

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA**

**CÁTEDRA DE "CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS"**

**Análisis de la Ley de Cierre de  
Acueductos regulados Aguas Abajo**

**MÉTODO DE LOS DIAGRAMAS  
TRIANGULARES**

**VERSIÓN AL 14/07/2005**

**Ing. Luis E. PÉREZ FARRÁS**

**INDICE**

<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>1</b>
<hr/>	
<b>2. CONCEPTOS Y ECUACIONES FUNDAMENTALES</b>	<b>2</b>
<hr/>	
2.1. CÁLCULO EN RÉGIMEN PERMANENTE	2
2.2. DISPOSITIVO DE CIERRE	3
2.2.1. DISPOSICIÓN GENERAL Y PÉRDIDAS DE CARGA	3
2.2.2. DIMENSIONADO DEL ACCESORIO CON ORIFICIO	5
2.3. FUNDAMENTO DE LAS ECUACIONES MÁS IMPORTANTES DEL MÉTODO	7
2.5 DIAGRAMA ENVOLVENTE ADMISIBLE Y SU EVALUACIÓN	9
2.6 SECUENCIA DE CIERRE Y TIEMPO DE CIERRE TOTAL	11
<hr/>	
<b>3. PROCESO DE CÁLCULO Y DISEÑO</b>	<b>13</b>
<hr/>	
3.1. CÁLCULO APROXIMADO PARA RÉGIMEN PERMANENTE	13
3.2. CONFIGURACIÓN DE RAMALES Y VÁLVULAS	13
3.3 CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL RAMAL PRINCIPAL ( D)	13
3.4. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL SEGUNDO Y DEL ÚLTIMO RAMAL	14
<hr/>	
<b>4. CIERRE SECUENCIAL DE TRAMOS INTERMEDIOS</b>	<b>14</b>
<hr/>	
<b>5. CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA TODAS LAS VÁLVULAS ABIERTAS</b>	<b>16</b>
<hr/>	
<b>6. EJEMPLO NUMÉRICO</b>	<b>18</b>
<hr/>	
<b>6.1 ALTERNATIVA 1 : 3 RAMALES EN PARALELO</b>	<b>19</b>
6.1.1 CÁLCULO APROXIMADO PARA RÉGIMEN PERMANENTE	19
6.1.2 CONFIGURACIÓN DE RAMALES Y VÁLVULAS :	19
6.1.3 CÁLCULOS PARA EL CIERRE DE $VM\phi_1$ :	19
6.1.4. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL RAMAL $D_2$ (350 MM) :	21
6.1.5. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL ÚLTIMO RAMAL :	22
<b>6.2. ALTERNATIVA 2 : 3 RAMALES EN PARALELO Y CIERRES PARCIALES EN RAMALES 2 Y 3</b>	<b>26</b>
6.2.1. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DE $VM\phi_3$	26
6.2.2. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL RAMAL $D_2$ (350 MM) :	26
<b>6.3. ALTERNATIVA 3 : 4 RAMALES EN PARALELO</b>	<b>28</b>
6.3.1. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DE $VM\phi_1$ :	28
6.3.2. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL RAMAL $D_2$ (300 MM) :	29
6.3.3. CÁLCULOS PARA LA NUEVA CONFIGURACIÓN DE DIÁMETROS :	31
<b>6.4. CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA TODAS LAS VÁLVULAS ABIERTAS</b>	<b>36</b>

---

# ANÁLISIS DE LA LEY DE CIERRE DE ACUEDUCTOS REGULADOS AGUAS ABAJO

## MÉTODO DE LOS DIAGRAMAS TRIANGULARES DE SOBREPRESIONES MÁXIMAS

### **1. GENERALIDADES**

Este método se aplica para analizar la ley de cierre de acueductos regulados aguas abajo.

Se propone el cierre secuencial con varios ramales en paralelo de diámetros decrecientes y con sus correspondientes válvulas.

El método a describir puede ser utilizado para un número  $n$  arbitrario de ramales. Ello no obstante es oportuno aclarar que una regulación muy fina puede obtenerse, para grandes diámetros con 3 ramales y para diámetros menores de 500 mm con 2 ramales.

El fundamento del método se encuentra en la "Teoría de los diagramas envolventes de sobrepresiones" (Teoría de los Movimientos Transitorios, ítems 5 y 7), los que en realidad acotan el problema que nos ocupa y con la particularidad de lograrlo con ecuaciones sencillas.

El procedimiento adoptado para la ley de cierre es el de cerrar las válvulas una a una, en forma secuencial, y con maniobras que duren  $2L/c$ , seguidas de períodos de "Uniformización del Régimen" o "descanso" de  $nL/c$  segundos de duración, variando  $n$  según el criterio del proyectista.

El tiempo estipulado para las maniobras de  $2L/c$  se fundamenta en que la máxima sobrepresión para "cierres bruscos" tendrá lugar, en el obturador, justamente en ese momento, configurando un diagrama triangular de envolventes de sobrepresiones ("Teoría de los movimientos transitorios", ítem 5.2.b).

Cada una de las maniobras de cierre dará lugar a un diagrama envolvente triangular, el que no deberá superar a un diagrama pre-establecido.

Es evidente, que todo esto presupone aceptar a la controvertida "ley lineal de variación de la velocidad" como válida, lo que puede ser aceptado, puesto que la configuración en paralelo, y el cierre secuencial propuesto, implican el trabajo de las válvulas, siempre en condiciones de buena regulación para el caudal de la conducción principal.

Otro concepto digno de destacarse de la propuesta, es que se conserva el diámetro del conducto principal para el primer tramo de los ramales en paralelo, los que disminuyen fuertemente su diámetro hasta llegar al último.

Para el diámetro principal se adopta válvula mariposa (más económica) y para los restantes adoptarse combinaciones de válvulas agujas o mariposa o simplemente alguna de las dos, para todos los ramales restantes, y a criterio del proyectista. Obviamente nunca deben adoptarse válvulas esclusa debido a su pésimo efecto regulador.

Con este criterio se simplifica notablemente el cálculo del caudal, puesto que el dispositivo integrado por los ramales en paralelo y sus correspondientes válvulas no introduce pérdidas de carga apreciable y permite encarar el cálculo del caudal principal como si no existiera.

En cambio, al producirse el cierre del ramal principal, todo el dispositivo originará una fuerte pérdida de carga que reducirá el caudal a un valor tal que produzca un diagrama de envolvente compatible con la conducción proyectada respondiendo a criterios económicos en la selección de las clases.

Este diagrama implicará el máximo valor de sobrepresión admisible. Para lograrlo se deberá proyectar una pérdida de carga del dispositivo, que se ajustará con una "placa orificio". Por otra parte, las maniobras de cierre parciales y la última maniobra (último ramal) deberán generar diagramas de sobrepresiones que no superen al diagrama original o que en caso de hacerlo satisfaga las exigencias del proyectista (quién procederá a ajustar la selección de clases de optar por esta alternativa).

Obviamente, la alternativa primera y más racional, en caso que alguna maniobra implique mayores sobrepresiones que la del diagrama original, es la de modificar el dimensionamiento del dispositivo, o las secuencias de cierre, o ambas cosas simultáneamente.

El objetivo principal del método propuesto es la de posibilitar el diseño criterioso y racional de leyes de cierre, por parte del proyectista de acueductos regulados aguas abajo. Siguiendo los lineamientos esbozados aquí, podrá tener acotado el problema para todas las maniobras que proyecte y podrá decidir las más convenientes.

## 2. CONCEPTOS Y ECUACIONES FUNDAMENTALES

### 2.1. CÁLCULO EN RÉGIMEN PERMANENTE

Al proyectar el dispositivo con el mismo diámetro del acueducto para el primer tramo, puede ignorarse el efecto del mismo puesto que prácticamente no produce pérdida de carga, con lo que se evita la gran dificultad del cálculo que implicarían  $n$  ramales en paralelo para la determinación del caudal.

Este puede obtenerse simplemente usando la expresión de HAZEN y WILLIAMS:

$$j = \frac{1}{(0,275.C)^{1,85}} \frac{Q^{1,85}}{D^{4,85}}$$

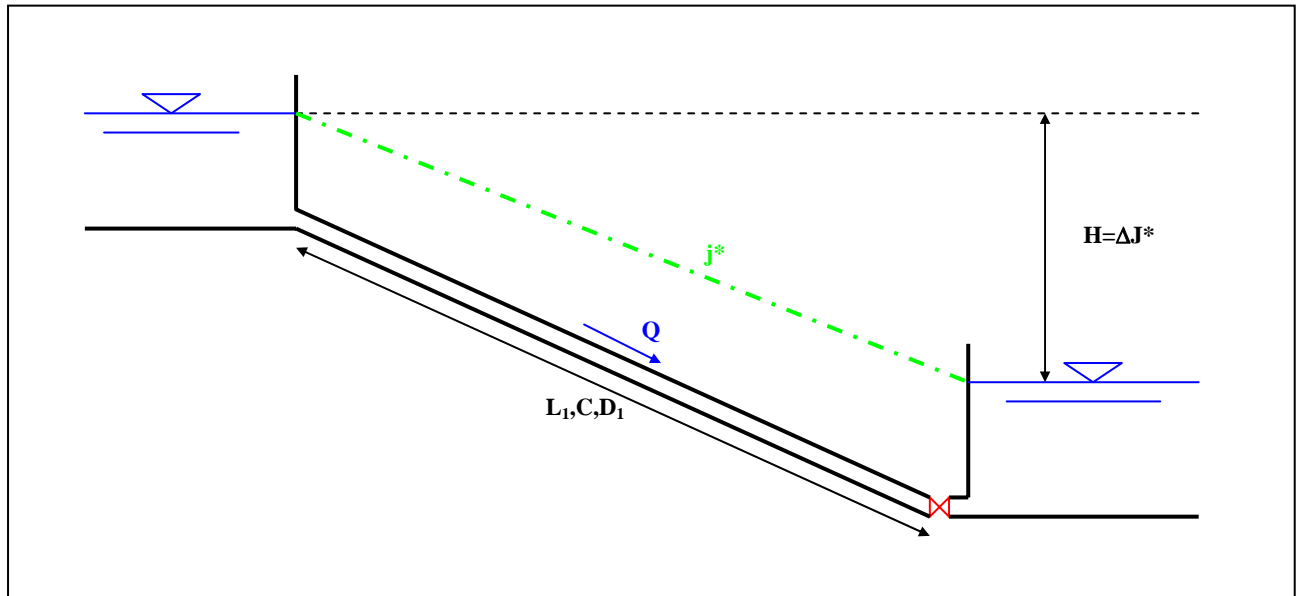
Como:

$$\Delta j^* = H = j \cdot L_1 \quad (1)$$

Se tiene que:

$$Q = 0,275 D_1^{2,62} \frac{H^{0,54}}{L_1 C D_1} \quad (2)$$

Nota : Posteriormente, de mediar interés, se podrá calcular el caudal que pasará por cada ramal. Para ello deberá evaluarse la pérdida en la placa orificio y en todo el dispositivo, lo que implica el dimensionamiento del mismo, objetivo principal del presente trabajo.



