

225
741



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

ANALISIS DE FENOMENOS TRANSITORIOS
EN SISTEMAS DE BOMBEO

Tesis Profesional

Que para obtener el Título de
INGENIERO CIVIL

presenta

ALFREDO MONTAÑO GABILONDO

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

	PAG.
Introducción	1
1.- CONSIDERACIONES SOBRE LOS METODOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS DE LOS FENOMENOS TRANSITORIOS	4
1.1 Descripción de algunos métodos.	
1.2 Desarrollo del método de Características.	
2.- TRATAMIENTO MATEMATICO DE ALGUNOS FRONTERAS TIPICAS O COMUNES EN UN SISTEMA DE BOMBEO	26
2.1 Concepto de frontera	
2.2 Tuberia conectada a un estanque con válvula en el otro extremo que se cierra con una determinada Ley de Cierre.	
2.3 Válvula intermedia.	
2.4 Tanque de Oscilación.	
2.5 Cámara de Aire.	
2.6 Bifurcación.	
2.7 Bombas.	

PAG.

3.- IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA PRO- -
PUESTA EN LA COMPUTADORA Y UN EJEMPLO -
DE APLICACION

69

- 3.1 Implementación de la metodología
propuesta en la computadora.
- 3.2 Ejemplo de Aplicación.
- 3.3 Comentarios

INTRODUCCION

Cuando un sistema de conducción de agua se encuentra trabajando a presión es común la aparición de los llamados "fenómenos transitorios". Estos fenómenos son producidos por la variación repentina del gasto en la conducción, misma que se presenta generalmente por la ejecución de maniobras en el sistema como apertura o cierre de válvulas, arranque de bombas, paro en una o varias de las unidades del sistema de bombeo, o bien por un paro total del sistema debido a una falla eléctrica.

Los "fenómenos transitorios" consisten en la formación de sobrepresiones o subpresiones en el sistema, los cuales en ocasiones alcanzan tal magnitud que pueden provocar el colapso de la conducción.

Hoy en día es cada vez más común la construcción de grandes sistemas de bombeo, así podemos mencionar sistemas como Cutzamala, Rio Colorado - Tijuana, Linares - Monterrey, etc.

Considerando que los costos de este tipo de sistema de conducción son a menudo muy altos, se justifica la realización de un análisis en detalle que permita conocer la magnitud de estos fenómenos, así como los puntos de la conducción más afectados por éstos, a fin de proponer una protección adecuada al sistema.

Durante mucho tiempo en nuestro país se han proyectado y construido sistemas de conducción sin el conocimiento en detalle de los problemas, que podrían ocasionar los "fenómenos transitorios" en ellos, esto en parte propiciado por la escasa informa-

ción existente entonces acerca de este tema, misma que a través de los años ha ido creciendo y desarrollándose hasta poner a disposición de cualquier ingeniero, métodos de análisis de este tipo de fenómenos, de alto grado de aproximación y que con ayuda de las computadoras son flexibles y de aplicación sencilla. En la actualidad es cada vez más común la realización de este tipo de análisis en sistemas de conducción de magnitud considerable. Sin embargo un gran porcentaje de estos análisis son llevados a cabo a nivel de proyecto ejecutivo, ahora bien, en esta etapa de proyecto ya se han definido en el sistema las características de la conducción, la topografía del terreno por donde pasará la línea, el equipo de bombeo que se utilizará, etc. lo que significa una gran limitación en el análisis, pues a este nivel el estudio se reduce a modelar el funcionamiento de la conducción de características ya especificadas, y en función de éste proponer los dispositivos adecuados para que las presiones que se presenten en el sistema sean compatibles con la resistencia de las instalaciones y brindarles así una protección adecuada. El costo de estos dispositivos es en ocasiones un porcentaje considerable del costo total del sistema, dependiendo esto del número y tipo de dispositivos que se hagan necesarios en la conducción que a la vez será función de las características hidráulicas de la conducción, de la topografía en su trazo, del equipo de bombeo, etc., características del sistema que como se mencionó anteriormente, a nivel de proyecto ejecutivo se encuentran perfectamente definidas. Apoyándose en lo anterior puede verse la importancia de que el análisis de fenómenos transitorios sea llevado a cabo a nivel de anteproyecto, pues es a este nivel donde el proyectista debe verificar el grado de factibilidad técnica y económica de las alternativas que se proponen en esta etapa del proyecto, y de ignorar el estudio a este nivel se llevará a cabo la elección de una alternativa ante otras, sin haber considerado en ellas los costos y problemas de construcción y operación en que se incurrirá por la apa-

rición de los fenómenos transitorios.

Hasta hace poco tiempo para la realización de este tipo de análisis era común la utilización de métodos de tipo gráfico ó se migráficos, mismos que presentan poca flexibilidad y exactitud. En la actualidad el desarrollo de las computadoras y la facilidad de acceso a éstas, permite analizar sistemas complejos mediante métodos que en un tiempo fueron considerados como sofisticados y que ahora ya no lo son tanto, algunos de los cuales se comentan en el capítulo uno. Es también en este capítulo - donde se dan los elementos básicos de la metodología que se propone adoptar para el diseño y revisión hidráulica de un sistema de bombeo, misma que es conocida como el "método de las características".

Algunos de los dispositivos y estructuras que se encuentran comúnmente en un sistema de bombeo de importancia como son cámaras de aire, torres de oscilación, válvulas, bombas, etc., requieren de un análisis matemático concordante con el método de las características. Este desarrollo matemático se presenta - en el capítulo dos.

En el capítulo tres se presenta la aplicación del método a un sistema de conducción, lo que permitirá evaluar el nivel y alcance del análisis propuesto.

1.- CONSIDERACIONES SOBRE LOS METODOS UTILIZADOS EN EL ANALISIS DE FENOMENOS TRANSITORIOS

1.1 DESCRIPCION DE ALGUNOS METODOS

Dada la complejidad que presentan en la actualidad algunos sistemas de bombeo y los elevados costos que se involucran en el diseño, construcción y operación de los mismos, se hace necesario que el método que se utilice en el análisis de fenómenos transitorios ofrezca además de una flexibilidad que permita considerar en el estudio todas las estructuras existentes en el diseño del sistema, así como a todos los dispositivos de control propuestos, una exactitud acorde a la importancia del sistema.

Hasta la actualidad se han desarrollado varios métodos que son utilizables en el análisis de fenómenos transitorios, algunos de ellos se han desarrollado pensando en casos especiales por lo que presentan poca flexibilidad en el estudio, otros en cambio son lo suficientemente generales y flexibles para el estudio de sistemas complejos.

A continuación se presenta en forma breve una descripción de algunos métodos con que se cuenta para este tipo de análisis.

a).- METODO GRAFICO

Este método omite la fricción en su desarrollo teórico, -

sin embargo, se usan correcciones para considerarla. Para su derivación son utilizadas las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y de movimiento. Este método ha sido el más práctico y de mayor popularidad en este tipo de análisis hasta la aparición de las computadoras.

Las ventajas que presenta este método son: una buena visualización del fenómeno, una relativa facilidad en análisis de sistemas sencillos de tuberías.

Las desventajas del método son: dificultad para mantener exactitud en el análisis, necesidad de soluciones hipotéticas para muchas condiciones de frontera.

b).- METODO DE LAS CARACTERISTICAS

El método de las características se basa en la transformación de las dos ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y de cantidad de movimiento en cuatro ecuaciones diferenciales totales; la fricción es considerada en su totalidad. Las ecuaciones son expresadas en diferencias finitas y se resuelven con la ayuda de una computadora digital.

Las ventajas que presenta el método son: exactitud en los resultados, dado que no se omiten términos, facilidad en la manipulación de condiciones de frontera, obtención de las cargas y velocidades en tantos puntos de la conducción como lo pretenda el criterio del analista, además como generalmente el método se aplica en computadoras, es -

fácil visualizar en el análisis de un sistema los efectos producidos por los cambios en él, de parámetros como son: diámetro de la tubería, espesores, dimensiones de los dispositivos, características de las bombas, etc.

Durante mucho tiempo se consideró como desventaja del método la necesidad del uso de la computadora para su aplicación.

c).- METODO ALGEBRAICO

A partir de las ecuaciones del método de características, se lleva a cabo el desarrollo de las ecuaciones del método algebraico, por lo mismo estas ecuaciones pueden resolver la mayoría de los problemas resueltos por el método de características.

Las ventajas que presenta el método son que puede ser aplicado sobre varias secciones, sin necesidad de calcular las condiciones en las secciones intermedias, lo que denota lo adecuado del método para el análisis en sistemas de conducción sencillos en donde no se necesita el cálculo en ninguna sección interior.

Las desventajas del método son que no se determina la fricción en forma precisa como en el método de las características, por otra parte es necesario ajustar el valor de la celeridad de onda para tener un número entero de secciones de análisis en cada tramo.

d).- METODO DE DIFERENCIAS FINITAS

En lugar del método de características se puede utilizar el método de diferencias finitas de Lax y Keller. Este método tiene las ventajas de que el intervalo de tiempo utilizado es arbitrario, la longitud de las secciones no depende del intervalo del tiempo, y de que tiene aplicaciones muy útiles cuando la celeridad o velocidad sónica en el agua es menor que la velocidad del agua.

Tiene las desventajas de que requiere de gran capacidad de memoria de la computadora utilizada y de que se necesitan plantear un gran número de ecuaciones simultáneas.

Entre estos métodos descritos, para la realización del análisis se ha seleccionado el método de características, dada su flexibilidad y exactitud en el análisis de sistemas complejos.

1.2 DESARROLLO DEL METODO DE LAS CARACTERISTICAS

Tal como se mencionó anteriormente el método de las características consiste en la transformación de las dos ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y de cantidad de movimiento en cuatro ecuaciones diferenciales totales.

Las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento desarrolladas pueden reducirse a las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial X} = 0 \quad \text{continuidad}$$

$$g \frac{\partial H}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V/V = 0 \quad \text{cantidad de movimiento}$$

donde:

H = carga de presión

V = velocidad

X = dirección en la que el fluido tiende a moverse

t = tiempo

D = diámetro

a = celeridad o velocidad de propagación de la onda de presión

g = gravedad

Y que podemos escribir ordenando términos

$$V \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial t} = 0$$

$$g \frac{\partial H}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} V|V| = 0$$

Expresando este sistema en forma matricial

$$\begin{pmatrix} V & a^2/g \\ g & V \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial H}{\partial X} \\ \frac{\partial V}{\partial X} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial H}{\partial t} \\ \frac{\partial V}{\partial t} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{f}{2D} V|V| \end{pmatrix} = 0$$

es decir

$$AU_x + BU_t + d = 0 \quad \text{ec.1.2.1}$$

el sistema de ecuación 1.2.1 se transforma linealmente con un determinante no nulo. Con la matriz Υ se forma un segundo sistema.

$$TAU_x + TBU_t + Ta = 0 \quad \text{ec.1.2.2}$$

Es posible encontrar una matriz diagonal C ,

$$\text{tal que } TA = CTB \quad \text{ec.1.2.3}$$

donde C sea una matriz diagonal.

De la ec.1.2.3 se deduce que $A = CB$

$$\therefore |A - CB| = 0$$

sustituyendo

$$|A - CB| = \begin{vmatrix} V & a^2/g \\ g & V \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} C & 0 \\ 0 & C \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

$$\begin{vmatrix} V-C & a^2/g \\ g & V-C \end{vmatrix} = (V-C)^2 - a^2 = 0$$

de donde

$$V - C = +a \Rightarrow \left. \begin{array}{l} C = V + a \\ C = V - a \end{array} \right\} \Rightarrow C = \begin{vmatrix} V+a & 0 \\ 0 & V-a \end{vmatrix}$$

entonces dada la condición $TA = CTB$

podemos obtener los coeficientes de T

$$\begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V & a^2/g \\ g & V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V+a & 0 \\ 0 & V-a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

desarrollando

$$i) \quad Vt_{11} + gt_{12} = (V+a) t_{11}$$

$$ii) \quad \frac{a^2}{g} t_{11} + Vt_{12} = (V+a) t_{12}$$

$$iii) \quad Vt_{21} + gt_{22} = (V-a) t_{21}$$

$$iv) \quad \frac{a^2}{g} t_{21} + Vt_{22} = (V-a) t_{22}$$

Trabajando con i e ii y suponiendo $t_{12}=1$ se llega a que --
 $t_{11} = g/a$, y trabajando con iii e iv , y suponiendo que --
 $t_{21} = 1$ se llega a que $t_{22} = -a/g$ de donde

$$T = \begin{pmatrix} g/a & 1 \\ 1 & -a/g \end{pmatrix}$$

de ésta manera el sistema transformado

$$CTB = \begin{pmatrix} V+a & 0 \\ 0 & V-a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g/a & 1 \\ 1 & -a/g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (V+a)g/a & V+a \\ V-a & -(V-a)a/g \end{pmatrix}$$

$$TB = \begin{pmatrix} g/a & 1 \\ 1 & -a/g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g/a & 1 \\ 1 & -a/g \end{pmatrix}$$

$$T_a = \begin{pmatrix} g/a & 1 \\ 1 & -a/g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{f}{2D} \quad V/V/ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{2D} \quad V/V/ \\ -\frac{a}{g} \quad \frac{f}{2D} \quad V/V/ \end{pmatrix}$$

Desarrollando en forma de sistema llegamos a

$$(V+a) \frac{g}{a} \frac{\partial H}{\partial X} + (V+a) \frac{\partial V}{\partial X} + g/a \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{f}{2D} \frac{V/V/}{2D} = 0$$

$$(V-a) \frac{\partial H}{\partial X} - (V-a) \frac{a}{g} \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{a}{g} \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{af}{2gD} \frac{V/V/}{2D} = 0$$

ordenando términos

$$\frac{g}{a} \left[(V+a) \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[(V+a) \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + \frac{fV/V/}{2gD} = 0 \text{ ec. 1, 2, 4}$$

$$-\frac{a}{g} \left[(V-a) \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] + \left[(V-a) \frac{\partial H}{\partial X} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] - \frac{afV/V/}{2gD} = 0 \text{ ec. 1, 2, 5}$$

recordando la definición de derivada total

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial X} + \frac{dX}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

y si hacemos que $(V+a) = \frac{dX}{dt}$ en la ec.1.2.4

y que $(V-a) = \frac{dX}{dt}$ en la ec.1.2.5 podemos reescribir el sistema.

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) } \frac{dH}{dt} + \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} + \frac{afV/V}{2gD} = 0 \\ \text{con} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ecs.1.2.6} \\ C^+ \end{array}$$

$$\text{b) } \frac{dX}{dt} = V+a$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{a) } \frac{dH}{dt} - \frac{a}{g} \frac{dV}{dt} - \frac{afV/V}{2gD} = 0 \\ \text{con} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{esc.1.2.7} \\ C^- \end{array}$$

$$\text{b) } \frac{dX}{dt} = V-a$$

Las ecuaciones 1.2.6 y 1.2.7 son el sistema de ecuaciones - diferenciales ordinarias que describen el fenómeno de golpe de ariete en una tubería. En la práctica la velocidad de propagación de la onda de presión es mucho mayor que la velocidad del agua, considerando ésto las ecs. 1.2.6 b) y 1.2.7 b) se pueden expresar

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad \text{ecs. 1.2.8}$$

esta ecuación muestra el cambio de posición de la onda de propagación con respecto al tiempo, ésto es la celeridad a . Cuando a es positivo la ec.1.2.8 se utilizará en el tramo aguas arriba del punto P, en caso contrario se utilizará aguas abajo (ver fig. 1.2.1)

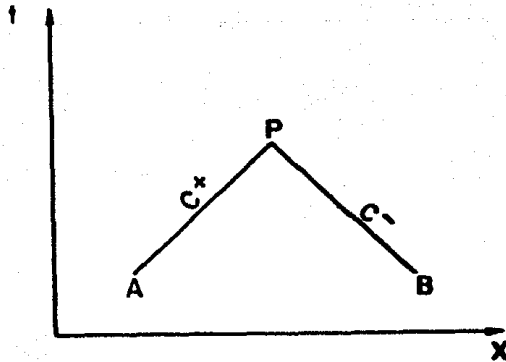


FIG. 1.2.1

Aplicando las ecs. 1.2.6 y 1.2.7 en un tubería como se muestra en la figura 1.2.2

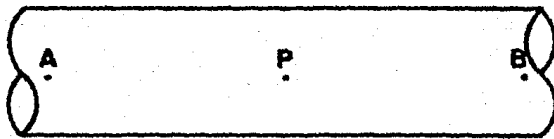


FIG. 1. 2. 2

y sustituyendo en las ecs. 1.2.6 y 1.2.7 la ec. 1.2.8, y trabajando con gastos $Q = VA \Rightarrow dV = \frac{dQ}{A}$ se tiene que

$$a) \quad \frac{dH}{dt} + \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fV/V}{g2D} \frac{dX}{dt} = 0 \quad \left. \begin{array}{l} \text{ec.1.2.9} \\ C^+ \end{array} \right\}$$

$$b) \quad \frac{dX}{dt} = + a$$

$$a) \quad \frac{dH}{dt} - \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{fV/V}{g2D} \frac{dX}{dt} = 0 \quad \left. \begin{array}{l} \text{ec.1.2.10} \\ C^- \end{array} \right\}$$

$$b) \quad \frac{dX}{dt} = - a$$

multiplicando por dt procedamos a integrar entre A y P y entre P y B respectivamente con las ecs. 1.2.9 y 1.2.10 (ver - figura 1.2.2)

con la ec.1.2.9

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{fQ/Q/}{2DgA^2} \int_{X_A}^{X_P} dX =$$

$$= H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{fQ_A/Q_A/}{2gDA^2} (X_P - X_A)$$

$$\int_{X_A}^{X_P} dX = a \int_{t_A}^{t_P} dt \implies (X_P - X_A) = a (t_P - t_A)$$

con la ec. 1.2.10

$$\int_{H_B}^{H_P} dH - \frac{a}{gA} \int_{Q_B}^{Q_P} dQ + \frac{f/Q/Q}{2gDA^2} \int_{X_B}^{X_P} dX =$$

$$= H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) + \frac{f/Q_B/Q_B}{2gDA^2} (X_P - X_B)$$

$$\int_{X_B}^{X_P} dX = -a \int_{t_B}^{t_P} dt \implies (X_P - X_B) = -a (t_P - t_B)$$

como $X_P - X_A = - (X_P - X_B) = \Delta X$

las ecuaciones quedan

$$a) H_P - H_A + \frac{a}{gA} (Q_P - Q_A) + \frac{fQ_A/Q_A/X}{2gDA^2} \Delta X = 0$$

$$b) X_P - X_A = a (t_P - t_A)$$

ecs.1.2.11

C+

$$a) \quad H_P - H_B - \frac{a}{gA} (Q_P - Q_B) - \frac{f/Q_B/Q_B}{2gDA^2} \Delta X = 0$$

$$b) \quad X_P - X_B = -a (t_P - t_B)$$

ecs.1.2.12

C⁻

el método de las características se puede visualizar en un sistema X Vs t (Fig. 1.2.3)

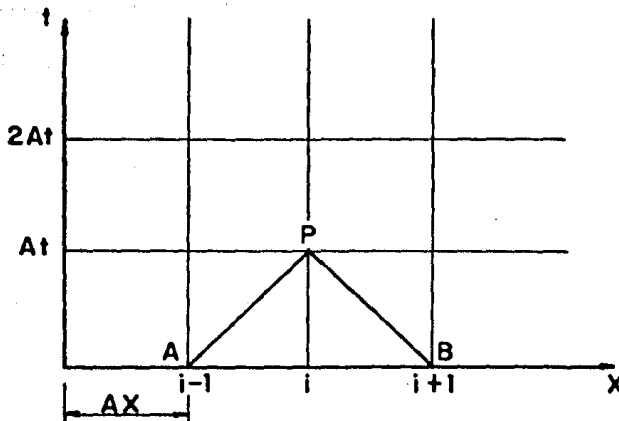


FIG. 1. 2. 3

En la figura 1.2.3 puede verse claramente que la velocidad y la carga en el punto P al tiempo $t + \Delta t$ dependen de las condiciones de los puntos A y B al tiempo t.

