

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**MODELAMIENTO NUMÉRICO DE LA VIBRACIÓN INDUCIDA POR
FLUJO EN UNA TUBERÍA HORIZONTAL QUE TRANSPORTA FLUJO
BIFÁSICO TURBULENTO AGUA – AIRE**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTOR

DANIEL ABARCA MORA

ASESOR

ROSENDO FRANCO RODRÍGUEZ

Junio 2018



© 2018, Daniel Abarca Mora

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos a través de cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis numérico de vibración inducida por flujo (FIV) sobre una tubería horizontal que transporta flujo bifásico agua-aire. Para el estudio del fluido se consideró un dominio de estudio de 3m de longitud en el que se analizaron diferentes modelos de turbulencia con la finalidad de seleccionar el más adecuado para el estudio FIV. Se tomó como criterio de comparación el comportamiento de la presión variable sobre la pared de la tubería. Los resultados obtenidos muestran que el modelo RANS K- ω SST es capaz de representar con buena precisión el comportamiento del flujo bifásico analizado, pues capta los patrones de flujo y las fluctuaciones de presión en concordancia con resultados experimentales reportados en la literatura, por lo que fue seleccionado para el análisis FIV. Seguidamente se procedió a determinar el método de análisis de vibración más adecuado para el objeto en estudio (tubería), en el cual se consideró un dominio de estudio de la tubería de 1.53 m de longitud, empotrada en ambos extremos. Es así que se determinó que el análisis dinámico transitorio acoplado bidireccional de interacción fluido-estructura (FSI), que contempla los efectos del campo de fluidos sobre el campo estructural y viceversa, representa de manera adecuada el fenómeno en estudio por considerar que son los esfuerzos, desplazamientos, aceleraciones y frecuencias las variables a determinarse en este análisis. Para las condiciones de flujo analizadas se captaron vibraciones, desplazamientos en el rango de -48 μm a 18 μm , aceleraciones en el rango de -0.07 m/s^2 a 0.8 m/s^2 y frecuencias máximas en el rango de 10 Hz a 35 Hz.



A Dios, a mis padres, mi esposa y mis hermanos, que siempre me brindaron su apoyo incondicional durante esta batalla.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mi asesor el profesor Rosendo Franco Rodríguez por todo el apoyo, colaboración y orientación brindada en el desarrollo del presente trabajo.

Al profesor Herbert Yépez Castillo por el esfuerzo, dedicación y consejo brindado durante todo este tiempo. Al ingeniero Renato Yupa Villanueva que con su valioso aporte, colaboración y enseñanza, fue posible el desarrollo de esta tesis.

Al profesor Luis Enrique Ortíz Vidal por su colaboración y aporte en lo referido a los datos e imágenes del trabajo experimental desarrollado.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	iii
AGRADECIMIENTOS	v
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	4
1. ESTADO DEL ARTE.....	4
1.1. El fenómeno de la vibración inducida por flujo en tuberías	6
1.1.1 Concepto de la vibración inducida por flujo	6
1.1.2 Particularidades de la vibración inducida por flujo en tuberías	7
1.1.3 Métodos utilizados para el estudio de la vibración inducida por flujo	7
1.2. Análisis del flujo turbulento bifásico mediante CFD.....	9
1.2.1 Modelos de turbulencia.....	12
1.2.2 Modelos multifásicos	19
1.3. Análisis de vibración mediante FEM.....	31
1.3.1 Métodos para el estudio de vibraciones	31
1.3.2 Métodos empleados en el modelamiento de la vibración inducida por flujo	38
CAPÍTULO 2	48
2. SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA PARA EL ESTUDIO DEL FLUIDO	48
2.1. Simulación numérica del flujo turbulento bifásico.....	48
2.1.1 Geometría y condiciones de contorno para el estudio del flujo.	48
2.1.2 Configuración del modelo RANS	50
2.1.3 Configuración del modelo LES.....	54
2.2. Aplicación y validación de los modelos RANS y LES.....	56
2.2.1 Ensayos experimentales de referencia.....	56
2.2.2 Resultados de los casos de estudio seleccionados.....	60

CAPÍTULO 3	82
3. MODELAMIENTO DE LA VIBRACION INDUCIDA POR FLUJO.....	82
3.1. Simulación numérica de la estructura (tubería)	82
3.1.1 Geometría y condiciones de contorno para la estructura.	82
3.1.2 Configuración del modelo estructural	84
3.2. Análisis modal de la tubería.....	85
3.2.1 Tubería vacía.....	85
3.2.2 Tubería con fluido	88
3.3. Simulación numérica del problema de interacción fluido estructura FSI89	
3.3.1 Configuración del modelo FSI.....	89
CAPÍTULO 4	93
4. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS	93
4.1. Resultados del estudio numérico de los casos FIV seleccionados.....	93
4.2. Validación de resultados	104
BIBLIOGRAFÍA.....	110
ANEXOS.....	116