**Figura 1**  
Esquema para el cálculo en régimen permanente

## 2.2. DISPOSITIVO DE CIERRE

### 2.2.1. Disposición general y pérdidas de carga

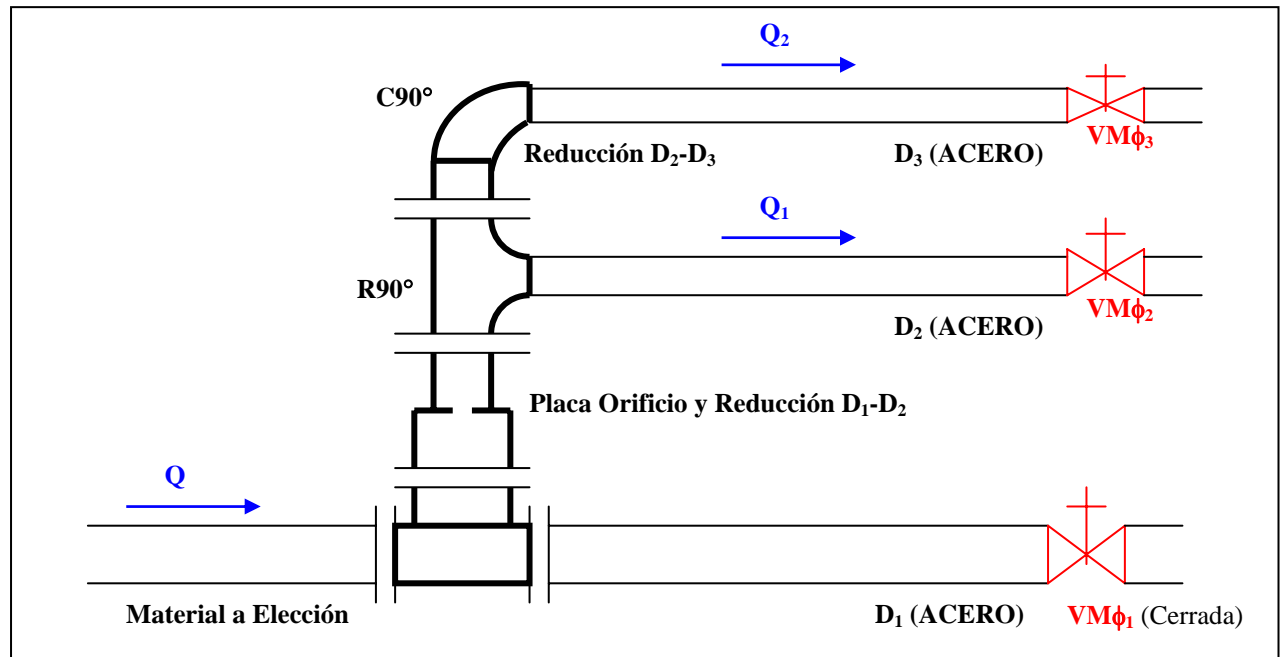
Se realiza el esquema del dispositivo para 3 ramales tal como se puede apreciar en la Figura 2.

Para el primer tanteo del mismo se recomienda que el segundo tramo cumpla con:

$$\frac{D_1}{3} \geq D_2 \geq \frac{D_1}{5} \quad (3)$$

Y el tercer tramo:

$$D_2 \geq D_3 \geq \frac{1}{3} D_2 \quad (4)$$



**Figura 2**  
Esquema del dispositivo de cierre

Evaluamos las pérdidas localizadas con el concepto de "Longitudes equivalentes" y según las siguientes ecuaciones:

$$\Delta J = \frac{L_1}{(0,275 C_1)^{1,85} \cdot D_1^{4,85}} Q^{1,85} = A \cdot Q^{1,85} \quad (5)$$

$$\Delta J_2 = \frac{L_{e_2}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_2^{4,85}} Q_1^{1,85} = B \cdot Q_1^{1,85} \quad (6)$$

$$\Delta J_3 = \frac{L_{e_3}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_3^{4,85}} Q_2^{1,85} = C \cdot Q_2^{1,85} \quad (7)$$

Nota: En caso de n ramales, un ramal genérico j cumplirá con:

$$\Delta J_j = \frac{L_{e_j}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_j^{4,85}} Q_{(j-1)}^{1,85} = J Q_{(j-1)}^{1,85} \quad (7b)$$

De donde:

$$A = \frac{L_1}{(0,275 C_1)^{1,85} \cdot D_1^{4,85}} \quad (8)$$

$$B = \frac{L_{e_1}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_2^{4,85}} \quad (9)$$

$$C = \frac{L_{e_2}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_3^{4,85}} \quad (10)$$

$$J = \frac{L_{e_j}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_{(j+1)}^{4,85}} \quad (10b)$$

En las que:

- $L_{e_j}$  es la longitud real más las longitudes equivalentes (en el último ramal incluye la pérdida en la válvula para cada grado de apertura).
- $C_1$  es el coeficiente para el material de la conducción principal.
- $C_a$  es el coeficiente para el acero.

Si se desea calcular el caudal que pasa por todos los ramales para todas las válvulas abiertas, disponemos de la ecuación complementaria:

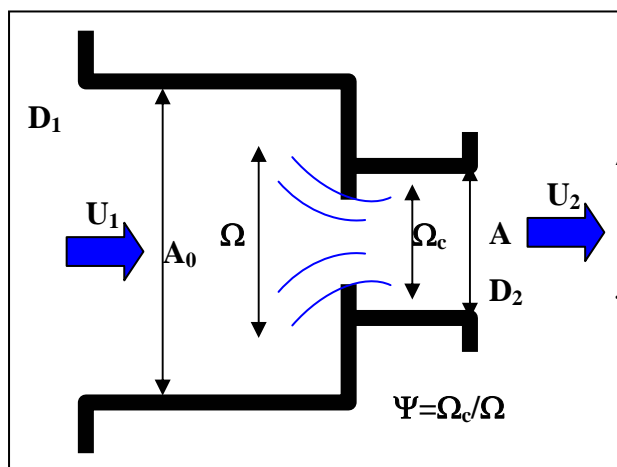
$$\Delta J_1' = \frac{L_{e_1}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_1^{4,85}} Q_1^{1,85} = A' \cdot Q_1^{1,85} \quad (11)$$

De donde:

$$A' = \frac{L_{e_1}}{(0,275 C_a)^{1,85} \cdot D_1^{4,85}} \quad (12)$$

### 2.2.2. Dimensionado del accesorio con orificio

Siguiendo los criterios del Manual URALITA (tomo II , pag.129) o del Manual del Ing. DALMATI (pag. v-91) la pérdida en la placa orificio es:



$$\Delta J_{p_0} = \xi \frac{U_2^2}{2 \cdot g} = \xi \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \frac{8 \cdot \xi \cdot Q^2}{g \cdot \pi^2 \cdot D_2^4}$$

$$\therefore \Delta J_{p_0} = \frac{8 \cdot \xi}{9,81 \cdot (3,14)^2} \frac{Q^2}{D_2^4} = 0,0827 \xi \frac{Q^2}{D_2^4}$$

Haciendo :  $M = 0,0827 \frac{\xi}{D_2^4}$  (13a)

Figura 3

Tenemos :  $\Delta J_{p_0} = M \cdot Q^2$  (13)

Placa orificio y reducción

Por otra parte, para dimensionar el orificio, tenemos que :

$$\frac{\Delta J_{p_0} \cdot D_2^4}{0,0827 \cdot Q^2} = \xi = \frac{E}{\Psi \cdot \Omega} - 1 \quad (14)$$

La que es válida para:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_0 > A \\ \Omega \leq 0,1 \cdot A_0 \\ 0,1 \cdot A < \Omega < A \end{array} \right.$$

De la (14) :

$$\frac{E}{\Psi \cdot \Omega} - 1 = \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\frac{\Delta J_{p_0}}{0,0827}} = 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}}$$

$$\frac{A}{\Psi \cdot \Omega} = 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}}$$

$$\frac{A}{\Omega} = \Psi \left( 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}} \right)$$

$$\therefore \Omega = \frac{A}{\Psi \left( 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}} \right)} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

$$\therefore d^2 = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot \Psi \left( 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}} \right)}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi \cdot \Psi \left( 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}} \right)}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot D_2^2}{4 \cdot \pi \cdot \Psi \left( 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}} \right)}}$$

