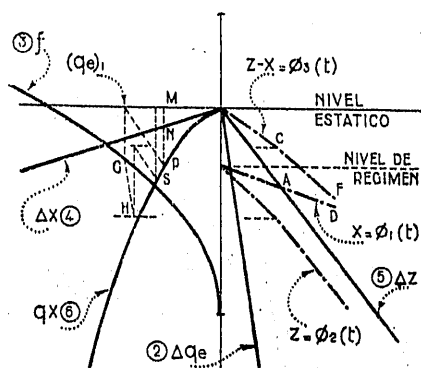


Figura 9.^a

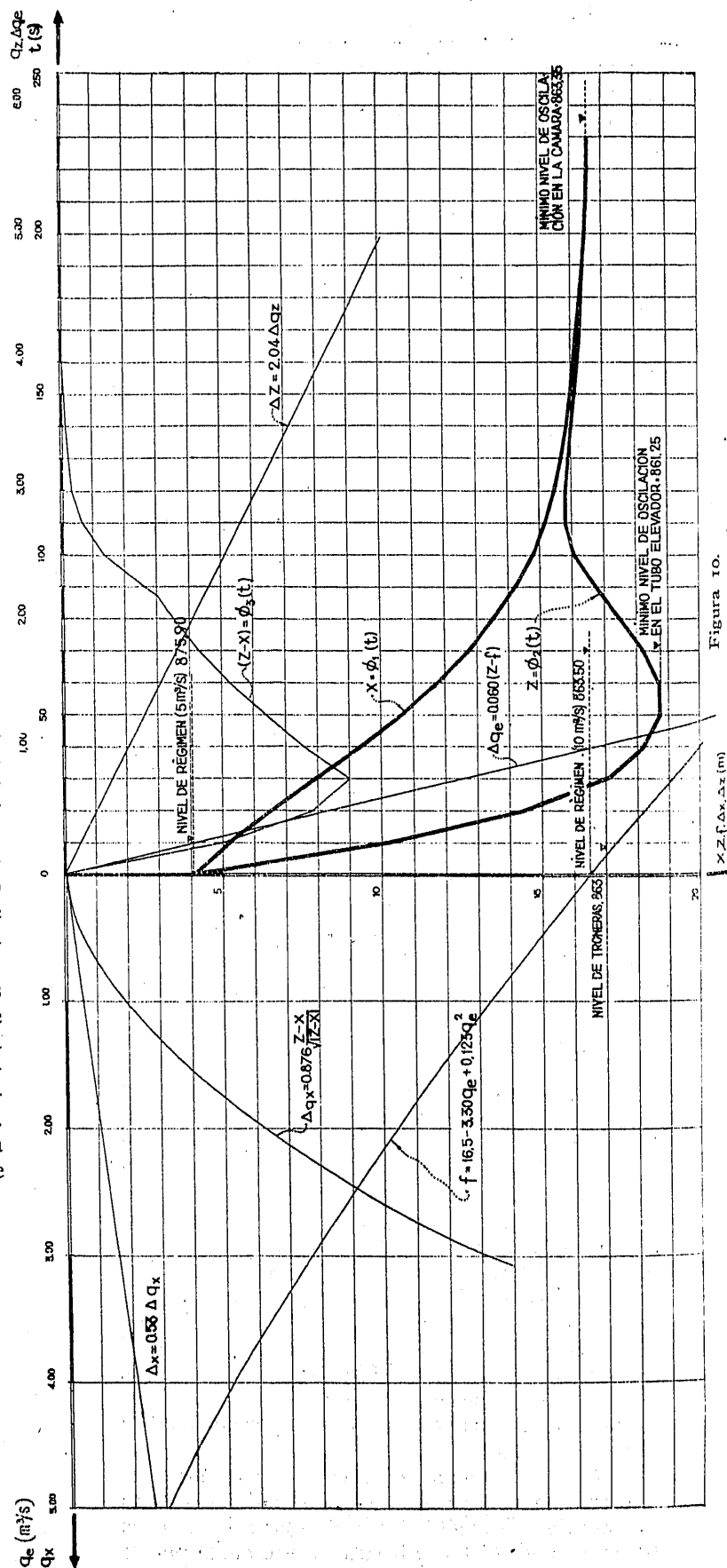


Figura 10.

vuelva a entrar líquido por las troneras, se opera como si se tratase de una chimenea simple cuyo diámetro fuera el del tubo elevador.