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Estadísticas del mallado hexagonal.....	50
Tabla 2.2 Propiedades físicas del agua y aire	52
Tabla 2.3 Propiedades físicas de la fase líquida y gaseosa	52
Tabla 2.4 Condiciones de contorno a la entrada (Inlet).	52
Tabla 2.5 Condiciones de contorno a la salida (Outlet).....	53
Tabla 2.6 Condiciones de contorno de la pared del fluido (Wall).	53
Tabla 2.7 Parámetros comunes	53
Tabla 2.8 Esquemas de discretización temporal y espacial	53
Tabla 2.9 Propiedades físicas de la fase líquida y gaseosa	55
Tabla 2.10 Condiciones de contorno a la entrada (Inlet).	55
Tabla 2.11 Condiciones de contorno a la salida (Outlet).....	55
Tabla 2.12 Condiciones de contorno de la pared del fluido (Wall).	55
Tabla 2.13 Parámetros comunes	55
Tabla 2.14 Esquemas de discretización temporal y espacial	56
Tabla 2.15 Características del banco experimental.....	57
Tabla 2.16 Casos o condiciones de estudio de flujo bifásico agua-aire.....	59
Tabla 3.1 Estadísticas del mallado de tubería.	84
Tabla 3.2 Propiedades térmicas y mecánicas de la tubería.....	84
Tabla 3.3 Frecuencias naturales de simulación.....	86
Tabla 3.4 Frecuencias naturales caso 1	88
Tabla 3.5 Frecuencias naturales caso 2	88
Tabla 3.6 Frecuencias naturales caso 3	89
Tabla 3.7 Propiedades térmicas y mecánicas de tubería PVC Schedule 40.....	91
Tabla A. 1 Propiedades físicas y térmicas del material de la tubería.....	117
Tabla A. 2 Resultados experimentales de L. E. Ortiz Vidal	120
Tabla A. 3 Tabla de las propiedades del aire a 1 atm de presión.....	121
Tabla A. 4 Propiedades modales experimentales del sistema de los cuatro primeros modos de vibración [55].....	125

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Torbellinos pequeños y grandes en la turbulencia, M. Pittard [27].....	12
Fig. 1.2 Modelos de turbulencia en función de su coste computacional, J. Sánchez [28].....	13
Fig. 1.3 Diferentes escalas de remolinos en fluidos turbulentos, J. A. Capote. [29].	15
Fig. 1.4 Flujo bifásico en una tubería horizontal, O. Shoham [9].....	19
Fig. 1.5 Patrones de flujo en una tubería horizontal a) Bubbly flow, b) Slug flow, c) Stratified smooth d) Stratified. O. Shoham [9].	21
Fig. 1.6 Burbuja Slug, Deendarlianto [19].....	21
Fig. 1.7 Morfología del patrón slug en una tubería horizontal, Deendarlianto [19].	22
Fig. 1.8 Proceso de formación del patrón slug de estratificado a slug, M. Lu [33].	23
Fig. 1.9 Definiciones de fracción de vacío (a) enfoque lineal (b) enfoque superficial y (c) enfoque volumétrico, J. López. [21].	24
Fig. 1.10 Mapa de patrones de flujo de Mandhane [34].	25
Fig. 1.11 Respuesta armónica de una estructura que soporta una máquina,.....	32
Fig. 1.12 Relación entre el tiempo y el dominio de la frecuencia.....	33
Fig. 1.13 Vibración Aleatoria en amplitud – Tiempo.	34
Fig. 1.14 Esfuerzos y deformaciones en un aerogenerador.	36
Fig. 1.15 Diagrama de flujo del método desacoplado o one way, R. Raja [36].....	37
Fig. 1.16 Diagrama de flujo del acoplamiento two way. R. Raja [36].....	38
Fig. 1.17 Vibración inducida de acuerdo al tipo de flujo, R. D. Blevins [11].	40
Fig. 1.18 Diagrama esquemático del sistema, D. Castillo [48].....	44
Fig. 1.19 Sistema de un grado de libertad.....	45
Fig. 1.20 Diagrama de cuerpo libre de los elementos diferenciales ds de una tubería horizontal que transporta fluido, a) fluido b) tubería. L. E. Ortiz [52]	46
Fig. 2.1 Modelo geométrico CAD del fluido.	49
Fig. 2.2 Mallado hexagonal del fluido con ICEM CFD.....	50
Fig. 2.3 Configuraciones de ingreso de las fases a) concéntrico b) partido.....	51
Fig. 2.4 Representación esquemática del circuito cerrado de ensayo bifásico	57
Fig. 2.5 Componentes del circuito de ensayo	58
Fig. 2.6 Equipos e instrumentación.....	58
Fig. 2.7 Casos de estudio en el mapa de Mandhane, L. E. Ortiz [7].....	59
Fig. 2.8 Puntos para ploteo de presiones variables en el fluido	61

