

ESTUDIO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE EN UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE EMERGENCIA CON PRESENCIA DE AIRE

Malanca, R.S^a.; Delmastro D.F^b; García, J.C^c

^a *Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto Balseiro, Av. Bustillo 9500, Bariloche, Río Negro, Argentina. malanca@cab.cnea.gov.ar*

^b *Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto Balseiro, Av. Bustillo 9500, Bariloche, Río Negro, Argentina. delmast@cab.cnea.gov.ar*

^c *Comisión Nacional de Energía Atómica, Instituto Balseiro, Av. Bustillo 9500, Bariloche, Río Negro, Argentina. garciajc@cab.cnea.gov.ar*

Keywords: Water Hammer, Two Phase Flow, Method of Characteristics.

Abstract. In this paper the effect of presence of air in an emergency cooling system of a nuclear power plant during the pipelines pressurization stage is analyzed. The pressure waves propagation along the system pipelines is considered. The presence air in one pipe is analyzed. A code was developed to simulate the pressure waves propagation in the system. This code uses the classical method of characteristics (moc) solving the mass and momentum equations. The two phase homogeneous model was used to represent the two-phase mixture in the pipe with presence of air. The maximal pressure in each pipe is calculated for the presence of air in one pipe for the pressurization of the tanks. The influence of the presence of air in the system is shown.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realiza una simulación numérica de ondas de presión tomando como referencia el sistema de refrigeración de emergencia de la Central Nuclear de Embalse (CNE). Se analiza el efecto de la presencia de aire en un tramo de la red hidráulica durante la presurización del sistema.

La finalidad y objetivos perseguidos, han sido el desarrollo de un estudio simplificado en el cual se consideren diferentes formas de presurización del sistema, obteniendo la distribución de presiones máximas teniendo en cuenta el aire presente en uno de los tramos de la cañería.

Se toma como condición inicial al fluido en reposo y las válvulas de cambio de clase cerradas, con una presión de 0,20 MPa en la rama de clase especial que conecta con los tanques de inyección y en la rama de clase 1 que conecta con los discos de ruptura. Para el primer análisis se consideran las válvulas de cambio de clase cerradas y una presurización de los tanques con distintas rampas de tiempo. Para el segundo análisis se simula la apertura de las válvulas de cambio de clase en forma abrupta, considerando una presión constante de 42 MPa en los tanques de inyección.

El fenómeno denominado “Golpe de Ariete”, se puede presentar cuando en un conducto cerrado con agua en reposo, existe una aceleración del flujo debido a una presurización rápida del sistema. El mismo se presenta en aquellos casos, en que la operación de válvulas, bombas o sistemas de presurización, actúan en forma casi instantánea.

Por ejemplo, considerando un sistema hidráulico constituido por una cañería conectada en su extremo inicial a un tanque que presuriza el sistema y una válvula conectada al final de la misma, cuando se realiza una operación abrupta de cierre de dicha válvula, se genera una onda de presión, la cual viaja aguas arriba con un valor de $\rho \cdot V \cdot a$ (las referencias de la simbología utilizada se encuentran al final del trabajo). Si el fluido es agua con una densidad de 1000 kg/m³, tiene una velocidad de 10 m/s y la velocidad del sonido de la misma es 1467 m/s, la variación de presión alcanza un valor de 14.5 MPa.

El efecto principal producido por este fenómeno dentro de una red de tuberías, es la aparición de ondas de presión, las cuales viajan por todo el sistema a la velocidad del sonido, provocando rebotes en los componentes de la red, lo que puede implicar un aumento de la presión. Debido a esto resulta de importancia un adecuado análisis de este tipo de fenómenos, ya que provocan en las tuberías estados tensionales que pueden producir daños en los diferentes componentes de la red.