Un ejemplo completo de apertura instantánea de 5 a 10 m.³/s., tomado del estudio de la chimenea del salto de Miller (Compañía de Riegos de Levante, S. A.), aparece en la figura 10.

V

En algunos sistemas hidroeléctricos resulta conveniente utilizar en una sola central los caudales procedentes de distintos embalses, estando entonces una sola chimenea alimentada por varias conducciones. La complejidad del proceso de comprobación, sea ana-

Si ambas concurren en la chimenea (esquema en V), las ecuaciones, con la notación de la figura 11, serán:

$$z = \frac{\Delta t}{S} q_e; \quad [1]$$

$$\Delta q_1 = - \frac{g S_{c1} \Delta t}{L_1} (z_1 - f_1 - f_e); \quad [7]$$

$$\Delta q_2 = - \frac{g S_{c2} \Delta t}{L_2} (z_2 - f_2 - f_e); \quad [8]$$

$$f_e = -K_e q_e |q_e|; \quad [9]$$

$$f_1 = K_{c1} q_1 |q_1|; \quad [10]$$

$$f_2 = K_{c2} q_2 |q_2|. \quad [11]$$

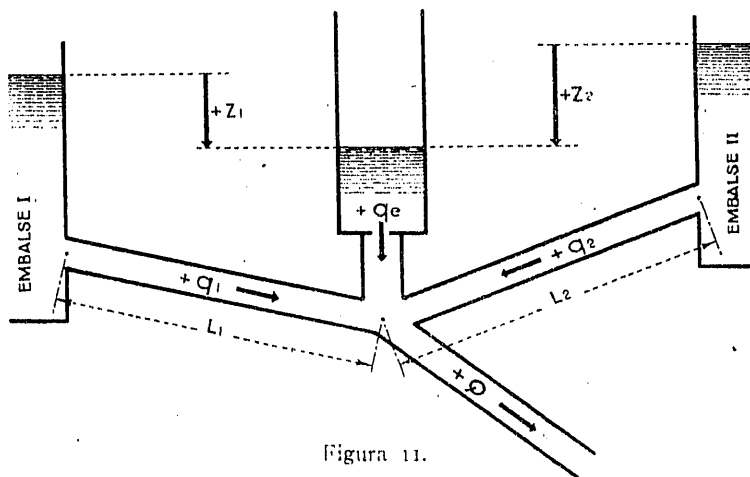
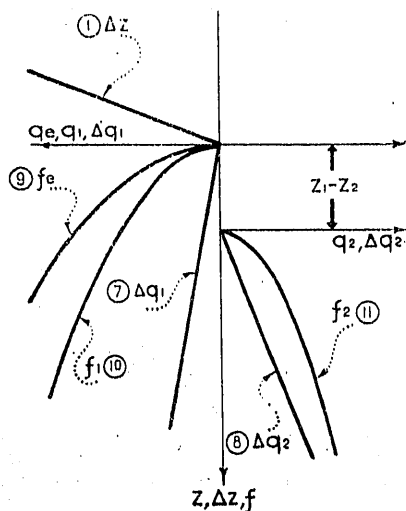


Figura 11.

lítico o gráfico, aumenta enormemente con el número de éstas; damos a continuación la construcción a emplear en el caso de dos conducciones, que es el más corriente en la práctica.

