

**ANÁLISIS DE UN FLUJO  
TURBULENTO, CAPAZ DE PRODUCIR  
VIBRACIONES DENTRO DE UNA  
TUBERÍA HORIZONTAL**

**ANALYSIS OF A TURBULENT FLOW,  
ABLE TO PRODUCE VIBRATIONS  
WITHIN A HORIZONTAL PIPE**

**ANÁLISE DE UM FLUXO  
TURBULENTE, CAPAZ DE PRODUZIR  
VIBRAÇÕES DENTRO DE UM TUBO  
HORIZONTAL**

**MSc. Maite M. Velasco Ch.**

Ingeniería Mecánica,  
Universidad de Pamplona  
Pamplona, Norte de Santander - Colombia  
[maite.velasco@unipamplona.edu.co](mailto:maite.velasco@unipamplona.edu.co)

**PhD. Francisco M. León Ob**

Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación  
GRUTEC, ULA, Universidad de los Andes  
Mérida- Venezuela  
[fleon@ula.ve](mailto:fleon@ula.ve)

*Fechas de recepción:* 07 de junio 2018

*Fecha aprobación:* 22 de agosto 2018

## Resumen

Recientemente, el estudio de las vibraciones inducidas por flujo de fluidos en tuberías ha tomado más importancia, porque los diseñadores están utilizando los materiales hasta sus límites, lo que conlleva a que las estructuras sean progresivamente más ligeras y flexibles. Es de importancia práctica mantener la estabilidad del flujo transportado en tuberías, debido a que, si la velocidad del fluido se hace bastante grande, el tubo puede hacerse inestable. Se ha encontrado que, para altas velocidades de flujo, incluso una pequeña perturbación, puede provocar en el sistema, una vibración que aumenta con el tiempo, y que el movimiento del medio, (vapor o agua), es considerado como la fuente más probable de inducir la vibración en la tubería. Este trabajo estudia el comportamiento vibratorio del fluido en una tubería a través de un experimento demostrativo que analiza la onda oscilatoria producida por el fluido. Se usa una manguera como guía, colocada longitudinalmente en el centro de la tubería, la misma es fotografiada y se miden la amplitud, la frecuencia y la velocidad del fluido para relacionar parámetros característicos de las vibraciones y de los fluidos.

**Palabras clave:** Amplitud, flujo de agua en tubería, transporte de agua en tubería, frecuencia, período vibraciones inducidas por fluido.

## Summary

Recently, the study of vibrations induced by fluid flow in pipes has taken on more importance because designers are using materials to their limits, which leads to the structures being progressively lighter and more flexible. It is of practical importance to maintain the stability of the flow transported in pipes, because if the speed of the fluid becomes quite large, the pipe may become unstable. It has been found that for high flow velocities, even a small disturbance, can cause a vibration in the system that increases with time, and that the movement of the medium, (steam or water), is considered the most likely source of inducing the vibration in the pipe. This work studies the vibratory behavior of the fluid in a pipeline through a demonstration experiment that analyzes the oscillatory wave produced by the fluid. A hose is used as a guide, placed longitudinally in the center of the pipe, it is photographed and the amplitude, frequency and speed of the fluid are measured to relate characteristic parameters of vibrations and fluids.

**Key Words:** Amplitude, Water Flow in Pipe, Water Transport in Pipe, Frequency, Period, Fluid-Induced Vibrations.

## Resumo

Recentemente, o estudo das vibrações induzidas pelo escoamento de fluidos em tubulações assumiu maior importância, pois os projetistas estão utilizando os materiais em seus limites, o que leva a que as estruturas sejam progressivamente mais leves e mais flexíveis. É de importância prática manter a estabilidade do fluxo transportado nos tubos, porque se a velocidade do fluido se tornar muito grande, o tubo pode ficar instável. Verificou-se que para velocidades de fluxo



elevadas, mesmo uma pequena perturbação, pode causar no sistema, uma vibração que aumenta com o tempo, e que o movimento do meio, (vapor ou água), é considerado como a fonte mais provável de induzir a vibração no tubo. Este trabalho estuda o comportamento vibratório do fluido em uma tubulação através de um experimento de demonstração que analisa a onda oscilatória produzida pelo fluido. Uma mangueira é usada como guia, colocada longitudinalmente no centro do tubo, é fotografada, e a amplitude, frequência e velocidade do fluido são medidas para relacionar parâmetros característicos de vibrações e dos fluidos.

**Palavras-chave:** Amplitude, fluxo de água na tubulação, transporte de água na tubulação, frequência, período, vibrações induzidas por fluido.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de tuberías que transportan fluidos prevalecen en muchos campos, entre ellos la ingeniería civil y marítima, las industrias de energía nuclear y eléctrica, las industrias de procesos químicos y petrolíferos, las aplicaciones navales y aeronáuticas, e incluso la infraestructura diaria. Debido a las excitaciones que surgen tanto del interior como del exterior de la tubería, ya sea causada por bombas, válvulas o vibraciones transmitidas, las respuestas de la interacción fluido-estructura (FSI) de los sistemas de tuberías se inducen y se transmiten casi continuamente a través del fluido y su sistema de confinamiento. Algunas veces estas respuestas son triviales, mientras que en otras pueden ser lo suficientemente grandes como para hacer que falle la tubería de transporte y el equipo conectado (Shuaijun L., Bryan W.K. y Gongmin L, 2015).