Existen otros trabajos en los cuales ha sido investigado el fenómeno de Golpe de Ariete para flujos en una y dos fases para sistemas hidráulicos de similares características (A. Lai. 2000 , A.G.T.J. Heinsbroek. 1997)

2. MODELO MATEMÁTICO Y FORMULACIÓN DEL FENÓMENO DEL GOLPE DE ARIETE

La resolución y simulación numérica del golpe de ariete, es abordada mediante el método de las características (V. Streeter et al. 1981., F. Moody. 1990,)

Este método, considera un flujo no estacionario teniendo en cuenta la compresibilidad del fluido. El mismo consiste en la resolución mediante un esquema de diferencias

finitas, en el que se discretizan cada uno de los tramos de la red, y se avanza en cada paso temporal, calculando los valores de velocidad y presión para cada nodo.

Se aplican dos ecuaciones básicas de la mecánica a un elemento de fluido en una tubería para obtener las ecuaciones diferenciales del flujo transitorio: la ecuación de conservación de momento lineal y la ecuación de conservación de la masa.

En este modelo se considera que el efecto de la fricción es similar al de estado estacionario.

El sistema hidráulico que se ha analizado, contempla la presencia de flujos en dos fases, de modo que las expresiones que gobiernan los transitorios de presión y caudal, se han obtenido para los casos de flujo en una y dos fases.

2.1 Modelo de una Sola Fase

Considérese un volumen de control limitado por dos superficies paralelas, las cuales son normales al eje de la cañería, al que se le aplican las leyes de conservación de momento lineal y conservación de la masa.

Estas dos ecuaciones son resueltas en forma simultanea permitiendo así obtener las ecuaciones básicas para la formulación del fenómeno del golpe de ariete.

Ecuación de Conservación de Momento Lineal

$$L1 = \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de Conservación de la Masa.

$$L2 = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

La constante a en la ecuación 2, es la velocidad de la onda de presión y depende de la compresibilidad del fluido, la rigidez de la cañería y las propiedades mecánicas del material. La misma puede calcularse como

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + \left(\frac{KD}{Ee}\right)} \quad (3)$$

Las dos ecuaciones diferenciales en derivadas parciales 1 y 2 poseen ambas dos variables desconocidas V y p , las cuales se combinan mediante un parámetro λ , transformándolas en dos ecuaciones características mediante la aplicación del Método de las Características (MOC).

La ecuación de onda característica queda expresada como

$$L = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \lambda \rho a^2 + \frac{\partial V}{\partial t} \right) + \lambda \left(\frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{\rho \lambda} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) + g \cdot \sin \theta + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (4)$$

Para la resolución de la ecuación 4, en hidráulica, es común utilizar la altura piezométrica y el caudal en lugar de la presión y la velocidad.

Típicamente, la ecuación característica, puede ser expresada en un esquema de diferencias finitas como

$$C_P = H_{i-1} + Q_{i-1} \left(C_H - \frac{\Delta t}{A} \sin \theta - \frac{f \Delta x}{2gDA^2} |Q_{i-1}| \right) \quad (5)$$

$$C_M = H_{i+1} - Q_{i+1} \left(C_H + \frac{\Delta t}{A} \sin \theta - \frac{f \Delta x}{2gDA^2} |Q_{i+1}| \right) \quad (6)$$

Dónde

$$C_H = \frac{a}{gA} \quad (7)$$

Estas expresiones dan la solución de altura piezométrica (m) y caudal (m³/s) en el nodo “i” al tiempo “t”, si los valores de altura piezométrica y caudal en los puntos “i_j” e “i_{j+1}” en un tiempo previo t-Δt son conocidos. De este modo los valores H_i y Q_i, pueden ser obtenidos mediante las siguientes expresiones