Tenemos, por tanto, que introducir en la construcción gráfica la consideración de las diferentes alturas de los dos embalses con relación a la chimenea, así como las distintas pérdidas de carga en las con-

• CIERRE INSTANTÁNEO •



• APERTURA INSTANTÁNEA •

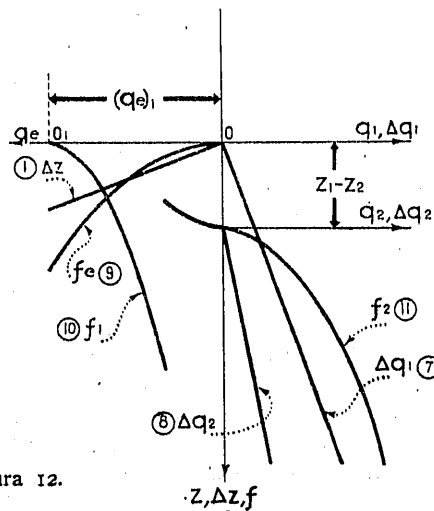


Figura 12.

ducciones. Para ello, en el gráfico de cierre instantáneo (fig. 12), se superponen dos sistemas de ejes coordenados correspondientes a los dos embalses; el eje de ordenadas es común a ambos, y los de abscis-

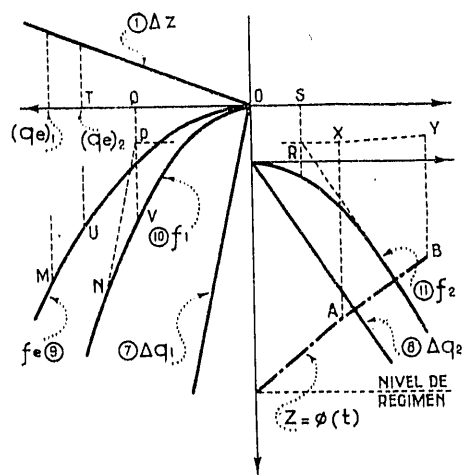


Figura 13.

sas están separados una magnitud igual a $z_1 - z_2$. En cada uno de ellos se representan las ecuaciones que se refieren al correspondiente embalse; o sea, en el primero, las [7] y [10], y en el segundo, las [8] y [11]. Las dos ecuaciones comunes, [1] y [9], se dibujan también en el primer sistema de coordenadas.

La forma de operar se detalla en la figura 13. El primer punto, A, de la curva $z = \phi(t)$, se obtiene, como en el caso de conducción única, subiendo una ordenada desde el punto correspondiente al valor inicial de q_e (que será $(q_e)_1 = Q - (q_1 + q_{2_{reg}})$), hasta cortar a la recta [1]. Por encima de A se sitúa el punto X, siendo $AX = (q_e)_1 M$, ordenada de la parábola [9], correspondiente al valor inicial de q_e .

Para situar el segundo punto, B, de la curva de oscilación, hemos de encontrar el nuevo valor de q_e , suma de los correspondientes q_1 y q_2 , en ambas conducciones. La ordenada del punto N nos representa las pérdidas de carga en la primera conducción, correspondientes al valor de régimen de q_1 . Trazando por este punto una paralela a la recta [7], hasta alcanzar en P la ordenada del punto Q, la abscisa OQ del punto P nos da el valor de q_1 , correspondiente al segundo intervalo. Operando en la misma forma con la parábola [11] y la recta [8], obtenemos el punto R, cuya abscisa, OS, representa el valor de q_2 , correspondiente al segundo intervalo. Sumando las magnitudes OQ y OS, tenemos el punto T, siendo OT el segundo valor de q_e , $(q_e)_2$, con el que situamos el punto B, segundo de la curva de oscilación, en la misma forma que empleamos para el primero.

Para el tercer intervalo se continúa el proceso de modo análogo, siendo $TU = BY$, el punto N pasando a ser el V, etc. Por el mismo proceso segui-

remos hallando los puntos sucesivos hasta terminar la curva de oscilación (*).

Debemos hacer notar que, al existir dos conducciones de características distintas, la velocidad del agua se anulará en una antes que en la otra. Inmediatamente, la velocidad cambiará en ella de signo, produciéndose una corriente desde el segundo embalse al primero. Cuando las velocidades en las dos conducciones sean iguales y de signo contrario, el nivel en la chimenea habrá llegado a su posición final de equilibrio.