El mecanismo más probable y más ampliamente observado de las vibraciones estacionarias de las tuberías, es la vibración inducida por el flujo, y existen dos razones para ello: la primera, es que hay muchas fuentes de vibración dentro del medio en comparación con la excitación mecánica externa transferida a la tubería acoplada desde estructuras o equipos,

y la segunda, es que la amortiguación de la estructura para la tubería suele ser mayor que la amortiguación del medio; por lo que la vibración de la tubería, podría extenderse alejándose de la fuente de oscilación del medio (Peter V. y Leonid F., 2003).

En otras palabras, la estabilidad del flujo transportado por tuberías es de importancia práctica, porque la frecuencia natural del tubo generalmente disminuye con el aumento de la velocidad del fluido (como por ejemplo en la alimentación de líneas de motores de cohetes y turbinas de agua, la disminución de la frecuencia natural puede ser importante). El tubo puede hacerse susceptible a la resonancia o fallar por fatiga, si su frecuencia natural se sitúa por debajo de ciertos límites. Si la velocidad del fluido se hace bastante grande, el tubo puede hacerse inestable. Cada perturbación aplicada al tubo, causa una vibración que disminuye con el tiempo. Se ha encontrado, que, para velocidades de flujo, por encima de unos valores determinados, incluso una pequeña perturbación, puede provocar vibración en el sistema, y que la resonancia del medio, (vapor o agua), es considerada como la fuente más probable de vibración inducida por el fluido.

Las estructuras en contacto con un fluido que fluye, ya sean naturales (por ejemplo, corrientes de aire o de mar), o hechas por el hombre, están inevitablemente sujetas a fuerzas y vibraciones inducidas por el fluido. Estas vibraciones pueden ser de amplitud grande o pequeña, o intrascendentes, incluso de preocupación leve. Cada perturbación aplicada al tubo causa una vibración que disminuye con el tiempo (R. W. Gregory y M. P. Païdoussis., 1966 a, c)

La realización de este trabajo, permitió estudiar el comportamiento a través de un experimento demostrativo, donde se analizó la onda oscilatoria producida por el fluido usando una manguera como guía colocada en el centro de la tubería en estudio, la misma será fotografiada para finalmente poder medir, la amplitud, la frecuencia, la elongación y la velocidad del fluido para así poder graficar parámetros característicos de las vibraciones y de los fluidos.

## II. ANTECEDENTES

A diferencia de las vibraciones de estructuras cilíndricas inducidas por flujo transversal ("flujo cruzado"), el estudio de la vibración debida al flujo axial es un fenómeno relativamente nuevo, que comenzó su estudio en serio en la década de 1950 (M.P. Païdoussis, 2016).

La mayoría de estos estudios previos tuvieron como objetivos principales (i) la medición de la amplitud de la vibración de configuraciones particulares de estructuras cilíndricas, modelado y condiciones de flujo en un reactor nuclear; (ii) entender las causas de la vibración; (iii) desarrollo de medios para predecir las amplitudes de vibración; el cual resultó ser, desde el punto de vista de los diseñadores, el objetivo más importante.

De acuerdo con M.P. Païdoussis and N.T. Issid (1974), entre los principales investigadores que han colaborado en esta área pueden citarse: J. Aitken (1876), Marcel Brillouin (1885), F.J. Bourrières (1939), Ashley y Haviland (1950), Feodos'ev (1951), Housner (1952), Niordson (1953), Long (1955), Handelman (1955), Heinrich (1956), Bolotin (1956), Hu and Tsoon (1957), Gregory and Païdoussis (1966<sup>a</sup>, 1966b), Morchan (1967) y otros.

Entre sus trascendentales aportes se mencionan: estabilidad de tubos en voladizo transportando fluido despreciando las fuerzas de gravedad, ecuación del movimiento para fluido transportado por tuberías, dinámica de estudios flexibles transportando fluidos, tubos en voladizo transportando fluidos y otros.

## III. MARCO TEÓRICO

El estudio de las vibraciones debido a flujo axial es un fenómeno relativamente nuevo, comenzando en la década de 1950. La razón para esto es fácil de entender, las velocidades del flujo transversal moderado pueden causar grandes amplitudes de vibración transversal, por ejemplo, las vibraciones inducidas por vórtice, en flujo axial, las vibraciones transversales son de poca amplitud, aproximadamente del orden  $10^{-3} < \frac{A}{D} < 10^{-2}$ , donde

A= amplitud de la vibración, D diámetro de la tubería; por lo que las vibraciones serían de poca importancia, si no fuera por la geometría característica de ciertas aplicaciones, a saber: i) en haces de elementos de combustible de reactores nucleares, tubos de monitoreo y barras de control y ii) en el caso de los tubos de intercambiadores de calor en regiones donde el flujo es normalmente axial. Otra razón importante para el interés en la vibración

inducida por el flujo axial es que algunos sistemas son inherentemente muy flexibles debido a su composición material, forma de soporte o longitud, de modo que son propensos no solo a las vibraciones de amplitud amplia sino también a inestabilidades fluido-elásticas, ejemplo, son las barcasas Dracon, las matrices acústicas remolcadas y los sistemas pendulares. M.P. Païdoussis (2016).