$$Q_i = \frac{C_P - C_M}{2C_H} \quad (8)$$

$$H_i = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (9)$$

La [figural](#) muestra el esquema numérico de resolución

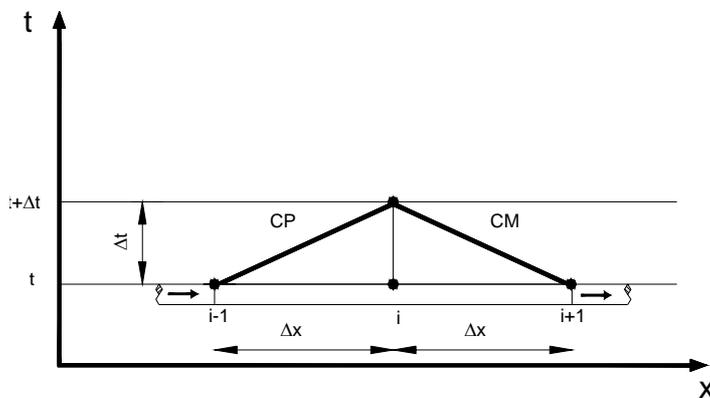


Fig. 1 Resolución Esquemática mediante el Método de las Características

2.2 Modelo de Dos Fases

Debido a la existencia de aire en un tramo de la red, ha sido necesaria la reformulación de las expresiones dadas para flujos en una sola fase, obteniendo en forma simplificada, expresiones de flujo en dos fases, aplicando modelo homogéneo donde las velocidades de ambas fases es la misma, permitiendo calcular en forma general los transitorios de presión y caudal para el sistema hidráulico en estudio.

Para la obtención del campo de presiones, se ha expresado la presión como alturas piezométricas al igual que para flujo en una fase, pero con la diferencia de que se han parametrizado los valores de alturas piezométricas utilizando la densidad del líquido como referencia.

$$p = \rho_{ref} \cdot g (H-z).$$

Planteando conservación de Masa y conservación de Momento Lineal, se obtienen las expresiones $L1$ y $L2$.

$$L1 = \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\rho_{ref}}{\rho} V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\rho_{ref}}{\rho} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\rho_{ref}}{\rho} V \sin \theta \quad (10)$$

$$L2 = V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\rho_{ref}}{\rho} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{fV^2}{2D} + g \sin \theta \left(\frac{\rho_{ref}}{\rho} - 1 \right) \quad (11)$$

Procediendo matemáticamente como se hizo para flujos en una fase, se obtienen las expresiones para el análisis del flujo en dos fases para la obtención de alturas piezométricas y caudales a través de las características C_P y C_M para cada uno de los nodos de la red en cada instante de tiempo t .

Los parámetros utilizados para el cálculo de flujo en dos fases mediante modelo homogéneo vienen dados por (G. Wallis. 1969)

$$\rho = \alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_f \quad (12)$$

$$C = \frac{1/\rho}{\sqrt{\frac{(1-\alpha)}{\rho_f^2 C_f^2} + \frac{\alpha}{\rho_g^2 C_g^2}}} \quad (13)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{X}{\mu_g} + \frac{1-X}{\mu_f} \quad (14)$$

$$K = \frac{\rho C^2}{\left(1 - \frac{C^2 \rho D}{Ee}\right)} \quad (15)$$

$$\frac{X}{1-X} = \frac{\rho_g}{\rho_f} \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (16)$$

En la [figura 2](#) se puede observar la variación de la velocidad del sonido en función de la fracción de vacíos.