En el caso de apertura instantánea, la disposición de las curvas es la representada en la figura 12. En el eje de abscisas correspondiente al embalse de mayor cota, los valores de q_1 se miden tomando como origen el punto O_1 , siendo $O O_1 = (q_e)_1$, valor inicial de q_e .

El procedimiento operativo es análogo al del caso de cierre y puede seguirse directamente en la figura 14, cuya notación se corresponde exactamente con la de la figura 13. En este ejemplo se ha supuesto que la apertura se produce con un caudal inicial nulo en las turbinas. Por ello, en el primer instante existe una corriente del embalse más alto al más bajo, y el punto inicial en la parábola de pérdidas de carga de la segunda conducción se encuentra en la rama de ésta situada a la izquierda del eje de ordenadas; pero, desde luego, puede operarse igualmente con cualquier otra hipótesis de caudal inicial.

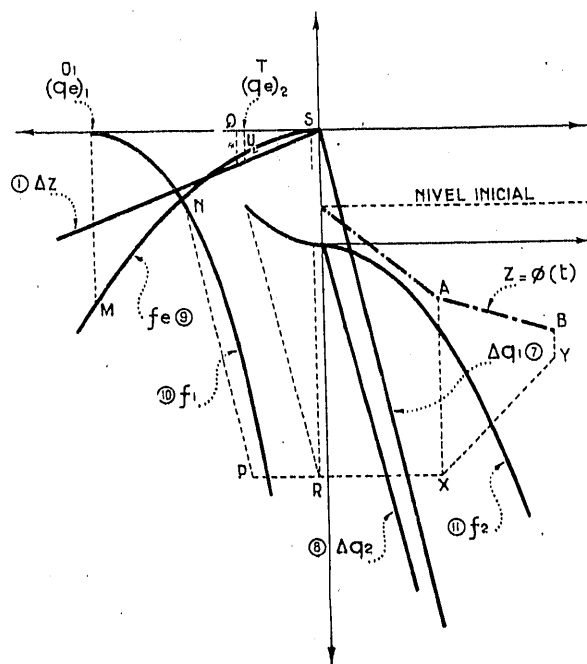


Figura 14.

(*) La construcción es aplicable al caso de cámara superior o pozo de área variable, sustituyendo, como en el caso de conducción única, la recta [1] por un haz de rectas correspondientes a las distintas secciones.

Si las condiciones topográficas del terreno lo exigen, puede resultar conveniente que las dos conducciones se unan en un punto anterior a la chimenea (esquema en Y, fig. 15). En este caso las ecuaciones a considerar son las siguientes:

$$z = \frac{\Delta t}{S} q_e; \quad [1]$$

$$\Delta q_1 = -\frac{g S_{c1} \Delta t}{L_1} (z_1 - z_3 - f_1); \quad [12]$$

$$\Delta q_2 = -\frac{g S_{c2} \Delta t}{L_2} (z_2 - z_3 - f_2); \quad [13]$$

$$\Delta q_3 = -\frac{g S_{c3} \Delta t}{L_3} (z_3 - f_3 - f_e); \quad [14]$$

$$f_1 = K_{c1} q_1 |q_1|; \quad [10]$$

$$f_2 = K_{c2} q_2 |q_2|; \quad [11]$$

$$f_3 + f_e = K_{c3} (Q - q_e) |Q - q_e| - K_e q_e |q_e|. \quad [15]$$

Con relación al caso anteriormente considerado (figura 11), introducimos dos nuevas variables: Δq_3 , incremento del caudal en el tramo común a las dos conducciones, y z_3 , diferencia entre la altura piezométrica en el punto de unión de éstas y el nivel en la chimenea. El sistema de ecuaciones continúa, sin embargo, siendo determinado, pues las [12], [13] y [14] están ligadas por la de continuidad en el nudo de conducciones

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 = \Delta q_3.$$

En el procedimiento gráfico Δq_1 , Δq_2 , Δq_3 y z_3 , se obtienen de modo simultáneo y puede prescindirse de considerar la última variable, pues no inter-