Para poder asegurar la estabilidad y convergencia del método - existe una restricción en el valor de la relación $\Delta t / \Delta x$, llamada condición de Courant, que exige se cumpla que

$$\Delta x \geq (V + a) \Delta t$$

La interpretación gráfica de ésta condición es la siguiente:

cuando se cumple que $\Delta x = (V + a) \Delta t$

las líneas C^+ y C^- correspondientes a las ecs. 1.2.11 y 1.2.12 llegan exactamente a los puntos A y B (fig. 1.2.3), cuando $\Delta x > (V + a) \Delta t$ las líneas C^+ y C^- llegarán a puntos comprendidos en el intervalo (A,B) . (Fig. 1.2.4)

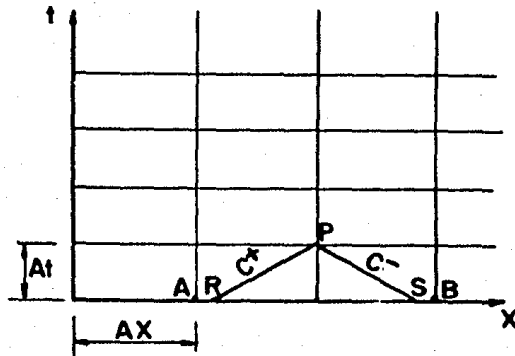


FIG. 1.2.4

Dado que lo que conocemos como datos iniciales son H y V en los puntos A y B , debemos interpolar para conocer H y V en R y S (Fig.1.2.4), para ésto se supone que H y V varían linealmente entre A y C y entre C y B . (Fig. 1.2.5)

Para el caso de interpolar el valor de H ,

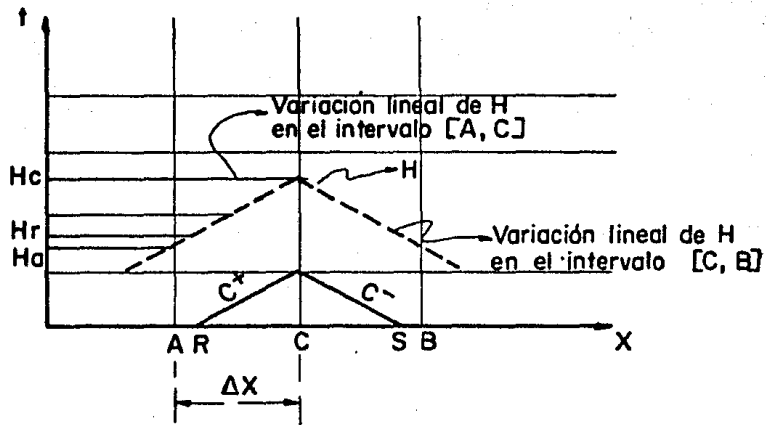


FIG. 1. 2. 5

Si definimos

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta X}$$

de la fig.1.2.5

$$\frac{HC - HR}{XC - XR} = \frac{HC - HA}{XC - XA}$$

$$HC - HR = \frac{(HC - HA)(XC - XR)}{(XC - XA)}$$

sabemos que

$$XC - XA = \frac{\Delta t}{\theta}$$

$$HR = HC - \frac{(HC - HA)(XC - XR)}{\Delta t / \theta}$$

$$HR = HC - \theta (HC - HA) \frac{(XC - XR)}{\Delta t}$$

la celeridad por definición:

$$a = \frac{XC - XR}{\Delta t}$$

$$H_R = H_C - a \phi (H_C - H_R) \quad \text{ec.1.2.13}$$

análogamente se pueden encontrar los valores de:

$$H_S = H_C - a \phi (H_C - H_B) \quad \text{ec.1.2.14}$$

$$V_S = V_C - a \phi (V_C - V_B) \quad \text{ec.1.2.15}$$

$$V_R = V_C - a \phi (V_C - V_A) \quad \text{ec.1.2.16}$$

Las ecuaciones 1.2.11 y 1.2.12 pueden reordenarse definiendo las constantes.

$$B = \frac{a}{gA} \quad \text{ec.1.2.17}$$

$$R = \frac{f \Delta X}{2g DA^2} \quad \text{ec.1.2.18}$$

sustituyendo estas ecs. en la ecs.1.2.11 a) y 1.2.12 a)

$$H_P = H_R + BQR - RQR/QR/ - BQP$$

Y

$$H_P = H_S - BQS + RQS/QS/ + BQP$$

Y si definimos

$$C_P = H_R + B_{QR} - R_{QR}/Q_R/ \quad \text{ec.1.2.19}$$

y

$$C_M = H_s - B_{QS} + R_{QS}/Q_s/ \quad \text{ec.1.2.20}$$

el sistema queda

$$H_P = C_P - B_{QP} \quad (C^+) \text{ ec.1.2.21}$$

$$H_P = C_M + B_{QP} \quad (C^-) \text{ ec.1.2.22}$$

resolviendo el sistema

$$H_P = (C_P + C_M)/2 \quad \text{ec.1.2.23}$$

$$Q_P = (H_P - C_M)/B \quad \text{ec.1.2.24}$$

Las ecuaciones 1.2.23 y 1.2.24 nos permiten encontrar gastos y cargas al tiempo $t + \Delta t$ en función de los gastos y cargas al tiempo t , a lo largo de una tubería que mantenga constantes sus características hidráulicas y geométricas.

Generalizando las ecuaciones queda



FIG. 1.2.6

$$HP = (CP + CM)/2$$

$$QP = (HP - CM)/B$$

de donde de acuerdo a la figura 1.2.6

$$CP = \left[H(I-1) + BQ(I-1) - RQ(I-1) / Q(I-1) \right]$$

$$CM = \left[H(I+1) - BQ(I+1) + RQ(I+1) / Q(I+1) \right]$$

para toda I en el intervalo $[2, n-1]$

Para los puntos extremos de un tramo puede aplicarse la - -
ec.1.2.21 o la ecuación 1.2.22 según corresponda y una ecua--
ción dada por una condición de frontera en este extremo.

2.- TRATAMIENTO MATEMATICO DE ALGUNAS FRONTERAS TIPICAS O COMUNES EN UN SISTEMA DE BOMBEO.

2.1 CONCEPTO DE FRONTERA

De acuerdo al capítulo anterior en un tramo de tubería que tiene características uniformes las ecuaciones 1.2.21 y 1.2.22 - pueden aplicarse directamente en el cálculo de las velocidades y cargas en cualquiera de sus secciones, no así en sus extremos, ya que éstos están influidos por condiciones diferentes - de otros tramos (fronteras internas) o por fronteras externas al sistema como puede ser depósitos, plantas de bombeo, etc.

2.2 TUBERIA CONECTADA A UN ESTANQUE CON VALVULA EN EL OTRO EXTREMO QUE SE CIERRA CON UNA DETERMINADA LEY DE CIERRE.

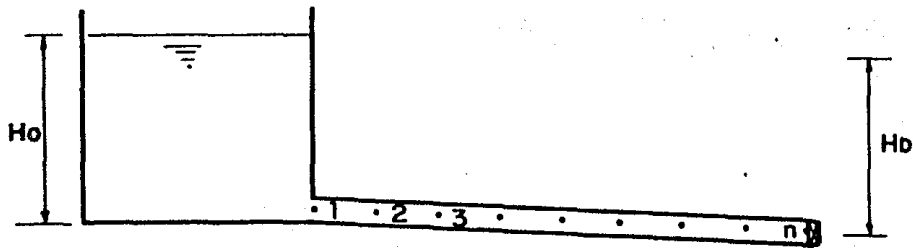


FIG. 2. 2. 1

En la fig. 2.2.1 en la frontera aguas arriba si el estanque es lo suficientemente grande se puede considerar la carga constante, entonces en el punto 1 (Fig. 2.2.1)

$$H_P = H_0 \quad \text{ec.2.2.1}$$

siendo H_P la carga en el punto 1 al tiempo $t + \Delta t$, además - aplicando la ec. 1.2.24

$$Q_P = (H_P - C_M)/B \quad \text{ec.2.2.2}$$

sustituyendo en 2.2.2 la ec. 2.2.1

$$Q_P = (H_0 - C_M)/B \quad \text{ec.2.2.3}$$

De esta manera quedan determinados los valores de Q_P y H_P gasto y carga en el punto 1 al tiempo $t + \Delta t$ (Fig.2.2.1)

Para la frontera aguas abajo se tiene que el gasto está dado por

$$Q_0 = C_d A_0 \sqrt{2 H_D g} \quad \text{ec.2.2.4}$$

donde Q_0 = gasto que pasa por la válvula cuando está totalmente abierta.

A_0 = Area del orificio cuando la válvula está totalmente abierta.

g = Gravedad

H_D Diferencia de cargas entre ambos lados de la vál vula cuando está totalmente abierta.

así también

$$Q_P = C_d A_g \sqrt{2g \Delta H} \quad \text{ec.2.2.5}$$

donde

Q_P = Gasto en la válvula para un cierto tiempo del intervalo de cierre.

A_g = Area en el orificio para ese cierto tiempo.

H = Diferencia de cargas a ambos lados de la válvula, es decir carga en el punto n (fig.2.2.1)

si

$$\zeta = \frac{C_d A_g}{C_d A_o}$$

entonces

$$Q_P = \frac{Q_o \zeta \sqrt{\Delta H}}{\sqrt{H_D}} \Rightarrow Q_P^2 = \frac{Q_o^2 \zeta^2 H_P}{H_D} \quad \text{ec.2.2.6}$$

sustituyendo en la ec.1.2.21 (C^+)

$$\frac{Q_P^2 H_D}{Q_o^2 \zeta^2} = C_P - B Q_P \quad \text{ec.2.2.7}$$

ordenando términos

$$Q_P^2 + \frac{B Q_o^2 \zeta^2}{H_D} Q_P - \frac{C_P Q_o^2 \zeta^2}{H_D} = 0$$

de donde

$$Q_P = \frac{-BQ_0^2 \tau^2}{HD} + \frac{\sqrt{\left[\frac{BQ_0^2 \tau^2}{HD} \right]^2 + 4 \frac{CPQ_0^2 \tau^2}{HD}}}{2} \quad \text{ec.2.2.8}$$

Si llamamos

$$CVP = \frac{Q_0^2}{2HD} \quad \text{ec.2.2.9}$$

y

$$CV = CVP \tau^2 \quad \text{ec.2.2.10}$$

se llega a

$$QP = -BCV + \sqrt{B^2CV^2 + 2CVCP} \quad \text{ec.2.2.11}$$

una vez encontrado el valor de Q_p (gasto en el punto n al tiempo $t + \Delta t$) se determina el valor de HP (carga en el punto n al tiempo $t + \Delta t$) con la ec.1.2.21

$$HP = CP - BQP$$

2.3 VALVULA INTERMEDIA

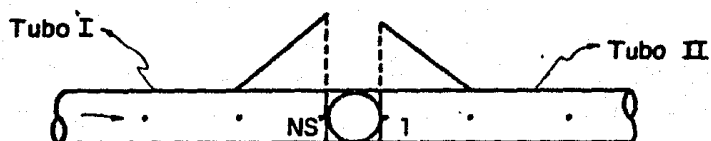


FIG. 2.3.1

En la fig. 2.3.1 se observa una válvula de la que se conoce - su ley de cierre, que conecta al tubo I con el tubo II. La flecha en el tubo I indica el sentido del flujo. Dado que el tubo I podría tener características geométricas diferentes al tubo II, la variable B definida en la ec.1.2.17 se definirá como B_I cuando se refiera al tubo I y como B_{II} cuando se refiera al tubo II.

Si definimos

$Q_{PI,1}$ = gasto en el punto 1 del tubo II al tiempo $t + \Delta t$

$Q_{PI,NS}$ = gasto en el punto NS del tubo I al tiempo $t + \Delta t$

recordando la ecuación 2.2.6 podemos escribir

$$Q_P = \frac{Q_0 \tau_0}{\sqrt{H_D}} \sqrt{H_{PI,NS} - H_{PII,1}}$$

ec.2.3.1

en condiciones iniciales se puede suponer

$$\sqrt{H_D} \approx \sqrt{H_{PI,NS} - H_{PII,1}}$$

planteando las ecs.1.2.21 y 1.2.22

$$C^+ \quad H_{PI,NS} = C_P - B_I Q_P$$

$$C^- \quad H_{PII,1} = C_M + B_{II} Q_P$$

restándolas:

$$H_{PI,NS} - H_{PII,1} = C_P - C_M - Q_P (B_I + B_{II}) \quad \text{ec.2.3.3}$$

de la ec.2.3.1

$$H_{PI,NS} - H_{PII,1} = \frac{Q_P^2 H_D}{Q_0^2 \tau_0^2}$$

sustituyendo en la ec.2.3.3.

$$\frac{Q_P^2 H_D}{Q_0^2 \tau_0^2} = C_P - C_M - Q_P (B_I + B_{II})$$

de donde

$$Q_P^2 + (B_I + B_{II}) \frac{Q_0^2 \tau_0^2}{H_D} Q_P + (C_P - C_M) \frac{Q_0^2 \tau_0^2}{H_D} = 0$$

recordando las ecs. 2.2.9 y 2.2.10 podemos escribir

$$Q_P^2 + 2CV (B_I + B_{II}) Q_P + 2 (C_P - C_M) CV = 0$$

de donde

$$Q_P = -CV(B_I + B_{II}) + \sqrt{CV^2(B_I + B_{II}) - 2 (C_P - C_M) CV} \quad \text{ec.2.3.4}$$

Con la ec.2.3.4 queda definido el valor de Q_P (gasto en la válvula al tiempo $t + \Delta t$), con las ecs.1.2.21 y 1.2.22 se pueden encontrar las cargas correspondientes al tiempo $t + \Delta t$.

2.4 TANQUE DE OSCILACION

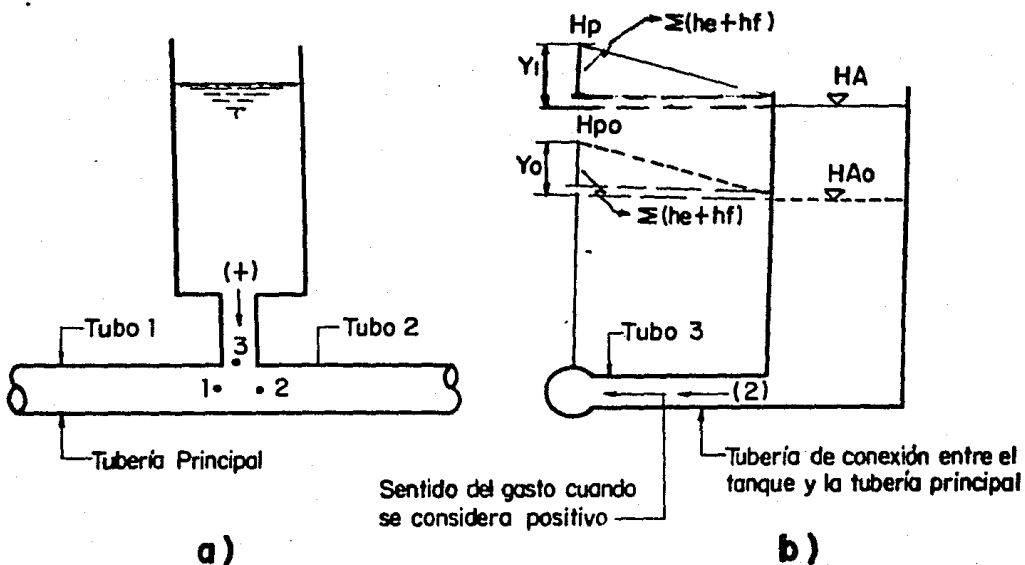


FIG. 2.4.1

En la fig.2.4.1 se muestra un tanque de oscilación visto normal a la tubería principal (a) y visto normal al tubo de conexión entre tanque y la tubería principal (b).

Supongamos al tanque trabajando en un intervalo de tiempo Δt y definamos las variables.

- A_i = área de la sección del tubo i .
- Δt = intervalo de tiempo escogido en el análisis, (de t a $t + \Delta t$)
- H_{AO} = nivel de agua en el tanque al tiempo t .
- H_A = nivel de agua en el tanque al tiempo $t + \Delta t$.
- V_{pi} = velocidad en el tubo i al tiempo $t + \Delta t$.
- V = velocidad en el tubo i al tiempo t .
- L_3 = longitud del tubo 3,
- Q_{Pi} = gasto en el tubo i al tiempo $t + \Delta t$.
- Q_i = gasto en el tubo i al tiempo t .
- H_{pi} = carga en el punto i al tiempo $t + \Delta t$.
- $(h_e + h_f)$ = pérdida en el tubo 3
- H_T = altura del agua en el tanque

AT = área del tanque.

Bi = variable i definida en la ec.1.2.17 aplicada al tubo i

Atendiendo a la fig. 2.4.1 y recordando las ecs.1.2.21 y 1.2.22 podemos expresar

$$HP1 = C_P - B_1 QP1 \quad (C^+) \text{ ec.2.4.1}$$

$$HP2 = C_M + B_2 QP2 \quad (C^-) \text{ ec.2.4.2}$$

por continuidad y respetando la convención de signos que se muestra en la fig. 2.4.1

$$QP1 + QP3 = QP2 \quad \text{ec.2.4.3}$$

por condición de carga única en el punto P,

$$HP1 = HP2 = HP3 = HP \quad \text{ec.2.4.4}$$

la ecuación de continuidad entre el tanque y el tubo 3,

$$- \frac{dHT}{dt} AT = A_3 \frac{(VP3 + V3)}{2} \quad \text{ec.2.4.5}$$

por diferencias finitas respecto al tiempo anterior

$$AT \frac{dHT}{dt} = \frac{(HA - HAO)}{\Delta t} AT \quad \text{ec.2.4.6}$$

con las ecuaciones 2.4.5 y 2.4.6

$$-\frac{\Delta I}{\Delta t} (H_A - H_{A0}) = A_3 \frac{(V_{P3} + V_3)}{2}$$

ordenando términos

$$H_A = H_{A0} - \frac{(V_{P3} + V_3)}{2} \frac{A_3}{A_t} \Delta t$$

dado que

$$Q = V A \quad \text{entonces}$$

$$H_A = H_{A0} - \frac{(Q_{P3} + Q_3)}{2} \frac{\Delta t}{A_t} \quad \text{ec.2.4.7}$$

además si definimos

$$Y = \frac{Y_0 + Y_1}{2} \quad (\text{ver fig. 2.4.1})$$

podemos expresar directamente de la fig. 2.4.1

$$Y = \frac{H_P - H_A + H_{P0} - H_{A0}}{2} \quad \text{ec.2.4.8}$$

aplicando la ecuación de cantidad de movimiento al tubo 3

$$F = ma$$

$$A_3 \gamma [Y - \sum (h_e - h_f)] = \frac{\gamma}{g} A_3 L_3 \frac{dV}{dt} \quad \text{ec.2.4.9}$$

por diferencias finitas respecto al tiempo anterior

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_{P3} - V_3}{\Delta t} = \frac{Q_{P3} - Q_3}{\Delta t A_3}$$

que sustituyendo en la ec.2.4.9

$$\left[Y - (H_e + h_f) \right] = - \frac{L_3}{g} \frac{(Q_{P3} - Q_3)}{A_3 t} \quad \text{ec.2.4.10}$$

utilizando las ecs.2.4.1, 2.4.2, 2.4.3 y 2.4.4 se puede escribir

$$\left[(C_P - H_{P1})/B_1 \right] + Q_3 = \left[(H_P - C_M)/B_2 \right]$$

de donde

$$\frac{C_P}{B_1} - \frac{H_P}{B_1} + Q_{P3} = \frac{H_P}{B_2} - \frac{C_M}{B_2}$$

agrupando términos

$$H_P \left(\frac{1}{B_2} + \frac{1}{B_1} \right) = \frac{C_P}{B_1} + Q_{P3} + \frac{C_M}{B_2} = \frac{C_P}{B_1} + \frac{C_M}{B_2} + Q_{P3}$$

despejando H_P

$$H_P = \frac{C_P/B_1 + C_M/B_2}{1/B_2 + 1/B_1} + \frac{Q_{P3}}{1/B_2 + 1/B_1} \quad \text{ec.2.4.11}$$

si definimos

$$\frac{C_P/B_1 + C_M/B_2}{1/B_2 + 1/B_1} = C_e$$

y

$$\frac{1}{1/B_2 + 1/B_1} = C_o$$

sustituyendo en la ec.2.4.11

$$H_P = C_e + C_o Q_{P3} \quad \text{ec.2.4.12}$$

reemplazando las ecs.2.4.12 y 2.4.7 en 2.4.8

$$Y = \frac{C_e + C_o Q_{P3}}{2} - \frac{H_{A0} - (Q_{P3} + Q_3)/2 \cdot \Delta t / A_t}{2} - \frac{H_{P0} - H_{A0}}{2} \quad \text{ec.2.4.13}$$

reemplazando la ec.2.4.13 en la ec.2.4.10

$$\frac{C_e + C_o Q_{P3}}{2} - H_{A0} + \frac{H_{P0}}{2} + \frac{Q_{P3} + Q_3 \Delta t}{4 A_t} - (h_e + h_f) = - \frac{L_3 (Q_{P3} - Q_3)}{g A_3 \Delta t}$$

ec.2.4.14

despejando el valor de Q_{P3}

$$Q_{P3} = \frac{- \frac{C_e}{2} + H_{A0} - \frac{H_{P0}}{2} - \frac{Q_3 \Delta t}{4 A_t} - (h_e + h_f) + \frac{Q_3 L_3}{g A_3 \Delta t}}{\frac{C_o}{2} + \frac{\Delta t}{4 A_t} + \frac{L_3}{g A_3 \Delta t}} \quad \text{ec.2.4.15}$$

Si suponemos que h_e y h_f son función únicamente de Q_3 , con la ec.2.4.15 se obtiene una solución directa del valor de Q_{P3} , pero si h_e y h_f los consideramos función de Q_3 y Q_{P3} será necesario aplicar algún procedimiento de tanteos como el de Newton Raphson.

Una vez obtenido el valor de Q_{P3} , apoyándonos en la ec.2.4.12 se tiene el valor de H_p , de donde utilizando las ecs.2.4.1 y 2.4.2 se obtienen los valores de Q_{P1} y Q_{P2} , es decir los gastos en los puntos 1 y 2 al tiempo $t + \Delta t$.

2.5 CAMARA DE AIRE

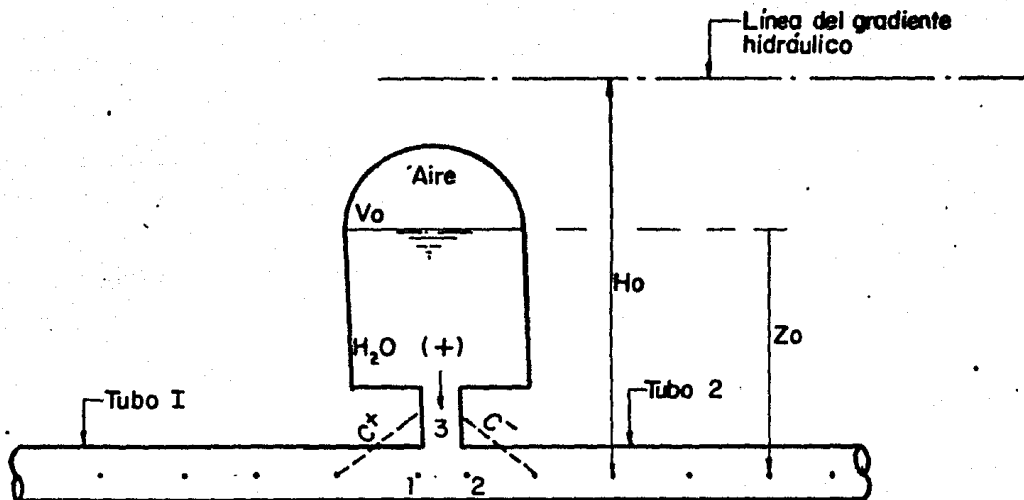


FIG. 2.5.1

En la figura 2.5.1 se muestra una cámara de aire, suponiéndola trabajando en un intervalo de tiempo de t a $t + \Delta t$ definamos las siguientes variables:

Z_0 = altura del agua en la cámara al tiempo t .