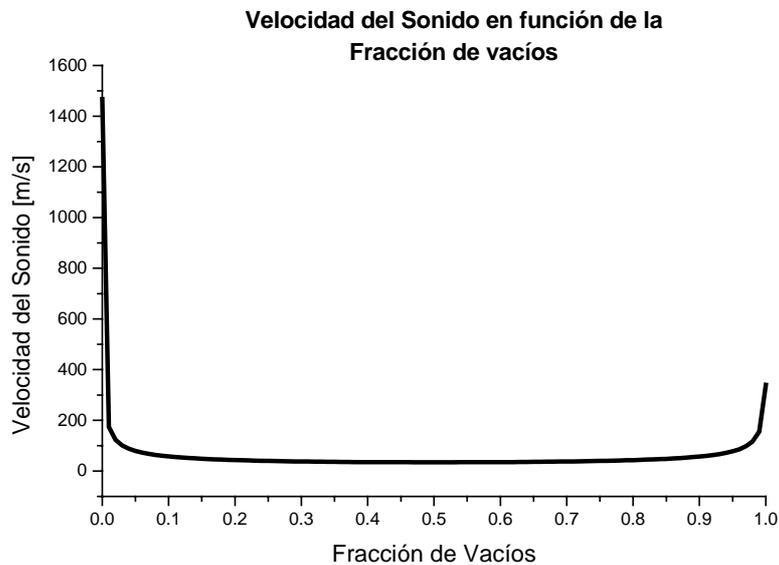


Fig. 2 Variación de la velocidad del sonido en función de la fracción de vacíos

3. IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA

La simulación numérica del sistema se ha realizado mediante el desarrollo de un código de cálculo basado en el método de las características.

Dentro del modelo de cálculo, se han considerado los componentes que intervienen en la operación del sistema hidráulico durante su operación, los que representan las condiciones de contorno de todo el sistema. Estos componentes contienen los nodos extremos de los caños que concurren a ellos, los que actualizan su valor en cada paso de tiempo, en función de los resultados del paso anterior.

4. DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA RED HIDRÁULICA ESTUDIADA

La red hidráulica estudiada consta de dos tanques presurizados, red hidráulica constituida por tubos, dos discos de ruptura, válvulas esféricas, dos válvulas de retención, curvas y codos de conexión.

En la [figura 3](#) se muestra un esquema del sistema hidráulico que fue utilizado como modelo de cálculo.