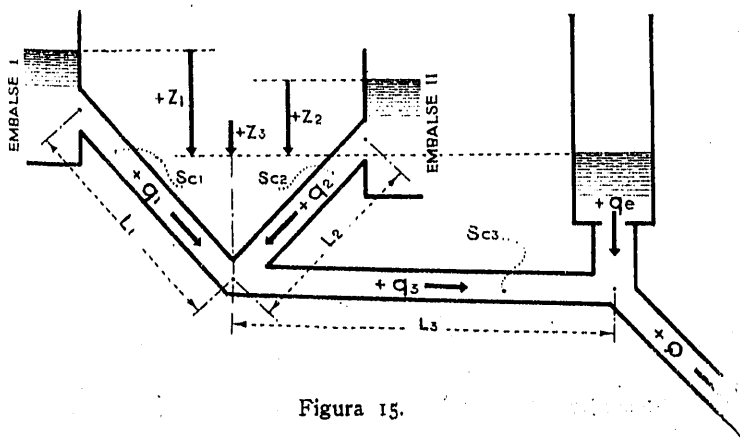


Figura 15.

viene en el proceso para situar cada punto de la curva $z = \phi(t)$ en función del anterior.

En el caso de cierre instantáneo, dispuestas las ecuaciones como se indica en la figura 16, se comienza situando el primer punto, A, de la curva de oscilación y el punto X, en la misma forma que en el caso de esquema en V, o sea partiendo del valor $(q_e)_1$ y utilizando la recta [1] y la parábola [15]. En la vertical del punto $(q_e)_1$ se fija C, al mismo nivel que los puntos D y E, que corresponden, en sus parábolas respectivas, a los valores iniciales q_1 y q_2 de los caudales en ambas conducciones convergentes. En la misma vertical, el punto F tiene el mismo nivel que el X.

Por los puntos C y F, respectivamente, se trazan paralelas a las rectas [12] + [13] y [14], que se cortan en G, obteniendo así el segmento $\overline{HG} = \Delta q_e$. Igualmente, trazando por D y E, respectivamente, paralelas a [12] y [13] hasta el nivel de G, tendremos los segmentos $\overline{IJ} = \Delta q_1$, $\overline{KL} = \Delta q_2$.

La vertical por el punto G nos da el valor de q_e en el segundo intervalo y nos permite situar los puntos B e Y, como lo hicimos en el primero.

Para la obtención de las magnitudes correspondientes al tercer intervalo de tiempo, se trazan verticales por los puntos J y K, hasta cortar, respectivamente, a las parábolas [10] y [11] en los puntos M y N. El más bajo de éstos (M en el ejemplo de la figura) se transporta horizontalmente a la vertical por G, dando el punto O. Por él se traza una paralela a [12] hasta el punto Q (situado a la misma cota que el N) y desde éste otra paralela a [12] + [13]. La intersección de ésta con una paralela a [14] por el punto P, situado a la misma cota que el Y, nos define el punto R. Como anteriormente, $SR = \Delta q_3$.

La vertical por R nos da el valor de Δz correspondiente al tercer intervalo, y la construcción se continúa, operando con los puntos R, M y N, como lo hicimos con los G, D y E.

Si hubiera sido el más bajo el punto N, correspondiente a la parábola de la segunda conducción, la construcción se hubiera desarrollado en la misma forma, pero trazando por el punto correspondiente al O, una paralela a la recta [13'], simétrica de la [13] con relación al eje de ordenadas. Esta paralela se interrumpe también a la cota del segundo punto considerado (que en este caso sería el M) y a continuación se traza la paralela a [12] + [13] hasta el punto R.