Z' = altura del agua en la cámara al tiempo $t + \Delta t$.

V_0 = volúmen de aire en la cámara al tiempo t .

V = volúmen de aire en la cámara al tiempo $t + \Delta t$.

Q_i = gasto en el punto i al tiempo t .

Q_{pi} = gasto en el punto i al tiempo $t + \Delta t$.

V_i = velocidad en el punto i al tiempo t .

V_{pi} = velocidad en el punto i al tiempo $t + \Delta t$.

A_C = área de la cámara

H_i = carga en el punto i al tiempo t .

H_{pi} = carga en el punto i al tiempo $t + \Delta t$.

A_i = área en el sección del tubo i .

B_i = variable B definida en el ec.1.2.17 aplicada al tubo i .

P = presión en el aire.

De acuerdo a la fig.2.5.1. y a las ecs.1.2.21 y 1.2.22 podemos escribir

$$HP_1 = C_P - B_1 Q_{P1} \quad \text{ec.2.5.1}$$

$$HP_2 = C_M + B_2 Q_{P2} \quad \text{ec.2.5.2}$$

Por continuidad y de acuerdo a la convención de signos que se muestra en la fig.2.5.1

$$Q_{p1} + Q_{p3} = Q_{p2} \quad \text{ec.2.5.3}$$

Por condición de carga única en el punto P

$$H_{p1} = H_{p2} = H_{p3} = H_P \quad \text{ec.2.5.4}$$

El cambio de volúmen de aire en la cámara en un intervalo de tiempo Δt es

$$V = \frac{(V_3 + V_{p3})}{2} A_3 \Delta t \quad \text{ec.2.5.5}$$

Existe una relación entre la presión del aire y su volumen, dada por

$$pV^n = \text{cte} \quad \text{ec.2.5.6}$$

donde p = presión del aire y está dado por

$$P = (H_0 - Z_0) \cdot \gamma \quad (\text{ver fig. 2.5.1}) \quad \text{ec.2.5.7}$$

de las ecuaciones 2.5.6 y 2.5.7 y dividiendo entre γ

$$(H_P - Z) V^n = \text{cte} \quad \text{ec.2.5.8}$$

con la ec.2.5.5

$$\Delta Z = - \frac{\frac{V_3 + V_{p3}}{2}}{A_3} \Delta t A_3 \quad \text{ec.2.5.9}$$

de acuerdo a la ecuación 2.5.8

$$\left[H_P - (Z_0 + \Delta Z) \right] \left[V_0 + \frac{V_P + V_{P3}}{2} A_3 t \right]^n = \text{cte} \quad \text{ec.2.5.10}$$

sustituyendo la ec.2.5.9 en la ec.2.5.10

$$\left[H_P - \left(Z_0 - \left(\frac{V_3 + V_{P3}}{2} \right) \frac{\Delta t}{A_c} \right) \right] \left[V_0 + \left(\frac{V_3 + V_{P3}}{2} \right) A_3 \Delta t \right]^n = \text{cte} \quad \text{ec.2.5.11}$$

como $Q = VA \Rightarrow Q_3 = V_3 A_3$ y $Q_{P3} = V_{P3} A_3$

la ecuación 2.5.11 se puede expresar

$$\left[H_P - \left(Z_0 - \frac{(Q_{P3} + Q_3)}{2 A_c} \Delta t \right) \right] \left[V_0 + \left(\frac{Q_3 + Q_{P3}}{2} \right) \Delta t \right]^n - \text{cte} = 0 \quad \text{ec.2.5.12}$$

En esta última expresión hay dos incógnitas Q_{P3} y H_P por lo que se requiere otra ecuación que la obtendremos de las ecs. 2.5.1, 2.5.2, 2.5.3 y 2.5.4

De la ec.2.5.1

$$Q_{P1} = \frac{C_P - H_{P1}}{B_1}$$

de la ec.2.5.2

$$QP2 = \frac{HP2 - CM}{B2}$$

sustituyendo en la ecuación 2.5.3

$$\frac{CP - HP}{B1} + QP3 = \frac{HP2 - CM}{B2}$$

combinándola con la ec.2.5.4

$$\frac{CP - HP}{B1} + QP3 = \frac{HP - CM}{B2}$$

$$HP = \frac{QP3 + \frac{CP}{B1} + \frac{CM}{B2}}{\frac{1}{B2} + \frac{1}{B1}}$$

ec.2.5.13

Las ecuaciones 2.5.12 y 2.5.13 forman un sistema de ecuaciones no lineales dado que en la ec.2.5.12 se encuentra un término de $QP3$ elevado a la n potencia, por lo que para resolverlo se deberá utilizar un método de iteraciones como el de Newton Raphson.

Una vez obtenidos los valores de las incógnitas del sistema - Q_{p3} y H_{pse} determinan los valores de Q_{p1} y Q_{p2} con las ecs. - 2.5.1 y 2.5.2 y las variaciones ΔV (incremento de aire en la cámara) y ΔZ (incremento del nivel de agua en la cámara) con las ecs. 2.5.5 y 2.5.9 con lo cual quedan determinadas las nuevas condiciones iniciales para el intervalo de tiempo siguiente.

2.6 BIFURCACION

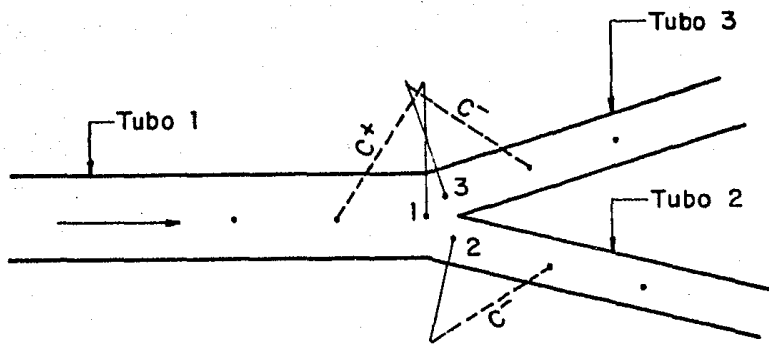


FIG. 2. 6. 1.

Para el caso de una bifurcación como la que se muestra en la fig. 2.6.1, se pueden plantear las siguientes ecuaciones.

la ec.1.2.21 aplicada en el punto 1.

$$HP_1 = CP - B_I QP_1 \quad \text{ec.2.6.1}$$

la ec.1.2.22 aplicada en los puntos 2 y 3.

$$HP_2 = CM + B_{II} QP_2 \quad \text{ec.2.6.2}$$

$$HP_3 = CM + B_{III} QP_3 \quad \text{ec.2.6.3}$$

la ec. de continuidad

$$QP_1 = QP_2 + QP_3 \quad \text{ec.2.6.4}$$

por condición de carga única en un punto P

$$HP_1 = HP_2 = HP_3 = HP \quad \text{ec.2.6.5}$$

sustituyendo las ecs.2.6.1 y 2.6.5 en las ecs.2.6.1, 2.6.2 y 2.6.3 formamos un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas de don de se obtiene

$$HP = \frac{CP + B_1/B_2(CM_2) + B_1/B_3(CM_3)}{1 + B_1/B_2 + B_1/B_3} \quad \text{ec.2.6.6}$$

en donde CM_i es la constante definida en la ec.3.20 aplicada sobre el tubo i .

Con H_P conocida se pueden aplicar las ecs.2.6.1, 2.6.2 y 2.6.3 para conocer los valores de Q_{P1} , Q_{P2} y Q_{P3} . (Condiciones en los puntos 1, 2 y 3 al tiempo $t + t$).

2.7 BOMBAS

2.7.1 CURVAS CARACTERISTICAS

Generalmente las curvas características de las unidades de bombeo son proporcionadas por el fabricante en forma gráfica de una manera similar a la de la figura 2.7.1.1

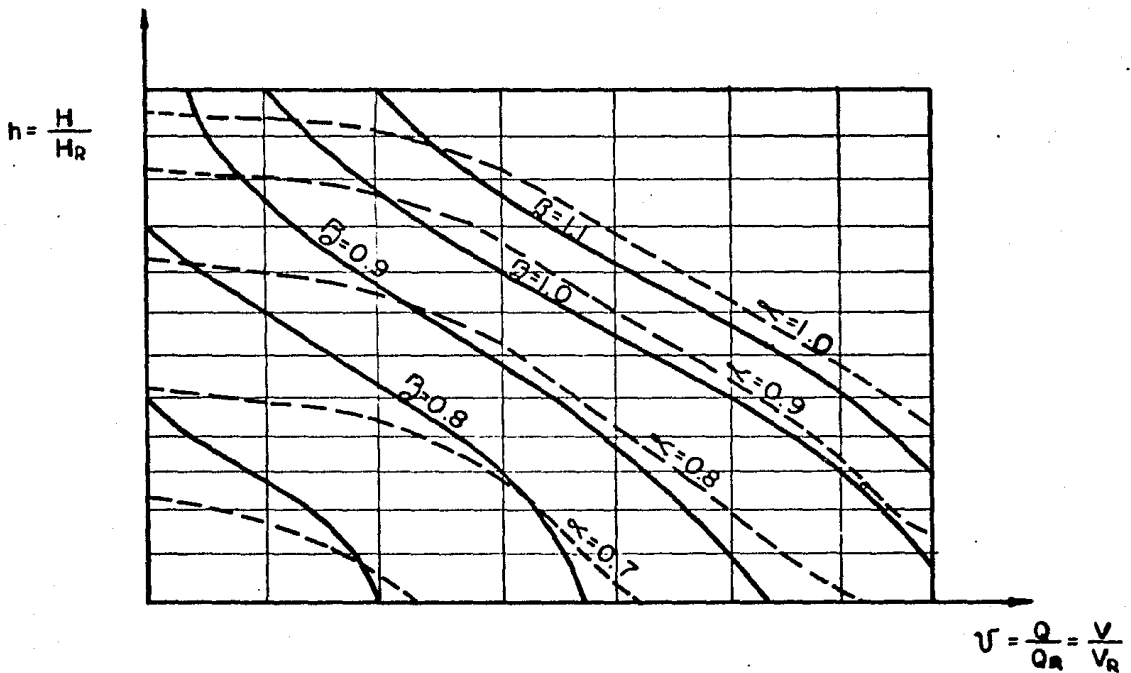


FIG. 2.7.1.1

en donde

$$\beta = \frac{I}{T_R} = \frac{\text{Torque en un cierto tiempo}}{\text{Torque de diseño}}$$

(el torque es usualmente llamado momento o par de torsión).

$$v = \frac{Q}{Q_R} = \frac{\text{Gasto en un cierto tiempo}}{\text{Gasto de diseño}}$$

$$\omega = \frac{N}{N_R} = \frac{\text{Velocidad rotacional en un cierto tiempo}}{\text{Velocidad rotacional de diseño}}$$

$$h = \frac{H}{H_R} = \frac{\text{Carga en un cierto tiempo}}{\text{Carga de diseño}}$$

La manipulación de estas curvas en el uso de las computadoras -
es complicada ya que los valores de ω , β , v , y h pueden -
cambiar de signo al ocurrir un fenómeno transitorio. Con la fi
nalidad de simplificar el manejo de estas curvas se utilizará -
la teoría homóloga. Esta teoría supone que la eficiencia no -
cambia con el tipo de unidad, es decir si por definición - - -
Potencia = T_w (referencia 1) además

$$\text{Potencia} = \frac{\gamma_{QH}}{\eta} \Rightarrow T_w = \frac{\gamma_{QH}}{\eta} \Rightarrow \eta = \frac{\gamma_{QH}}{T_w}$$

∴ de acuerdo a la teoría homóloga

$$\frac{Q_1 H_1}{T_{1W1}} = \frac{Q_2 H_2}{T_{2W2}}$$

por otro lado como $\dot{W} = \frac{2\pi N}{60}$

entonces

$$\frac{Q_1 H_1 (60)}{T_1 2\pi N_1} = \frac{Q_2 H_2 (60)}{T_2 2\pi N_2}$$

simplificando

$$\frac{Q_1 H_1}{T_1 N_1} = \frac{Q_2 H_2}{T_2 N_2}$$

definiendo

$$WH = \frac{h}{\alpha^2 + v^2} = f_1(X) \quad \text{ec.2.7.1.1}$$

y

$$WB = \frac{b}{\alpha^2 + v^2} = f_2(X) \quad \text{ec.2.7.1.2}$$

donde $X = \pi + \text{th}^{-1} v/c$

pueden formarse curvas del tipo de la figura 2.7.1.2 que sean -
equivalentes a las de la figura 2.7.1.1, graficando WH Vs. X
y WB Vs. X

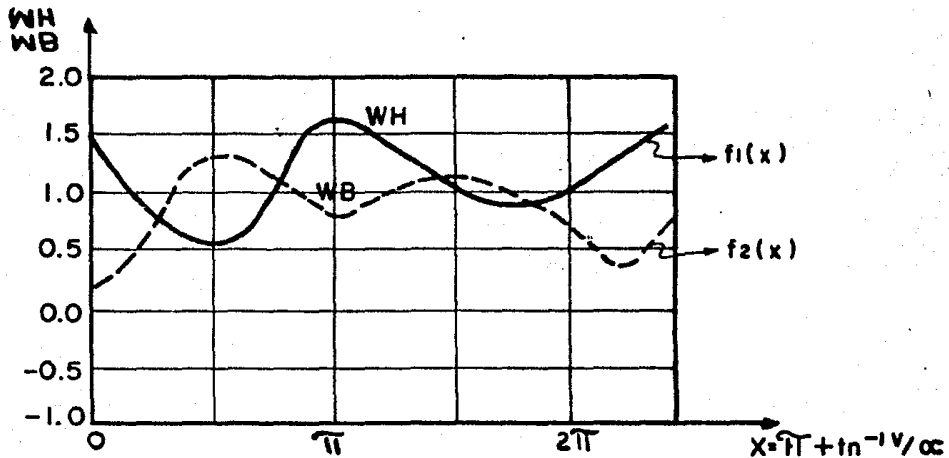


FIG. 2.7.1.2

El procedimiento para la transformación de las gráficas es sencillo ya que cualquier punto de la figura 2.7.1.1 nos proporciona directamente en la figura los valores de α , β , v y h ; con los valores de α y v se obtiene el valor de X , con el valor de h de la ec.2.7.1.1 se obtiene WH , con el valor de β de la ec.2.7.1.2 se obtiene WB .

En algunas ocasiones al llevar a cabo un diseño no se tienen disponibles datos sobre el equipo de bombeo por lo que se hace necesario utilizar datos de otros equipos para la formación de las curvas WH y WB . Las curvas tienden a ser similares cuando se manejan velocidades específicas iguales, en la referencia 1 se encuentran tabulados valores de WH y de WB para velocidades específicas ($N_s = N \quad Q / H^{3/4}$) de 1800, 7600 y 13500 -- (gpm, ft)

Utilizando las relaciones dimensionales h , β , v y α y las ecuaciones 2.7.1.1 y 2.7.1.2 podemos escribir

$$H = HRh = HR (\alpha^2 + v^2) f1 (X) \quad \text{ec.2.7.1.3}$$

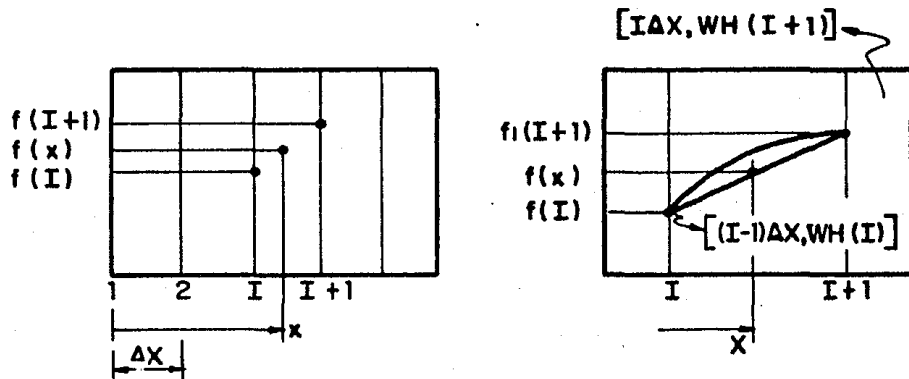
$$T = TR\beta = TR (\alpha^2 + v^2) f2 (X) \quad \text{ec.2.7.1.4}$$

Para obtener el valor de α , v y X en un instante dado $t + \Delta t$ se recurre a iteraciones utilizando como primera aproximación α y v del instante anterior t . Posteriormente al resolver un sistema de ecuaciones en las cuales intervienen α y v se obtienen los valores de h , α , v del instante $t + \Delta t$.

METODO:

Con v y α (al tiempo t) obtenemos $X = \sqrt{W} + tn^{-1} v/\alpha$ (primera aproximación). Si tenemos la fig. 2.7.1.2 dividida en el eje de las X en n segmentos ΔX , con $n + 1$ datos podemos trazar una recta entre los puntos conocidos de WH y WB , recta que se puede expresar en la forma

$$f1 (X) = A_0 + A_1 X \quad \text{y} \quad f2 (X) = B_0 + B_1 X$$



F I G. 2. 7. 1. 3

es decir para toda X en el intervalo
el valor de $WH(X)$ está dado por

$$[(I-1)\Delta X, (I)\Delta X]$$

$$WH(X) = f_1(X) = A_0 + A_1X$$

para obtener los coeficientes A_0 y A_1 se procede de la siguiente manera

en la figura 2.7.1.3

$$I = \frac{X}{\Delta X} + 1$$

I es el número entero que nos localiza el más próximo valor anterior de los $n + 1$ datos que tenemos en forma de vector. - Así obtenemos dos puntos en el plano.

$$[WH(I), (I-1) \Delta X]$$

$$[WH(I-1), (I) \Delta X]$$

y podemos calcular

$$A1 = [WH(I-1) - WH(I)] / \Delta X$$

$$A0 = WH(I) - A1(I-1) \Delta X$$

en forma análoga podemos encontrar $B1$ y $B0$, así

$$f2(X) = B0 + B1X$$

$$\text{donde } B1 = [WB(I-1) - WB(I)] / \Delta X$$

$$B0 = WB(I) - B1(I-1) \Delta X$$

Así queda expresada la manera de dados unos valores de ω y v determinar sus $f1(X)$ y $f2(X)$ correspondientes. Para obtener los valores de ω , v y X correspondientes al tiempo $t + \Delta t$ es necesario que se resuelvan varias ecuaciones en forma simultánea mismas que se deducirán más adelante y que relacionan las ecuaciones características, la ecuación de balance de cargas y continuidad

2.7.2 PLANTA DE BOMBEO COMO FRONTERA INTERNA

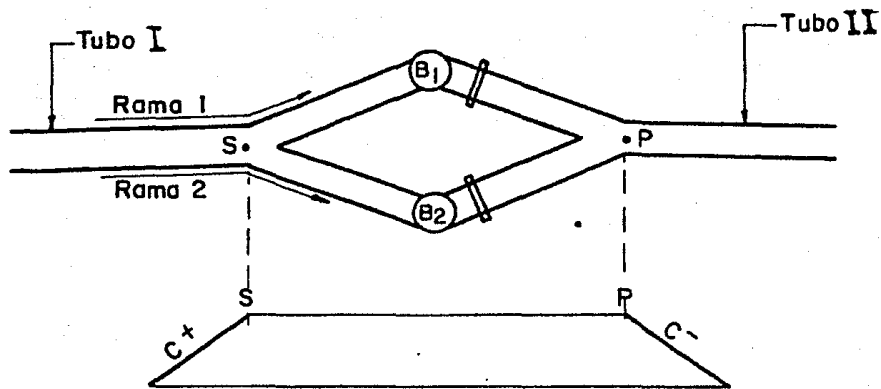


FIG. 2.7.2.1

De acuerdo con la figura 2.7.2.1 y recordando las ecs. 1.2.21 y 1.2.22 se puede escribir

$$H_s = C_P - B_I Q_s \quad \text{ec.2.7.2.1}$$

$$H_P = C_M + B_{II} Q_P \quad \text{ec.2.7.2.2}$$

además

por la rama uno se cumple que

$$H_P = H_S + H_{dB1} - h_{L1}$$

donde

H_S = carga en el punto S al tiempo $t + \Delta t$

H_P = carga en el punto P al tiempo $t + \Delta t$

H_{dB1} = carga proporcionada por la bomba i

h_{L1} = pérdidas ocasionadas por la válvula

$$h_{L1} = \frac{H_0 v/v}{\zeta^2}$$

donde

H_0 = pérdida en la válvula cuando opera totalmente abierta

sustituyendo

$$H_P = H_S + H_{dB1} - \frac{H_0 v_1/v_1}{\zeta^2} \quad \text{ec.2.7.2.3}$$

por la rama dos

$$H_P = H_S + H_{dB2} - \frac{H_0 v_2/v_2}{\zeta^2} \quad \text{ec.2.7.2.4}$$

Si las bombas son del mismo tipo, las pérdidas serán iguales, y ambas ecuaciones (2,7,2,3 y 2,7,2,4) serán las mismas, pero - si consideramos unas bombas (B2) operando y otras (B1) fa-

llando las ecuaciones son distintas

para bombas operando ($\zeta = 1$)

$$H_P = H_s + H_{dB0} - \Delta H_0 \quad v_2/v_2/ \quad \text{ec.2.7.2.5}$$

para bombas fallando

$$H_P = H_s + H_{dBf} - \frac{\Delta H_0 \quad v_2/v_2/}{\zeta^2} \quad \text{ec.2.7.2.6}$$

expresando H_{dB0} y H_{dBf} (carga proporcionada por las bombas operando y carga proporcionada por las bombas fallando) utilizando la ec.2.7.1.3

$$H_{dBf} = H_R (\alpha_1^2 + v_1^2) f_1 (\pi + t_n^{-1} v_1/\alpha_1) \quad \text{ec.2.7.2.7}$$

$$H_{dB0} = H_R (\alpha_2^2 + v_2^2) f_1 (\pi + t_n^{-1} v_2/\alpha_2) \quad \text{ec.2.7.2.8}$$

recordemos que para una bomba operando normalmente

$$\alpha = 1$$

$$\zeta = 1$$

por otro lado si tenemos M_f bombas fallando y M_0 bombas operando, aplicando la ecuación de continuidad (fig.2.7.2.1) tenemos que

$$Q_s = Q_p = A_s V_s = A_p V_p = M_f v_1 Q_R + M_0 v_2 Q_R \quad \text{ecs.2.7.2.9}$$

y 2.7.2.9'

sustituyendo en las ecs. 2.7.2.5 y 2.7.2.6 las ecuaciones 2.7.2.7 y 2.7.2.8 y recordando que $X = \sqrt{1 + \tan^{-1} v/\alpha}$ podemos escribir

$$H_s + H_R (\alpha_1^2 + v_1^2) [A_0 + A_1 (\sqrt{1 + \tan^{-1} v_1/\alpha_1})] - \frac{\Delta H_0 v_1/v_1}{\tau_1^2} = HP$$

ec.2.7.2.10

$$H_s + H_R (\alpha_2^2 + v_2^2) [B_0 + B_1 (\sqrt{1 + \tan^{-1} v_2/\alpha_2})] - \Delta H_0 v_2/v_2 = HP$$

ec.2.7.2.11

Hasta el momento se tienen 6 ecuaciones (2.7.2.1, 2.7.2.2, - 2.7.2.9, 2.7.2.9', 2.7.2.10 y 2.7.2.11) y 7 incógnitas (HS, - QS, HP, v1, v2, α_1). La ecuación faltante la obtendremos de $f_2(X) = W_B(X)$

El cambio de la velocidad rotacional en una bomba depende del - desequilibrio del torque aplicado con respecto el tiempo, así;

$$T_b = - I \frac{dw}{dt} = - \frac{WR^2}{d} \frac{dw}{dt} \quad \text{ec.2.7.2.12}$$

donde

T_b = torque promedio de T_0 y T_P

I = momento de inercia

w = velocidad angular

Si definimos

T_0 = torque al tiempo t .