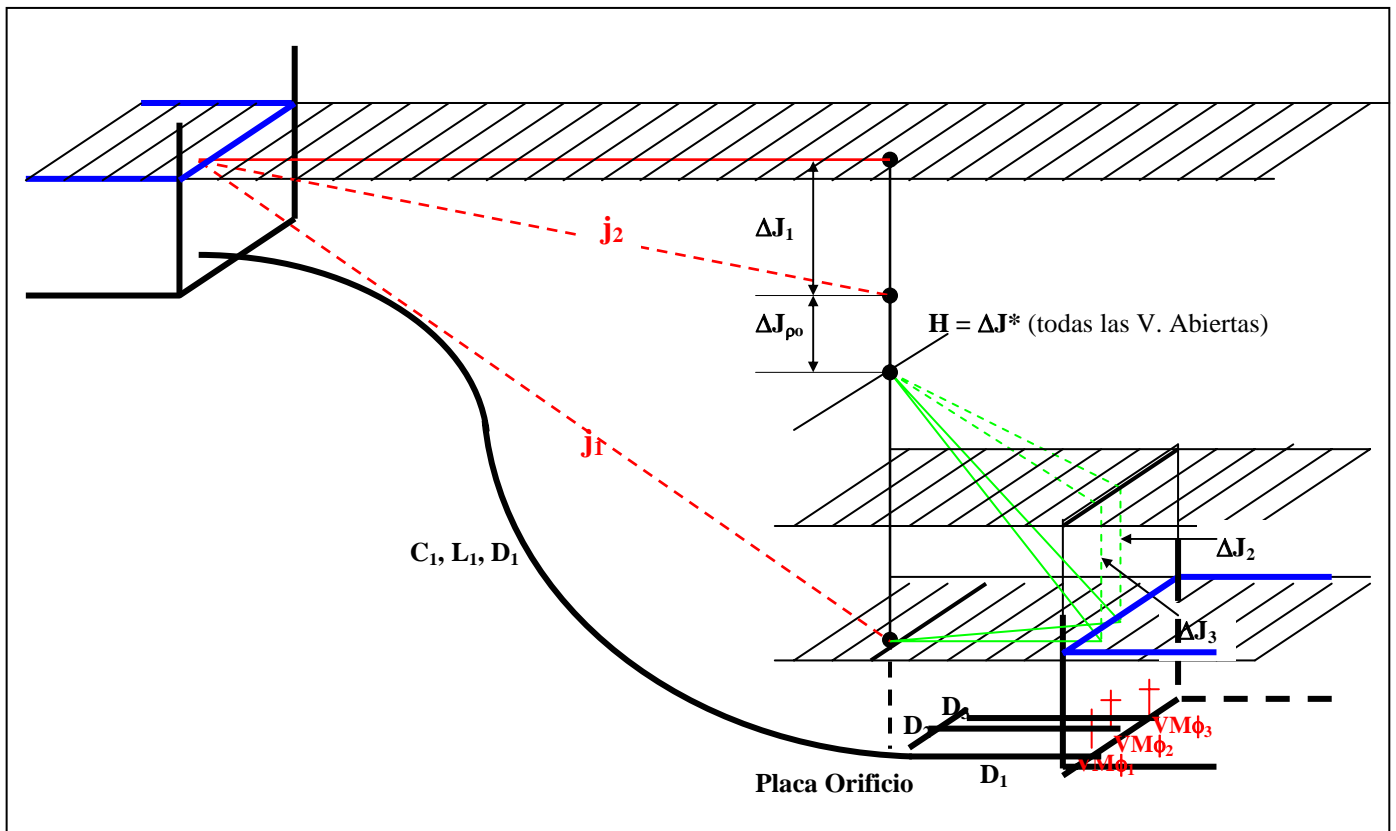
$$d = D_2 \sqrt{\frac{1}{\Psi \left( 1 + 3,477 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p_0}} \right)}}$$



Para  $A/\Omega$  entre 0,1 y 1  $\Psi$  varía tan solo entre 0,616 y 0,596  $\therefore$  adoptamos  $\Psi \cong 0,61 = \text{cte}$  y, finalmente :

$$d = D_2 \sqrt{\frac{1}{0,61 + 2,121 \frac{D_2^2}{Q} \sqrt{\Delta J_{p0}}}} \quad (15)$$

### 2.3. FUNDAMENTO DE LAS ECUACIONES MÁS IMPORTANTES DEL MÉTODO



**Figura 4**  
Esquema para la deducción de las ecuaciones

En el esquema se puede apreciar que cuando todas las válvulas están abiertas, prácticamente:

$$\Delta J^* = H = j_1 \cdot L_1$$

En rigor de verdad, la situación esquematizada a partir de  $j$  es la que posibilita todos los cálculos, aunque nosotros lo utilizamos a partir de V, cerrada.

En el caso más general, y extrapolando para n ramales en paralelo tendremos :

$$H = \Delta J_1 + \Delta J_{p_0} + \Delta J_2 = \Delta J_1 + \Delta J_{p_0} + \Delta J_3 = \dots = \Delta J_1 + \Delta J_{p_0} + \Delta J_n$$

$$H = \Delta J_1 + \Delta J_{p_0} + \Delta J \tag{16}$$

$$\Delta J = \Delta J_2 = \Delta J_3 = \dots = \Delta J_n \tag{17}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \tag{18}$$

Pero reemplazando en función de  $\Delta J$  (Hazen y Williams), se tiene (ecs. 8,9 y 10) :

$$H = A \cdot Q^{1,85} + \Delta J_{p_0} + \Delta J \tag{19}$$

$$\Delta J = B \cdot Q_1^{1,85} = C \cdot Q_2^{1,85} = \dots = n \cdot Q_n^{1,85} \tag{20}$$

El valor  $\Delta J$  de la (19) implica una pérdida equivalente de los ramales en paralelo que puede obtenerse del siguiente planteo :

$$\begin{aligned} \Delta J &= \chi \cdot Q^{1,85} ; \text{ de donde } Q^{1,85} = \frac{\Delta J}{\chi} \\ \Delta J_2 &= B \cdot Q_1^{1,85} ; \text{ de donde } Q_1^{1,85} = \frac{\Delta J_2}{B} \\ \Delta J_3 &= C \cdot Q_2^{1,85} ; \text{ de donde } Q_2^{1,85} = \frac{\Delta J_3}{C} \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta J_n &= N \cdot Q_{(n-1)}^{1,85} ; \text{ de donde } Q_{(n-1)}^{1,85} = \frac{\Delta J_n}{N} \end{aligned} \tag{21}$$

Como, por otra parte, reemplazando las (21) en la (18) :

$$\frac{\Delta J}{\chi} k^{0,54} = \frac{\Delta J_2}{B} k^{0,54} + \frac{\Delta J_3}{C} k^{0,54} + \dots + \frac{\Delta J_n}{N} k^{0,54}$$

Teniendo en cuenta la (17) :

$$\frac{1}{\chi^{0,54}} = \frac{1}{B^{0,54}} + \frac{1}{C^{0,54}} + \dots + \frac{1}{N^{0,54}}$$

$$\therefore \chi = \frac{1}{\left(\frac{fL}{2D}k\right)^{0,54} + \left(\frac{fL}{2D}k\right)^{0,54} + \dots + \left(\frac{fL}{2D}k\right)^{0,54} + \left(\frac{fL}{2D}k\right)^{1,85}} \quad (22)$$

Reemplazando en la (16) :

$$H = \Delta J_1 + \Delta J_{p_0} + \chi \cdot Q^{1,85}$$

$$\therefore \Delta J_{p_0} = -A \cdot Q^{1,85} + H - \chi \cdot Q^{1,85}$$

$$\therefore \Delta J_{p_0} = H - (A + \chi) \cdot Q^{1,85} \quad (23)$$

La que posibilita el dimensionamiento del orificio con la (15) ( ítem 2.2.2 ).

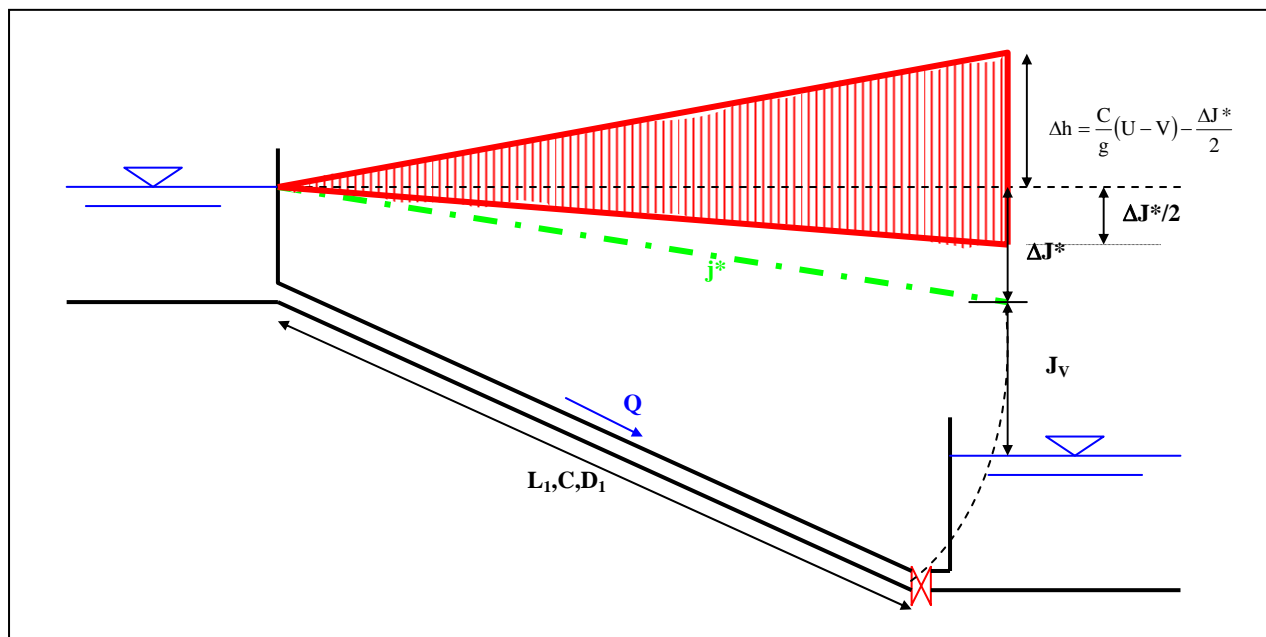
De las (21) y la (17) se deduce también que :

$$\chi \cdot Q^{1,85} = B \cdot Q_1^{1,85} = C \cdot Q_2^{1,85} = \dots = N \cdot Q_n^{1,85}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= \left(\frac{\chi}{B}\right)^{0,54} Q \\ Q_2 &= \left(\frac{\chi}{C}\right)^{0,54} Q \\ &\dots\dots\dots \\ Q_n &= \left(\frac{\chi}{N}\right)^{0,54} Q \end{aligned} \quad (24)$$

**2.5 DIAGRAMA ENVOLVENTE ADMISIBLE Y SU EVALUACIÓN**

Teniendo en cuenta el diagrama envolvente para un tiempo de maniobra de cierre  $T=2L/c$  y considerando el efecto amortiguador de las pérdidas por frotamiento, resultarán los parámetros que se deducen de la Figura 5 ( " Teoría de los Movimientos Transitorios " , ítems 5.1.e . y 6.3 ).