Fig. 2.9 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 1.modelo RANS $k-\omega$ SST	61
Fig. 2.10 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 1 RANS $k-\omega$ SST ..	62
Fig. 2.11 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 1.modelo RANS $k-\omega$ SST	62
Fig. 2.12 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 1.modelo LES.....	63
Fig. 2.13 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 1 LES	63
Fig. 2.14 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 1.modelo LES .	64
Fig. 2.15 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado numérico del caso 1	64
Fig. 2.16 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 1.....	65
Fig. 2.17 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 2.modelo RANS $k-\omega$ SST	65
Fig. 2.18 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 2 RANS $k-\omega$ SST ..	66
Fig. 2.19 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 2.modelo RANS $k-\omega$ SST	66
Fig. 2.20 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 2.modelo LES.....	67
Fig. 2.21 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 2 LES	67
Fig. 2.22 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 2.modelo LES .	68
Fig. 2.23 Comparación cualitativa entre lo experimental (L. E. Ortíz Vidal [55]) y el resultado de la simulación del caso 2	68
Fig. 2.24 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 2.....	69
Fig. 2.25 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 3.modelo RANS $k-\omega$ SST	69
Fig. 2.26 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 3 RANS $k-\omega$ SST ..	70
Fig. 2.27 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 3.modelo RANS $k-\omega$ SST	70
Fig. 2.28 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 3.modelo LES.....	71
Fig. 2.29 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 3 LES	71
Fig. 2.30 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 3.modelo LES .	72
Fig. 2.31 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado de la simulación del caso 3	72
Fig. 2.32 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 3.....	73
Fig. 2.33 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 4.modelo RANS $k-\omega$ SST	

.....	73
Fig. 2.34 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 4 RANS $k-\omega$ SST..	74
Fig. 2.35 Variación de presión de puntos superior en inferior - Caso 4.modelo RANS $k-\omega$ SST.....	74
Fig. 2.36 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 4.modelo LES.....	75
Fig. 2.37 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 4 LES	75
Fig. 2.38 Variación de presión de puntos superior en inferior - Caso 4.modelo LES	76
Fig. 2.39 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado de la simulación del caso 4.....	76
Fig. 2.40 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 4.....	77
Fig. 2.41 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 5.modelo RANS $k-\omega$ SST.	77
Fig. 2.42 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 5 RANS $k-\omega$ SST..	78
Fig. 2.43 Variación de presión de puntos superior en inferior - Caso 5.modelo RANS $k-\omega$ SST.....	78
Fig. 2.44 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 5.modelo LES.....	79
Fig. 2.45 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 5 LES	79
Fig. 2.46 Variación de presión de puntos superior en inferior - Caso 5.modelo LES	80
Fig. 2.47 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado de la simulación del caso 5.....	80
Fig. 2.48 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 5.....	81
Fig. 3.1 Modelo geométrico de la tubería	83
Fig. 3.2 Mallado de la tubería con ICEM CFD.....	83
Fig. 3.3 Condiciones de contorno del problema estructural.....	85
Fig. 3.4 Frecuencias naturales y modos de vibración de la tubería.....	87
Fig. 3.5 Modelo geométrico del análisis FSI.	90
Fig. 3.6 Especificaciones tubería PVC Schedule 40, Anexo 1	90
Fig. 3.7 Esquema de análisis FSI usando la herramienta system coupling.....	91
Fig. 4.1 Esfuerzos en la tubería - Caso 1.....	94
Fig. 4.2 Desplazamientos de la tubería (t = 1 s) – Caso 1.....	95
Fig. 4.3 Desplazamientos de la tubería (t = 3 s) – Caso 1.....	95
Fig. 4.4 Desplazamiento del punto medio de la tubería – Caso 1.....	96
Fig. 4.5 Desplazamiento estabilizado del punto medio de la tubería – Caso 1.....	96
Fig. 4.6 Aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 1.	97