T_P = torque al tiempo $t + \Delta t$.

podemos escribir

$$\frac{T_0 + T_P}{2} = \frac{WR^2}{g} \frac{dw}{dt} \quad \text{ec.2.7.2.13}$$

donde

$$w = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi}{60} \frac{N}{NR} = \frac{\pi}{30} (\alpha) \quad NR \quad (\text{rad/seg})$$

$$\therefore \frac{dw}{dt} = \frac{NR}{30} \frac{d\alpha}{dt} \quad \text{ec.2.7.2.14}$$

por otro lado si

$$\beta_0 = \frac{T_0}{TR} \quad \text{ec.2.7.2.15}$$

$$\beta_1 = \frac{T_P}{TR} \quad \text{ec.2.7.2.16}$$

reemplazando en la ec.2.7.2.13

$$\frac{1}{2} (\beta_0 TR + \beta_1 TR) = - \frac{WR^2}{g} \frac{\pi}{30} NR \frac{d\alpha}{dt} \quad \text{ec.2.7.2.17}$$

por diferencias finitas respecto al tiempo anterior

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\alpha - \alpha_0}{\Delta t} \quad \text{ec.2.7.2.18}$$

donde

$$\alpha = \alpha \quad \text{al tiempo } t + \Delta t$$

$$\alpha_0 = \alpha \quad \text{al tiempo } t$$

sustituyendo

$$\beta_0 + \beta_1 = \frac{WR^2}{g} \frac{\pi}{15} \frac{NR}{TR} \frac{\alpha_0 - \alpha}{\Delta t} \quad \text{ec.2.7.2.19}$$

Si definimos

$$C_7 = \frac{WR^2 NR}{15g TR \Delta t} \quad \text{ec.2.7.2.20}$$

la ec.2.7.2.19 queda

$$\beta_0 + \beta_1 - C_7 (\alpha_0 - \alpha) = 0 \quad \text{ec.2.7.2.21}$$

recordando que

$$\beta_1 = f_2(X) (\alpha_1^2 + v_1^2)$$

$$= [B_0 + B_1 (\pi + \tan^{-1} v_1/\alpha_1)] (\alpha_1^2 + v_1^2)$$

y que β_0 es conocido del instante anterior la ecuación - -
2.7.2.21 queda

$$\left[B_0 + B_1 (\overline{W} + \tan^{-1} v_1/c) \right] (c^2 + v_1^2) + \beta_0 - C_7 (c_0 - c) = 0$$

ec.2.7.2.22

Lo que sigue se deduce suponiendo que H_S es la carga de un tanque de sumergencia por lo que se puede considerar constante, y por lo tanto es conocido Q_S de la ec.2.7.2.1 y despejando Q_P en función de H_P de la ec.2.7.2.2 y reemplazando en la ec.2.7.2.9' obtenemos H_P en función de v_1 y v_2 con lo cual reducimos las seis ecuaciones y puede aplicarse posteriormente un método como el de Newton Raphson. Esta suposición es válida solamente para tuberías de succión de corta longitud pero no es válida para tuberías de mediana longitud en la cual pueden generarse también fenómenos transitorios, cuya magnitud está en relación directa con la longitud de ésta.

Es decir, haciendo un resumen de las ecuaciones que definen nuestro sistema:

$$H_S = C_P - B_I Q_S \quad \text{ec.2.7.2.1}$$

$$H_P = C_M + B_{II} Q_S \quad \text{ec.2.7.2.2}$$

$$Q_S = M_f v_1 Q_R + M_0 v_2 Q_R \quad \text{ec.2.7.2.9}$$

$$Q_P = M_E v_1 Q_R + M_0 v_2 Q_R \quad \text{ec.2.7.2.9'}$$

$$H_P = H_S + H_R (c^2 + v_1^2) \left[A_0 + A_1 (\overline{W} + \tan^{-1} v_1/c) \right] - \frac{\Delta H_0 v_1/v_1}{L^2}$$

ec.2.7.2.10

$$HP = HS + HR (\alpha_2^2 + v_2^2) [A_3 + A_4 (\overline{N} + \tan^{-1} v_2/\alpha_2)] - \Delta H_0 v_2/v_2/$$

ec.2.7.2.11

$$[B_0 + B_1 (\overline{N} + \tan^{-1} v_1/\alpha_1)] (\alpha_1^2 + v_1^2) + B_0 - C_7 (\alpha_0 - \alpha) = 0$$

ec.2.7.2.22

en estas siete ecuaciones se tienen como incógnitas a

$Q_s, H_s, Q_p, H_p, v_1, v_2, \alpha_1$.

$$\text{Si } H_s = \text{cte} \implies Q_s = (C_p - H_s)/B_I \quad (\text{de la ec.2.7.2.1})$$

$$Q_p = (H_p - C_m)/B_{II} \quad (\text{de la ec.2.7.2.2})$$

$$(H_p - C_m)/B_{II} = M_E v_1 Q_R + M_O v_2 Q_R \quad (\text{de la ec.2.7.2.9'})$$

despejando H_p

$$H_p = B_{II} (M_E v_1 Q_R + M_O v_2 Q_R) + C_m \quad \text{ec.2.7.2.23}$$

introduciendo H_p en las ecs.2.7.2.10 y 2.7.2.11, con la ec. -- 2.7.2.22 el sistema se reduce a 3 ecuaciones

$$F_I = H_s + HR (\alpha_1^2 + v_1^2) [A_0 + A_1 (\overline{N} + \tan^{-1} v_1/\alpha_1)] - \frac{\Delta H_0 v_1/v_1/}{\alpha_1^2}$$

$$- B_{II} (M_E v_1 Q_R + M_O v_2 Q_R) - C_m = 0$$

$$F2 = Hs + Hr (\alpha^2 + v2^2) [A3 + A4 (\pi + \tan^{-1} v2/\alpha^2)] - \Delta H0 v2/v2/$$

$$- B_{II} (Mf v1 QR + Mo v2 QR) - CM = 0$$

$$F3 = [B0 + B1 (\pi + \tan^{-1} v1/\alpha^1)] (\alpha^1^2 + v1^2) + B3 - C7 (\alpha_0 - \alpha) = 0$$

Estas tres ecuaciones contienen 3 incógnitas α^1 , $v1$ y $v2$ y -
pueden determinarse con un método como el de Newton-Raphson.

Una vez obtenidos los valores de α^1 , $v1$ y $v2$, se sustituyen $v1$ y $v2$ en la ec.2.7.2.23 y obtenemos Hp , reemplazando este valor -
en la ec.2.7.2.2 se determinan el valor de Qp .

Generalizando: la resolución de la planta de bombeo, es decir consi
derando Hs variable, tenemos

con la ec.2.7.2.1 y la ec.2.7.2.9

$$(CP - Hs)/B_I = Mf v1 QR + Mo v2 QR \quad \text{ec.2.7.2.24}$$

con la ec.2.7.2.2 y la ec.2.7.2.9'

$$(HP - CM) / B_{II} = Mf v1 QR + Mo v2 QR \quad \text{ec.2.7.2.25}$$

despejando Hs y HP de las ecs.2.7.2.24 y 2.7.2.25.

$$Hs = - (Mf v1 QR + Mo v2 QR) B_I + CP \quad \text{ec.2.7.2.26}$$

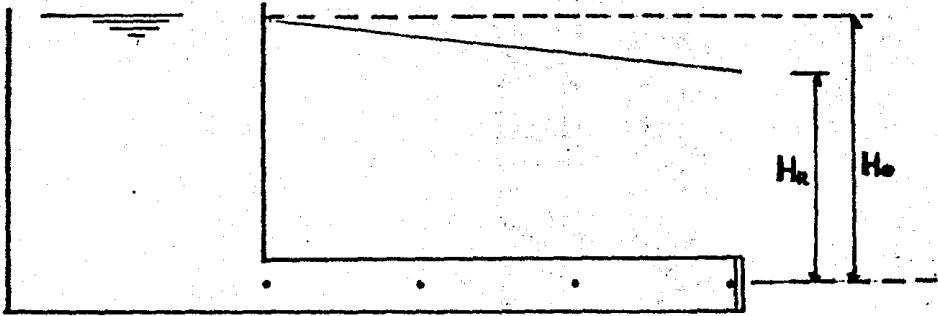
$$HP = (Mf v1 QR + Mo v2 QR) B_{II} + CM \quad \text{ec.2.7.2.27}$$

reemplazando H_S y H_P en las ecuaciones 2.7.2.10 y 2.7.2.11 - tendremos dos ecuaciones que junto con la ec.2.7.2.22 forman - un sistema de tres ecuaciones, con tres incógnitas (ω , v_1 , v_2) sistema que se puede resolver con el método de Newton - Rapshon del mismo modo que el caso simplificado ($H_S = \text{cte}$). Posteriormente con v_1 y v_2 y las ecuaciones 2.7.2.9 y 2.7.2.9' se obtienen los valores de Q_P y Q_S , y con las ecs.2.7.2.26 y 2.7.2.27 se calculan los valores de H_S y H_P .

A continuación se presenta el caso de una tubería conectada a un estanque con un válvula en el otro extremo, de la que se - conoce su ley de cierre.

Con el propósito meramente didáctico se aplicará en ella la - metodología propuesta para el cálculo de las condiciones que se presentan en la tubería a un tiempo Δt después de comenzada la maniobra de cierre en la válvula.

EJEMPLO DIDACTICO



DATOS:

$a = 1000 \text{ m/s}$

λ
velocidades de la onda de presión

$L = 3000 \text{ m.}$

longitud de la tubería

$D = 1.0 \text{ m.}$

diámetro

$f = 0.02$

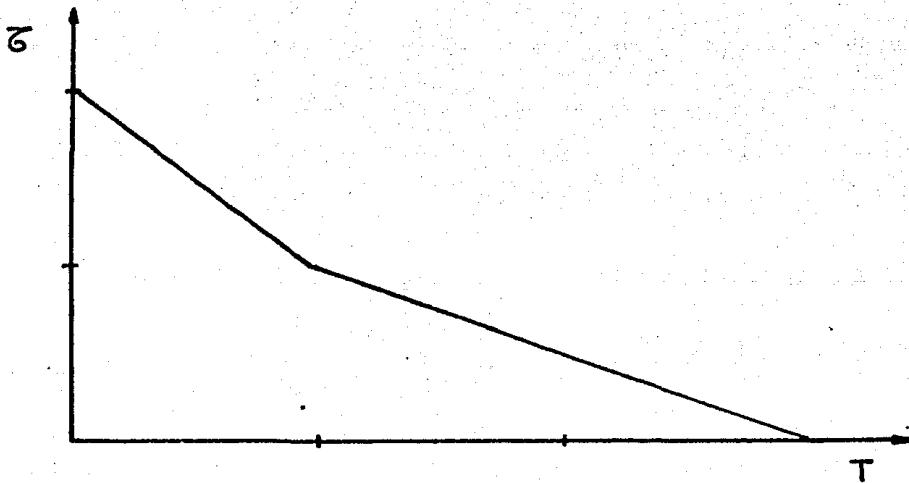
coeficiente de Darcy

$H_0 = 100 \text{ m.}$

carga en el estanque

$Q_0 = 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ gasto inicial

$T_c = 3.0 \text{ seg.}$ tiempo de cierre



LEY DE CIERRE

usando para el análisis

$$\Delta x = 1000 \text{ m.}$$

$$\Delta t = 1 \text{ seg.}$$

y considerando $a \gg v$

tenemos que $x = a \Delta t$ satisface la condición de Courant.

cálculo de las constantes B y R

$$B = \frac{a}{gA} = 129.79$$

$$R = \frac{f \Delta X}{2gDA^2} = 1.6525$$

Cálculo de condiciones iniciales (todas las cargas serán referidas al nivel de referencia señalado en la figura)

sea H_{pi} = carga en el punto i al tiempo $t + \Delta t$

H_i = carga en el punto i al tiempo t.

Q_{pi} = gasto en el punto i al tiempo $t + \Delta t$

Q_i = gasto en el punto i al tiempo t.

t = tiempo en que empieza la maniobra de cierre.

$$H_1 = H_0$$

utilizando Darcy

$$H_2 = H_0 - \frac{f \Delta X v^2}{D^2 g} = H_0 - RQ^2 = 100 - 1.6525 (1) = 98.34 \text{ m.}$$

análogamente

$$H_3 = 96.69 \text{ m.}$$

$$H_4 = 95.04 \text{ m.}$$

* condiciones en el punto 1 al tiempo $t + \Delta t$

$$H_{P1} = H_0 = 100 \text{ m.}$$

de la ec.1.2.24

$$Q_{P1} = (H_{P1} - C_M) / B$$

de la ec.1.2.20

$$C_M = H_2 - BQ_2 + R Q_2/Q_2$$

$$C_M = 98.34 - 129.79 (1.0) + 1.6525 (1) = - 29.79$$

sustituyendo

$$Q_{P1} = (100 + 29.79) / 129.79 = 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

* condiciones en el punto 2 al tiempo $t + \Delta t$.
de las ecs.1.2.23 y 1.2.24

$$H_{P2} = (C_P + C_M) / 2$$

$$Q_{P2} = (H_{P2} - C_M) / B$$

donde

$$C_P = H_1 + BQ_1 - RQ_1/Q_1 = 100 + (129.79)(1) - 1.6525(1) = 228.13$$

$$C_M = H_3 - BQ_3 + RQ_3/Q_3 = 96.69 - (129.79)(1) + 1.6525(1) = 31.44$$

sustituyendo

$$H_{P2} = (228.13 - 31.44)/2 = 98.34 \text{ m.}$$

$$Q_{P2} = (98.72 + 31.44)/129.79 = 1.00 \text{ m}^3/\text{s}$$

* condiciones en el punto 3 al tiempo $t + \Delta t$,
de las ecs. 1.2.23 y 1.2.24

$$H_{P3} = (C_P + C_M)/2$$

$$Q_{P3} = (H_{P3} - C_M)/B$$

donde

$$C_P = H_2 + BQ_2 - RQ_2/Q_2 = 98.34 + (129.79)(1) - 1.6525(1) = 226.47$$

$$C_M = H_4 - BQ_4 + RQ_4/Q_4 = 95.04 - (129.79)(1) + 1.6525(1) = -33.09$$

sustituyendo

$$H_{P3} = (226.47 - 33.09)/2 = 96.69 \text{ m.}$$

$$Q_{P3} = (96.68 + 33.09)/129.79 = 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

- * condiciones en el punto 4 al tiempo $t + \Delta t$.
de la ec.1.2.21

$$H_{p4} = C_p - BQ_{p4}$$

de la ec.2.2.11

$$Q_{p4} = - \frac{B Q_0^2 z^2}{2H_4} + \sqrt{B^2 \frac{Q_0^4 z^4}{4H_4^2} + 2 \frac{Q_0^2 z^2}{2H_4} C_p}$$

donde

$$C_p = H_3 + BQ_3 - R Q_3/Q_3 = 96.69 + 129.79 - 1.6525 = 224.82$$

por lo que

$$Q_{p4} = \frac{-129.79(1)(.5)^2}{2(95.04)} + \sqrt{\frac{(129.79)^2(1)(.5)^4}{4(95.04)^2} + \frac{2(1)(.5)^2 224.82}{2(95.04)}}$$

$$Q_{p4} = 0.6170 \text{ m}^3/\text{s}$$

de donde

$$H_{p4} = 224.82 - 129.79(.6170) = 144.73 \text{ m.}$$

Hasta el momento se han encontrado los gastos y cargas correspondientes a un tiempo de un segundo después de comenzada la maniobra de cierre, en los puntos 1, 2, 3 y 4.

Suponiendo estos valores como iniciales y utilizando un Δt -- también de 1 segundo, con un procedimiento análogo al anterior pueden encontrarse las condiciones de gasto y carga al tiempo $t + \Delta t$ (dos segundos después de comenzada la maniobra de -- cierre), en los mismos puntos, y así sucesivamente ir encon-- trando condiciones de gasto y carga cada Δt hasta llegar a un tiempo de simulación deseado. En el caso de nuestro ejemplo en la tabla 2.1 se presentan los resultados obtenidos para un tiem po de simulación de 5 segundos.

TABLA 2.1

TIEMPO (seg)	X/L =	0.0	0.333	0.666	1.00	TAU
0	Carga	100	98.34	96.69	95.04	1.0
	Gasto	1.0	1.0	1.0	1.0	
1	Carga	100	98.34	96.69	144.74	0.5
	Gasto	1.0	1.0	1.0	0.617	
2	Carga	100	98.34	145.88	187.86	0.25
	Gasto	1.0	1.0	0.621	0.285	
3	Carga	100	147.02	188.74	225.84	0.0
	Gasto	1.0	0.62	0.291	0.0	
4	Carga	100	189.62	226.34	226.37	0.0
	Gasto	0.253	0.277	0.0	0.0	
5	Carga	100	179.53	227.19	226.34	0.0
	Gasto	-0.39	-0.36	0.0	0.0	

3.- IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA EN LA COMPUTADORA Y UN EJEMPLO DE APLICACION

3.1 IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA PROPUESTA EN LA COMPUTADORA.

Tal como se mencionó en el primer capítulo de este trabajo, para la aplicación de la metodología expuesta en el -- análisis de fenómenos transitorios, se hace necesario el -- uso de la computadora. En la primera parte de este capítulo se presenta un programa de computadora en lenguaje -- Fortran, en el cual se ha implementado la metodología para el cálculo de fenómenos transitorios en sistemas de bombeo con las siguientes fronteras:

Planta de bombeo, bifurcación, cambio de espesor y torre de oscilación simple y/o de un paso.

Con el fin de facilitar al lector el manejo del programa -- se presenta a continuación una lista de las variables de -- entrada utilizadas en el programa, así como un diagrama de bloque y un listado del mismo.

LISTA DE VARIABLES DE ENTRADA.

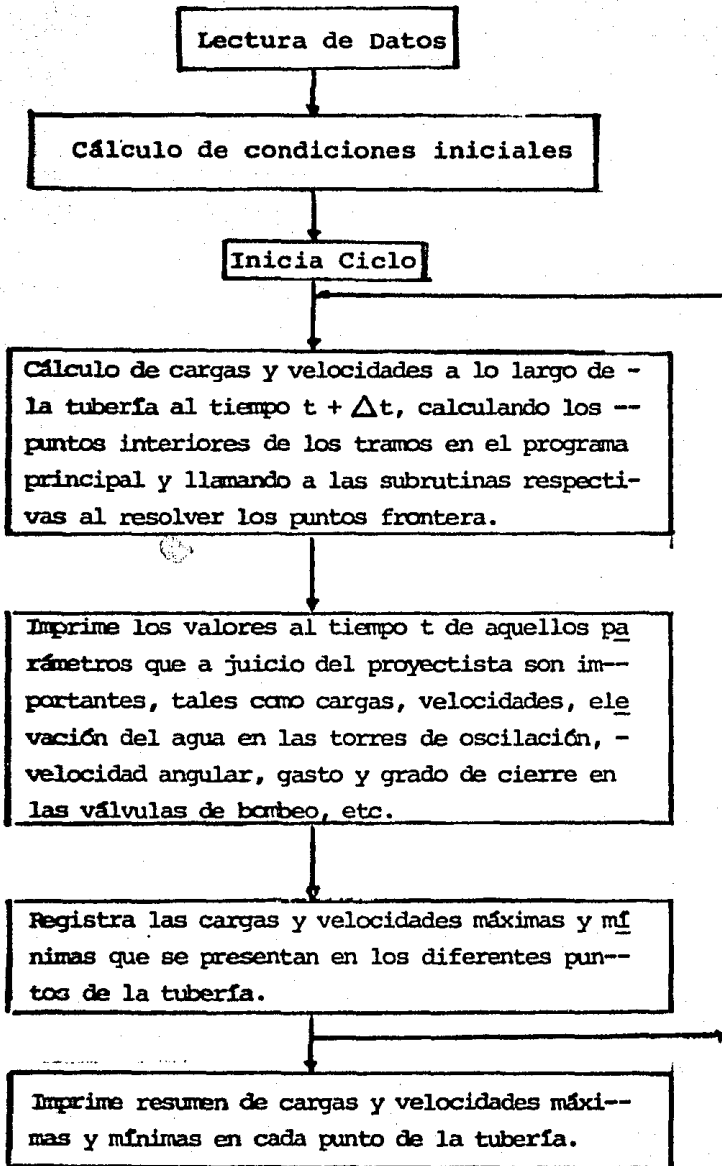
1. NCASOS: número de casos que se van a analizar.
2. IDB: indicador de bifurcación (si no existe bifurcación $IDB = 0$, si existe entonces $IDB =$ al número del tramo anterior a ésta).