La interacción fluido-estructura (FSI) M.P. Païdoussis (2013), existe en tuberías que transportan líquido cuando las ondas de presión en el líquido causan esfuerzos y tensiones en los tubos (y viceversa). La causa inicial de las interacciones puede ser una alteración en el flujo (la actividad de una válvula o una bomba), o una perturbación en la tubería (la máquina vibrando). En ambos casos la dinámica resultante implicará una colección extensa de ondas de presión en el fluido y ondas de tensión en la pared de la tubería. Cada vez que estas ondas se reflejen en un apoyo o en una curva en la tubería, inducen nuevas ondas de ambos tipos. Estas son interacciones intrínsecamente de doble dirección. Hay diferentes interacciones entre los fluidos y la tubería. La

figura 1 mapa conceptual ilustra la amplitud de posibilidades, y una clasificación mostrada por Eduard N., Donald R, (2005).

La mecánica de FSI es una nueva rama interdisciplinaria que se ocupa de la hidromecánica y la mecánica sólida. Los sistemas de tuberías que transportan fluido son los sistemas típicos de FSI. Hay principalmente tres acoplamientos entre el fluido y la tubería: Poisson, fricción y acoplamiento de unión. El acoplamiento de Poisson relaciona la presión fluidica con las tensiones axiales estructurales debidas a la presión radial, contracción o expansión de la pared de la tubería, que está asociada con el modo de "respiración" de la tubería. El acoplamiento de fricción es inducido por las fuerzas de fricción generadas entre el fluido y la tubería que produce pérdidas de presión dentro del fluido y por lo tanto los cambios asociados en las tensiones de la pared. Estos dos acoplamientos actúan a lo largo de todo el tubo, el acoplamiento de unión solo actúa en las secciones de unión, como uniones ramificadas, secciones con dobleces, cambios de diámetro y condiciones de frontera.

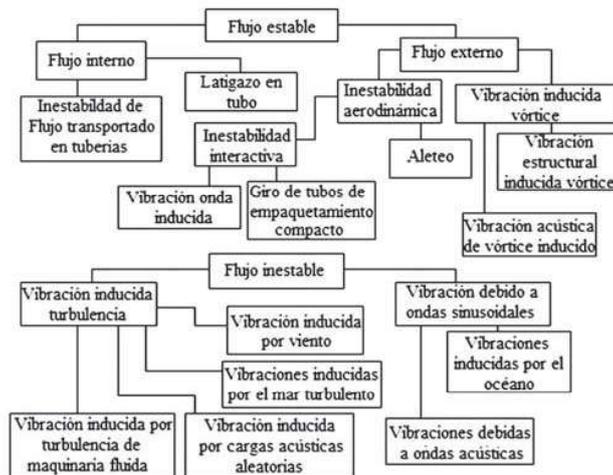


Figura 1. Mapa conceptual Clasificación de las vibraciones inducidas por fluido. Fuente: Robert D. Blevins, (2001).

En conjunto, estos acoplamientos pueden influir en las frecuencias naturales de la tubería llena de líquido. Existen dos tipos de FSI: uno aparece en la interfaz entre el fluido y su estructura conectada, el otro aparece en un fluido de dos fases (fluido/sólido), es decir, cuando el fluido y el sólido están parcial o completamente interconectados (Shuaijun L., Bryan W.K. y Gongmin L., 2015).

### A. Vibración

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio, todos los cuerpos que posean masa y elasticidad son capaces de vibrar. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

La mayoría de las máquinas y estructuras experimentan vibraciones hasta cierto grado por lo que su diseño requiere la consideración de este efecto dinámico debido a que ocasiona un aumento en los esfuerzos y tensiones. Las vibraciones usualmente están divididas en dos tipos característicos: vibraciones de estado estable y vibraciones transitorias dinámicas; el mecanismo más probable y extensamente observado de vibraciones en estado estable en tuberías es la vibración inducida por fluido.

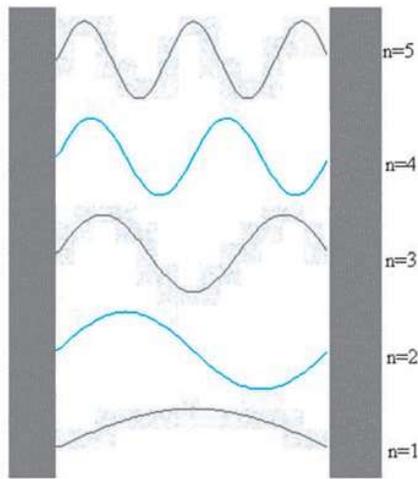
Hay dos razones principales para esto; primero, debido a la presencia de muchas fuentes de vibraciones dentro del medio en comparación con la excitación mecánica externa transferida a la tubería conectada a las estructuras

o equipos, y segundo, la estructura de amortiguamiento para la tubería usualmente es más alta que el medio de amortiguamiento, por lo que la vibración de la tubería puede extenderse lejos de la fuente únicamente debido al medio de oscilación.