**Figura 5**  
 Diagrama envolvente de  $\Delta h$  para maniobras intermedias

La sobrepresión por sobre el nivel estático resulta :

$$\Delta h = \frac{C}{g}(U - V) - \frac{1}{2} \Delta J^*$$

El valor de  $\Delta h$  y consecuentemente el diagrama envolvente para la última maniobra, la que obviamente lleva a la condición  $Q = 0$ , difiere del anterior solo en el hecho de que  $V$  es nula (cierre total).

El proyectista puede adoptar un valor de  $\Delta h$  admisible y en consecuencia el correspondiente diagrama triangular de sobrepresiones . Luego proyectará el dispositivo y la secuencia de las maniobras de cierre, verificando que los diagramas envolventes o  $\Delta h_{MAX}$  (que es lo mismo) resultan menores que el admitido.

En caso de que resulte algún diagrama mayor, podrá adoptar a éste si le resulta satisfactorio o recalcular todo nuevamente.

Una vez definido el diagrama de envolvente puede realizar la selección de clases de los distintos tramos (" Teoría de los Transitorios ", ítems 5.2. y 5.3).

Del diagrama de sobrepresiones admisibles y de la ecuación (25) puede procederse como sigue:

Para el caudal de diseño  $Q_0$  se calculan  $\Delta J^*$  y  $U$ . Se adopta el material del caño al que le corresponde una celeridad aproximada  $C$  .

La sobrepresión en la válvula será la dadas por la (25).

Se adopta  $\Delta h_{ADM}$  y se despeja  $V$ , la que resulta :

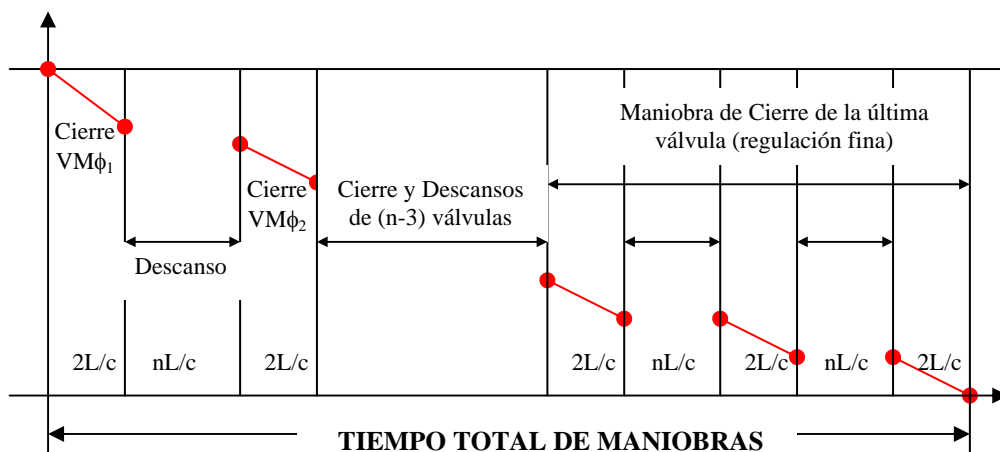
$$V = U - \frac{g}{C} \left[ \frac{H}{\Delta \eta_{MAX}} + \frac{\Delta J^*}{2} \right] \quad (25a)$$

El caudal resultante será :

$$Q = V \cdot \Omega = V \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \quad (25b)$$

Para este caudal resultante deberá dimensionarse la placa orificio.

## 2.6 SECUENCIA DE CIERRE Y TIEMPO DE CIERRE TOTAL



**Figura 6**  
Gráfico Q - T

En el gráfico de la Figura 6 se ilustra sobre la maniobra de cierre para n ramales y teniendo en cuenta la " regulación fina " en el último ramal .

Esta " regulación fina " podría ser necesaria en el caso de que al cerrar el último ramal en  $2L/c$  obtuviéramos un  $\Delta h$  mayor que el admisible . En ese caso procederíamos a cierres parciales de esta última válvula y en tantas veces como sea necesario.

El proceso de cálculo para este "último cierre" puede realizarse como sigue :

La expresión general de las pérdidas localizadas es :

$$j = K \frac{U^2}{2.g}$$

Con k para cada grado de cierre y que puede obtenerse de las tablas de "Teoría de los Movimientos Transitorios", ítem 7.2 , o de un ajuste realizado a partir de mediciones experimentales de la Universidad de La Plata ( válida para válvulas aguja ) y que da la ecuación:

$$K = \frac{6,2641}{G^{2,098}}$$

En la que G es el "grado de cierre".

Por ecuación de continuidad :

$$j = K \frac{Q^2}{2.g.\Omega^2} = 16K \frac{Q^2}{2.g.\pi^2.D_n^4} = 0,0827K \frac{Q^2}{D_n^4}$$

Haciendo :

$$\eta = 0,0827 \frac{K}{D_n^4} \tag{26}$$

Se tiene :

$$j = \eta.Q^2 \tag{27}$$

Por otra parte , para determinar el caudal (y en consecuencia la velocidad) para cada grado de cierre, planteamos la ecuación para el acueducto principal en serie con el último tramo, que resulta:

$$h + N g Q^{1,85} + \Delta j_{p_0} + j = H$$

Reemplazando la (27) y la (13) e igualando a cero, se tiene que :

$$h + N g Q^{1,85} + M + \eta g Q^2 - H = 0 \tag{28}$$

La ecuación (28) puede ser resuelta por el método iterativo de "RAPHSON-NEWTON" ("Teoría de los Movimientos transitorios" , ítem 7.5).

### 3. PROCESO DE CÁLCULO Y DISEÑO

#### 3.1. CÁLCULO APROXIMADO PARA RÉGIMEN PERMANENTE

Se usa la ecuación (2) :

$$Q = 0,275 C. D^{2,62} \frac{E_1 H}{D_1} k^{0,54}$$

#### 3.2. CONFIGURACIÓN DE RAMALES Y VÁLVULAS

Se proyecta la configuración de ramales en paralelo, con diámetros decrecientes y respetando el mismo diámetro de la conducción, para el primer tramo, al que siempre se le coloca una válvula mariposa (más económica) . En el resto de los ramales se instalan válvulas agujas o mariposa a criterio del proyectista.

Por ser las válvulas mariposa más económica, un criterio razonable será seleccionar estas válvulas y considerar una única válvula aguja en el último ramal, de resultar necesaria la regulación fina .

Se recomienda como muy apropiado el esquema de 3 ramales para diámetros de conducción mayores al 600 y 2 ramales para diámetros menores de 500 mm .

Una guía para la selección de los diámetros de ramales y válvulas en este caso es la siguiente:

$$\frac{D_1}{3} \geq D_2 \geq \frac{D_1}{5}$$

$$D_2 \geq D_3 \geq \frac{D_2}{3}$$

#### 3.3 CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL RAMAL PRINCIPAL ( D)

- Se cierra  $V_{M_1}$  en  $2L/c$ .
- Se adopta el diagrama de envolventes máximas admisibles.
- Con las (25a) y (25b) se calculan V y Q.
- Con las (8) , (9) y (10) se calculan A,B y C.
- Con la (22) se calcula  $\chi$  .
- Con la (23) se clacula  $\Delta J_{p_0}$  .
- Con la (15) se calcula el diámetro del orificio d .
- Con las (24) se calculan  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  que deben verificar la (18) .

### 3.4. CÁLCULOS PARA EL CIERRE DEL SEGUNDO Y DEL ÚLTIMO RAMAL

- a) En caso de tener más de 3 ramales , se procede para los  $n - 2$  ramales restantes de la misma forma que en 3.3., sin los ítems f) y g) puesto que el orificio ya está dimensionado y considerando además que  $Q_2$  es nulo.
- b) Si el  $\Delta h$  ocasionado por el cierre de un ramal implica valores mayores que  $\Delta h_{ADM}$ , se puede proceder de dos maneras :
- b<sub>1</sub> ) Se adopta un nuevo ramal de forma de mejorar la capacidad de erogar del dispositivo y disminuir así  $h$  .
- b<sub>2</sub> ) Se analiza el cierre secuencial del ramal anterior en intervalos  $2L/c$ . (En el ítem 4 se analizan las ecuaciones a utilizar como así también la discusión sobre la conveniencia o no de esta alternativa b<sub>2</sub>) .
- c) El cierre del penúltimo ramal da un caudal a evaluar con la (28), la que a su vez permite evaluar el cierre secuencial del último ramal de ser este necesario .

### 4. CIERRE SECUENCIAL DE TRAMOS INTERMEDIOS

Tal como se indicó en 3.4.b<sub>2</sub>) , una alternativa teóricamente atractiva para disminuir excesos en  $\Delta h$  por cierres parciales, es la de adoptar cierre secuencial del tramo intermedio cuyo cierre en  $2L/c$  originaría el excesivo valor de sobrepresiones apuntado.

Los cálculos para este caso pueden realizarse con las ecuaciones que siguen :

Recordando la (16) :

$$\Delta J_1 + \Delta J_{p_0} + \Delta J = H$$

Teniendo en cuenta las (5), (13) y (21) :

$$A \cdot Q^{1,85} + M \cdot Q^2 + \chi \cdot Q^{1,85} - H = 0$$

$$b + \chi g Q^{1,85} + M \cdot Q^2 - H = 0 \quad (30)$$

Ecuación que permite la evaluación de  $Q$  por el método iterativo de RAPHSON-NEWTON.

Se impone el cierre en  $n$  intervalos de  $2L/c$  segundos de duración y los subsiguientes intervalos de descuento de  $nL/c$  segundos .

Cada intervalo lleva a valores del grado de cierre que tengan un efecto regulador en el caudal erogado por el dispositivo, para lo que se recurre a las tablas de  $K$  ("Teoría de los Transitorios", ítem 7.2.) .



Evidentemente así aumentaremos el valor de  $\chi$  de la (30) posibilitando el cálculo del efecto regulador buscado .