3. NTD: número de tramos distintos en el sistema
4. NNPB: número de identificación de la planta de bombeo (arbitrario).
5. NVER: número 1 ó 0 para que imprima o no los datos.
6. IND: número total de puntos en la ley de cierre
7. IND2: número de puntos en la ley de cierre (primera parte).
8. NTD1: número de tramos en la rama principal.
9. ALON (I): longitud del tramo I.
10. D (I): diámetro del tramo I.
11. ES (I): espesor del tubo en el tramo I.
12. FR (I): coeficiente de fricción de Darcy en el tramo I
13. E (I): módulo de elasticidad en el tramo I.
14. CMU (I): módulo de Poisson
- 15.-NT (I): número de subtramos en que se divide el tramo I.
16. NTC (I): número 1 ó 2 que indica si es tubería o túnel

17. IFD (I): identificador de frontera
 Si IFD (I)= 1, la frontera es un cambio de es-
 sor.
 Si IFD (I)=2, la frontera es una bifurcación.
 Si IFD (I)= 3, la frontera es un tanque de os-
 cilación simple.
 Si IFD (I)= 4, la frontera es una tanque de os-
 cilación de un paso.
18. ARETO (I): área de la torre de oscilación.
19. CTE (I): elevación del agua en la torre de oscilación -
 de un paso.
20. DOT (I): diámetro del orificio de la torre.
21. QT1: gasto por la tubería ppal. despues de la bifur-
 cación.
22. QT2: gasto por la rama secundaria.
23. HVB2: elevación de llegada rama secundaria.
24. DELH2: pérdidas en la salida de la rama secundaria.
25. DELT: intervalo de tiempo utilizado para el análisis
26. TTT: tiempo de simulación.
27. QO: gasto saliendo de las bombas.
28. HSD: elevación del tanque de succión.

29. HVB: elevación del agua en la llegada de la rama -
ppal.
30. HRD: carga de diseño.
31. QRD: gasto de diseño.
32. TRD: par torsional
33. NRD: velocidad rotacional (r.p.m.)
34. WR2: momento de inercia.
35. AMO: número de bombas operando.
36. AMF: número de bombas fallando.
37. VALV: indica la existencia de válvulas en las bombas
(si VALV = 1, sí existen, si VALV = 0, no exis-
ten).
38. DELH: pérdidas en la válvula completamente abierta.
39. DELH1: pérdidas por válvula para regular gasto en la
rama ppal.
40. TC: tiempo de cierre en las válvulas en la planta
de bombeo.
41. TIC: tiempo al que se inicia el cierre.
42. TCI: tiempo al que se inicia la segunda etapa del -
cierre.

DIAGRAMA DE BLOQUE



SUBROUTINAS

PBSCA:

Por medio de esta subrutina se determinan las cargas y velocidades al tiempo $t + \Delta t$ en el punto de bombeo, que se encuentra fallando parcial o totalmente.

VALVSA:

Se calcula el grado de abertura de la válvula al tiempo t , en función de la ley de cierre.

TANOW:

Por medio de esta subrutina se determinan las cargas y velocidades al tiempo $t + \Delta t$ de los puntos continuos (anterior y posteriores) a las torres de oscilación.

LISTADO DEL PROGRAMA

```

0001 DIMENSION SA(15),E(15),CMB(15),MP(15),MTC(15),VTR(10),CPEC(15)
0002 COMMON/XX/ M(150),G(150),N(150),R(150),ALTEMA(150),MCT(150)
0003 DIMENSION UB(10),PCPT(10),FUA(15),AC(15),BC(15),FETA(15),GC(15)
0004 DIMENSION AMAXY(150),AMAXN(150),AMJNY(150),AMJNN(150),ASAXTY(150),
  1ANAXTH(150),ANJHY(150),ANJTH(150),MAGNAX(15),MAGNHC(15)
0005 DIMENSION SALD(3)
0006 COMMON/X1/AREA(15),B(15),ALON(15),VTR(15),MT(15),R(15)
0007 COMMON/X2/MAD(5),ARCTD(15),DOT(15),Q(5),MPO(5),MP
0008 COMMON/X3/MB(67),MB(67),TAS(33)
0009 COMMON/X4/CRS,TRB,HRD,MRB,MR2,MW,ARL,ISB,CLM,DELX
0010 COMMON/X7/ALF,V1,V10C,V10,V200,V20,ALO,AL00,DELTA0,ALFAD
0011 COMMON/X8/RC1,RC2,CP,CM,0,DELX,PI,J,NIB,NTD,F,ITF
0012 COMMON/X9/TA(33),TIC,TC3,TC,IMB,IMR2,EP5J
0013 REAL*8 SALTD
0014 REAL M,MRB
0015 DATA TAI/0.0000,0.0001,0.0004,0.0008,0.0014,0.0022,0.0032,0.0045,
  10.0062,0.0081,0.0111,0.0140,0.0180,0.0220,0.0270,0.0330,0.0370,
  20.0470,0.0550,0.0640,0.0800,0.0950,0.1110,0.1300,0.1740,0.2010,
  30.2420,0.2960,0.3410,0.4470,0.5380,0.7205,1.0045/
0016 DATA MW/0.634,0.643,0.646,0.640,0.629,0.613,0.595,0.575,0.552,
  20.533,0.516,0.505,0.504,0.510,0.512,0.522,0.537,0.559,0.580,0.601,
  30.630,0.642,0.652,0.722,0.753,0.782,0.808,0.832,0.857,0.879,0.904,
  40.936,0.959,0.994,1.027,1.060,1.099,1.124,1.145,1.204,1.238,1.258,
  41.271,1.282,1.078,1.066,1.047,1.018,0.990,0.931,0.075,0.808,0.737,
  50.642,0.582,0.500,0.414,0.330,0.244,0.011,-0.107,-0.148,-0.225,
  6-0.342,-0.423,-0.494,-0.556,-0.620,-0.653,-0.670,-0.670,-0.660,
  7-0.633,-0.640,-0.600,-0.570,-0.520,-0.470,-0.430,-0.360,-0.275,
  8-0.160,-0.040,0.130,0.275,0.430,0.550,0.620,0.634/
0017 DATA MR/-0.684,-0.545,-0.414,-0.292,-0.187,-0.105,-0.053,-0.012,
  10.042,0.097,0.156,0.227,0.300,0.377,0.444,0.522,0.575,0.672,0.739,
  20.743,0.797,0.837,0.845,0.855,0.896,0.877,0.839,0.833,0.804,0.759,
  30.703,0.645,0.583,0.520,0.454,0.409,0.370,0.343,0.331,0.327,0.338,
  40.354,0.372,0.405,0.450,0.504,0.552,0.579,0.603,0.614,0.617,
  50.606,0.582,0.546,0.500,0.432,0.360,0.288,0.214,0.123,0.037,
  6-0.053,-0.161,-0.248,-0.314,-0.372,-0.530,-0.740,-0.620,-1.000,
  7-1.120,-1.220,-1.370,-1.490,-1.590,-1.660,-1.690,-1.770,-1.650,
  8-1.590,-1.520,-1.420,-1.320,-1.230,-1.100,-0.990,-0.820,-0.684/
0018 DATA YA/1.0000,0.7705,0.5350,0.4490,0.3610,0.2696,0.2420,0.2010,
  10.1760,0.1300,0.1110,0.0950,0.0800,0.0640,0.0550,0.0470,0.0390,
  20.0330,0.0270,0.0230,0.0180,0.0140,0.0111,0.0066,0.0062,0.0045,
  30.0032,0.0022,0.0014,0.0005,0.0004,0.0001,0.0001/
0019 DATA GAM/G,CA,PI/1000,0.7,80665,20790,0.3,14157265/
0020 IDB=0
0021 CALL ASSIGN(2,'DK11(CUGA,CBA)')
0022 REAR(2,22)SALTD
0023 CALL CLOSE(2)
0024 22 FORMAT(2A4,A2)
0025 23 FORMAT(1H,2A1,A2)
0026 CALL ASSIGN(5,'DK11A,BTKG')
0027 REAR(5,305)MCAS05
0028 NO 2722 ILL=1,MCAS05
  E LEX DATOS DEL PROBLEMA
0027 REAR(5,305)ZMB
0033 REAR(5,305)NTB,MWP0,MUCH,IMB,IMR2

```



```

0031 IF(I00.E0.0)GO TO 327
0032 READ(S,305)NTB1
0033 327 CONTINUE
0034 DO 301 I=1,NTB
0035 READ(S,306)B(I),ALOH(I),ES(I),FR(I),FC(I),CHU(I),NT(I),NTCC(I)
0036 301 CONTINUE
0037 LL=NTB-1
0038 IF(I00.MC.0) LL=NTB-2
0039 IF(LL.E0.0)GO TO 333
0040 READ(S,303)(I=1,LL)
0041 I=NTB
0042 J=0
0043 DO 304 KI=1,LL
0044 GO TO(304,302,303,303) NTB(KI)
0045 303 I=I+1
0046 READ(S,306)B(I),ALOH(I),ES(I),FR(I),FC(I),CHU(I),NT(I),NTCC(I)
0047 READ(S,309)ANC1(I),CTE(I),DET(I)
0048 GO TO 304
0049 302 READ(S,309)DT1,DT2,HW2,DEL2
0050 304 CONTINUE
0051 313 CONTINUE
0052 NTCC=I
0053 IF(NTB.E0.1)NTCC=1
0054 READ(S,309)DEL1,DT,CO,HSR,HWB
0055 READ(S,309)HSD,WRD,TRD,MSD,MS2
0056 READ(S,305)AND,ANT,VALV,DELH,DELSH
0057 READ(S,309)TC,TIC,FC1
0058 306 FORMAT(GF10.0,2I4)
0059 305 FORMAT(10F4)
0060 309 FORMAT(GF10.0)
0061 325 TAU=1
0062 HAI=0
0063 COEF=0.0
0064 INDI=INVB
0065 VVV=00/(ORDR(AHJIAW))
0066 QT=00
0067 DO 4 I=1,NTB
0068 AREA(I)=PI*B(I)/2*HAI
0069 IF(I00.E0.0)GO TO 1
0070 IF(I.0T.I00)DT=DT1
0071 IF(I.0T.MTB)DT=DT2
0072 1 DT(I)=DT
0073 PCPT(I)=(FR(I)*ALOH(I)*200(T)*FC2)/(2.0*SD(I)*AREA(I)*2*2)
0074 4 CONTINUE
0075 DO 50 I=1,NTCC
0076 IF(NTC(I).GT.1)GO TO 3
0077 IF(J.LE.NTB) GO TO 50
0078 AREA(I)=PI*B(I)/2.0*HAI
0079 50 RATE=8(I)/ES(I)
0080 HUI(I)=1.
0081 IF(RATE.L1.25.)HUI(I)=(2.0*ES(I)/B(I))*8(I.0CHU(I))*B(I)/(D(I)*ES(I))
0082 A(I)=1440.0/(1.0*00952480(I)*HUI(I)/ES(I))*40.5
0083 GO TO 50
0084 5 A(I)=1486.483134/(1.0*290000000.0*(1.0CHU(I))*40.5

```


PAGE 004

```

0130 406 WRITE(7,439)
0131 N=0
0132 I=INT2
0133 439 FORMAT(1X,'MAYOS DE LAS FRONTERAS INTERNAS')
0134 DO 449 I=1,LL
0135 GO TO (440,441,443,444) JFBI(L)
0136 440 WRITE(7,420) L
0137 GO TO 449
0138 441 WRITE(7,421) L
0139 GO TO 449
0140 443 WRITE (7,423) L
0141 I=I+1
0142 WRITE(7,424) I,D(I),ALON(I),ES(I),FR(I),F(I),CHU(I),NT(I),A(I)
0143 400 FORMAT(//,10X,'AREA TANGHE =',F7.2,' M2,',3X,'ELEV. SCP. LINE =',
    F7.2,' M')
0144 WRITE(7,400) AREA(I),CTE(I)
0145 GO TO 449
0146 444 WRITE(7,425) L
0147 I=I+1
0148 WRITE(7,424) I,D(I),ALON(I),ES(I),FR(I),F(I),CHU(I),NT(I),A(I)
0149 WRITE(7,400) AREA(I),CTE(I)
0150 GO TO 449
0151 449 CONTINUE
0152 420 FORMAT(//,10X,'FRONTERA INT.',I2,2X,'CAMBIO DE ESPESOR, ANGULO DE
    INCLINACION, RUGOSIDAD, ETC.')
0153 421 FORMAT(//,10X,'FRONTERA INT.',I2,2X,'TRANSICION DE (90 A 90) TUBOS')
0154 423 FORMAT(//,10X,'FRONTERA INT.',I2,2X,'TANGHE DE OSCILACION UNIDO A
    TUBO PRINCIPAL',//,10X,'POR TUBERIA CORTA',//,22X,
    2,' B LONG ESP INT N. CLAS NU NS CELER',/
    3,22X,
    4,'NTS NTS NTS K0/CH2 - N/S')
0155 424 FORMAT(//,10X,7H TR=,F4.2X,F3.3,2X,F3.1,2(X,F3.1),3X,F9.1,2X,
    1F3.3,2X,13,2X,F6.1)
0156 425 FORMAT(//,10X,'FRONTERA INT.',I2,2X,'TANGHE DE OSCILACION UNIDO A
    TUBO PRINCIPAL',//,10X,'POR TUBERIA CORTA DE UN SOLO SENTIDO',//,22X,
    2,' B LONG ESP INT N. CLAS NU NS CELER',
    3,22X,
    4,'NTS NTS NTS K0/CH2 - N/S')
0157 431 FORMAT(//,10X,F4.2,2X,F3.3,2X,F3.3,2X,F3.2,2(X,F6.2),2X,F3.2,2(X
    1X,F3.3),2X,F6.2,2X,F3.3)
0158 430 CONTINUE
0159 440 K=0
0160 PCT=0
0161 I=INT2
0162 IF(I=0,GT,0) I=INT2
0164 DO 1000 I=1,INT2
0165 1000 PCT=PCT+PCT(I)
0166 I=I+1
0167 N=0
0168 DO 9 J=1,INT2
0169 1005 N=N+NT(J)
0170 IF(J,EG,INT2) N=N+J
0172 TRA=NT(J)
0173 DELX=ALON(J)/TRA

```



```

0237 ALF=1.
0238 VI=VVV
0239 ALFA=ALF
0240 XI=PI*4*AMC(VI,ALF)
0241 I1=XI*DELX*1
0242 R1=(UB(I111)-UB(I1))/DELX
0243 Z2=I1-1
0244 DO=UB(I1)-Z2*DELX*1
0245 BETAO=(ALF*ALF*VI*VI)/(DO*I1*XI)
0246 V10=VVV
0247 V20=VVV
0248 AL0=1.
0249 AL00=1.
0250 V100=VVV
0251 V200=VVV
0252 I=0
0253 NP=NP
0254 DO 733 I=1,NP
0255 ANAV(I)=V(I)
0256 ANAV(I)=V(I)
0257 ANAV(I)=N(I)-V(I)*V(I)/(2.0)-ALTEZA(I)
0258 ANAV(I)=N(I)-V(I)*V(I)/(2.0)-ALTEZA(I)
0259 ANAV(I)=0.0
0260 ANAV(I)=0.0
0261 ANAV(I)=0.0
0262 ANAV(I)=0.0
0263 733 CONTINUE
0264 NIT=NT0-1
0265 K3=0
0266 KX=0
0267 I3=K3=0
C IMPRIME VALORES AL TIEMPO T
0268 IF (NVER.CO.1)GO TO 933
0270 IF (NLI.CO.1300)GO TO 933
0272 IF (NLI.CO.0160)GO TO 920
0274 WRITE(7,23)SALTO
0275 932 WRITE(7,928)NMF
0276 928 FORMAT(/,15X,'DATOS ,, LA SALIDA DE LAS BOMBAS,NIT0',2X
1,F2)
0277 WRITE(7,929)
0278 929 FORMAT(/,/,15X,'VELOC. CARDA VEL.ANG. G/GRD TAU TI
ICMPO ',/,15X,' N/S H ADIN ADIN
2 ABIN SEC H H',/)
0279 920 K3=K3+1
0280 WRITE(7,931)V(I),I1(1),ALF,VI,TAU,T,HAD(1),HAD(2)
0281 931 FORMAT(3X,F4.3,3X,F3.3,2X,F7.4,2X,F7.4,3X,F7.4,3X,F7.2,3X,F6.2,2X
1,F7.2)
0282 KX=K3*(K3/50)150
0283 NLI=NLI+1
0284 933 NT0=0
0285 DO 720 I=1,NP
0286 NLI=I
0287 INAV(I)=N(I)-V(I)*V(I)/(2.0)-ALTEZA(I)
0288 IF (V(NLI).GT.0)ANAV(I)=INAV(I)

```

```

0290 IF(VVGR) .GT. AMIN(X) ) AMIN(X) = VVGR
0292 IF(VVGR) .LT. AMIN(X) ) AMIN(X) = V
0294 IF(VVGR) .LT. AMIN(X) ) AMIN(X) = V(OR)
0296 IF(ORCT(1) .GT. AMIN(X) ) AMIN(X) = ORCT(1)
0298 IF(ORCT(1) .LT. AMIN(X) ) AMIN(X) = V
0300 IF(ORCT(1) .LT. AMIN(X) ) AMIN(X) = ORCT(1)
0302 IF(AMIN(X) .LT. 20.0) GO TO 25
0304
0306 720 CONTINUE
0307 DO 310 I=1,NIT
0308 IF(ORCT(I) .GT. AMIN(X) ) AMIN(X) = ORCT(I)
0310 IF(ORCT(I) .LT. AMIN(X) ) AMIN(X) = ORCT(I)
0312 510 CONTINUE
0313 I=TABLET
0314 IF(I .GT. IIT) GO TO 25
0316 E=OT(I)
0317 L=C
0318 DO 310 J=1,NIT
0319 IF(OT(J) .GT. E) GO TO 9000
0321 AM=OT(J)
0322 DO 19 I=L,K
0323 OS=OT(I) - TETA(J) * RAO(OT(I) - C(I) * I)
0324 NS=OT(I) - TETA(J) * RAO(OT(I) - N(I) * I)
0325 OS=OT(I) - TETA(J) * RAO(OT(I) - O(I) - I)
0326 NS=OT(I) - TETA(J) * RAO(OT(I) - N(I) - I)
0327 CP=OS * RCI(J) * RCI(J) * RCI(J) * RCI(J)
0328 CS=NS * RCI(J) * RCI(J) * RCI(J) * RCI(J)
0329 MS(I) = (CP * C) / 2.
0330 MP(I) = (CP * C) / (2. * RCI(J))
0331
0332 19 CONTINUE
0333 9000 IF(I .GT. NIT) GO TO 20
0334 IF(I .GT. NIT) GO TO 204
0336 OS=OS(K12) - TETA(J) * RAO(J) * RCI(J) * RCI(J) - OS(K12)
0337 NS=NS(K12) - TETA(J) * RAO(J) * RCI(J) * RCI(J) - NS(K12)
0338 OS=OS(K11) - TETA(J) * RAO(J) * RCI(J) - OS(K11)
0339 NS=NS(K11) - TETA(J) * RAO(J) * RCI(J) - NS(K11)
0340 RCI=RC(J)
0341 RCI=RC(J)
0342 CP=OS * RCI * RCI * RCI * RCI
0343 CS=NS * RCI * RCI * RCI * RCI
0344 GO TO (700,701,704,704) I, I, J
0345
0346 700 CONTINUE
0347 CP(K11) = (CP * C) / (RC(J) * RCI(J))
0348 MP(K11) = MP(K11)
0349 MS(K11) = CP * RCI(J) * RCI(J)
0349 MS(K12) = MS(K12)
0350 GO TO 706
0351
0352 701 CONTINUE
0353 MS2=MS(K11) - TETA(NTR) * RAO(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR)
0354 MS2=MS(K12) - TETA(NTR) * RAO(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR)
0354 MS=MS(K11)
0355 MS=MS2 - MS(K11) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR)
0356 MS(K11) = MS2 - MS(K11) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR) * RCI(NTR)
0357 MS(K12) = MS(K12)