Como vemos, la construcción resulta algo más compleja que las anteriores. Representa, sin embar-

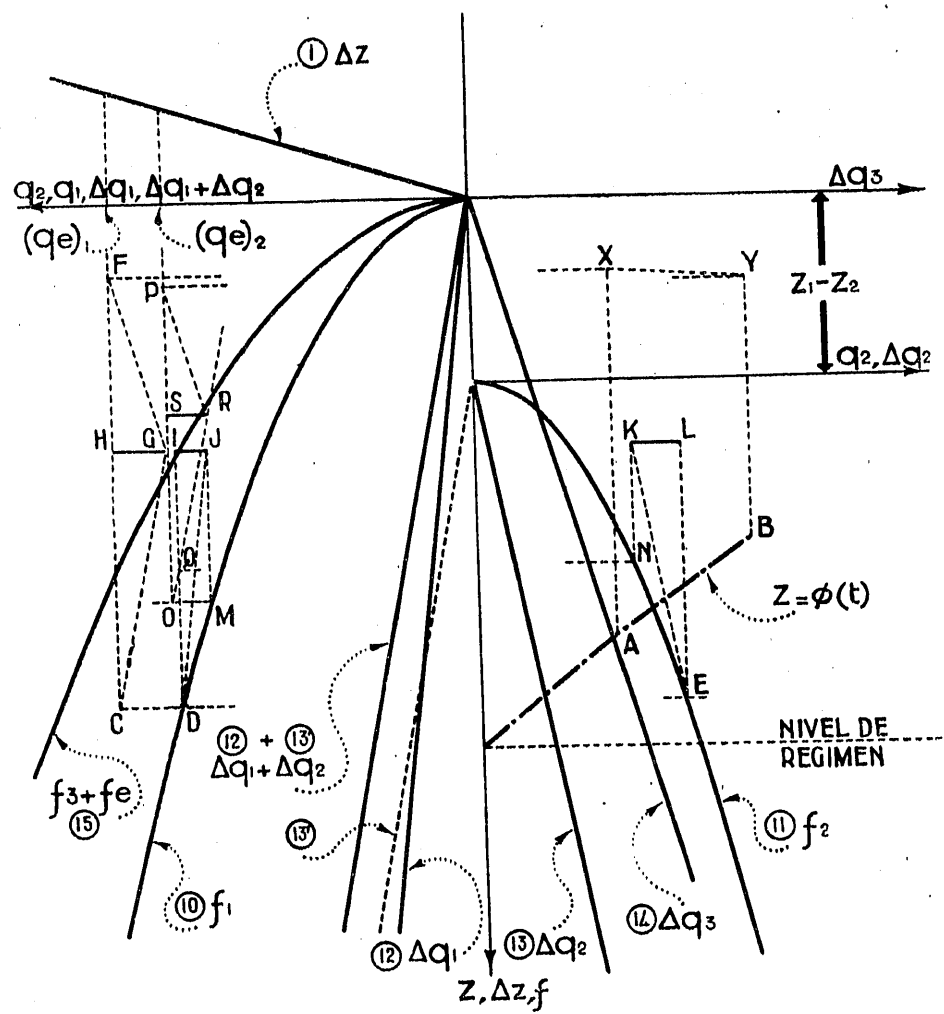


Figura 16.