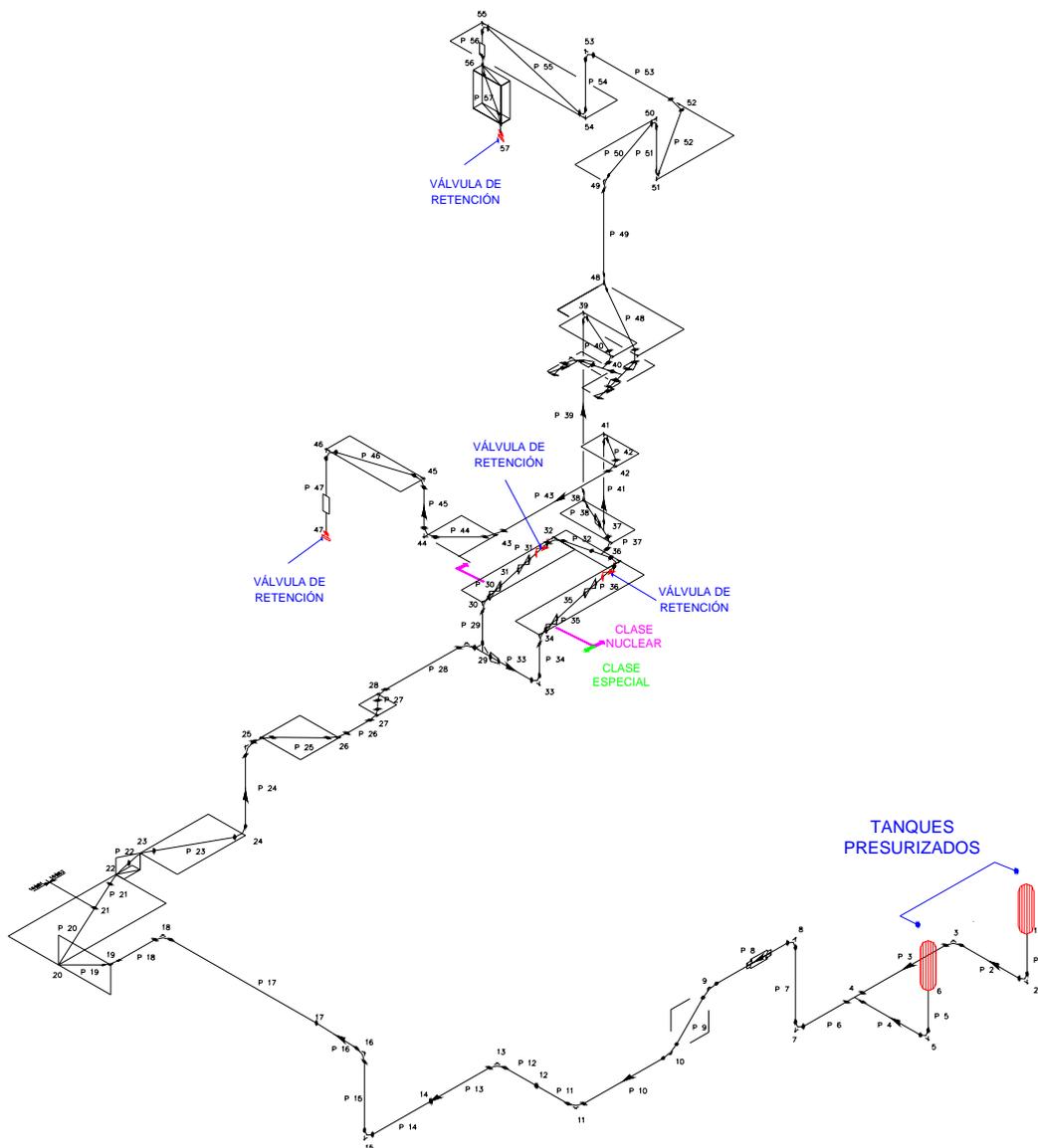


Fig.3: Esquema Isométrico de la red hidráulica estudiada.

Uno de los tramos de cañería (43 del isométrico), posee aire en su interior con una fracción de vacío del 30%.

Para el cálculo de los transitorios de presión, se han postulado diferentes secuencias.

a) Se ha tomado como condición inicial al fluido en reposo y las válvulas de cambio de clase cerradas, con una presión de 0,2 MPa en la rama de clase especial que se conecta con los tanques de inyección. Con esta configuración, se ha simulado la presurización de los tanques en forma abrupta y con rampas de tiempo de 0,50seg. y 1seg.

b) Es simulada la apertura de las válvulas de cambio de clase, con una condición inicial de presión de 4.20 MPa para los tramos comprendidos entre los tanques y las válvulas de cambio de clase. Para los tramos comprendidos entre dichas válvulas y los discos de ruptura (clase nuclear), la condición adoptada es de 0.20 MPa. La velocidad es nula en

todo el circuito hidráulico. Para este caso de análisis se ha considerado la apertura abrupta de las válvulas con una presión de inyección constante de los tanques de inyección de 4.20 MPa.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

El objetivo del análisis consiste en la obtención de curvas envolventes para los máximos valores de presión desarrollados en el sistema hidráulico estudiado.

La Figura 4 muestra el comportamiento de la red hidráulica en estudio para el caso en que existe ausencia de aire en todos los tramos de la red en estudio y para diferentes constantes de tiempo (secuencia de operación “a”).

La misma representa los valores máximos de presión para los tramos de cañería comprendidos entre los tanques de presurización y las válvulas de cambio de clase. Todos los componentes intervinientes en el modelo analizado corresponden a la clase especial. Para este caso se ha considerado que las válvulas de cambio de clase permanecen cerradas durante el análisis.