Entre las fuentes de medio de vibración (acústica) más comunes están las pulsaciones inducidas por la bomba, el flujo turbulento, la cavitación, remolinos, entre otros. Teniendo en cuenta que el amortiguamiento del fluido es muy pequeño, una gran amplificación usualmente, es observada en las frecuencias de resonancia. La pulsación de la presión del medio afecta la tubería causando un desbalance de las fuerzas en sitios donde la dirección del flujo o la velocidad se cambia (codos, te, orificios, otros) (Robert D. Blevins., 1986)

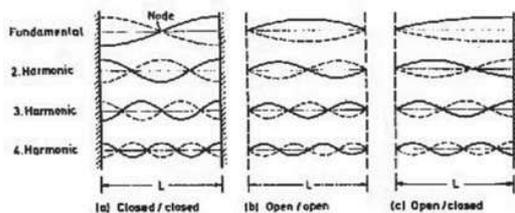
### B. Modos de Vibración

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico. La mayoría de los sistemas tienen varios modos de vibración (Figura. 2). La vibración de una estructura es siempre una combinación o una mezcla de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado. Por ejemplo, si se toca una campana suavemente, lo primero que se va oír es el modo fundamental de vibración, pero si se la toca más fuerte, otros modos son excitados y se oyen los parciales superiores del tono, es decir, en cada vibración se adopta una forma específica y se emite un sonido característico dado por la frecuencia con que vibra (A.P. French, 1974).



**Figura 2.** Modos de vibración. Fuente Vibraciones y Ondas. A. P. French, (1974).

La frecuencia mínima de vibración capaz de generar una onda estacionaria se llama Frecuencia Fundamental ( $F_0$  ó  $n=1$ ). Cuando la cuerda vibra con dicha frecuencia se dice que se ha establecido su modo fundamental de vibración. La frecuencia de los demás modos de vibración son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y se denominan armónicos ( $n = 2, 3, 4, 5...$ ). Una visión general de todas las condiciones límites y los correspondientes patrones de ondas estables unidimensionales se ilustran en la Figura 3. Claramente la distancia  $L$  entre los dos extremos puede contener cualquier número entero múltiplo de la mitad de una longitud de onda de resonancia.



**Figura 3.** Patrones de onda estacionaria unidimensional mostrando variaciones de presión para diferentes condiciones finales.

Fuente Eduard Naudascher. Donald Rockwell. (2005).

## IV. EXPERIMENTO

El experimento demostrativo tiene como propósito, reproducir experimentalmente las inestabilidades oscilatorias del fluido para determinar su relación con la inducción de vibraciones en tubos doblemente empotrados transportando fluido (agua). Se observan y registran fotográficamente los patrones de movimiento por medio de la manguera guía de 3/8 in instalada en la tubería de vidrio. Es decir, los valores relativos de amplitud y frecuencia obtenidos experimentalmente para variaciones de caudal, se analizarán de manera cualitativa para mostrar la existencia de vibración y su incremento con el aumento del flujo. En relación a la influencia de alguna vibración externa, el tubo se encuentra aislado de las mismas, debido a que en los extremos del tubo se instalaron gomas aislantes.

### Descripción del equipo

El equipo, mostrado esquemáticamente en la Figura 4, consiste de dos tanques de acero cada uno con una capacidad de  $0,2895 \text{ m}^3$  (289,5 L), uno alimentador y el otro receptor, ambos con tapas de láminas ajustadas por tornillos, una bomba marca Venfab con un motor de 0.8 hp marca Weg, un fluxómetro marca Iberconta, de 1 bar, de  $Q_{\text{max}}$  de  $7 \text{ m}^3/\text{h}$ , con lecturas de apreciación de 10L., 100L., y 1000L., un tubo de vidrio de 0,254 m (1 in) de diámetro y espesor de  $3 \times 10^{-3} \text{ m}$  (3mm), de longitud de 0.75 m conectado entre ambos tanques, tubería de plástico de diámetro 0,508 m (2 in), una válvula de control de caudal de salida del tanque 2 de 1.5 in, una válvula de 1.25 in a la entrada del fluxómetro y una manguera de plástico de diámetro de  $95,25 \times 10^{-3} \text{ m}$  (3/8 in.) usada como guía para ver y medir las ondulaciones producidas en el agua. La cámara usada fue una Casio EX-SH100 de

10.1 megapixels con zoom de 10x y estabilización de imagen. Para atenuar la intensidad del chorro de agua cuando entra al tanque 1 (alimentador) se colocó una malla de plástico, para evitar que el mismo impacte directamente sobre la manguera que sirve de guía para la observación de las ondulaciones que se forman en el agua.