```

```

0328      MM(MNP11)-MM(K11)
0329      CP(K11)=(CP-MNK11)/BC1
0330      CP(K12)=CMCK(12)-CN1/BC2
0331      CP(MNP11)=CMN(MNP11)-CNC1/2
0332      GO TO 704
0333  704 CONTINUE
0334      NTO=NTD11
0335      IF((NTO(1)-C5.3) GO TO 2010
0336      IF((NTO(1)-ED.1) NTO(NTD)-M(K11)
0337      IF(CMO(NTD).LE.M(K11).AND.D3(NTD).LE.0.0) GO TO 700
0338  2010 CALL TACKS
0339      MM(K11)=MP
0340      CP(K11)=(CP-MP)/BC1
0341      MM(K12)=MP
0342      CP(K12)=(CP-CN)/BC2
0343  705 CONTINUE
0344      L=K13
0345      Z=INT(J11)11
0346  21 CONTINUE
0347      DC1=DC(1)
0348      CS=DC(1)-TETA(1)2A(1)R(0(1)-R(2))
0349      NS=DC(1)-TETA(1)2A(1)R(1(1)-R(2))
0350      CS=NS-DC(1)2S(1)R(1)2S(1)2S(1)
0351      IF(VALV.ED.0.) GO TO 9999
0352      IF(T.LT.1IC) DO TO 9999
0353      IF(T.GT.12) TAU=0.0
0354      IF(TAU.CO.0.0) GO TO 815
0355      CALL VALVSA(F,TAU)
0356      IF(TAU.LE.0.00009) TAU=0.0
0357  815 IF(TAU.CO.0.0) V1=0.0
0358      IF(TAU.CO.0.0) V1F=0.0
0359      IF(TAU.CO.0.0) V1F=0.0
0360  9999 CONTINUE
0361      CALL PPSCA(MP,TAU)
0362      DE(1)=MP
0363      CP(1)=(MP-CN)/BC1
0364      GO TO 803
0365  802 CP(1)=0.0
0366      IN(1)=CN
0367  33 CONTINUE
0368  803 DC=DC(NTD)
0369      CR=0(MN)-TETA(NTD)2A(NTD)R(0(MN)-C(MN-1))
0370      NR=0(MN)-TETA(NTD)2A(NTD)R(1(MN)-C(MN-1))
0371      CP=NR(1)2CR-R(NTD)2CR(1)2CR(1)
0372      MCE=MVD
0373      IF(120.ME.0) MCE=MVD
0374      MM(MN)=DC)COE(1)2A(1)2A(1)2A(1)
0375      CP(MN)=(CP-MCE)/BC2
0376      IF(120.CO.0) GO TO 801
0377      DC=DC(NTD1)
0378      CR=0(MNP1)-TETA(NTD1)2A(NTD1)R(0(MNP1)-C(MNP1-1))
0379      NR=0(MNP1)-TETA(NTD1)2A(NTD1)R(1(MNP1)-C(MNP1-1))
0380      CP=NR(1)2CR-R(NTD1)2CR(1)2CR(1)
0381      MM(MNP1)=MVB1

```



```

0054 DOLF=(F2 A22DU11/A21
0055 941 CONTINUE
0056 ALF=ALF/DOLF
0057 V1=V1/DV1
0058 X1=PIATAN2(V1,ALF)
0059 TOL=ABS(RA1) /ABS(DV1)
0060 I=(AND.(IC,0) TOL=POL(ABS(V2)
0061 IF(TOL.LT.0.0002)GO TO 801
0062 GO TO 800
0063 530 CONTINUE
0064 F0=HRD2(1,1)Z2222(A21A32X2)-DEL18V24ADS(V2)-DC14FAD2V26RHD
1-CH18SD
0067 A32=HRD2(2,2)Z22(A21A32X2)A33)-2,2DEL18A32(V2)-DC14FAD2V26R
0068 DV2=-F3/A33
0069 V2=V1/DV2
0070 X2=PIATAN2(V2,ALF)
0071 TOL=ABS(DV2)
0072 IF(TOL.LT.0.0001)GO TO 801
0074 800 CONTINUE
0075 WRITF(7,939)
0076 939 FORMAT(1H,///,'NO CONVERGEN EN 6 ITERACIONES LOS VALORES DE ALI
1,V1 Y V2')
0077 101 I3=X1/DELX11
0078 IF(I3.EQ.11)GO TO 500
0080 IF(AND.E1,0)GO TO 942
0082 I4=X2/DELX11
0083 IF(I4.EQ.12)GO TO 500
0085 942 CONTINUE
0086 H0=CONJUG18(ANFV11AND2V2)ICH
0087 IF(TAU.LU,0) H0=AMISV24ORD2VC14CH
0089 V100=V10
0090 V10=V1
0091 V200=V20
0092 V20=V2
0093 AL00=AL0
0094 AL0=ALF
0095 RETA0=(ALF*ALF+V10V1)2(101R12X1)
0096 ALFA0=ALF
0097 RETURN
0098 END

```

```
0001 SUBROUTINE HALVCA(T,TAU)
0002 CDRUM/CR/TAC(3),TIC,TCL,TC,IND,IND2
0003 TTAU=T-TIC
0004 IF(TCL.NE.0.)GO TO 3A
0005 BTAU=TC/(IND-1.)
0006 IZ=TTAU/BTAU+1
0007 GO TO 3F
0008
0009 3C IF(T.CI.TCL)GOTO 3D
0010 BTAU=TC1/IND2
0011 IZ=TTAU/BTAU+1
0012
0013 3F T1=(TA(I311)-TA(I3))/BTAU
0014 Z1=IZ-1
0015 TD=TA(I3)-Z1*BTAU+T1
0016 TAU=TD+T1*BTAU
0017 GO TO 4D
0018
0018 3E TTAU=T-TIC-TCL
0019 BTAU=(TC-TCL)/(IND-IND2)
0020 IZ=TTAU/BTAU+IND2
0021 T1=(TA(I311)-TA(I3))/BTAU
0022 Z1=IZ-IND2
0023 TD=TA(I3)-Z1*BTAU+T1
0024 TAU=TD+T1*BTAU
0025 5D RETURN
0026 END
HALVCA
```

```

0001  SHOROTIME TARDM
0002  COMHON/X2/ARCA(15)*R(15)+ALON(15)+FR(15)+HT(15)+R(15)
0003  COMHON/X4/RO(5)+ANCO(15)+DOT(15)+Q3(5)+RPO(5)+IP
0004  COMHON/XU/RC1,RC2,CP,CRG,RLT,P1,J,HTD,HTD,F
0005  CD=1/(1./R2311./R21)
0006  CE=(C1/R3+CR/R2)*CD
0007  A3=AREA(NTD+HTD)
0008  C4=ALON(MD+INTD)/(64RELT*E3)
0009  C3=DEL1/11+ARETO(NTD+INTD)
0010  XK1=(0.6346+.3)*C(DT(NTD+INTD)/D(NTD+INTD)+26)+22
0011  XK2=ABS(1./XK1-1.)
0012  M2=(FR(NTD+INTD)+ALON(NTD+INTD)/(2.+465R(NTD+INTD)))*XK2/(2.+46)*/
    1A3*12
0013  C10=H2D(NTD)-CE/2.-HPO(HTD)/2.- (C3-C4)*E3(HTD)
    1-M2*U3(HTD)+ABS(C3(HTD))
0014  BP=C10/(C0/2.+C3/C4)
0015  HP=C3/C0*U3
0016  H2G(HTD)=HP
0017  H2R(NTD)=H2R(NTD)-DEL1/ARETO(NTD+INTD)+C3(NTD)*H2G/2.
0018  Q3(HTD)=BP3
0019  RETURN
0020  END
TARDM

```

3.2 EJEMPLO DE APLICACION.

Se desea bombear un gasto de $3.15 \text{ m}^3/\text{seg.}$ desde una elevación de 104.0 m.s.n.m. y entregarlo de la siguiente manera:

$2.15 \text{ m}^3/\text{s}$ a la elevación de 238.56 m.s.n.m. y
 $1.00 \text{ m}^3/\text{s}$ a la elevación de 236.00 m.s.n.m.

Las características de la tubería en la conducción se - - muestran en la figura 3.2.1, donde se presenta la conducción en planta.- El perfil del trazo de la conducción se muestra en la fig. 3.2.2

Datos de la planta de bombeo:

Número de unidades = 5
 Gasto de diseño = $0.63 \text{ m}^3/\text{s.}$
 Momento de diseño = 6332.24 kg.-m
 Velocidad rotacional = 1800 r.p.m.
 Momento de inercia = 230 kg.-m^2

Datos generales:

$\gamma = 1000.0 \text{ kg/m}^3$
 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
 Módulo $K = 20900.0 \text{ kg/cm}^2$

Para llevar a cabo el análisis de fenómenos transitorios en el sistema se realizaron tres corridas que se anexan al final de este capítulo y se detallan a continuación.

CORRIDA No. 1.-

Se llevó a cabo la simulación para las siguientes condiciones:

No. de bombas operando = 0

No. de bombas fallando = 5

Tiempo de simulación = 50 seg.

Intervalo de tiempo utilizado = 0.40 seg.

VALV = 1 (existen válvulas en las bombas)

Tiempo de cierre en las válvulas T_C = 30 seg.

ANALISIS DE RESULTADOS

Datos a la salida de las bombas, punto 1.

Velocidad mínima = 1.468 m/s.

Velocidad máxima = 2.131 m/s.

Carga mínima = 100.508 mts.

Carga máxima = 345.97 mts.

Velocidad angular mínima = -1.1492

Al instante siguiente al paro de las bombas se inicia un fuerte decremento en la carga, el cual prosigue hasta $t = 8.4$ seg. es decir al tiempo en que el primer frente de onda vaya y regrese, a partir de ese momento la carga empieza a aumentar y la velocidad disminuye hasta volverse negativa ($t = 9.6$ seg.) Con el agua en sentido hacia las bombas al tiempo en que se lleva a cabo la maniobra de cierre se produce un incremento -

de carga en función de la magnitud del cambio de velocidad y de los valores que va tomando TAU.

Este proceso ocasiona que la carga llegue a 345.97 mts. - - -
($t = 28$ seg.) es decir 96 mts. arriba de la carga en operación normal.

Con la finalidad de bajar esta carga máxima, se realizaron corridas con un tiempo de cierre mayor a los 30 seg., logrando bajar el incremento de carga, pero se observó un aumento en el valor absoluto de la velocidad angular que sobrepasa el límite de tolerancia (-1.200).

RESUMEN DE LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS DE LA TUBERIA

En la fig. 3.2.5 se han vaciado los valores de cargas máximas y mínimas a lo largo de la tubería, en ella puede observarse que no hay un solo punto en toda la tubería que no este sujeto a -- cargas negativas de gran magnitud, lo que resalta la necesidad de proteger la conducción por medio de un dispositivo adecuado para evitar un colapso inminente.

CORRIDA No. 2

Se llevó a cabo la simulación para las siguientes condiciones:

Número de bombas operando = 0

Número de bombas fallando = 5

Tiempo de simulación = 50 seg.

Intervalo de tiempo utilizado = 0.4 seg.

VALV = 1 (existen válvulas en las bombas)
Tiempo de cierre en las válvulas = 6 seg.

Se consideró un tanque de oscilación de un paso a 375 m. de la planta de bombeo con las siguientes características:

Area del tanque = 20 m^2
Elev. superficie libre = 220 m.s.n.m.
Diámetro de la tubería de conexión = 1.067 mts.
Longitud de la tubería de conexión = 5.00 mts.

ANALISIS DE RESULTADOS

Datos a la salida de las bombas, punto 1.

Velocidad mínima = -2.42 m/seg.
Velocidad máxima = 2.131 m/seg.
Carga mínima = 113.24 mts.
Carga máxima = 258.09 mts.
Velocidad angular mínima = - 1.11

Al instante siguiente al paro de las bombas se inicia un fuerte decremento en la carga, el cual continua hasta el tiempo $t = 1.20$ seg., tiempo en que se aprecia empieza a trabajar la torre (columna H (1)) a partir del cual las velocidades se vuelven negativas ocasionando un incremento en la carga que continúa hasta tomar el valor de 258.0 mts. ($t = 4.8$ seg.) - 1.2 seg. después las válvulas quedan cerradas apreciándose en la carga una tendencia a estabilizarse.

RESUMEN DE LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS DE LA TUBERIA

En la figura 3.2.4 se ha vaciado los valores de cargas máximas y mínimas a lo largo de la tubería. La línea de cargas máxima se apega más a la de operación normal y la línea de cargas mínimas sin llegar a tener las magnitudes del caso anterior sigue por debajo de la línea del terreno, lo que indica que el dispositivo propuesto no es suficiente para proteger el sistema.

CORRIDA No. 3

Se llevó a cabo la simulación para las siguientes condiciones:

Número de bombas operando = 0

Número de bombas fallando = 5

Tiempo de simulación = 120 seg.

Intervalo de tiempo utilizado = 0.40 seg.

VALV = 1 (existen válvulas en las bombas)

Tiempo de cierre en las válvulas TC = 6 seg.

Se consideró un tanque de oscilación simple a 375 m. de la - - planta de bombeo (fig. 3.2.5) con las siguientes características:

Area del tanque = 7.00 M²

Diámetro de la tubería de conexión = 0.559 mts.

Longitud de la tubería de conexión = 10 mts.

ANALISIS DE RESULTADOS

Datos a la salida de las bombas, punto 1.

Velocidad mínima = -2.073 m/seg.

Velocidad máxima = 2.131 m/seg

Carga mínima = 132.29 mts.

Carga máxima = 262.47 mts.

Velocidad angular mínima = -1.095

Al instante siguiente al paro de las bombas se inicia un fuerte decremento en la carga, que continua hasta $t = 1.20$ seg., 0.4 segundos despues de que empezó a trabajar la torre. (ver columna # (1)), a partir de este tiempo las velocidades se vuelven negativas ocasionando la elevación de la carga al valor de - 262 mts. de donde disminuye unos cuantos metros y tiende a estabilizarse.

RESUMEN DE LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS DE LA TUBERIA

En la figura 3.2.5 se han vaciado los valores de cargas máximas y mínimas a lo largo de la tubería. En ella puede observarse - que la línea de cargas máximas anda en el orden de la de operación normal, así como que la línea de cargas mínimas se mantiene en todos los puntos de la tubería con por lo menos 6 ó 7 metros arriba del terreno, de donde se deduce que la tubería esta protegida para los fenómenos transitorios ocasionados por un - paro total en la planta de bombeo.

L = LONGITUD DE TRAMO
Ø = DIAMETRO EN EL TRAMO
Q = GASTO QUE CONDUCE EL TRAMO
f = COEFICIENTE DE FRICION DE DARCY
———— CONDUCCION PRINCIPAL
----- CONDUCCION SECUNDARIA