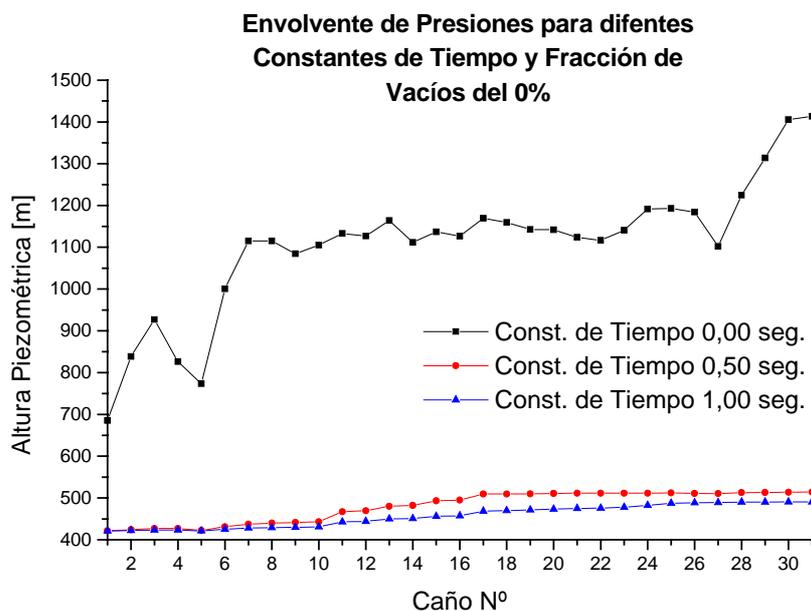


Fig.4: Envlovente de Presiones Máximas expresadas como Alturas Hidrostáticas. Resolución de la red desde los tanques de presurización hasta las válvulas de cambio de clase, para diferentes constantes de Tiempo

El comportamiento observado en la figura 4, demuestra la incidencia que tiene en los resultados una presurización abrupta del sistema, frente a la observada cuando estamos en presencia de rampas de presurización las cuales hacen que el sistema se comporte lo más parecido a un transitorio lento. Esto es debido a que el tiempo que tarda la onda en

viajar a lo largo de la red es menor que el tiempo de presurización del sistema, haciendo que los valores de presión máxima alcanzados sean menores.

La figura 5, muestra la curva envolvente de presiones máximas para la totalidad del sistema hidráulico analizado. Este sistema contempla los tramos comprendidos entre los tanques presurizados y las válvulas de cambio de clase (clase especial), como así también todos los tramos comprendidos entre las mencionadas válvulas y los discos de ruptura (clase nuclear).

Como condición inicial del análisis, se ha considerado que los tramos comprendidos entre los tanques y las válvulas de cambio de clase, poseen una presión de 4,20 MPa (42 Kg/cm²), mientras que el resto del sistema posee una presión de 0,20 MPa (2 Kg/cm²).

Para este caso, se ha considerado el comportamiento de la red para una presurización abrupta y con fracciones de vacío del 0% y 30%.

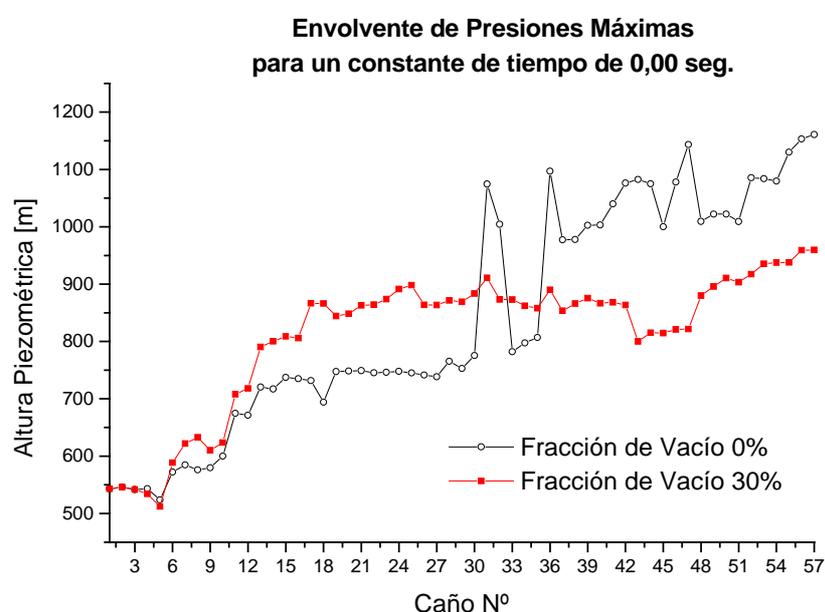


Fig.5: Envolvente de Presiones Máximas expresadas como Alturas Hidrostáticas. Resolución para la totalidad de la red hidráulica en estudio, para diferentes constantes valores de fracción de vacíos.