Fig. 4.7 PSD de la aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 1.	97
Fig. 4.8 Esfuerzos en la tubería - Caso 2.....	98
Fig. 4.9 Desplazamientos de la tubería (t = 1.8 s) – Caso 2.....	98
Fig. 4.10 Desplazamientos de la tubería (t = 3.2 s) – Caso 2.....	99
Fig. 4.11 Desplazamiento del punto medio de la tubería – Caso 2.....	99
Fig. 4.12 Desplazamiento estabilizado del punto medio de la tubería – Caso 2.....	100
Fig. 4.13 Aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 2.	100
Fig. 4.14 PSD de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 2.	101
Fig. 4.15 Esfuerzos en la tubería - Caso 3.....	101
Fig. 4.16 Desplazamientos de la tubería (t = 1 s) – Caso 3.....	102
Fig. 4.17 Desplazamientos de la tubería (t = 3 s) – Caso 3.....	102
Fig. 4.18 Desplazamiento del punto medio de la tubería – Caso 3.....	103
Fig. 4.19 Desplazamiento estabilizado del punto medio de la tubería – Caso 3.....	103
Fig. 4.20 Aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 3.	104
Fig. 4.21 PSD de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 3.	104
Fig. 4.22 PSD experimental de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 1 (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)).	105
Fig. 4.23 PSD experimental de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 2 (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)).	106
Fig. 4.24 PSD de la aceleración experimental – Caso 2 = C24, L. E. Ortíz [12].....	106
Fig. 4.25 PSD experimental de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 3 (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)).	107
Fig. A. 1 Mapa de Mandhane con las condiciones experimentales dadas por L. E. Ortíz [7].....	119
Fig. A. 2 Sistema de un grado de libertad.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos

A	sección transversal interna de la tubería
F	fuerza normal de la tubería sobre el fluido
J	velocidad superficial de la mezcla
M	masa lineal del fluido
m	masa lineal de la tubería
p	presión
Q	fuerza transversal de la tubería
qS	fuerza tangencial de la tubería sobre fluido
T	tensión longitudinal en la tubería
U	velocidad real o in situ
u	velocidad adimensional
w	deformación de la tubería

Letras griegas

β	fracción de vacío homogénea o fracción volumétrica
τ	tiempo adimensional
Ω	frecuencia (natural) del sistema
ω	frecuencia adimensional del sistema

Subíndices

k	tipo de fase
g	relativo a la fase gas
f	relativo a las fase líquida

INTRODUCCIÓN

En la industria de los hidrocarburos se presenta una serie de problemas durante el transporte de fluidos y en especial, los sistemas de tuberías no enterradas presentan vibración inducida por el flujo (FIV). El estudio FIV es de gran importancia ya que dichas vibraciones pueden provocar la falla de las tuberías ocasionando no sólo pérdidas económicas sino también un daño irremediable al medio ambiente. Las vibraciones aparecen debido a cargas dinámicas que pueden tener diferentes orígenes, por ejemplo, algunos trabajos resaltan la influencia de una trayectoria irregular de la tubería, con cambios de dirección y curvaturas, que pueden originar o incrementar las fuerzas dinámicas (M. Díaz, et al [1]). Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se centran en las cargas dinámicas que son originadas por la turbulencia del flujo, tema bastante complejo en el que aún hay trabajo por realizar. La complejidad radica en que la turbulencia es un fenómeno dependiente del tiempo, tridimensional, no lineal y caótico, pero no aleatorio, pues contiene estructuras espaciales bien definidas que se desarrollan en el tiempo, conocidas como eddies (M. Pittard, [2] y T. Shurtz, [3]). En tal sentido, uno de los aspectos más discutidos es el enfoque de modelamiento de turbulencia a utilizar en una simulación computacional, siendo tres los más conocidos: 1) La simulación numérica directa (Direct Numerical Simulation, DNS) que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes y requiere de un enmallado fino para captar todas las escalas de turbulencia. 2) La simulación de vórtices grandes (Large Eddy Simulation, LES) que también resuelve las ecuaciones de Navier Stokes, sin exigir una malla exhaustivamente fina como el DNS, ya que realiza un filtrado de las escalas de turbulencia. 3) La simulación de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) que emplea un promedio temporal sobre las ecuaciones de transporte e incorpora modelos que interpretan el comportamiento de la turbulencia (J. Fernández, [4]). Cabe mencionar que estos métodos han sido y seguirán siendo ampliamente empleados, sin embargo la aproximación DNS, que resuelve todas las escalas de turbulencia con pasos de tiempo suficientemente pequeños para captar las fluctuaciones más rápidas, demanda altísimo costo computacional haciéndola inviable en la mayoría de casos de aplicación industrial, a pesar que en la actualidad se cuenta con poderosas herramientas computacionales. Asimismo, LES, cada vez

más empleado y recomendado por investigadores (M. Pittard, [2], T. Shurtz, [3] y B. Kapusuzoglu, [5]), requiere gran almacenamiento computacional y elevados tiempo de ejecución, mientras que el RANS, quizá sea la aproximación que se ha ajustado más a las prácticas en ingeniería.