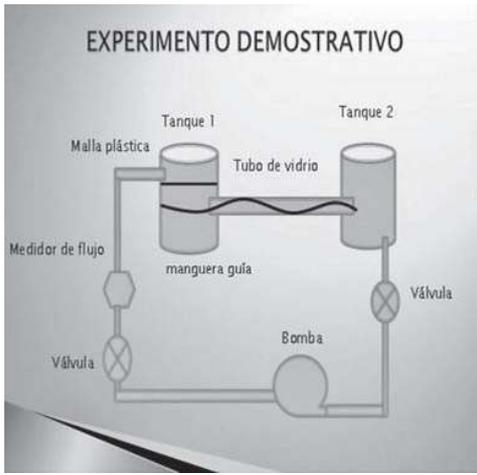


Figura 4. Experimento demostrativo.  
Fuente: Velasco Maite (2013).

Para tomar los datos, se utilizó un volumen de 10 L (0,01m<sup>3</sup>) como referencia fija del fluxómetro, la válvula se fue abriendo poco a poco hasta llegar al máximo caudal que podía pasar, se dejó estabilizar la misma por un lapso de 10 minutos en su recorrido para después leer el tiempo con un cronómetro para cada uno de los ensayos. Estos valores se tomaron tres veces con el mismo tiempo para asegurar su precisión lo mejor posible, ver Tabla 1.

## RESULTADOS

Para comprobar que el fluido con que se trabajó era turbulento fue necesario verificar que los números de Reynolds (Re) estuviesen en el rango de turbulencia,  $Re \geq 4000$  según Mott (2015).

Tabla 1. Valores obtenidos en el equipo

| video | Tiempo (s) | caudal (m <sup>3</sup> /s) | velocidad (m/s) | Reynolds  |
|-------|------------|----------------------------|-----------------|-----------|
| 1     | 25,80      | 3,8760E-04                 | 1,3113          | 2,4889E04 |
| 2     | 24,80      | 4,0323E-04                 | 1,3641          | 2,5893E04 |
| 3     | 22,90      | 4,3668E-04                 | 1,4773          | 2,8041E04 |
| 4     | 20,90      | 4,7847E-04                 | 1,6187          | 3,0725E04 |
| 5     | 18,80      | 5,3191E-04                 | 1,7995          | 3,4157E04 |
| 6     | 17,80      | 5,6180E-04                 | 1,9006          | 3,6076E04 |
| 7     | 15,70      | 6,3694E-04                 | 2,1548          | 4,0901E04 |
| 8     | 13,70      | 7,2993E-04                 | 2,4694          | 4,6872E04 |
| 9     | 12,50      | 8,0000E-04                 | 2,7065          | 5,1372E04 |
| 10    | 10,50      | 9,5238E-04                 | 3,2220          | 6,1157E04 |
| 11    | 10,05      | 9,9502E-04                 | 3,3662          | 6,3896E04 |
| 12    | 9,50       | 1,0526E-03                 | 3,5611          | 6,7595E04 |

|    |      |            |        |           |
|----|------|------------|--------|-----------|
| 13 | 9,10 | 1,0989E-03 | 3,7177 | 7,0566E04 |
| 14 | 8,50 | 1,1765E-03 | 3,9801 | 7,5548E04 |
| 15 | 8,10 | 1,2346E-03 | 4,1766 | 7,9278E04 |
| 16 | 7,50 | 1,3333E-03 | 4,5108 | 8,5621E04 |
| 17 | 7,10 | 1,4085E-03 | 4,7649 | 9,0444E04 |
| 18 | 6,50 | 1,5385E-03 | 5,2047 | 9,8793E04 |
| 19 | 6,15 | 1,6260E-03 | 5,5009 | 1,0441E05 |
| 20 | 5,50 | 1,8182E-03 | 6,1510 | 1,1675E05 |
| 21 | 5,15 | 1,9417E-03 | 6,5691 | 1,2469E05 |
| 22 | 4,15 | 2,4096E-03 | 8,1520 | 1,5473E05 |

Fuente: Velasco Maite (2013).

Se realizaron los cálculos de caudal y velocidad de acuerdo a las ecuaciones (1) y (2) y luego se obtuvo el Re con el uso de la ecuación (4). Así se completó la Tabla 1 para una serie de 22 videos, con una duración de 10s cada uno.