En la figura 5, se puede observar que existe un aumento de la presión para los casos en que se tiene en cuenta la presencia de aire, frente al caso que existe una ausencia de este. Este fenómeno se observa desde los tanques de presurización hasta las válvulas de cambio de clase.

La presencia de aire en uno de los tramos de la red, produce una demora en el comportamiento de todo el sistema. Cuando la onda de presión viaja a lo largo de la red en ausencia de aire y esta alcanza el caño 43 el cual posee aire en su interior, se produce una onda de reflexión la cual viaja aguas arriba y una onda de refracción la que sigue viajando aguas abajo de la red.

Es posible dar una expresión simplificada que relaciona este fenómeno, en donde se obtiene la onda de reflexión y refracción en función de la onda incidente, de las características del fluido y de los caños conectados entre sí. Hay dos expresiones las cuales relacionan la onda reflejada (f_1) y refractada (F_2) con la onda incidente (F_1).

$$f_1 \approx F_1 \left(\frac{\frac{\rho_1 A_1}{a_1} - \frac{\rho_2 A_2}{a_2}}{\frac{\rho_1 A_1}{a_1} + \frac{\rho_2 A_2}{a_2}} \right) \quad (17)$$

$$F_2 \approx F_1 \left(1 + \frac{\frac{\rho_1 A_1}{a_1} - \frac{\rho_2 A_2}{a_2}}{\frac{\rho_1 A_1}{a_1} + \frac{\rho_2 A_2}{a_2}} \right) \quad (18)$$

El subíndice 1 indica las propiedades de los caños que poseen agua como fluido y el subíndice 2 indica las propiedades del caño que posee la mezcla de agua y aire.

Observando la [figura 6](#), la cual representa la respuesta en términos de caudal para el nodo inicial del caño que posee aire (43 en el modelo de cálculo), se observa un aumento del flujo volumétrico durante el comienzo del transitorio. Este aumento es debido al fenómeno de retardo en la respuesta del sistema provocado por la onda de reflexión.

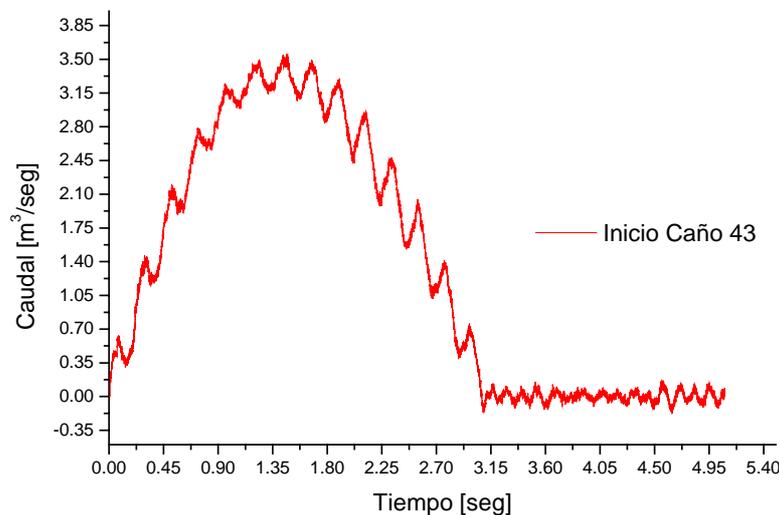


Fig.6 Respuesta Transitoria de Caudales para el tramo con presencia de Aire

Durante este proceso, los tanques siguen inyectando más líquido a la red y hacen que el fluido se acelere, alcanzando los valores de caudal observados en la figura durante el comienzo del transitorio.

Una vez alcanzado el máximo valor de caudal, el mismo comienza a disminuir haciendo que la presión en el sistema aumente por encima de los valores de presión de inyección. Este aumento de presión es necesario para que el fluido se desacelere y el sistema tienda a su estacionario final.

En la [figura 7](#) se puede observar este fenómeno de aumento de presión necesario para provocar el frenado del fluido dentro del sistema.