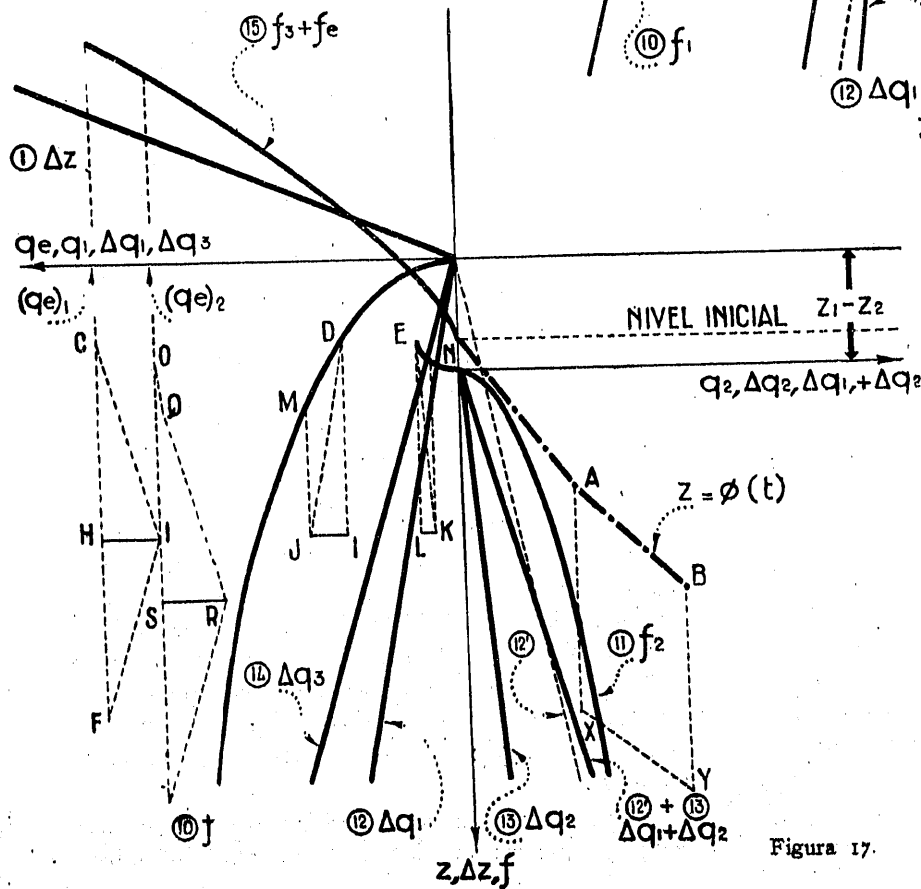


Figura 17.

go, también, una simplificación de cierta importancia con relación al tratamiento totalmente analítico.

Como en los casos anteriores, en la figura 17 indicamos, con la misma notación que en la figura 16, la construcción en la hipótesis de apertura instantánea.

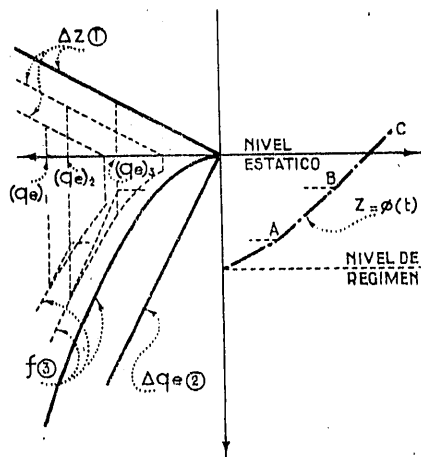


Figura 18.

VII

En la mayoría de los casos que se presentan en la práctica, la elección del tipo de chimenea y el dimensionamiento aproximado de la solución adoptada, se hacen considerando únicamente las hipótesis de cierre y apertura instantáneos. Es necesario, sin em-

bargo, al conocer las características del regulador suministradas por la casa constructora de las turbinas, rehacer la comprobación, teniendo en cuenta la duración de las maniobras.

Para ello, el tiempo durante el cual se realiza el cierre o la apertura se divide en intervalos iguales, suponiéndose constante el caudal que toman las turbinas durante cada uno de ellos. La máxima simplificación en el procedimiento se obtiene haciendo coincidir el valor de este intervalo con el adoptado para el trazado de toda la curva de oscilación.

En el gráfico, la longitud $O(q_e)_1$, en el eje de abscisas (siendo $(q_e)_1$ el caudal al comienzo de la maniobra) se divide en el número de partes que se considere suficiente para el grado de exactitud requerido. Con cada uno de estos puntos como origen, se dibujan las distintas parábolas de pérdidas de carga, sustituyendo en cada caso, en la ecuación general, Q por su valor en el correspondiente intervalo, así como paralelas a la recta [1].

Preparado en esta forma el diagrama, puede procederse exactamente del mismo modo que anteriormente hemos expuesto. Basta considerar, en cada uno de los intervalos, la parábola y la recta que le corresponden, hasta llegar al último de ellos, que coincidirá con el final de la maniobra.

En la figura 18 damos un ejemplo del proceso anterior, en el que se supone dividido en tres partes el tiempo de cierre del regulador en una chimenea simple.