Un punto adicional a considerar en el análisis del flujo, además del enfoque para modelar la turbulencia, es el número de fases. Como es de suponer, el problema es más sencillo cuando se trabaja con un flujo monofásico, sin embargo es poco habitual encontrar en la industria casos donde un solo fluido participa de un determinado proceso. Un gran número de aplicaciones de interés tratan flujos compuestos por diferentes fases (líquido-gas, líquido-sólido, líquido-líquido, gas sólido) y esta condición le agrega complejidad al análisis. Actualmente se señala que no hay un modelo multifásico capaz de interpretar de manera adecuada todo tipo de flujo compuesto, pero si existen modelos orientados a resolver situaciones muy específicas, tales como: de fase discreta (Dispersed Phase Model, DPM), euleriano (Eulerian), de mezcla (Mixture), de volumen de fluido (Volume of Fluid, VoF). Un criterio general establece que el modelo VoF es empleado para fases inmiscibles, mientras los otros tres para fases interpenetradas (J. Fernández, [4]). Por otro lado, existen diversos patrones de flujo bifásico, líquido-gas, en tuberías horizontales dentro de los cuales se pueden mencionar: estratificado, ondulante, anular, tapón, burbujeante y disperso (Mandhane et al, [6]), siendo el patrón tapón (slug) el de mayor impacto en las vibraciones de acuerdo a la literatura (L. E. Ortíz et al, [7]).

En un análisis FIV no sólo el fluido actúa sobre la tubería, sino que los movimientos de la tubería también repercuten en el comportamiento del fluido. Es por ello que algunos autores plantean la necesidad de realizar un análisis acoplado de la interacción fluido-estructura (FSI), que contemple los efectos mutuos (F. Li, et al, [8]). Por este motivo en el presente trabajo se realiza un análisis FIV sobre una tubería horizontal utilizando un modelo transitorio FSI. Ya que la turbulencia del flujo origina las fluctuaciones de la presión, siendo esta la carga variable que origina las vibraciones de la tubería, se realizan un análisis preliminar del flujo utilizando modelos de turbulencia RANS y LES. Los resultados del análisis de flujo son validados cualitativamente con resultados experimentales de la literatura y la selección del modelo de turbulencia más adecuado se realiza de forma cuantitativa, comparando

los resultados de la presión en función del tiempo, en un punto ubicado en la superficie de contacto entre el flujo y la tubería.

OBJETIVO GENERAL

Realizar el modelamiento numérico de la vibración inducida por flujo en una tubería horizontal que transporta flujo bifásico turbulento agua - aire.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar los modelos numéricos para el análisis de flujos bifásicos turbulentos y seleccionar el más adecuado para el presente trabajo.
- Estudiar los modelos numéricos para el análisis de vibraciones mecánicas y seleccionar el más adecuado para el presente trabajo.
- Implementar y validar el modelo de análisis del flujo bifásico turbulento seleccionado en el software ANSYS.
- Implementar y validar el modelo de análisis de vibraciones seleccionado en el software ANSYS.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

El flujo multifásico, especialmente el flujo de dos fases gas-líquido, es un fenómeno que se presenta en un gran número de aplicaciones y procesos industriales, como nuclear, químico y petróleo. Dado el gran número de aplicaciones en las que este fenómeno existe, existe una fuerte motivación para poder estudiarla.

El fenómeno es complejo y combina físicamente flujo de fluido de estudio monofásico (fuerzas viscosas, fuerzas de inercia y fuerzas de presión), con las propiedades del flujo bifásico (fuerzas de interfaz, transferencia de masa, calor e impulso, entre otros). En la industria petrolera, el flujo de gas- líquido se produce en muchos procesos tales como producción, transporte y tratamiento, especialmente en embalses y tuberías (aguas arriba).

En años recientes, el estudio de la vibración inducida por flujo bifásico (FIV) se ha ido incrementando debido a que se presenta en varios campos de la ingeniería, tales como tuberías para el transporte de petróleo, plantas de procesamiento y energía, intercambiadores de calor y plantas de energía nuclear (O. Shoham, [9]; S. Miwa, [10]). En estas aplicaciones, el conocimiento de la carga dinámica inducida por el flujo bifásico gas-líquido es primordial para diseñar sistemas de ingeniería que operen de forma segura, evitando daños estructurales. Estos sistemas, no son ajenos a un contexto nacional, ya que la producción de petróleo viene en incremento respecto a los anteriores años (Sociedad Nacional de Minería Petróleo y Energía SNMPE, 2017).