Para pasar de los valores de K a valores de  $\chi$  se tiene la siguiente igualdad :

$$\Delta J_{HW} = \Delta J_C$$

En la que :

- $\Delta J_{HW}$  es la pérdida localizada evaluada en función de longitudes equivalentes y con la ecuación de Hazen y Williams .
- $\Delta J_C$  es la pérdida evaluada por la tradicional ecuación cuadrática en función de Q (26) :

$$\therefore \frac{L_e \cdot Q_j^{1,85}}{(0,275 C)^{1,85} \cdot D_j^{4,85}} = \frac{0,0827 \cdot K \cdot Q_j^2}{D_j^4}$$

Teniendo en cuenta las (26) , (7b) y (10b) , un ramal genérico j responderá a la igualdad :

$$J Q_j^{1,85} = \eta \cdot Q_j^2 \quad \therefore \quad J = \eta \cdot Q_j^{0,15} \tag{32}$$

Recordando la (22) :

$$\chi = \frac{L_e \cdot Q_j^{1,85}}{(0,275 C)^{1,85} \cdot D_j^{4,85}} + \dots + \frac{1}{K_j} + \frac{L_e \cdot Q_j^{1,85}}{(0,275 C)^{1,85} \cdot D_j^{4,85}}$$

Lo que significa que J (y en consecuencia  $\chi$ ) resulta función de Q .

Esta indeterminación puede salvarse en forma aproximada teniendo en cuenta que la función  $Q^{0,15}$  varía poco con respecto a la unidad en el rango de caudales entre 0,4 y 2m<sup>3</sup>/s, y relativamente poco, entre 0,05 y 0,4 , tal como puede apreciarse en la tabla adjunta.

En la nombrada tabla , y el seguimiento que el proyectista va haciendo de los caudales involucrados, puede estimar en primera aproximación  $Q_j^{0,15}$  y corregir así el valor de  $\eta$  para obtener el de J.

Este hecho da lugar a la discusión sobre la validez de esta alternativa, adelantada en 3.4.b<sub>2</sub>).

En efecto, a la imprecisión que implica la estimación de  $Q_j^{0,15}$ , se suma la indefinición (mucho más importante) de los valores de  $K$  en la zona de regulación de las válvulas, las que se dan para valores de cierre a partir del orden del 80 % y con efecto regulador creciente a medida que nos acercamos al 100 % .

Por lo tanto, el cálculo puede llevar a valores que necesariamente deben ser ajustados muy sutilmente y en forma empírica una vez construido e instalado el dispositivo en obra .

Todo lo expuesto parece aconsejar como un criterio sumamente más práctico (de encontrarse con el problema que origina este análisis) disponer de un nuevo ramal con cierre en  $2L/c$  . Ello no obstante ponemos a consideración del proyectista la alternativa y la posibilidad de evaluarla numéricamente en primera aproximación .

Nota : Evidentemente , la solución de la (16) podría abordarse también, con la expresión cuadrática de DARCY WEISBACH ( $j = f.v^2/2g.D$ ). Pero la variación de  $f$  con  $Q$  daría lugar a un problema similar y con el agravante de una mayor complejidad matemática .

### 5. CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA TODAS LAS VÁLVULAS ABIERTAS

De mediar interés en la determinación más exacta del caudal total y de los caudales en cada tramo que pasan con las válvulas totalmente abiertas, se pueden realizar los cálculos que siguen :

La pérdida en el tramo principal de longitud  $L$  será :

$$\Delta J_1 = A \cdot Q^{1,85}$$

Mientras que la pérdida debida al dispositivo con  $n$  tramos en paralelo resultará :

$$\Delta J_2 = \chi' \cdot Q^{1,85}$$

Debe cumplirse la ecuación :

$$\Delta J_1 + \Delta J_2 = H$$

$$\therefore (A + \chi') \cdot Q^{1,85} = H$$

$$\therefore Q = \frac{H^{0,54}}{A + \chi'} \quad (33)$$

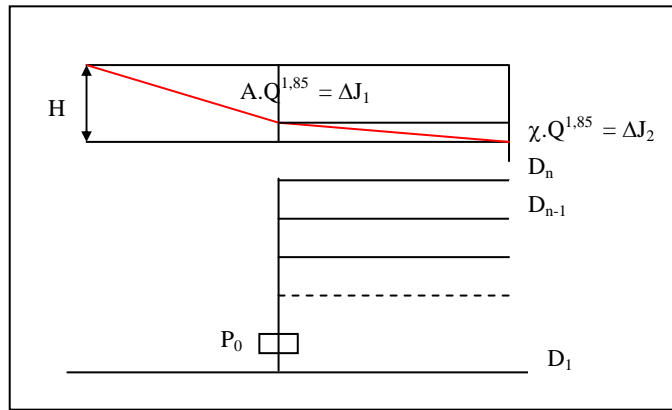
En la que  $\chi'$  será :

$$\chi' = \frac{1}{\left(\frac{K}{A} + \frac{K}{B}\right) Q^{0,54}} \quad (34)$$

En la anterior se tiene :

$$A' = \frac{L_{e1}}{b \cdot 2,275 C_a g^{0,85} \cdot D_1^{4,85}}$$

Mientras que el coeficiente equivalente  $B'$  surge de considerar el tramo de diámetro  $D_1$ , en paralelo con el tramo con la placa orificio, el que a su vez está en serie con el resto de los tramos en paralelo y cuyo coeficiente equivalente es  $\chi$ .



**Figura 7**

Equivalencia de ramales en paralelo

Para el ramal equivalente se tiene la pérdida en la placa orificio en serie con el resto de los ramales en paralelo, por lo que la pérdida será :

$$\Delta J_2 = \chi' \cdot Q^{1,85} = B' \cdot Q_2^{1,85} = A' \cdot Q_1^{1,85}$$

Como :

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Reemplazando:

$$\frac{\Delta J_2}{\chi' k^{0,54}} = \frac{\Delta J_2}{A' k^{0,54}} + \frac{\Delta J_2}{B' k^{0,54}}$$

Eliminando  $\Delta J_2$  :

$$\chi' = \frac{1}{\frac{A' k^{0,54}}{\chi' k^{0,54}} + \frac{B' k^{0,54}}{\chi' k^{0,54}}} \cdot Q^{1,85} \tag{35}$$

En la que  $B'$  deberá cumplir necesariamente con la condición :

$$B' \cdot Q_2^{1,85} = M \cdot Q_2^2 + \chi \cdot Q_2^{1,85}$$

En forma similar a lo tratado en el ítem 4 , que nos llevó a la ecuación (32) , resolvemos el problema de pasar de la variación cuadrática de las pérdidas localizadas a una forma apta para longitudes equivalentes ( HAZEN y WILLIAMS ) con la igualdad :

$$M \cdot Q_2^2 = M^* \cdot Q_2^{1,85}$$

$$\therefore M^* = M \cdot Q_2^{0,15} \tag{36}$$

Es decir que :

$$B' = M^* + \chi \tag{37}$$

Con lo que la (35) queda :

$$\chi' = \frac{M}{k} \cdot 0,54 + \frac{1}{\frac{M^*}{k} + \chi} \cdot 0,54 \cdot Q^{1,85} \tag{38}$$

El proceso debe realizarse entonces por iteraciones puesto que M\* es función de Q Su valor es fácil de obtener para un primer tanteo, teniendo en cuenta que casi todo el caudal pasará por el tramo de diámetro D puesto que con ese criterio se diseña el dispositivo al prever una gran pérdida de carga para los ramales en paralelo con el principal.

En resumen, aceptando por ejemplo para el primer tanteo  $Q_2 = 0,05 \cdot Q$  , del cálculo o de la tabla obtenemos  $Q_2^{0,15}$  y es inmediato M\* .

La solución se tendrá cuando se verifique con suficiente aproximación que:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Esto se logra fácilmente , puesto que la incertidumbre en la presunción de Q<sub>2</sub> para la determinación de M\* dá variaciones prácticamente irrelevantes para el cálculo de χ', que puede salvarse además en el segundo tanteo .

Para la determinación de los caudales Q<sub>i</sub> que reparten la pequeña porción del caudal restante en n - 1 ramales en paralelo, valen las ecuaciones (24), teniendo en cuenta que el caudal a fraccionar es ahora Q<sub>2</sub> y que el coeficiente χ es el que corresponde a los n - 1 ramales.

## 6. EJEMPLO NUMÉRICO

Diseñaremos un dispositivo para el cierre de un acueducto con los datos que siguen :

$$L_1 = 32404 \text{ m}$$

$$\text{Material F.C. } \therefore C = 148$$

$$D = 1100 \text{ mm} = 1,1 \text{ m}$$

$$\text{Cota estática : } 348,40 \text{ m}$$

$$\text{Cota cisterna de llegada } 295,40 \text{ m}$$

$$\therefore H = 53 \text{ m}$$

## 6.1 ALTERNATIVA 1 : 3 RAMALES EN PARALELO

### 6.1.1 Cálculo Aproximado para Régimen Permanente

De la ecuación (2) :

$$Q = 0,275 \cdot 148 \cdot 1,1^{2,62} \cdot \frac{53}{32404} \cdot 1^{0,54} = 1,6347 \text{ m}^3/\text{S} \cong 1,64 \text{ m}^3/\text{S}$$

### 6.1.2 Configuración de Ramales y Válvulas :

Adoptamos 3 ramales de acero en paralelo y siguiendo la recomendación fijamos  $D_2 = 350$  mm y  $D_3 = 200$  mm.

Para el primer ramal instalamos  $VM\phi_1$  de 1100, para el segundo  $VM\phi_2$  de 350 y para el tercero  $VM\phi_3$  de 200 mm .

Como se desprende de los ramales , los valores de pérdidas de carga de los ramales T, curvas a 90 grados y reducciones son valores despreciables frente a las pérdidas a originar por el orificio  $\Delta J_{p_0}$  y la reducción de diámetros del dispositivo frente al gran diámetro original .

En consecuencia los despreciamos sin cometer error sensible .

Adoptamos  $L_1' \cong L_2 \cong L_3 = 2\text{m}$ .