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

$\dot{Q}$  = caudal ( $m^3/s$ )

$V$  = volumen ( $m^3$ )

$t$  = tiempo (s).

$$V = \dot{Q} / A \quad (2)$$

$V$  = velocidad ( $m/s$ )

$A$  = área de la sección transversal ( $m^2$ )

$$A = \pi/4 \phi_{int}^2 \quad (3)$$

$\phi_{int}$  = diámetro interno del tubo de vidrio (m).

$$Re = \frac{\rho V \phi_{int}}{\mu} \quad (4)$$

$Re$  = número de Reynolds

$\rho$  = densidad ( $Kg/m^3$ )

$\mu$  = viscosidad dinámica ( $Pa.s$ )

Datos fijos para el agua.

$$Temp=20^{\circ}C; \rho=998 \frac{Kg}{m^3}; \mu=1,02 e^{-3} Pa.s$$

Para realizar los cálculos relacionados con las vibraciones (tabla 2), de las fotos obtenidas en cada uno de los videos se midieron, la amplitud y el número de ciclos. Son valores aproximados debido a que la cámara se usó para una resolución de 10.1 megapixels a una velocidad de 17 fotos por segundo. Se usó el programa Adobe Acrobat 7.0 Profesional para poder medir los datos anteriormente mencionados. Un extracto de estas mediciones, son las Figuras 5, 6, 7, y 8. Estas imágenes corresponden a los videos 1, 3, 4 y 7. Es necesario aclarar que las amplitudes mostradas en la Tabla 2, son el resultado de promediar los valores de tres muestras para cada posición de la válvula.

En la Tabla 2, se observa el número de ciclos para cada video. De allí, para el cálculo de la Frecuencia se utilizaron los tiempos de la Tabla 1, por ejemplo, para el primer tiempo se usó la siguiente relación:

$$\begin{aligned} 25,8 s &\rightarrow 34 \text{ ciclos} \\ 1 s &\rightarrow x \text{ ciclos} \\ F &= 1,3178 = \left( \frac{\text{ciclos}}{s} \right) \left( \frac{1}{s} \right) \end{aligned}$$

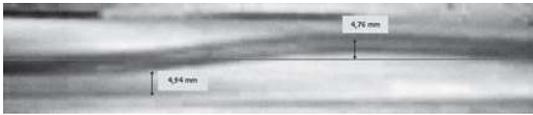
$$T = \left(\frac{1}{F}\right) \quad (5)$$

$T = \text{periodo (s)}$

$F = \text{frecuencia (1/s)}$

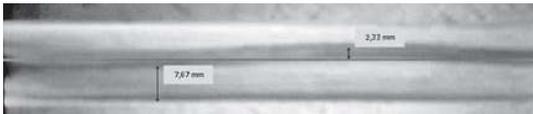
Usando la ecuación (5) se procedió a calcular cada Periodo de la Tabla 2. Se muestra el cálculo para la primera posición de la válvula:

$$T = \frac{1}{1,3178} \left(\frac{1}{s}\right) = 0,7588 \text{ (s)}$$



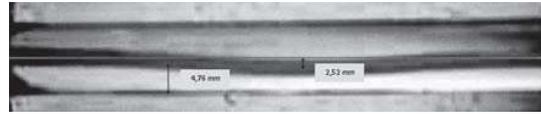
**Figura 5.** Visualización del movimiento del fluido dentro de la tubería para un  $t=25,8s$ .

Fuente: Velasco Maite (2013).



**Figura 6.** Visualización del movimiento del fluido dentro de la tubería para un  $t=22,9s$ .

Fuente: Velasco Maite (2013).



**Figura 7.** Visualización del movimiento del fluido dentro de la tubería para un  $t=20,9s$ .

Fuente: Velasco Maite (2013).



**Figura 8.** Visualización del movimiento del fluido dentro de la tubería para un  $t=15,7s$ .

Fuente: Velasco Maite (2013).

Las Figuras 5, 6, 7, y 8, se muestran para que el lector visualice las oscilaciones de la manguera guía por acción del fluido. Puede observarse el trazo del centro de la tubería y la medición de las amplitudes de desplazamiento para diferentes caudales o variación en la apertura de la válvula.

**Tabla 2.** Resultado de las mediciones realizadas en las fotografías.

| video | ciclos | Frecuencia (1/s) | Periodo (s) | Amplitud (mm) |
|-------|--------|------------------|-------------|---------------|
| 1     | 34     | 1,3178           | 0,7588      | 6,30          |
| 2     | 30     | 1,2097           | 0,8267      | 3,74          |
| 3     | 35     | 1,5284           | 0,6543      | 5,48          |
| 4     | 33     | 1,5789           | 0,6333      | 4,67          |
| 5     | 34     | 1,8085           | 0,5529      | 3,97          |
| 6     | 33     | 1,854            | 0,5394      | 5,22          |
| 7     | 34     | 2,1656           | 0,4618      | 5,04          |
| 8     | 32     | 2,3358           | 0,4281      | 7,22          |
| 9     | 33     | 2,64             | 0,3788      | 4,95          |
| 10    | 31     | 2,9524           | 0,3387      | 7,56          |
| 11    | 25     | 2,4876           | 0,402       | 3,57          |

|    |    |        |        |      |
|----|----|--------|--------|------|
| 12 | 29 | 3,0526 | 0,3276 | 5,66 |
| 13 | 26 | 2,8571 | 0,35   | 6,45 |
| 14 | 30 | 3,5294 | 0,2833 | 5,19 |
| 15 | 29 | 3,5802 | 0,2793 | 4,30 |
| 16 | 33 | 4,4    | 0,2273 | 3,94 |
| 17 | 31 | 4,3662 | 0,2290 | 5,61 |
| 18 | 31 | 4,7692 | 0,2097 | 7,91 |
| 19 | 25 | 4,0650 | 0,246  | 6,20 |
| 20 | 32 | 5,8182 | 0,1718 | 4,48 |
| 21 | 32 | 6,2136 | 0,1609 | 5,30 |
| 22 | 31 | 7,4699 | 0,1339 | 5,05 |

Fuente: Velasco Maite (2013).