La terminología FIV se introdujo por Robert Blevins en 1977, quien fue el primero en clasificar el fenómeno acorde a la dinámica estructural e hidrodinámica y desarrolló una metodología fundamental para analizar el problema (R. Blevins, [11]). Existen muchos investigadores que resaltan que, el origen de las vibraciones mecánicas en tuberías que transportan flujo bifásico es debido a la superposición de la turbulencia y la presencia del flujo bifásico (L. E. Ortiz, [7]). En tal sentido, la literatura muestra estudios analíticos, numéricos y experimentales para predecir los patrones de flujos bifásicos y así mismo determinar la carga dinámica sobre la estructura, la cual es un parámetro inicial para el estudio del problema FIV.

En el estudio del problema FIV, los autores respaldan sus investigaciones analíticas y numéricas con ensayos experimentales. Ciertos estudios desarrollan formulaciones analíticas para estudiar las vibraciones mecánicas debido al flujo bifásico turbulento para patrones tapón, disperso y burbujeante (L. E. Ortiz, [12]), sin embargo, no se tiene información cualitativa de la morfología bifásica en estudio. Desde el punto de vista numérico existen estudios para determinar los esfuerzos, desplazamientos y las frecuencias de vibración debido a la presencia de flujo bifásico (F. Li, [8]), no obstante este trabajo no posee ensayos experimentales, los cuales permitirían la validación del modelo numérico. Por otro lado, existen estudios solamente basados en experimentación, donde se busca estudiar la iniciación y evolución del flujo tapón dentro de una tubería horizontal (Hanyang, [13]; Dinaryanto, [14]), sin embargo, las conclusiones a las que llegan los autores difieren, ya que Gu Hanyang afirma que el mecanismo de formación del patrón tapón depende exclusivamente de la velocidad superficial del gas, mientras que Okto Dinaryanto, concluye que la iniciación depende de las velocidades superficiales del líquido y gas.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una rama de la mecánica de fluidos que hace uso de métodos numéricos y algoritmos para resolver problemas que involucran flujo de fluidos. En tal sentido existen aportes científicos que abordan el problema de flujo bifásico bajo diversos métodos de modelamiento de turbulencia y la influencia de estos en la formación de los patrones (R. Franco, 2017). Por otro lado, el problema FIV en tuberías horizontales que transportan flujo bifásico puede ser estudiado a través de la interacción fluido estructura FSI (R. Franco, 2017).

A continuación veremos algunos conceptos y fundamentos del análisis de fluidos que rigen los flujos bifásicos.

1.1. El fenómeno de la vibración inducida por flujo en tuberías

1.1.1 Concepto de la vibración inducida por flujo

La vibración inducida por flujo es un término que denota aquellos fenómenos asociados con la respuesta de las estructuras presentes en el flujo de fluido o que transmiten el mismo. Más específicamente, el término abarca aquellos casos en los que se desarrolla una interacción entre las fuerzas dinámicas del fluido y la inercia, amortiguación o las fuerzas elásticas en las estructuras. El estudio de estos fenómenos se basa en tres disciplinas: (1) mecánica estructural, (2) vibración mecánica y (3) dinámica de fluidos [15].

La vibración de cilindros circulares sujetos a flujo de fluidos ha sido conocida por el hombre desde la antigüedad; la vibración de un cable en su frecuencia natural en respuesta a la liberación del vórtice era conocida en la antigua Grecia como tonos de viento. Pero no se hicieron estudios sistemáticos del problema hasta hace un siglo atrás cuando Strouhal estableció la relación entre la frecuencia del desprendimiento del vórtice y la velocidad del flujo para un diámetro de cilindro dado. Las primeras investigaciones en esta área han sido resumidas por Zdravkovich y Goldstein [15].

La vibración inducida por flujo comprende fenómenos complejos y diversos; el sacudimiento de las líneas de transmisión, el aleteo de las tuberías que transportan fluido, el giro o rotación de los tubos de los intercambiadores de calor debido al paso del fluido son ejemplos típicos. Recientemente, la vibración inducida por flujo se ha estudiado extensamente por varias razones. En primer lugar, con el uso de materiales de alta resistencia, las estructuras se vuelven más delgadas y más susceptibles a la vibración. En segundo lugar, el desarrollo de reactores nucleares avanzados requiere un fluido de alta velocidad que fluya a través de los componentes, lo que puede causar vibraciones excesivas. En tercer lugar, la interacción dinámica de la estructura y el fluido es uno de los problemas más interesantes y fascinantes en la ingeniería mecánica [15].