Para el acero ,  $C_a \cong 135$

### 6.1.3 Cálculos para el Cierre de $VM\phi_1$ :

a) Se cierra  $VM\phi_1$  en  $2L/c$  .

b) Adoptamos  $\Delta h_{ADM} = 30 \text{ m}$ .

c)

$$V = U - \frac{9,81}{1000} \frac{30}{2} + \frac{53}{2}$$

$$U = \frac{4.1,64}{3,14 \cdot 1,1^2} = 1,723 \text{ m/s}$$

$$\therefore V = 1723 - \frac{9,81}{1000} 56,5 = 1,169 \text{ m/s}$$

$$Q = 1,169 \frac{3,14 \cdot 1,1^2}{4} = 1,01 \text{ m}^3/\text{s}$$

d)  $A = \frac{32404}{0,275 \cdot 148 \cdot 0,85 \cdot 1,1^{4,85}} = 21,483$

$$B = \frac{2}{0,275 \cdot 135 \cdot 0,35 \cdot 0,85^{4,85}} = 0,4059$$

$$C = \frac{2}{0,275 \cdot 135 \cdot 0,2 \cdot 0,85^{4,85}} = 6,1256$$

e)  $\chi = \frac{1}{\frac{1}{0,4059} k^{0,54} + \frac{1}{6,1256} k^{0,54}} = \frac{1}{\frac{1}{0,627 + 0,375} Q^{1,85}} = 0,2766$

f)  $\Delta J_{p_0} = 53 - 21,483 + 0,2766 \cdot 1,01^{1,85} = 30,84 \text{ m}$ .  
 $\Delta J_{p_0} = 30,84 \text{ m}$ .

g)  $d = 0,35 \sqrt{\frac{1}{0,61 + 2,121 \frac{0,35^2}{1,01} \sqrt{30,84}}} = 0,245 \text{ m}$ .

$d = 245 \text{ mm}$ .

$$\begin{aligned}
 \text{h) } Q_1 &= \frac{0,2766}{6,1256} K^{0,54} 1,01 = 0,821 \text{ m}^3/\text{s} \\
 Q_2 &= \frac{0,2766}{6,1256} K^{0,54} 1,01 = 0,1896 \text{ m}^3/\text{s} \\
 Q &= 0,821 + 0,1896 = 1,0106 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{VERIFICA})
 \end{aligned}$$

**6.1.4. Cálculos para el Cierre del Ramal D<sub>2</sub> (350 mm) :**

Al quedar el tramo D<sub>1</sub> en serie con D<sub>3</sub>, la ecuación es la (28), que queda así :

$$M + C Q^{1,85} + \eta Q^2 - H = 0$$

En las que :

$$M = \frac{0,0827}{0,35^4} \xi = 5,511 \xi$$

$$\eta = \frac{0,0827}{0,2^4} K = 51,69 K$$

$$\begin{aligned}
 \xi &= \frac{f L}{1,49 R^2} - 1 = \frac{f L}{1,49 \cdot 0,61 \cdot d^2} - 1 = \frac{f L}{1,49 \cdot 0,245^2} - 1 \\
 \xi &= 5,5018
 \end{aligned}$$

$$\therefore M = 5,511 \cdot 5,5018 = 30,32$$

De las tablas de "Teoría de los Transitorios" ítem 7.2. , para Válvula mariposa totalmente abierta es K = 0,07

$$\therefore \eta = 51,69 \cdot 0,07 = 3,618$$

Por lo que la (28) resulta :

$$30,32 + 6,1256 Q^{1,85} + 3,618 Q^2 - 53 = 0$$

$$\therefore 27,6086 Q^{1,85} + 33,938 Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con 0,85 m<sup>3</sup>/s :

$$\begin{aligned}
 \therefore 27,6086 \cdot 0,85^{1,85} + 33,938 \cdot 0,85^2 - 53 &= \\
 &= 20,44 + 24,52 - 53 = - 8,039
 \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta Q_1 = \frac{-8,039}{1,85 \cdot 27,6086 \cdot 0,85^{0,85} + 2 \cdot 33,938 \cdot 0,85} = 0,0786 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,85 + 0,0786 = 0,9286 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore 26,6086 \cdot 0,9286^{1,85} + 33,938 \cdot 0,9286^2 - 53 =$$

$$= 23,2009 + 29,2646 - 53 = -0,53 \cong 0$$

$$\therefore Q = 0,93 \text{ m}^3/\text{s} \quad ; \quad V = \frac{4 \cdot 0,93}{3,14 \cdot 1,1^2} = 0,9791$$

$$\frac{\Delta J}{2} = \frac{A \cdot Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 0,93 = 9,989 \text{ m}$$

$$\Delta H = \frac{1000}{9,81} (0,169 - 0,979) \cdot 9,989 = 9,37 < 30 \text{ m. (VERIFICA)}$$

El valor de Q de 0,93 m<sup>3</sup>/s implica dejar para el último ramal una acción reguladora muy importante .

### 6.1.5. Cálculos para el Cierre del Ultimo Ramal :

Dado que aún resta obturar un elevado caudal de 0,93 m<sup>3</sup>/s, se proyecta cierre secuencial de la última válvula en 4 intervalos 2L/c con 3 "descansos" intermedios de 2L/c cada uno.

a) En el primer cierre de VMφ<sub>3</sub> en 2L/c cerramos hasta 25 % ; K = 1,9. La ecuación resulta :

$$27,6086 Q^{1,85} + 30,32 + \eta Q^2 - 53 = 0$$

$$\eta = 51,69 \cdot 1,9 = 98,21$$

$$\therefore 27,6086 \cdot Q^{1,85} + 128,53 \cdot Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con Q = 0,57 m<sup>3</sup>/s :



$$\begin{aligned} \therefore 27,6086\overline{0,57}^{1,85} + 128,53\overline{0,57}^2 - 53 &= \\ = 9,759 + 41,759 - 53 &= -1,48 \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta Q = \frac{-1,48}{1,85 \cdot 27,6086\overline{0,57}^{0,85} + 2 \cdot 128,53\overline{0,57}} = 0,008305$$

$$\therefore Q_0 = 0,57 + 0,008305 = 0,5783 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \therefore 27,6086\overline{0,5783}^{1,85} + 128,53\overline{0,5783}^2 - 53 &= \\ = 10,0237 + 42,9844 - 53 &= 0,0081 \text{ m} \approx 0 \end{aligned}$$

$$\therefore \boxed{Q = 0,578 \text{ m}^3/\text{s}} \quad ; \quad \boxed{V = \frac{4 \cdot 0,578}{3,14 \cdot 1,1^2} = 0,6085 \text{ m/s}}$$

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A \cdot Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 0,93 = 9,99 \text{ m}$$

$$\therefore \Delta h = \frac{1000}{9,81} (0,9791 - 0,6085) - 9,99 = 27,79 \text{ m} < 30 \text{ m} \quad (\text{VERIFICA})$$

Nótese el notable efecto regulador logrado dado que con un 25 % de carrera estamos reduciendo Q en 0,352 m<sup>3</sup>/s ( 21 % del total ) lo que es impensable con un solo ramal (una única válvula) .

b) En el segundo cierre de VMφ<sub>3</sub> cerramos hasta 50 % ; K = 15 :

$$\eta = 51,69 \cdot 15 = 775,35$$

La ecuación resulta :

$$27,6086 Q^{1,85} + 805,67 \cdot Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con Q = 0,25 m<sup>3</sup>/s :

$$\therefore 27,6086 \overline{0,25}^{1,85} + 805,67 \overline{0,25}^2 - 53 = -0,525 \text{ m.}$$

$$\Delta Q_1 = - \frac{-0,525}{1,8 \cdot 27,6086 \overline{0,25}^{0,85} + 2 \cdot 805,67 \cdot 0,25} = 0,00125$$

$$\therefore Q_1 = 0,25 + 0,00125 = 0,25125 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \therefore 27,6086 \overline{0,25125}^{1,85} + 805,67 \overline{0,25125}^2 - 53 &= \\ = 2,144 + 50,849 - 53 &= 0,00317 \text{ m.} \cong 0 \quad (\text{VERIFICA}) \end{aligned}$$

$$\therefore Q = 0,0251 \text{ m}^3/\text{s} ; V = \frac{4 \cdot 0,251}{3,14 \cdot 1,1^2} = 0,264 \text{ m/s}$$

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A \cdot Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 0,578 = 6,209 \text{ m.}$$

$$\Delta h = \frac{1000}{g} (b \cdot 6,6085 - 0,264 \cdot g \cdot 6,209) = 2891 \text{ L}$$

$$\Rightarrow \Delta h = 30,00 \text{ m. (VERIFICA)}$$

Otra vez, el efecto regulador es evidente , pues con solo un 25 % más de cierre, hemos reducido Q en 0,327 m<sup>3</sup>/s ( un 19,9 % del total ).

c) En el tercer cierre de VMφ<sub>3</sub> cerramos hasta 80 % ; K = 200

$$\therefore \eta = 51,69 \cdot 200 = 10338$$

La ecuación queda :

$$27,6086 Q^{1,85} + 10368,38 \cdot Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con Q = 0,07 m<sup>3</sup>/s :

$$\begin{aligned} 27,6086 \overline{0,07}^{1,85} + 10368,38 \overline{0,07}^2 - 53 &= \\ = 0,2016 + 50,805 - 53 &= -1,99 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta Q_1 = \frac{-1,99}{1,85 \cdot 27,6086 \cdot 0,07^{0,85} + 2 \cdot 10368,38 \cdot 0,07} = 0,001365$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,07 + 0,001365 = 0,07136 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \therefore 27,6086 \cdot 0,07136^{1,85} + 10368,38 \cdot 0,07136^2 - 53 &= \\ = 0,2088 + 52,7983 - 53 &= 0,00717 \text{ m} \cong 0 \quad (\text{VERIFICA}) \end{aligned}$$

$$\therefore Q = 0,0713 \text{ m}^3/\text{s} ; V = \frac{40,0713}{3,141,1^2} = 0,075 \text{ m/s}$$

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 0,251 = 2,696 \text{ m}$$

$$\therefore \Delta h = \frac{1000}{9,81} (0,264 - 0,075) - 2,696 = 16,57 \text{ m} < 30 \quad (\text{VERIFICA})$$

Con otro 25 % de cierre , Q se redujo en 0,1927 m / s ( 11,75 % del total ) .

d) En el cuarto cierre de VM $\phi_3$  cerramos hasta 100 % ; K =  $\infty$

En este caso ;

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 0,0713 = 0,7658 \text{ m}$$

$$\Delta h = \frac{1000}{9,81} (0,075 - 0) - 0,7658 = 6,88 \text{ m} < 30 \quad (\text{VERIFICA})$$

Por lo que la maniobra de todas las válvulas que implican diagrama de sobrepresiones máximas con Dh  $\leq$  30 m , se resume así :

- a) Cierre en 2L/c de VM $\phi_1$
- b) Descanso de 2L/c
- c) Cierre en 2L/c de VM $\phi_2$
- d) Descanso en 2L/c

- e) Primer cierre  $VM\phi_3$  en  $2L/c$
  - f) Descanso en  $2L/c$
  - g) Segundo cierre de  $VM\phi_3$  en  $2L/c$
  - h) Descanso en  $2L/c$
  - i) Tercer cierre de  $VM\phi_3$  en  $2L/c$
  - j) Descanso en  $2L/c$
  - k) Ultimo cierre de  $VM\phi_3$  en  $2L/c$
- } Cierre Secuencial de  $VM\phi_3$   
en  $14 L/c = 454 \text{ seg}$

$$\text{Tiempo total de maniobra} : 22L/c = (11 \cdot 32404) / 1000 = 714 \text{ s} = 12'$$

## 6.2. ALTERNATIVA 2 : 3 RAMALES EN PARALELO Y CIERRES PARCIALES EN RAMALES 2 Y 3

El análisis de la Alternativa 1 nos indica que el tercer ramal es el que sintetiza una parte muy importante del efecto regulador del dispositivo .