## V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para conocer la vibración de la tubería, en función de los diferentes parámetros medidos y calculados, se trazan varias curvas, aproximadas, debido a que la apreciación de los instrumentos utilizados introduce errores en los datos obtenidos. Los parámetros de vibraciones que se midieron fueron el número de ciclos y la amplitud. Estas medidas fueron tomadas directamente de las fotografías generadas en el experimento. A partir del número de ciclos se calculó la Frecuencia. Ambas variables, Frecuencia y Amplitud, se graficaron en función del tiempo de apertura de la válvula y del número de Reynolds y solo la Amplitud en función de la longitud de la cuerda.

En la Figura 9 puede observarse que para los tiempos menores (Caudal mayor, Velocidad alta, mayor apertura de la Válvula) la Frecuencia es la más elevada y disminuye para caudales menores o mayores tiempos. Esto es consistente con lo observado en la figura 11, en donde la Frecuencia aumenta con el número de Reynolds. Es decir, a medida que

el flujo se hace más turbulento la Frecuencia vibratoria aumenta.

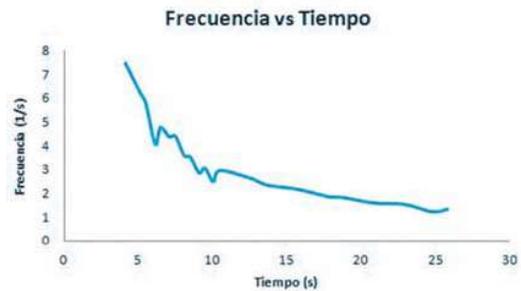


Figura 9. Variación de la frecuencia vs tiempo.

Fuente: Velasco Maite (2013).

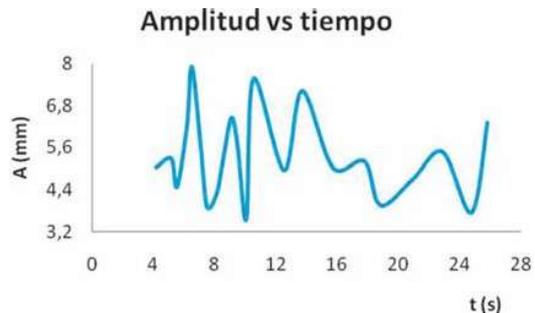
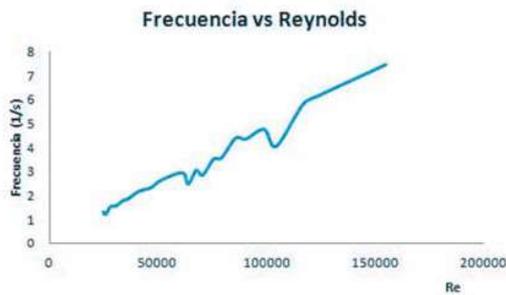


Figura 10. Variación de la amplitud vs tiempo.

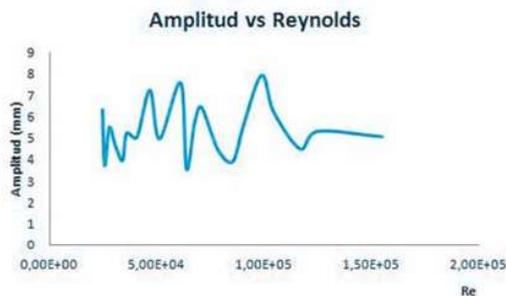
Fuente: Velasco Maite (2013).



**Figura 11.** Variación de la frecuencia vs número de Reynolds.

Fuente: Velasco Maite (2013).

En la Figuras 10 y 12, se muestra la variación de la Amplitud con respecto al tiempo y al número de Reynolds. Se nota, en la Figura 10, mayor variación de la Amplitud para tiempos menores o caudales mayores. En la figura 12, a medida que el número de Re aumenta, la onda que se produce tiende a estabilizarse en un valor intermedio. Sin embargo, la información que puede obtenerse de estas dos figuras es que es notoria la vibración, pero no muestran tendencias claras de aumento o disminución con respecto al tiempo o al número de Reynolds.

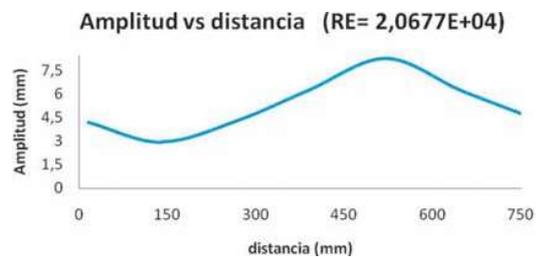


**Figura 12.** Variación de la amplitud vs número de Reynolds.

Fuente: Velasco Maite (2013).