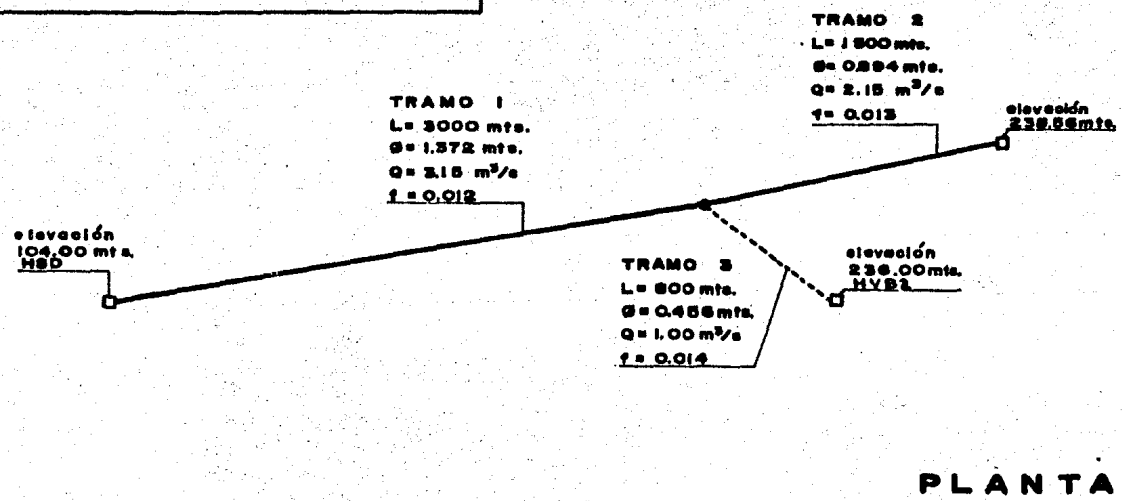


fig. 3-2-1

fig. 3-2-2

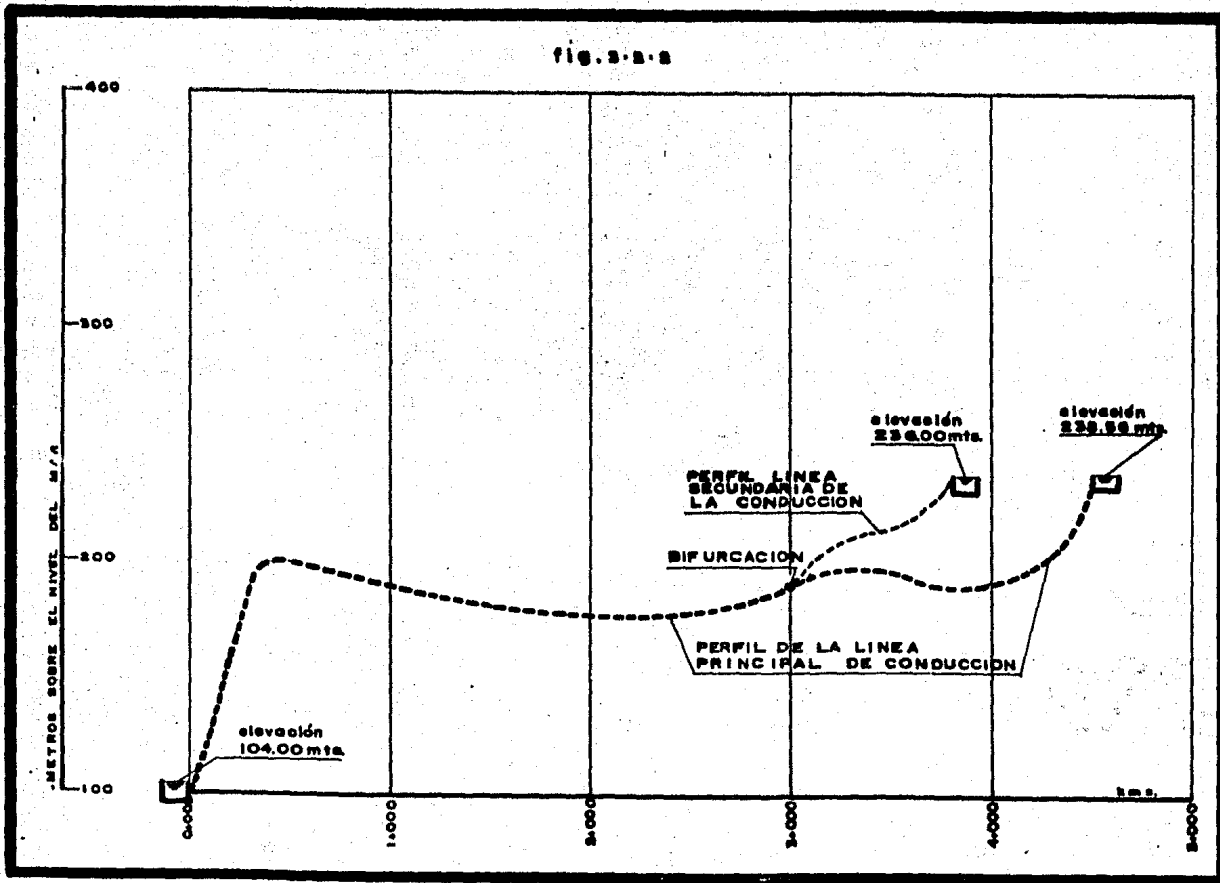


FIG. 3-2-3

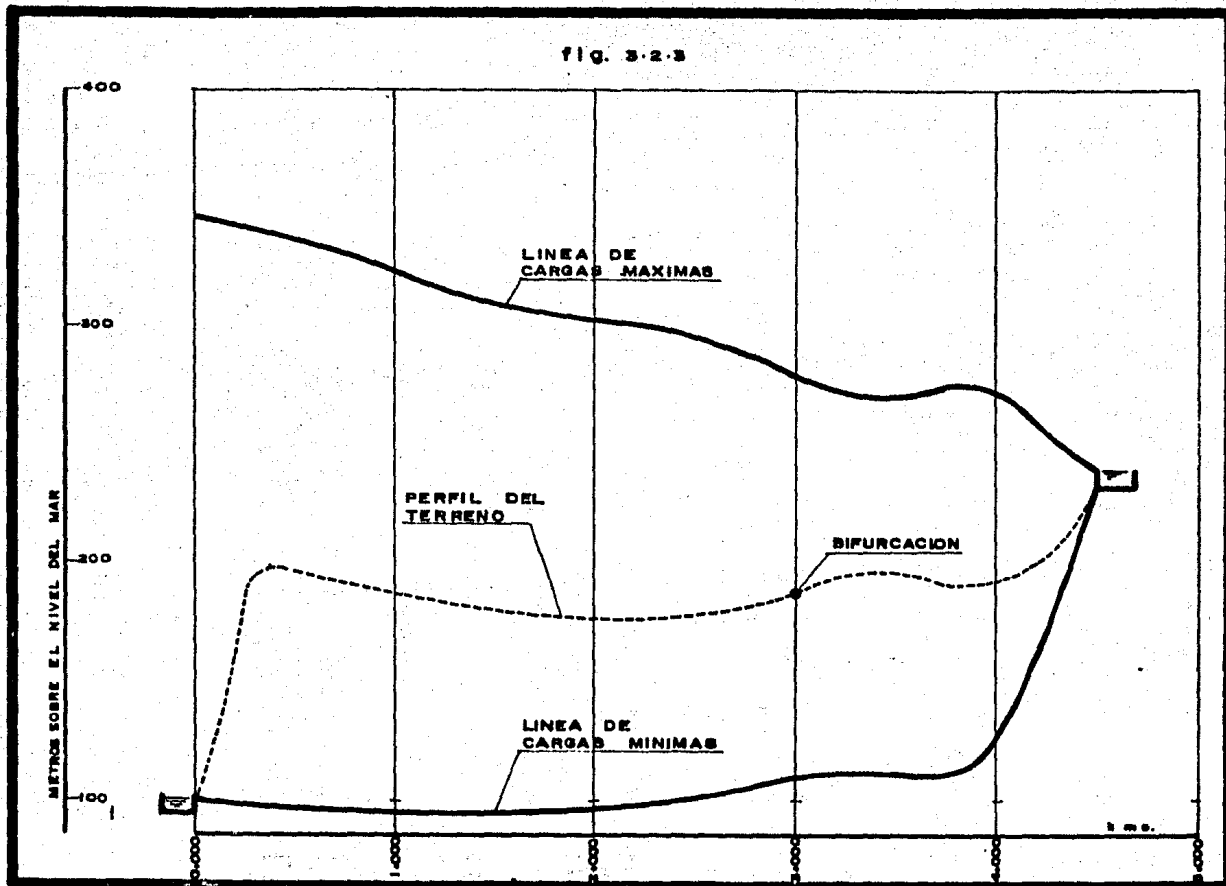


fig. 5.2.4

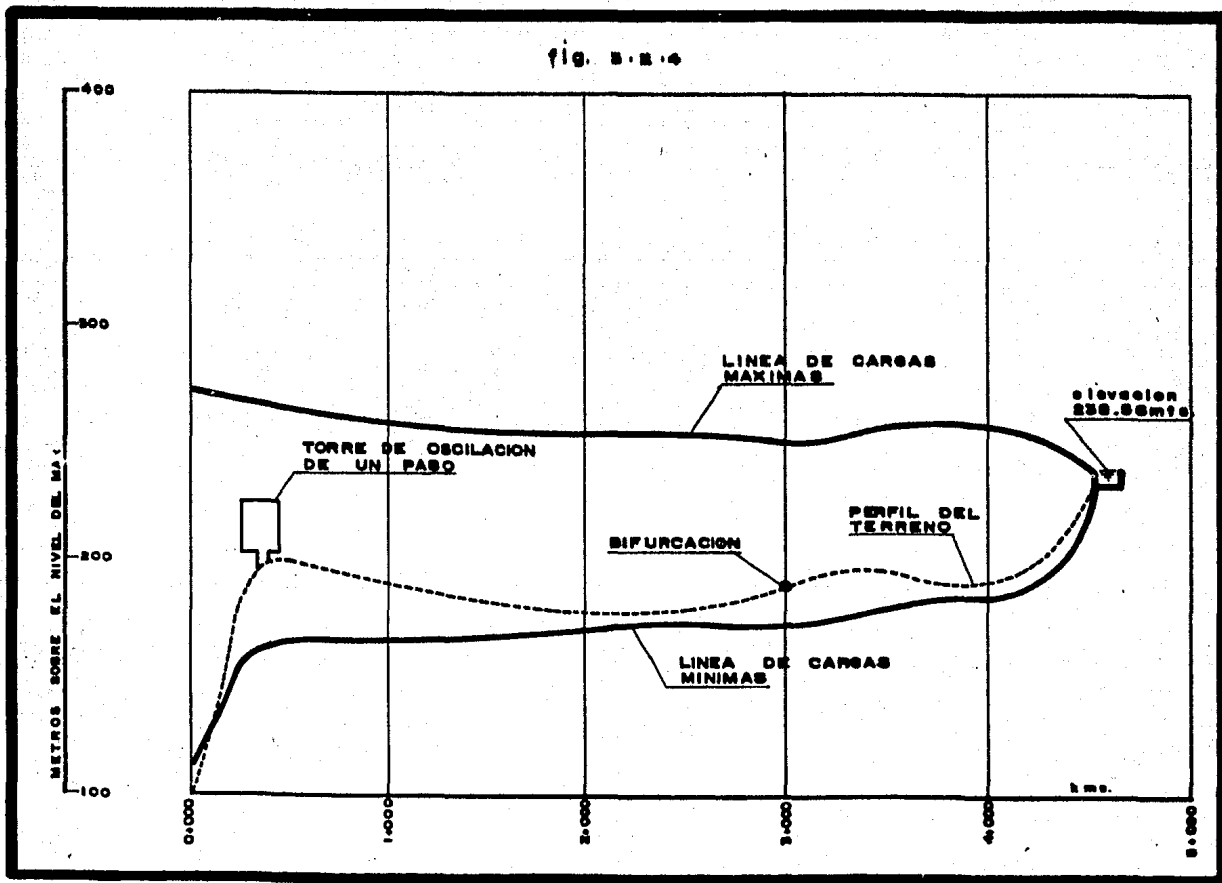
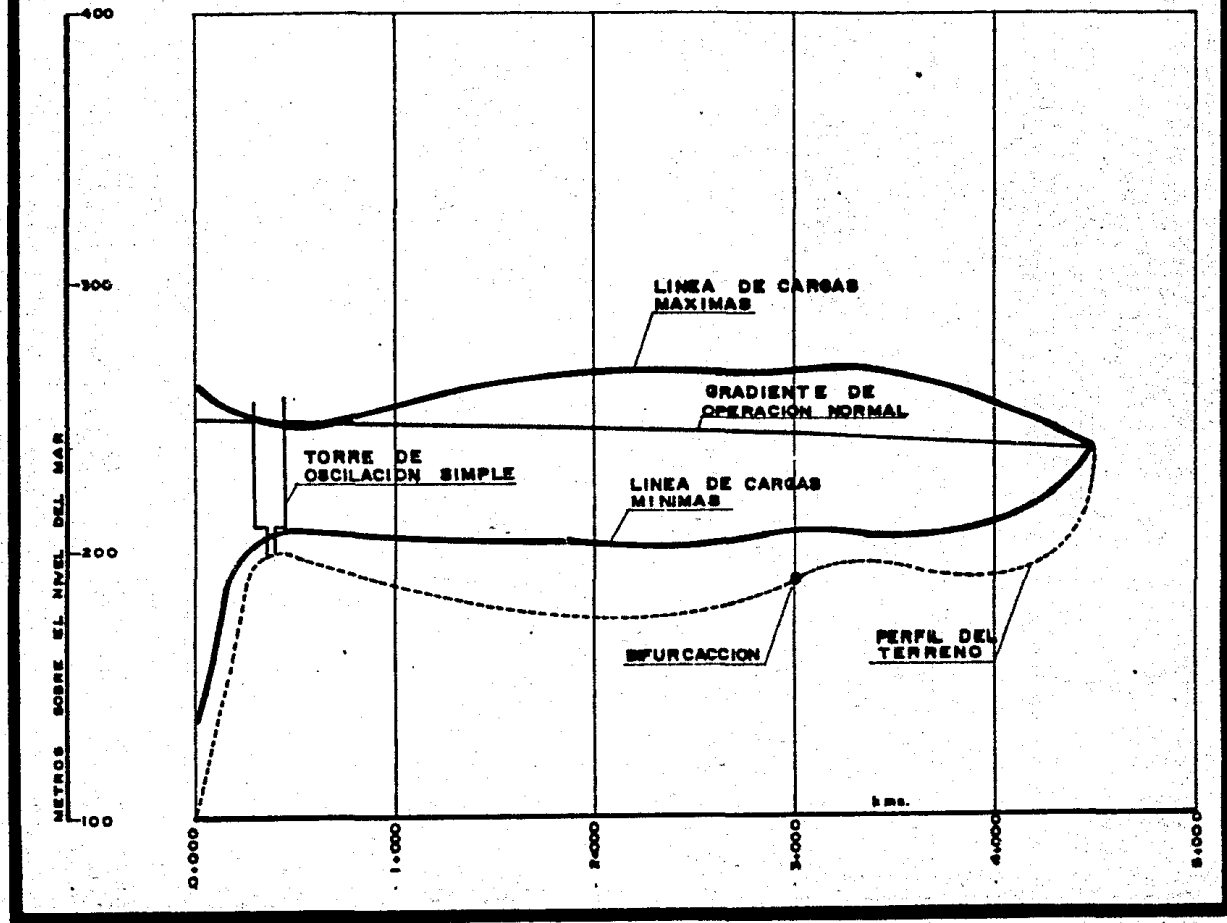


fig. 3-2-5



C O R R I D A N o. 1

ALFONSO MONTANO
CALCULO DE TRANSITORIOS

DATOS DEL SISTEMA

DATOS DE LA PLANTA DE BOMBEO 1

CAUDAL BMS- 0.43 M³/S
 CARGA BMS- 144.30 MTS.
 HORNEN BMS- 4332.24 KGS
 VEL. BMS- 1000.00 RPM
 DIA DE IN- 230.00 K-02.
 DIA FALLA- 3
 DIA OPERA- 0

08 DATOS GENERALES 04

QMS- 1000.0000/KI Q- 9.000/02 TIEMPO DE SID- 50.00 S
 DELT- 0.00 S NO DE TRAMOS CON COMB. DIFERENTES 3
 MUELLO K- 20000.0 K/C02
 BASTO 3.0000/S ALTIMA TORNILLO DE SUCCION- 104.00 M
 ALTIMA DE LLEVADA- 230.54 M

DATOS DE LOS TRAMOS

D	LINE	ESP	FRI	N. ELAS	NO	MS	CLER
	BYS	BYS	-	K/C02	-	-	M/S
TRAMO 1	1.172	3000.0	0.009	0.012	2100000.0	0.300	8 707.6
TRAMO 2	1.047	1700.0	0.006	0.013	2100000.0	0.300	4 815.2
TRAMO 3	0.762	800.0	0.005	0.014	2100000.0	0.300	2 707.7

DATOS DE LAS FRONTERAS INTERIAS

102

FRONTERA INT 1 TRANSICION DE UNO A DOS TUDOS

DATOS DE LAS VALVULAS

VALV	DELH	TC	TIC	TCI	DELH	INVEN
1.0	0.0114	20.00	0.00	0.00	0.0000	0

DATOS RELATIVOS A LA RIFINICACION

GASTO INICIAL = 3.150 M³/S
 GASTO TUD.PRINC = 2.150 M³/S
 GASTO TUD. SEC. = 1.000 M³/S
 ELEV. LLEGADA = 236.000 M
 PERDIDAS LLEG. = 4.640 M
 TRANS T.PRINC. = 2

DATOS A LA CALZADA DE LAS BOMBAS-FUENTE I

VELOC. M/S	CARGA N	VEL. ANG. ARIN	G/GRS ARIN	TAN ARIN	TIEMPO SEG	N	
						N	N
2.121	250.020	1.0000	1.0000	1.0000	0.00	0.00	0.00
1.152	137.444	0.4103	0.5407	0.8807	0.40	0.00	0.00
0.679	134.170	0.4513	0.4124	0.7415	0.80	0.00	0.00
0.741	127.758	0.3380	0.3549	0.4494	1.20	0.00	0.00
0.655	114.543	0.2961	0.3260	0.3913	1.60	0.00	0.00
0.440	112.641	0.2323	0.3077	0.3241	2.00	0.00	0.00
0.636	110.469	0.2202	0.2783	0.4082	2.40	0.00	0.00
0.423	108.003	0.1954	0.2924	0.4502	2.80	0.00	0.00
0.406	107.043	0.1759	0.2845	0.4124	3.20	0.00	0.00
0.392	105.321	0.1403	0.2777	0.3751	3.60	0.00	0.00
0.379	104.084	0.1075	0.2719	0.3344	4.00	0.00	0.00
0.384	103.343	0.1372	0.2740	0.2976	4.40	0.00	0.00
0.384	102.843	0.1290	0.2740	0.2663	4.80	0.00	0.00
0.385	102.327	0.1225	0.2747	0.2543	5.20	0.00	0.00
0.385	102.331	0.1172	0.2747	0.2427	5.60	0.00	0.00
0.391	102.141	0.1130	0.2773	0.2254	6.00	0.00	0.00
0.394	101.984	0.1094	0.2788	0.2081	6.40	0.00	0.00
0.427	101.439	0.1071	0.2941	0.1947	6.80	0.00	0.00
0.451	100.973	0.1063	0.3028	0.1840	7.20	0.00	0.00
0.448	100.572	0.1041	0.3134	0.1711	7.60	0.00	0.00
0.477	100.500	0.1043	0.3177	0.1513	8.00	0.00	0.00
0.472	103.222	0.1042	0.2717	0.1112	8.40	0.00	0.00
0.224	105.403	0.0990	0.1042	0.1227	8.80	0.00	0.00
0.045	103.397	0.0947	0.0212	0.1143	9.20	0.00	0.00
-0.051	103.639	0.0923	-0.0240	0.1072	9.60	0.00	0.00
-0.531	112.090	0.0748	-0.2492	0.1003	10.00	0.00	0.00
-1.076	130.004	-0.0040	-0.5050	0.0934	10.40	0.00	0.00
-1.442	148.013	-0.1733	-0.6840	0.0872	10.80	0.00	0.00
-1.649	163.637	-0.4017	-0.7737	0.0800	11.20	0.00	0.00
-1.609	175.041	-0.6102	-0.7530	0.0740	11.60	0.00	0.00
-1.444	182.132	-0.7822	-0.6780	0.0688	12.00	0.00	0.00
-1.270	187.021	-0.8285	-0.5942	0.0633	12.40	0.00	0.00
-1.153	189.401	-0.8633	-0.5421	0.0588	12.80	0.00	0.00
-1.122	191.413	-0.8789	-0.5247	0.0544	13.20	0.00	0.00
-1.147	194.103	-0.8909	-0.5381	0.0509	13.60	0.00	0.00
-1.179	197.673	-0.9054	-0.5332	0.0473	14.00	0.00	0.00
-1.194	201.140	-0.9214	-0.5412	0.0441	14.40	0.00	0.00
-1.184	203.628	-0.9348	-0.5367	0.0407	14.80	0.00	0.00
-1.159	204.670	-0.9423	-0.5439	0.0377	15.20	0.00	0.00
-1.129	204.373	-0.9444	-0.5298	0.0332	15.60	0.00	0.00
-1.107	203.597	-0.9397	-0.5194	0.0316	16.00	0.00	0.00
-1.103	203.099	-0.9346	-0.5179	0.0300	16.40	0.00	0.00
-1.110	203.615	-0.9316	-0.5248	0.0273	16.80	0.00	0.00
-1.140	203.010	-0.9323	-0.5350	0.0256	17.20	0.00	0.00
-1.123	206.043	-0.9359	-0.5419	0.0239	17.60	0.00	0.00
-1.217	211.842	-0.9454	-0.5714	0.0220	18.00	0.00	0.00
-1.313	221.647	-0.9679	-0.6171	0.0199	18.40	0.00	0.00
-1.393	234.794	-1.0023	-0.6548	0.0178	18.80	0.00	0.00
-1.427	247.443	-1.0406	-0.6499	0.0161	19.20	0.00	0.00
-1.447	260.051	-1.0740	-0.6794	0.0144	19.60	0.00	0.00

DATOS A LA SALIDA DE LAS BOMBAS, PUNTO 1

VELOC. M/S	CARGA N	VEL.ANG. ABIN	Q/ORD ADIN	TAU ADIN	TIEMPO SEG	M	M
-1.463	274.483	-1.1077	-0.6891	0.0130	20.00	0.00	0.00
-1.463	206.761	-1.1333	-0.6868	0.0118	20.40	0.00	0.00
-1.425	295.591	-1.1492	-0.6697	0.0106	20.80	0.00	0.00
-1.347	290.140	-1.1400	-0.6321	0.0096	21.20	0.00	0.00
-1.233	294.694	-1.1315	-0.5793	0.0085	21.60	0.00	0.00
-1.112	297.629	-1.1060	-0.5210	0.0075	22.00	0.00	0.00
-0.993	201.031	-1.0576	-0.4536	0.0063	22.40	0.00	0.00
-0.925	277.305	-1.0100	-0.4137	0.0057	22.80	0.00	0.00
-0.873	279.276	-0.9834	-0.4099	0.0047	23.20	0.00	0.00
-0.820	206.007	-0.9197	-0.3027	0.0043	23.60	0.00	0.00
-0.701	294.567	-0.8706	-0.3664	0.0037	24.00	0.00	0.00
-0.713	303.104	-0.8379	-0.3347	0.0032	24.40	0.00	0.00
-0.647	308.516	-0.7966	-0.3039	0.0027	24.80	0.00	0.00
-0.570	312.599	-0.7533	-0.2673	0.0023	25.20	0.00	0.00
-0.497	316.590	-0.7070	-0.2331	0.0020	25.60	0.00	0.00
-0.425	321.473	-0.6592	-0.1993	0.0016	26.00	0.00	0.00
-0.356	327.900	-0.6104	-0.1670	0.0013	26.40	0.00	0.00
-0.295	334.332	-0.5617	-0.1385	0.0010	26.80	0.00	0.00
-0.230	340.458	-0.5136	-0.1090	0.0008	27.20	0.00	0.00
-0.104	346.766	-0.4673	-0.0854	0.0006	27.60	0.00	0.00
-0.136	345.972	-0.4237	-0.0636	0.0005	28.00	0.00	0.00
-0.094	345.025	-0.3827	-0.0440	0.0003	28.40	0.00	0.00
-0.055	344.722	-0.3444	-0.0259	0.0002	28.80	0.00	0.00
0.000	335.576	0.0000	0.0000	0.0000	29.20	0.00	0.00
0.000	324.501	0.0000	0.0000	0.0000	29.60	0.00	0.00
0.000	313.760	0.0000	0.0000	0.0000	30.00	0.00	0.00
0.000	303.888	0.0000	0.0000	0.0000	30.40	0.00	0.00
0.000	295.685	0.0000	0.0000	0.0000	30.80	0.00	0.00
0.000	289.070	0.0000	0.0000	0.0000	31.20	0.00	0.00
0.000	283.692	0.0000	0.0000	0.0000	31.60	0.00	0.00
0.000	278.813	0.0000	0.0000	0.0000	32.00	0.00	0.00
0.000	273.839	0.0000	0.0000	0.0000	32.40	0.00	0.00
0.000	267.903	0.0000	0.0000	0.0000	32.80	0.00	0.00
0.000	259.456	0.0000	0.0000	0.0000	33.20	0.00	0.00
0.000	248.334	0.0000	0.0000	0.0000	33.60	0.00	0.00
0.000	234.806	0.0000	0.0000	0.0000	34.00	0.00	0.00
0.000	220.720	0.0000	0.0000	0.0000	34.40	0.00	0.00
0.000	207.567	0.0000	0.0000	0.0000	34.80	0.00	0.00
0.000	195.917	0.0000	0.0000	0.0000	35.20	0.00	0.00
0.000	185.925	0.0000	0.0000	0.0000	35.60	0.00	0.00
0.000	176.257	0.0000	0.0000	0.0000	36.00	0.00	0.00
0.000	166.043	0.0000	0.0000	0.0000	36.40	0.00	0.00
0.000	157.870	0.0000	0.0000	0.0000	36.80	0.00	0.00
0.000	150.244	0.0000	0.0000	0.0000	37.20	0.00	0.00
0.000	145.751	0.0000	0.0000	0.0000	37.60	0.00	0.00
0.000	144.668	0.0000	0.0000	0.0000	38.00	0.00	0.00
0.000	146.773	0.0000	0.0000	0.0000	38.40	0.00	0.00
0.000	150.400	0.0000	0.0000	0.0000	38.80	0.00	0.00
0.000	156.938	0.0000	0.0000	0.0000	39.20	0.00	0.00
0.000	165.053	0.0000	0.0000	0.0000	39.60	0.00	0.00

DATOS A LA SALIDA DE LAS BOMBAS-FUENTES 1

VELOC. M/S	CARGA M	VEL. ANG. ANG	W/SEG ANG	TAN ANG	TIEMPO SEG	M	M
0.000	175.381	0.0000	0.0000	0.0000	40.00	0.00	0.00
0.000	184.654	0.0000	0.0000	0.0000	40.10	0.00	0.00
0.000	171.120	0.0000	0.0000	0.0000	40.20	0.00	0.00
0.000	176.720	0.0000	0.0000	0.0000	41.20	0.00	0.00
0.000	201.743	0.0000	0.0000	0.0000	41.40	0.00	0.00
0.000	207.140	0.0000	0.0000	0.0000	42.00	0.00	0.00
0.000	213.607	0.0000	0.0000	0.0000	42.40	0.00	0.00
0.000	221.901	0.0000	0.0000	0.0000	42.80	0.00	0.00
0.000	232.262	0.0000	0.0000	0.0000	43.20	0.00	0.00
0.000	244.417	0.0000	0.0000	0.0000	43.60	0.00	0.00
0.000	237.017	0.0000	0.0000	0.0000	44.00	0.00	0.00
0.000	271.302	0.0000	0.0000	0.0000	44.40	0.00	0.00
0.000	283.720	0.0000	0.0000	0.0000	44.80	0.00	0.00
0.000	279.134	0.0000	0.0000	0.0000	45.20	0.00	0.00
0.000	302.751	0.0000	0.0000	0.0000	45.60	0.00	0.00
0.000	307.771	0.0000	0.0000	0.0000	46.00	0.00	0.00
0.000	315.000	0.0000	0.0000	0.0000	46.40	0.00	0.00
0.000	320.830	0.0000	0.0000	0.0000	46.80	0.00	0.00
0.000	324.147	0.0000	0.0000	0.0000	47.20	0.00	0.00
0.000	324.315	0.0000	0.0000	0.0000	47.60	0.00	0.00
0.000	322.496	0.0000	0.0000	0.0000	48.00	0.00	0.00
0.000	317.786	0.0000	0.0000	0.0000	48.40	0.00	0.00
0.000	311.114	0.0000	0.0000	0.0000	48.80	0.00	0.00
0.000	301.570	0.0000	0.0000	0.0000	49.20	0.00	0.00
0.000	275.252	0.0000	0.0000	0.0000	49.60	0.00	0.00

RENDIM DE LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS EN LA TUNELERIA