Resulta interesante, desde el punto de vista teórico, pensar en aliviar el efecto del último ramal aumentando el efecto regulador del segundo. Para ello se procede como se indica en el ítem 4 (es decir con cierres secuenciales también para  $VM\phi_2$ ).

### 6.2.1. Cálculos para el Cierre de $VM\phi_3$

Idem 5.1.3.

### 6.2.2. Cálculos para el Cierre del Ramal $D_2$ (350 mm) :

Proyectamos el cierre en 2 maniobras de  $2L/c$  segundos de duración con un "descanso" de  $2L/c$  segundos de duración también.

La ecuación a utilizar es la (30) :

$$b + \chi g Q^{1,85} + M Q^2 - H = 0$$

En la que :

$$\left\{ \begin{array}{l} M = 30,32 \text{ (calculado en 5.1.4)} \\ H = 53 \\ A = 21,483 \\ \chi \text{ es el valor a imponer con el grado de cierre; cerrando hasta } \\ \text{90 \% ; } K = 1000 \text{ (m\u00e1ximo efecto regulador computado en} \\ \text{tabla )} \end{array} \right.$$

De la (26) ,

$$\eta = \frac{0,0827}{0,35^4} K = 5,511 K = 5511$$

De la tabla de  $Q^{0,15}$ , este valor para Q del orden de 0,6 resulta  $\cong 0,92 \therefore B = 4\,960$

De la (2),

$$\chi = \frac{1}{\frac{B}{4960} K^{0,54}} + \frac{1}{\frac{B}{61256} K^{0,54}} \frac{1,85}{Q} = 5,82$$

Por lo que la ecuaci\u00f3n queda :

$$27,3046 Q^{1,85} + 30,32 Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con  $Q_0 = 0,95 \text{ m}^3/\text{s}$  :

$$27,3046 \overline{0,95}^{1,85} + 30,32 \overline{0,95}^2 - 53 = 0$$

$$= 24,8327 + 27,3638 - 53 = -0,803 \text{ m}$$

$$\therefore \Delta Q_1 = - \frac{-0,803}{1,85 \cdot 24,8327 \overline{0,95}^{0,85} + 2 \cdot 27,3638 \cdot 0,95} = 0,008728 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,95 + 0,008728 = 0,9587 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nótese el escaso efecto regulador aún elevando a 90 % de cierre de  $VM\phi_2$ . Además por encontrarnos en una zona muy sensible y con las aproximaciones hechas en las estimaciones de  $Q^{0,15}$ , el valor calculado no resulta demasiado confiable.

Estos cálculos comprueban numéricamente lo adelantado en el ítem 4, cuando se discute sobre lo poco práctico de proyectar maniobras de cierre parciales en los ramales intermedios .

En base a lo expuesto se rechaza esta alternativa .

### 6.3. ALTERNATIVA 3 : 4 RAMALES EN PARALELO

Con la idea de una mejor repartición de los caudales que posibilite una mejor regulación, adoptamos 4 ramales en paralelo con sus correspondientes válvulas mariposa.

Establecemos los diámetros siguientes :

$$D_1 = 1100 \text{ mm}$$

$$D_2 = 300 \text{ mm}$$

$$D_3 = 200 \text{ mm}$$

$$D_4 = 150 \text{ mm}$$

#### 6.3.1. Cálculos para el Cierre de $VM\phi_1$ :

a) , b) y c) ídem 5.1.3

$$d) \quad A = 21,483$$

$$B = \frac{2}{0,275 \cdot 135 \cdot 0,3^{4,85}} = 0,8573$$

$$C = \frac{2}{0,275 \cdot 135 \cdot 0,2^{4,85}} = 6,1256$$

$$D = \frac{2}{0,275 \cdot 135 \cdot 0,15^{4,85}} = 24,723$$

e)

$$\chi_1 = \frac{1}{\frac{1}{0,8573} k^{0,54}} + \frac{1}{\frac{1}{6,1256} k^{0,54}} + \frac{1}{\frac{1}{24,723} k^{0,54}} = 0,4007$$

$$\chi_2 = \frac{1}{\frac{1}{6,1256} k^{0,54}} + \frac{1}{\frac{1}{24,723} k^{0,54}} = 2,995$$

f)  $\Delta J_{p_0} = 53 - b - 1,483 + 0,4007 g^{-1,85} = 30,71 \text{ m}$

g)  $d = 0,30 \sqrt{\frac{1}{0,61 + 2,121 \frac{0,3^2}{1,01} \sqrt{30,71}}} = 0,233 \text{ m}$

h)  $Q_1 = \frac{0,4007^{0,54}}{0,8573} k^{0,54} 1,01 = 0,6698 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q_2 = \frac{0,4007^{0,54}}{6,1256} k^{0,54} 1,01 = 0,2316 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = \frac{0,4007^{0,54}}{24,723} k^{0,54} 1,01 = 0,1090 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \Rightarrow Q = 1,0104 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{VERIFICA})$$

**6.3.2. Cálculos para el Cierre del Ramal D<sub>2</sub> (300 mm) :**

La (16) en este caso resulta (teniendo en cuenta las (20) y (21)) :

$$H = A Q^{1,85} + M Q^2 + \chi_1 Q^{1,85} =$$

$$= (A + \chi_1) Q^{1,85} + M Q^2$$

Con  $c_2$  resultante de  $D_3$  y  $D_4$  en paralelo.

La ecuación queda entonces :

$$b + \chi_2 g Q^{1,85} + M Q^2 - H = 0$$

$$M = \frac{0,0827}{0,3^4} \xi = 10,21$$

$$\xi = \frac{E}{G} \frac{0,3^2}{0,61 \cdot 0,233^2} - 1 \frac{I}{K} = 2,9504$$

$$\therefore M = 30,1243$$

La ecuación resulta :

$$(21,483 + 2,995) Q^{1,85} + 30,1243 Q^2 - 53 = 0$$

$$\therefore 24,478 Q^{1,85} + 30,1243 Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con  $Q_0 = 0,92 \text{ m}^3/\text{s}$  :

$$\therefore 24,478 \cdot 0,92^{1,85} + 30,1243 \cdot 0,92^2 - 53 =$$

$$= 20,9789 + 25,4972 - 53 = -6,52$$

$$\therefore \Delta Q_1 = - \frac{-6,52}{1,85 \cdot 24,478 \cdot 0,92^{0,85} + 2 \cdot 30,1243 \cdot 0,92} = 0,06679 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,92 + 0,06679 = 0,9868 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore 24,478 \cdot 0,9868^{1,85} + 30,1243 \cdot 0,9868^2 - 53 =$$

$$= 23,8836 + 29,3342 - 53 = 0,2178 \text{ m (verifica)}$$

$$\therefore Q \cong 0,985 \text{ m}^3/\text{s}$$



Nota : El efecto regulador del tramo de diámetro  $D_2 = 300$  mm es muy escaso (sólo el 2,27%). En consecuencia es aconsejable adoptar una nueva configuración para el dispositivo, que genere más pérdida. Probamos con :

$$D_2 = 250 \text{ mm} ; D_3 = 150 \text{ mm} ; D_4 = 100 \text{ mm}$$

**6.3.3. Cálculos para la Nueva Configuración de Diámetros :**

a), b) y c) ídem 5.1.3.

d)

$$A = 21,483$$

$$B = \frac{2}{0,275 \cdot 135^{1,85} \cdot 0,25^{4,85}} = 2,0755$$

$$C = 24,723$$

$$D = \frac{2}{0,275 \cdot 135^{1,85} \cdot 0,1^{4,85}} = 176,66$$

e)

$$\chi_1 = \frac{1}{\frac{1}{0,0755} k^{0,54} + \frac{1}{24,723} k^{0,54} + \frac{1}{176,66} k^{0,54}} = 1,185$$

$$\chi_2 = \frac{1}{\frac{1}{24,723} k^{0,54} + \frac{1}{176,66} k^{0,54}} = 14,226$$

$$f) \Delta J_{p_0} = 53 - 21,483 + 1,185 \cdot 0,01^{1,85} = 29,91 \text{ m}$$

$$g) d = 0,25 \sqrt{\frac{1}{0,61 + 2,121 \frac{0,25^2}{1,01} \sqrt{29,91}}} = 0,2169 \text{ m}$$

$$h) \quad Q_1 = \frac{0,185}{2,0755} k^{0,54} \cdot 1,01 = 0,7462 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = \frac{0,185}{24,723} k^{0,54} \cdot 1,01 = 0,1958 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_3 = \frac{0,185}{176,66} k^{0,54} \cdot 1,01 = 0,0677 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 1,0097 \text{ m}^3/\text{s} \quad (\text{verifica})$$

i) Cálculos para el cierre del ramal de D = 250 mm :

La ecuación resulta :

$$h + \chi_2 g Q^{1,85} + M Q^2 - H = 0$$

$$M = \frac{0,0827}{0,25^4} \xi = \frac{0,0827}{0,25^4} \frac{M \cdot 0,25^2}{61,0,2169^2} - 1 = 29,37$$

Por lo que :

$$(21,483 + 14,226) Q^{1,85} + 29,37 Q^2 - H = 0$$

$$\therefore 35,709 Q^{1,85} + 29,37 - H = 0$$

Tanteamos con  $Q_0 = 0,85 \text{ m}^3/\text{s}$  :

$$\therefore 35,709 \cdot 0,85^{1,85} + 29,37 \cdot 0,85^2 - 53 =$$

$$= 26,631 + 21,2198 - 53 = - 5,149$$

$$\therefore \Delta Q_1 = - \frac{- 5,149}{1,85 \cdot 35,709 \cdot 0,85^{0,85} + 2 \cdot 29,37 \cdot 0,85} = 0,0479 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,85 + 0,0479 = 0,8979 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore 35,709 \cdot 0,8979^{1,85} + 29,37 \cdot 0,8979^2 - 53 =$$

$$= 29,2583 + 23,6788 - 53 = - 0,0629 \text{ m} \cong 0 \text{ (verifica)}$$

$$\therefore Q \cong 0,895 \text{ m}^3/\text{s} ; V = \frac{4 \cdot 0,895}{3,14 \cdot 1,1^2} = 0,9422 \text{ m}/\text{s}$$

Nótese que se ha logrado un efecto regulador interesante, puesto que Q se reduce de 1,01 a 0,895 m<sup>3</sup>/s (un 11,39 %).