En un sentido amplio, la vibración inducida por el flujo abarca aquellos campos en los cuales se generan las respuestas dinámicas debido a estructuras sumergidas en algún fluido, que contienen fluido o sometidas a flujo externo.

1.1.2 Particularidades de la vibración inducida por flujo en tuberías

En el fenómeno de la vibración inducida por flujo en tuberías, se presentan algunos parámetros que caracterizan este fenómeno en particular, en principio la turbulencia que se genera por el paso del flujo es un fenómeno dependiente del tiempo, tridimensional, no lineal y caótico, pero no aleatorio, pues contiene las conocidas estructuras espaciales bien definidas, denominadas eddies (remolinos), que se desarrollan en el tiempo [16]. Numerosos estudios indican también que parámetros como el patrón de flujo bifásico, la fracción de vacío, la velocidad de deslizamiento y la de compresibilidad del fluido contienen información importante sobre el fenómeno de vibración inducida por flujo bifásico (2-FIV). Estos parámetros tienen en cuenta las fluctuaciones del fluido, la densidad y los gradientes de presión, y son responsables de la complejidad de los fenómenos 2-FIV [17]. Es así que varios autores [12], [7], han determinado que la respuesta de vibración se incrementa cuando la velocidad superficial de la mezcla y la fracción de vacío se incrementan [18], [8].

Existen también estudios relacionados al patrón de flujo bubbly y anular, pero son pocos los relacionados al patrón de flujo slug a pesar de que genera una mayor amplitud de vibración debido a su fenomenología intermitente [17]. Según L.E. Ortíz Vidal [18], los niveles de aceleración de la vibración son mayores en los patrones de flujo slug y disperso que en los demás patrones de flujo.

1.1.3 Métodos utilizados para el estudio de la vibración inducida por flujo

Para poder realizar el adecuado abordaje de la vibración inducida por flujo, es necesario hacer uso de algún método o métodos que nos permitan resolver con un nivel de precisión adecuada este fenómeno. En la literatura se reportan estudios de numerosos autores, muchos de los cuales enfocan sus estudios con métodos experimentales, otros los plantean desde el punto de vista analítico y otros lo realizan desde el punto de vista numérico, algunos de ellos realizan estudios haciendo uso de

hasta dos métodos para estudiar el mismo fenómeno.

Deendarianto [19] realizó un estudio numérico y experimental del patrón de flujo slug en una tubería horizontal encontrando una buena correlación entre ambos resultados, además que también indica que la velocidad superficial del gas (J_G) tiene una influencia importante en la fluctuación del fluido. Un estudio puramente experimental fue realizado por Dinaryanto [14], su estudio se basa en la iniciación o formación y el desarrollo del patrón de flujo bifásico slug en una tubería horizontal, llegando a la conclusión que tanto la velocidad superficial del gas (J_G) y la velocidad superficial del líquido (J_L) juegan un papel importante en la formación y desarrollo del patrón del flujo slug. Por otro lado S. Miwa [10] realizó un estudio analítico, en ella recopila el planteamiento teórico y la clasificación del fenómeno FIV según varios autores.

Thomas Frank [20] lleva a cabo un estudio puramente numérico del patrón de flujo bifásico slug en una tubería horizontal, determinando entre otras cosas que el proceso de transición entre el flujo estratificado o segregado al flujo slug es determinado principalmente por la fricción de la pared de la fase líquida. J. López [21], realiza un estudio experimental y numérico en una tubería horizontal que transporta flujo bifásico, encontrando buena concordancia entre ambos métodos y realizando el estudio para tres patrones de flujo (estratificado, slug y anular) con el mismo modelo numérico. Otro autor, F. Li [8] realiza un estudio numérico del fenómeno FIV con flujo bifásico en una tubería submarina, dicho estudio contempla varias simulaciones con distintos valores de la fracción de vacío del aire, determinando que este parámetro es determinante en la respuesta vibratoria de la estructura, de igual manera M. Díaz [1] lleva a cabo un estudio numérico para determinar el efecto del flujo bifásico en el comportamiento estructural de una tubería, en este estudio se prueban distintos valores de flujo másico dando una respuesta estructural distinta para cada caso. M. Pittard [22] realiza un estudio numérico y experimental del fenómeno FIV en flujos totalmente desarrollados, como resultado se encuentra una buena correspondencia entre ambos métodos, además que la fluctuación de presión en la pared de la tubería tiene una relación cuadrática con el flujo.