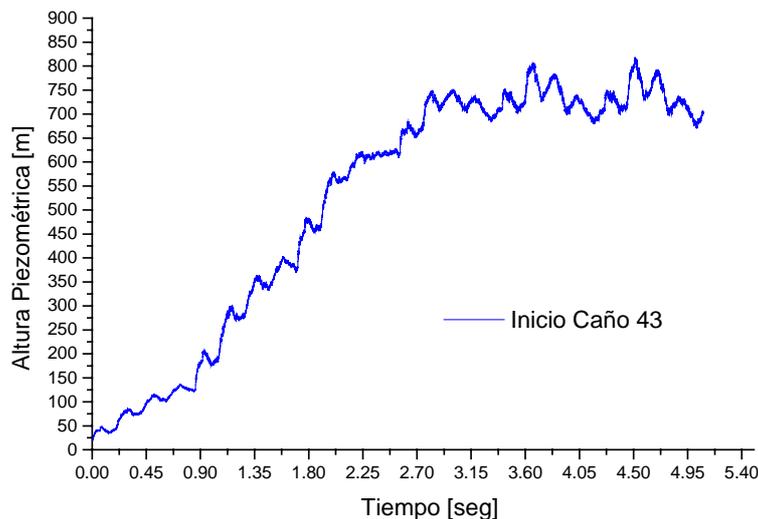


Fig.7 Respuesta Transitoria de Alturas Piezométricas para el tramo con presencia de Aire

6. CONCLUSIONES

La presencia de aire en uno de los tramos de la red, produce una demora en la respuesta transitoria de todo el sistema incrementando los valores máximos de alturas piezométricas para el caso de presurización instantánea.

Debido a la onda reflejada, producto de la presencia de aire en la red, la rapidez con que aumenta la presión se ve reducida. Esta demora hace que la inyección de fluido a la salida de los tanques de presurización aumente el caudal en todo el sistema. Debido a la necesidad de frenar el fluido, la presión aumenta obteniéndose valores mayores a la de los tanques de presurización.

Como resultado de lo expuesto, produce un incremento en la presión en los tramos de la clase especial y una disminución de la misma para los caños pertenecientes a la clase nuclear, respecto del caso sin aire.

7. NOMENCLATURA

A : Área de la sección transversal del caño.

C_M : Curva característica negativa.

C_P : Curva característica positiva.

C_f : Velocidad del sonido del fluido.

C_g : Velocidad del sonido del gas.

D : Diámetro del caño.
 E : Módulo de elasticidad del material.
 F_1 : Onda incidente.
 F_2 : Onda refractada.
 H : Presión hidrostática (m)
 K : Módulo de compresibilidad del fluido.
 Q : Caudal
 V : Velocidad media
 X : Título.
 a : Velocidad del sonido.
 e : Espesor de la cañería.
 f : factor de fricción de la cañería.
 f_1 : Onda reflejada.
 g : Aceleración gravitatoria.
 p : Presión.
 t : tiempo.
 α : Fracción de Vacíos.
 μ_f : Viscosidad dinámica del fluido.
 μ_g : Viscosidad dinámica del gas.
 ρ : Densidad.
 ρ_f : Densidad del fluido.
 ρ_g : Densidad del gas.
 ρ_{ref} : Densidad de referencia.

8. REFERENCIAS

- A.G.T.J. Heinsbroek. Fluid-structure interaction in non-rigid pipeline systems. *Nuclear Engineering and Design* 172 (1997) 123-135.
- A. Lai. Investigation of water hammer in piping networks with voids containing non-condensable gas. *Nuclear Engineering and Design* 197 (2000) 61-7.
- V. Streeter and E. Wylie. Mecánica de Fluidos. 6ta Edición. Editorial McGraw-Hill Latinoamericana S.A. Bogotá. Colombia. 1981.
- G. Wallis. One-Dimensional Two – Phase Flow. McGraw-Hill Inc, 1969.
- F. Moody. Introduction to Unsteady Thermofluid Mechanics. John Wiley & Sons. 1990.