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 1,01 = 10,85 \text{ m}$$

$$\Delta h = \frac{1000}{9,81} (1,169 - 0,9422) - 10,85 = 12,27 < 30 \text{ m (verifica)}$$

j) Cálculos para el cierre del ramal D<sub>3</sub> = 150 mm :

La ecuación resulta :

$$(A + D) Q^{1,85} + (M + h)^2 - H = 0$$

Para D<sub>4</sub> totalmente abierta, x ≅ 0

$$\therefore (21,483 + 176,66) Q^{1,85} + 30,1243 Q^2 - 53 = 0$$

$$198,143 Q^{1,85} + 30,1243 Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con Q<sub>0</sub> = 0,45 m<sup>3</sup>/s :

$$\begin{aligned} \therefore 198,143 \cdot 0,45^{1,85} + 30,1243 \cdot 0,45^2 - 53 &= \\ &= 45,2295 + 6,100 - 53 = -1,67 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta Q_1 = - \frac{-1,67}{1,85 \cdot 198,143 \cdot 0,45^{0,85} + 2 \cdot 30,1243 \cdot 0,45} = 0,007838 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,45 + 0,007838 = 0,4578 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \therefore 198,143 \cdot 0,4578^{1,85} + 30,1243 \cdot 0,4578^2 - 53 &= \\ &= 46,6905 + 6,313 - 53 = -0,00397 \text{ m} \cong 0 \text{ (verifica)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &\cong 0,46 \text{ m}^3/\text{s} ; V = \frac{4 \cdot 0,46}{3,14 \cdot 1,1^2} = 0,484 \text{ m/s} \\ \frac{\Delta J^*}{2} &= \frac{A Q}{2} = \frac{21,483}{2} \cdot 0,895 = 9,61 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\Delta h = \frac{1000}{9,81} \cdot 0,9422 - 0,484 \cdot 9,61 = 37,09 \text{ m} > 30 \text{ m}$$

Puede optarse por recalcular todo con un diámetro un rango mayor para D4 (150mm) o, lo que parece más práctico, elevar el valor de Dh<sub>adm</sub> a 40 m y delimitar las clases con este nuevo valor. Adoptamos este criterio.

k) Cálculos para el cierre del último ramal :

La ecuación resulta :

$$\begin{aligned} 198,143 Q^{1,85} + (30,1243 + h) Q^2 - 53 &= 0 \\ \text{Con } \eta &= \frac{0,0827}{0,1^4} K = 827 K \end{aligned}$$

Primer cierre en 2L/c hasta 25% cierre; K = 1,9

$$\therefore h = 827 \cdot 1,9 = 1571 \text{ (excelente efecto regulador)}$$

$$\therefore 198,143 Q^{1,85} + 1601 Q^2 - 53 = 0$$

Tanteamos con  $Q_0 = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$  :

$$\begin{aligned} \therefore 198,143 \cdot \overline{0,18}^{1,85} + 1601 \cdot \overline{0,18}^2 - 53 &= \\ &= 8,3029 + 51,87 - 53 = 7,1753 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta Q_1 = - \frac{7,1753}{1,85 \cdot 198,143 \cdot \overline{0,18}^{0,85} + 2 \cdot 1601 \cdot 0,18} = - 0,01084 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_1 = Q_0 + \Delta Q_1 = 0,18 + 0,01084 = 0,16916 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \therefore 198,143 \cdot \overline{0,16916}^{1,85} + 1601 \cdot \overline{0,16916}^2 - 53 &= \\ &= 7,4016 + 45,8127 - 53 = 0,21 \text{ m} \cong 0 \text{ (verifica)} \end{aligned}$$

$$\therefore Q \cong 0,169 \text{ m}^3/\text{s} ; V = \frac{4 \cdot 0,169}{3,14 \cdot 1,1^2} = 0,1779 \text{ m/s}$$

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A Q}{2} = \frac{21,483}{2} 0,46 = 4,94 \text{ m}$$

$$\Delta h = \frac{1000}{9,81} (0,484 - 0,1779) - 4,94 = 26,26 \text{ m} < 40 \text{ m (verifica)}$$

Se procede luego al cierre del último caudal en  $2L/c$ , con lo que :

$$\frac{\Delta J^*}{2} = \frac{A Q}{2} = \frac{21,483}{2} 0,169 = 1,8153 \text{ m}$$

$$\Delta h = \frac{1000}{9,81} (0,1779 - 0) - 4,94 = 13,194 \text{ m} < 40 \text{ m (verifica)}$$

l) La maniobra de cierre en resumen queda así :

- Cierre de  $D_1$  en  $2L/c$
- Descanso de  $2L/c$
- Cierre de  $D_2$  en  $2L/c$

- Descanso de  $2L/c$
- Cierre de  $D_3$  en  $2L/c$
- Descanso de  $2L/c$
- Cierre de  $VM\phi_4$  hasta 75 % abierto (cierre 25 %) en  $2L/c$
- Descanso de  $2L/c$
- Cierre último de  $VM\phi_4$  en  $2L/c$

Tiempo total de maniobra =  $18L/c = (18 \cdot 32404) / 1000 \cong 584 \text{ s} \cong 9,72'$

#### 6.4. CÁLCULOS HIDRAÚLICOS PARA TODAS LAS VÁLVULAS ABIERTAS

Su objetivo es el cálculo aproximado de los caudales que pasarán por los tres ramales del dispositivo cuando están todas las válvulas abiertas y tiene caracter de "cálculo complementario" puesto que no es esencial para la evaluación del dispositivo de cierre secuencial de tramos en paralelo.

La teoría y ecuaciones disponibles se han desarrollado en el ítem 5. En el presente realizamos el cálculo para la primer alternativa estudiada en 6.1. ,consistente en tres ramales en paralelo de diámetros  $D_1 = 1100 \text{ mm}$ ,  $D_2 = 350 \text{ mm}$  y  $D_3 = 200 \text{ mm}$  y sus correspondientes válvulas mariposa.

RESUMEN DE DATOS	}	$D_1 = 1100 \text{ mm} ; D_2 = 350 \text{ mm} ; D_3 = 200 \text{ mm}$ $A = 21,483 ; B = 0,4059 ; C = 6,1256$ $c = 0,2766 ; M = 30,32 ; H = 53 \text{ m}$ $A' = \frac{2}{b_{0,275}^{1,35} g^{3,85} 1,1^{4,85}} = 0,001572$
---------------------	---	--

Aceptamos para evaluar  $Q_2^{0,15}$  que el 95 % de  $Q$  pasa por  $D_1 \therefore Q_2 = 0,05 Q = 0,0817 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $\therefore Q_2^{0,15} = 0,6868 \therefore M^* = 0,6868 \cdot 30,32 = 20,8252 \therefore B' = M^* + \gamma = 20,8252 + 0,2766 = 21,1018$ .  
 Por lo que :

$$\chi' = \left[ \frac{1}{\left(\frac{1}{0,001572}\right)^{0,54} + \left(\frac{1}{21,1018}\right)^{0,54}} \right]^{1,85} = 0,001565$$

El caudal principal resulta :

$$Q = \frac{53}{21,483 + 0,001565} Q^{0,34} = 1,6284 \text{ m}^3/\text{s} \cong 1,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_1 = \frac{Q^{0,54}}{0,001572} = \frac{1,6284^{0,54}}{0,001572} = 1,62448 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_2 = \frac{Q^{0,54}}{21,1018} = \frac{1,6284^{0,54}}{21,1018} = 0,009586 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1,62448 + 0,009586 = 1,63406 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tanteamos nuevamente ahora teniendo en cuenta que :

$$Q_2^{0,15} = 0,498$$

$$M^* = 0,498 \cdot 30,32 = 15,099$$

$$B' = 15,3759$$

Por lo que :

$$\chi' = \left[ \frac{1}{\left(\frac{1}{0,001572}\right)^{0,54} + \left(\frac{1}{15,099}\right)^{0,54}} \right]^{1,85} = 0,00156169$$

Nótese que prácticamente  $\chi'$  no ha cambiado, pero sí ha cambiado  $Q_2$  puesto que ahora :

$$Q_2 = \frac{1,6284^{0,34}}{15,3759} = 0,011362 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tanteamos nuevamente , ahora  $Q_2^{0,15} = 0,51 \therefore M = 15,46$  por lo que el valor  $B'=5,7366$  a obtener es  $Q_2 = 0,011 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\therefore Q \cong 1,625 + 0,011 = 1,636 \text{ m}^3/\text{s}$$

Nótese que el rango de aproximación de las ecuaciones utilizadas impiden evaluar con exactitud  $Q_2$  y en consecuencia los caudales que pasarán por todos los ramales en paralelo al conducto principal de diámetro  $D_1$  ; por lo que esta verificación auxiliar pierde interés.