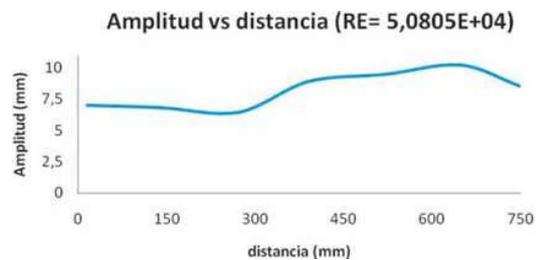
A continuación, en las gráficas realizadas para las figuras 13 y 14, se aprecia la variación de la Amplitud para Re específicos en relación la longitud del tubo de pruebas. Aquí, a medida que el tiempo y el caudal van aumentando, las

ondas generadas por el fluido se van estabilizando, tiende a que se produzca la misma cantidad de ondas emitidas por el mismo tiempo. Ambas figuras muestran la vibración por parte del fluido. En las figuras 13 y 14, teóricamente existen diferentes modos de vibración, se puede observar en estas figuras, que, para número de Reynolds bajos, los modos de vibración serán más fáciles de observar. Al comparar las curvas de ambas figuras, es notorio que la amplitud tiende a estabilizarse a medida que el número de Re va en aumento, pero a unos valores más altos de Amplitud.



**Figura 13.** Variación de la amplitud vs distancia (para un Reynolds específico).

Fuente: Velasco Maite (2013).



**Figura 14.** Variación de la amplitud vs distancia (para un Reynolds específico).

Fuente: Velasco Maite (2013).

Claramente, un experimento tan sencillo muestra, graficando apropiadamente los parámetros vibratorios, que es importante considerar el fenómeno vibratorio en tuberías que manejen flujo turbulento de fluido. En este estudio con la realización de varios videos para poder obtener gráficamente patrones vibratorios del fluido y así estimar los cálculos relacionados a



las vibraciones, se pudo verificar que a medida que el caudal iba aumentando, los parámetros de frecuencia y amplitud, mostraron variaciones claramente apreciables a pesar del escaso equipamiento e instrumentación.

## VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el movimiento ondulatorio de un fluido interno, unidimensional, transitorio, incompresible y turbulento, capaz de producir vibraciones dentro de una tubería horizontal a través de un estudio cualitativo.

La realización del experimento permitió visualizar el fenómeno vibratorio debido al flujo turbulento de agua, usando una manguera como una traza del fluido. La precisión de las mediciones fue afectada por el espesor de la manguera que ocupó un espacio dentro del tubo.

La Frecuencia de la vibración del fluido mostró un incremento a medida que se aumentó el número de Reynolds, en tanto que la amplitud de la vibración, mostró tendencia de estabilización a medida que se aumentaba el número de Reynolds. La vibración a lo largo de la tubería, mostró valores promedio de amplitud crecientes a medida que se aumentó el número de Reynolds. Es decir, la estructura de la tubería estará sometida a fuerzas y deflexiones mayores a medida que se incrementa el flujo de fluido o la turbulencia del mismo.

## VII. REFERENCIAS

Blevins, R. (1986). Flow-Induced Vibration. Malabar, FL: Krieger Publishing Company.

Eduard, N., y Donald, R. (2005). Flow-induced vibrations. An Engineering Guide. Mineola, New York: Dover Publications, Inc.

French, A. P. (1974). Vibraciones y Ondas. Barcelona, España: Editorial Reverté, S. A.

Gregory, R. W., y Païdoussis, M. P. (1966). Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid I. Theory. Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 293(1435), 512-527.

Gregory, R. W., y Païdoussis, M. P. (1966). Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid II. Experiments. Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences, 293(1435), 528-542.

Mott, R., y Untener, J. (2015). Applied fluid mechanics (7th ed.). United States: Pearson Education (US).

Païdoussis, M. P. (2016). Fluid-Structure Interactions. Slender Structures and Axial Flow, Volume 2. Kidlington, Oxford, U.K.; Waltham, Mass.: Academic Press

Païdoussis, M. P. (2013). Fluid-Structure Interactions Slender Structures and Axial Flow. Academic Press

Païdoussis, M. P., y Issid, N. T. (1974). Dynamics Stability of pipes conveying fluid. Journal of Sound and Vibration, 33(3), 267-294.

Peter, V., y Leonid, F. (2003). Analytical Study of Piping Flow-Induced Vibration. Example of Implementation. 17th International Conference on structural mechanics in reactor technology, Prague, Czech Republic.

Shuaijun, L., Bryan, W. K., y Gongmin, L. (2015). FSI research in pipeline systems – A review of the literature. Journal of Fluids and Structures, 57, 277-297, .

Velasco, M. (2013). Análisis del movimiento ondulatorio de un flujo turbulento, capaz de producir vibraciones dentro de una tubería horizontal (tesis de maestría). Universidad de los Andes, Merida, Venezuela.