FUENTE	VELOCIDAD M/S	MAX.	TIEMPO S	VELOCIDAD M/S	MIN.	CARGA METROS	MAXIMA	TIEMPO S	CARGA METROS	MINIMA	TIEMPO S
1	2.130632	0.00	-1.608512	11.20	345.970084	28.00	100.404457	0.00			
2	2.130632	0.00	-1.677754	11.20	340.013780	28.00	70.670422	4.00			
3	2.130632	0.00	-1.717174	17.60	331.040332	28.00	77.211078	7.20			
4	2.130632	0.00	-1.773737	17.60	320.691875	28.00	96.923315	6.00			
5	2.130632	0.00	-1.775494	17.20	310.353430	27.60	97.025483	6.40			
6	2.130632	0.00	-1.776300	18.00	305.126617	28.00	97.536957	6.00			
7	2.130673	2.00	-1.778035	18.00	295.109715	30.40	100.203353	5.60			
8	2.130678	2.00	-1.800012	18.00	271.396423	30.00	101.070176	5.20			
9	2.176122	3.20	-1.808202	17.60	280.364108	30.00	110.353307	4.00			
10	2.400472	0.00	-1.817677	17.60	280.560122	30.00	110.347647	4.00			
11	2.400472	0.00	-1.832333	17.60	271.501626	17.20	110.453178	5.20			
12	2.400472	0.00	-1.870630	16.00	274.300912	16.00	110.779053	5.60			
13	2.400472	0.00	-1.743003	16.00	261.036317	16.00	141.664490	5.20			
14	2.400472	0.00	-1.856046	16.00	238.309770	20.00	238.263220	0.00			
15	2.240341	3.20	-1.820017	15.00	280.300237	30.00	110.351172	4.00			
16	2.240323	3.60	-1.870233	15.00	230.132203	20.00	117.360400	4.40			
17	2.200000	4.00	-1.820046	15.00	240.964537	4.00	221.120720	16.00			

C O R R I D A N o. 2

ALFREDO MONTAÑO
CALCULO DE TRANSUNTOS

DATOS DEL SISTEMA

DATOS DE LA PLANTA DE BOMBEO 1

CASIO BPS= 0.63 KCV/S
CARGA BPS= 146.70 NTS.
MOMEN BPS= 4332.24 KG-M
VEL ROTAC= 1800.00 RPM
MOM DC IM= 230.00 K-RE2
ROM FALLA= 3
ROM OPERA= 0

DATOS GENERALES

DAMA= 1000.00KG/M3 G= 9.81N/S2 TIEMPO DE CIN= 50.00 S
DELTA= 0.40 S NU DE TRANOS CON CARAC. DIFERENTES 4
MODULO K= 20700.0 KG/CM2

CASIO 3.15M/S ALTURA TANQUE DE SUCCION= 104.00 M
ALTURA DE LLEGADA= 238.56 M

DATOS DE LOS TRANOS

	D	LONG	ESP	FRI	N. ELAS	MU	MS	CELER
	MTS	MTS	MTS		KG/CM2			M/S
TRANOS 1	1.372	375.0	0.009	0.012	2100000.0	0.300	1	507.6
TRANOS 2	1.372	2525.0	0.009	0.012	2100000.0	0.300	7	507.6
TRANOS 3	1.067	1500.0	0.006	0.013	2100000.0	0.300	4	845.2
TRANOS 4	0.742	800.0	0.005	0.014	2100000.0	0.300	2	507.7

DATOS DE LAS OULVIAS

QULV	DELTA	TC	TTC	TCL	DELTA	QULV
1.0	0.0114	1.00	0.00	0.00	0.0000	0

DATOS RELATIVOS A LA DIFUSION

GASTO INICIAL = 1.150 KL/S
 GASTO TUB.PRINC = 2.150 KL/S
 GASTO TUB. SEC. = 1.000 KL/S
 ELEV. LLEGADA = 214.000 M
 FRENTERO LLEG. = 4.640 M
 TUBOS T.PRINC. = 3

DATOS DE LAS FRENTERAS INTERNAS

FRENTERA INT. 1 TAMBO DE OSCILACION UNICO ATUO PRINCIPAL
FOR TUBERIA CONSTA DE UN SOLO SENTIDO

B	LONG	ESP	FRI	N. CLAS	NO	MS	CELER
M/S	M/S	M/S		KL/CM2			M/S
TUBOS 5	1.067	5.0	0.005	0.014	2100000.0	0.300	1 814.7

AREA TAMBO = 26.00 M2 ELEV. SUP.LINE = 220.00 M

FRENTERA INT 2 TRANSICION DE UNO A DOS TUBOS

TUBOS NO. 1 ALTURA EXC.= 220.000 ALTURA MIN.= 217.428 ULTIMA ELEV.= 217.020

DATOS A LA SALIDA DE LAS BOMBAS-PIRTO I

VELDC. M/C	CARGA N	VEL.AMG. ADIN	Q/ORD ADIN	TAU ADIN	TIEMPO SEC	N(C)	
						N	M
2.131	250.000	1.0000	1.0000	1.0000	0.00	219.00	0.00
1.152	159.457	0.5108	0.5108	0.5204	0.40	220.00	0.00
0.870	134.157	0.4514	0.4123	0.3366	0.80	220.00	0.00
0.764	122.734	0.3880	0.3548	0.2256	1.20	219.90	0.00
-1.510	167.022	0.1801	-0.7085	0.1515	1.60	219.90	0.00
-0.615	116.244	0.0335	-0.2835	0.1002	2.00	219.81	0.00
-7.421	225.862	-0.2814	-1.1360	0.0588	2.40	219.70	0.00
-1.674	105.586	-0.6275	-0.7852	0.0475	2.80	219.57	0.00
2.760	257.719	-0.9230	-1.0365	0.0326	3.20	219.47	0.00
-1.430	249.257	-1.0940	-0.6712	0.0229	3.60	219.36	0.00
1.430	274.258	-1.1166	-0.6749	0.0130	4.00	219.27	0.00
-0.723	242.209	-1.0036	-0.3392	0.0075	4.40	219.10	0.00
0.507	250.070	-0.9556	-0.2764	0.0037	4.80	219.11	0.00
0.254	230.933	-0.8199	-0.1190	0.0016	5.20	219.05	0.00
-0.007	218.632	-0.6666	-0.0409	0.0005	5.60	218.99	0.00
0.000	221.724	0.0000	0.0000	0.0000	6.00	218.93	0.00
0.000	217.616	0.0000	0.0000	0.0000	6.40	218.88	0.00
0.000	204.642	0.0000	0.0000	0.0000	6.80	218.83	0.00
0.000	226.489	0.0000	0.0000	0.0000	7.20	218.77	0.00
0.000	227.000	0.0000	0.0000	0.0000	7.60	218.71	0.00
0.000	217.270	0.0000	0.0000	0.0000	8.00	218.66	0.00
0.000	209.305	0.0000	0.0000	0.0000	8.40	218.62	0.00
0.000	220.439	0.0000	0.0000	0.0000	8.80	218.57	0.00
0.000	224.009	0.0000	0.0000	0.0000	9.20	218.52	0.00
0.000	217.649	0.0000	0.0000	0.0000	9.60	218.48	0.00
0.000	214.905	0.0000	0.0000	0.0000	10.00	218.44	0.00
0.000	214.384	0.0000	0.0000	0.0000	10.40	218.41	0.00
0.000	224.440	0.0000	0.0000	0.0000	10.80	218.37	0.00
0.000	210.795	0.0000	0.0000	0.0000	11.20	218.34	0.00
0.000	216.043	0.0000	0.0000	0.0000	11.60	218.30	0.00
0.000	213.429	0.0000	0.0000	0.0000	12.00	218.26	0.00
0.000	223.220	0.0000	0.0000	0.0000	12.40	218.22	0.00
0.000	219.510	0.0000	0.0000	0.0000	12.80	218.18	0.00
0.000	217.340	0.0000	0.0000	0.0000	13.20	218.15	0.00
0.000	212.974	0.0000	0.0000	0.0000	13.60	218.11	0.00
0.000	221.463	0.0000	0.0000	0.0000	14.00	218.07	0.00
0.000	219.813	0.0000	0.0000	0.0000	14.40	218.03	0.00
0.000	218.112	0.0000	0.0000	0.0000	14.80	217.99	0.00
0.000	213.000	0.0000	0.0000	0.0000	15.20	217.95	0.00
0.000	220.055	0.0000	0.0000	0.0000	15.60	217.92	0.00
0.000	219.751	0.0000	0.0000	0.0000	16.00	217.88	0.00
0.000	218.787	0.0000	0.0000	0.0000	16.40	217.84	0.00
0.000	213.309	0.0000	0.0000	0.0000	16.80	217.80	0.00
0.000	217.650	0.0000	0.0000	0.0000	17.20	217.77	0.00
0.000	217.532	0.0000	0.0000	0.0000	17.60	217.74	0.00
0.000	217.029	0.0000	0.0000	0.0000	18.00	217.71	0.00
0.000	213.531	0.0000	0.0000	0.0000	18.40	217.69	0.00
0.000	218.078	0.0000	0.0000	0.0000	18.80	217.66	0.00
0.000	219.535	0.0000	0.0000	0.0000	19.20	217.64	0.00
0.000	219.176	0.0000	0.0000	0.0000	19.60	217.62	0.00

RESUMEN DE LOS VALORES MÁXIMOS Y MÍNIMOS EN LA TUBERÍA

PUNTO	VELOCIDAD M/S	SEÑAL	TIEMPO	VELOCIDAD M/S	SEÑAL	TIEMPO	CARGA MÁXIMA	TIEMPO	CARGA MÍNIMA	TIEMPO
	M/S	S		M/S	S		METROS	S	METROS	S
1	2.136632	0.00	-2.426328	2.00	274.133044	4.00	111.274577	2.00		
2	2.136632	0.00	-2.099371	2.00	244.118439	1.20	141.774577	0.80		
3	2.222284	1.20	-0.869333	34.00	245.844167	1.20	141.774577	0.80		
4	2.274684	1.40	-0.999917	34.00	244.828184	1.60	144.052223	1.20		
5	2.242384	2.00	-0.121437	41.40	238.004479	2.00	144.228243	1.60		
6	2.211837	2.40	-0.142782	43.20	234.471288	2.40	140.344818	2.00		
7	2.187483	2.80	-0.183774	42.00	233.153487	47.20	149.954814	2.40		
8	2.139833	3.20	-0.281508	42.00	234.674464	47.60	171.733882	2.80		
9	2.137474	3.60	-0.194934	42.00	232.431223	47.60	173.244373	3.20		
10	2.134122	3.20	-0.172897	42.00	230.272049	7.60	172.928459	3.60		
11	2.004472	0.00	-0.003242	42.00	230.227734	7.60	172.897321	3.60		
12	2.004472	0.00	0.035484	42.00	235.045228	6.40	177.497463	4.00		
13	2.004472	0.00	0.018694	44.00	235.108137	6.00	181.673747	4.40		
14	2.004472	0.00	-0.015470	40.00	232.838542	6.40	185.297470	4.80		
15	2.004472	0.00	-0.032897	40.00	238.339770	40.00	239.248220	0.00		
16	2.203542	3.20	-0.424538	40.00	230.271977	7.60	172.913894	3.60		
17	2.244523	3.60	-0.447115	40.00	248.004249	7.20	177.423859	4.00		
18	2.282683	4.00	-0.449137	40.00	240.944549	4.40	235.544534	40.40		

C O R R I D A N O. 3

ALFREDO MONTANO
CALCULO DE TRANSISTORES

DATOS DEL SISTEMA

DATOS DE LA PLANTA DE BOMBEO 1

GASTO DIS= 0.63 M³/S
CARGA DIS= 148.30 MTS.
MOMEN DIS= 6332.24 KG-K
VEL ROTAC= 1000.00 RPM,
MOM DE IM= 230.00 K-M²,
DOM FALLA= 3
DOM OPERA= 0

DATOS GENERALES

DAMA= 1000.00KG/M³ G= 9.81M/S² TIEMPO DE SIM= 120.00 S
DELT= 0.40 S MU DE TRAMOS CON CARAC. DIFERENTES 4
MODULO K= 20900.0 KG/CM²

GASTO 3.15M³/S ALTURA TAMBOR DE SUCCION= 104.00 M
ALTURA DE LLEGADA= 230.56 M

DATOS DE LOS TRAMOS

D	LONG	ESP	FRI	M. ELAD	MU	MS	CELER
MTS	MTS	MFS	-	KG/CM ²	-	-	M/S
TRAMOS 1 1.372	375.0	0.009	0.012	2100000.0	0.300	1	907.6
TRAMOS 2 1.372	2625.0	0.009	0.012	2100000.0	0.300	7	907.6
TRAMOS 3 1.067	1500.0	0.006	0.013	2100000.0	0.300	4	865.2
TRAMOS 4 0.762	800.0	0.005	0.014	2100000.0	0.300	2	907.7

DATOS DE LAS ONDULAS

ONDA	ELIN	TC	TIC	TCI	PELNI	ANEN
1.0	0.0114	6.40	0.00	0.00	0.0000	0

DATOS RELATIVOS A LA RIFURCACION

GASTO INICIAL = 3.150 KL/S
 GASTO TUB.PRINC = 2.150 KL/S
 GASTO TUB. SEC. = 1.000 KL/S
 ELEV. LLEGADA = 216.000 M
 PERDIDAS LLEC. = 4.600 M
 TUBOS T.PRINC. = 3

DATOS DE LAS FRONTERAS INTERNAS

**FRONTERA INT. 1 TAMBIEN DE OSCILACION UNIDAD ATUHO PRINCIPAL
POR TUBERIA CURTA**

D	LONG	ESP	FRI	N. ELAS	MU	NS	CELER
M/S	M/S	M/S	-	KG/CM2	-	-	M/D

TUBO 5 0.307 10.0 0.003 0.014 2100000.0 0.200 1 990.7

AREA TUBO = 7.07 M2 ELEV. SUP.LINE = 0.00 M

FRONTERA INT 2 TRANSICION DE UNO A DOS TUBOS

VELOC. M/S	CARGA N	VEL. ANG. AB/M	R/ORDEN AB/M	TAJ AB/M	TIEMPO SEG	H(L) M	M
2.131	250.020	1.0000	1.0000	1.0000	0.00	249.26	0.00
1.152	159.457	0.4108	0.5406	0.5261	0.40	249.26	0.00
0.870	134.157	0.4514	0.4123	0.3566	0.80	249.21	0.00
-0.213	132.296	0.5795	-0.1095	0.2256	1.20	249.07	0.00
-1.177	152.863	0.2789	-0.5526	0.1515	1.60	248.86	0.00
-1.538	163.549	0.0323	-0.7433	0.1003	2.00	248.59	0.00
-2.073	193.697	-0.3039	-0.9733	0.0600	2.40	248.20	0.00
-2.016	209.105	-0.6719	-0.9460	0.0475	2.80	247.96	0.00
-1.923	234.917	-0.9272	-0.9023	0.0326	3.20	247.64	0.00
-1.591	251.073	-1.0649	-0.7465	0.0220	3.60	247.33	0.00
-1.270	259.200	-1.0934	-0.6000	0.0130	4.00	247.05	0.00
-0.923	250.190	-1.0595	-0.4130	0.0075	4.40	246.80	0.00
-0.592	261.652	-0.9710	-0.2779	0.0037	4.80	246.57	0.00
-0.306	262.472	-0.8374	-0.1437	0.0016	5.20	246.37	0.00
-0.094	256.000	-0.6056	-0.0442	0.0005	5.60	246.18	0.00
0.000	241.550	0.0000	0.0000	0.0000	6.00	246.02	0.00
0.000	227.664	0.0000	0.0000	0.0000	6.40	245.86	0.00
0.000	227.512	0.0000	0.0000	0.0000	6.80	245.69	0.00
0.000	238.760	0.0000	0.0000	0.0000	7.20	245.52	0.00
0.000	241.271	0.0000	0.0000	0.0000	7.60	245.35	0.00
0.000	234.007	0.0000	0.0000	0.0000	8.00	245.18	0.00
0.000	232.254	0.0000	0.0000	0.0000	8.40	245.02	0.00
0.000	233.840	0.0000	0.0000	0.0000	8.80	244.86	0.00
0.000	239.694	0.0000	0.0000	0.0000	9.20	244.70	0.00
0.000	237.772	0.0000	0.0000	0.0000	9.60	244.55	0.00
0.000	242.245	0.0000	0.0000	0.0000	10.00	244.42	0.00
0.000	237.175	0.0000	0.0000	0.0000	10.40	244.29	0.00
0.000	240.357	0.0000	0.0000	0.0000	10.80	244.17	0.00
0.000	239.961	0.0000	0.0000	0.0000	11.20	244.06	0.00
0.000	240.504	0.0000	0.0000	0.0000	11.60	243.95	0.00
0.000	230.009	0.0000	0.0000	0.0000	12.00	243.84	0.00
0.000	236.949	0.0000	0.0000	0.0000	12.40	243.72	0.00
0.000	235.332	0.0000	0.0000	0.0000	12.80	243.59	0.00
0.000	235.356	0.0000	0.0000	0.0000	13.20	243.46	0.00
0.000	234.722	0.0000	0.0000	0.0000	13.60	243.32	0.00
0.000	234.660	0.0000	0.0000	0.0000	14.00	243.17	0.00
0.000	234.165	0.0000	0.0000	0.0000	14.40	243.02	0.00
0.000	234.071	0.0000	0.0000	0.0000	14.80	242.87	0.00
0.000	234.057	0.0000	0.0000	0.0000	15.20	242.72	0.00
0.000	235.043	0.0000	0.0000	0.0000	15.60	242.57	0.00
0.000	235.445	0.0000	0.0000	0.0000	16.00	242.42	0.00
0.000	234.399	0.0000	0.0000	0.0000	16.40	242.28	0.00
0.000	233.362	0.0000	0.0000	0.0000	16.80	242.13	0.00
0.000	234.609	0.0000	0.0000	0.0000	17.20	241.99	0.00
0.000	234.510	0.0000	0.0000	0.0000	17.60	241.85	0.00
0.000	236.314	0.0000	0.0000	0.0000	18.00	241.72	0.00
0.000	233.650	0.0000	0.0000	0.0000	18.40	241.59	0.00
0.000	234.197	0.0000	0.0000	0.0000	18.80	241.47	0.00
0.000	230.344	0.0000	0.0000	0.0000	19.20	241.35	0.00
0.000	230.340	0.0000	0.0000	0.0000	19.60	241.24	0.00

RESUMEN DE LOS VALORES MAXIMOS Y MINIMOS EN LA TUBERIA

115

PUNTO	VELOCIDAD MAX.		VELOCIDAD MIN.		CARGA MAXIMA	TIEMPO	CARGA MINIMA		TIEMPO
	M/S	S	M/S	S			METROS	S	
1	2.130452	0.00	-2.073271	2.40	262.444838	5.20	132.292908	1.20	
2	2.130452	0.00	-2.212798	2.80	249.029861	0.40	207.113510	2.40	
3	2.130452	0.00	-0.415159	116.80	249.029861	0.40	207.182997	2.40	
4	2.130452	0.00	-0.414767	116.80	250.022919	9.60	206.928192	2.80	
5	2.130452	0.00	-0.415437	119.60	259.110474	10.00	206.232733	3.20	
6	2.130452	0.00	-0.423213	119.60	261.861267	10.00	205.829178	3.60	
7	2.130452	0.00	-0.431515	119.60	266.362979	9.20	205.344391	4.00	
8	2.173873	2.40	-0.440625	119.60	266.980377	9.60	204.168367	4.40	
9	2.134178	2.00	-0.449754	119.60	265.821350	8.40	203.597438	4.80	
10	2.136122	3.20	-0.458114	119.60	266.297058	8.80	207.553268	5.60	
11	2.404472	0.00	-0.382277	119.60	266.255096	8.00	207.498439	5.60	
12	2.404472	0.00	-0.690193	119.60	266.226654	8.40	206.699295	6.00	
13	2.404472	0.00	-0.693449	119.60	261.398346	8.40	209.398437	5.60	
14	2.404472	0.00	-0.700450	119.60	251.397324	8.00	217.937546	4.80	
15	2.404472	0.00	-0.701826	119.60	238.359998	91.20	238.265228	0.00	
16	2.243542	3.20	-0.147390	119.60	266.294922	8.80	207.570328	5.60	
17	2.244323	3.60	-0.153726	119.60	254.109497	8.80	215.426343	4.00	
18	2.281083	4.00	-0.156026	119.60	240.054949	4.40	233.977371	119.60	

3.3 COMENTARIOS

Un análisis a los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas al ejemplo propuesto, permite visualizar la gran flexibilidad de que goza la metodología propuesta una vez que se ha implementado a la computadora. Esta flexibilidad permite al proyectista ir variando uno o varios parámetros en el sistema, manteniendo otros constantes e ir observando a la vez los cambios producidos en el funcionamiento del sistema, ocasionados por ellos. En el caso de nuestro ejemplo es obvio que de las tres simulaciones realizadas sólo una protege al sistema de una falla total en la planta de bombeo, pero esto no significa que la solución propuesta sea la única o simplemente que sea la mejor, ya que habría que realizar otras corridas en las cuales podrían variar parámetros como tiempo de cierre, dimensiones de la cámara, localización de la misma, e inclusive probar para una torre de oscilación de un paso de dimensiones mayores a las propuestas en la segunda simulación, hasta determinar las necesarias para que el sistema quede protegido, etc. Entre mayor sea el número de alternativas simuladas en mejor situación estaremos de aproximarnos a la solución óptima, lo que en sistemas de gran magnitud puede significar en el terreno económico un ahorro considerable.

B I B L I O G R A F I A

1.- FLUID TRANSIENTS

1978 Victor L. Streeter
Mc. Graw Hill E. Benjamin Wylie

2.- HYDRAULIC TRANSIENTS

1967 Victor L. Streeter
Mc. Graw Hill E. Benjamin Wylie

3.- APPLIED HYDRAULIC TRANSIENTS

1979 M. Hanis Chaudhry, Phd
Van - Nostrand Reynhold Co.

4.- TRANSIENT ANALYSIS OF OFFSHORE LOADING SYSTEMS

An Asme Publication