Chen An [23] lleva a cabo un estudio analítico y numérico del comportamiento dinámico de una tubería que transporta flujo bifásico, en ella se determina que las

amplitudes de vibración se incrementan con el aumento de la fracción de vacío y el flujo de agua. Otro autor G. Hanyang [13] realiza un estudio netamente experimental del desarrollo del patrón de flujo slug en tuberías horizontales, llegándose a determinar entre otras cosas que el mecanismo de iniciación del patrón de flujo slug solo depende de la velocidad superficial del gas (J_G). L. E. Ortiz [7], [24], [18], [12], [17] lleva a cabo estudios tanto analíticos como experimentales en una tubería horizontal que transporta flujo bifásico, de ellos determina a partir de la respuesta de vibración, diferentes características propias de ciertos patrones de flujo, además que concluye entre otras cosas, que el flujo patrón, la velocidad de la mezcla y la fracción de vacío son los responsables de la respuesta de aceleración de la tubería.

A partir de la revisión bibliográfica, se concluye que este fenómeno abarca dos partes importantes de acuerdo a los diferentes autores, el primero, el análisis del fluido, con el cual se obtiene la carga dinámica sobre la tubería, y el segundo, el análisis estructural, con el cual se estudia el comportamiento de la tubería sometida a la carga variable. Asimismo, desde el punto de vista numérico, se hace uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para abordar el estudio del fluido y del método de los elementos finitos (FEM) para el abordaje estructural.

1.2. Análisis del flujo turbulento bifásico mediante CFD

Como se mencionó anteriormente, el fenómeno requiere primeramente de un análisis de fluidos, concretamente flujos bifásicos, ya que es ésta la que genera la carga dinámica variable sobre la pared de la tubería; por ende es necesario conocer primeramente aquellos principios que rigen la mecánica de los fluidos, para luego estudiar los modelos de turbulencia y modelos multifásicos que gobiernan concretamente el fenómeno multifásico y que se encuentran disponibles en la literatura.

- **Principio de conservación de la masa**

Llamada también ecuación de continuidad, es el cambio temporal de la masa debido a la diferencia existente entre los flujos máscicos tanto a la entrada como a la salida en un elemento diferencial muy pequeño.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1)$$

Donde \mathbf{V} , representa el vector velocidad y ρ la densidad del fluido que se mantiene constante en el tiempo por ser nuestro caso flujo incompresible resultándonos [25].

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

Para un modelo de dos fluidos, la ecuación de conservación de la masa es:

$$\frac{\partial m_k}{\partial t} + \frac{\partial m_k u_k}{\partial x} = S_{m,k} \quad (3)$$

Donde el subíndice k representa g (gas) y l (*liquid*), la masa por unidad de volumen m_k es el producto de la fracción de volumen β_k y la densidad.

- **Principio de conservación de la cantidad de movimiento**

Llamado también ecuación de momentum o momento, establece que la fuerza resultante en un volumen de control determinado es igual al producto de su masa infinitesimal por la aceleración de la misma [25], así como también las fuerzas normales y cortantes que actúan en el elemento. Para cada una de las direcciones se tienen:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (6)$$

Las velocidades u, v, w , son las velocidades en los ejes x, y y z , τ es el esfuerzo cortante y f es la fuerza resultante en la superficie del fluido.

- **Principio de conservación de la energía**

Llamado también ecuación de la energía, se basa en la primera ley de la termodinámica que establece que la razón de cambio de energía en un elemento diferencial infinitesimal es el resultado del flujo de calor neto más el trabajo realizado sobre el elemento, debido a las fuerzas actuantes sobre la superficie o cuerpo [25].

$$\rho \left(\frac{\partial e}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla e \right) - \nabla (K_H \nabla T) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (7)$$

Donde e , es la energía interna, \mathbf{V} es la velocidad vectorial, T la temperatura y K_H es el coeficiente de conducción de calor.

- **Las ecuaciones de Navier Stokes (N-S)**

Estas ecuaciones describen el comportamiento de los fluidos en el tiempo, son ecuaciones diferenciales parciales no lineales que son obtenidas del principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad, otras tres ecuaciones para la conservación del momento en las direcciones x , y y z , y una ecuación adicional para la conservación de la energía, de ellas se tienen 4 variables independientes (x y z) y el tiempo y como variables dependientes se obtienen 6 que son las tres velocidades, la presión, temperatura y la densidad.

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial p}{\partial x_i} - f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (9)$$

Se tiene por tanto una aceleración local $\left(\frac{\partial u_i}{\partial t} \right)$ y una convectiva $\left(u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$, también se tiene la presión que actúa sobre el elemento, f_i es la fuerza volumétrica que actúan en el elemento de masa por unidad de volumen y $\left(\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \right)$ es la fuerza de fricción pudiendo ser normal o tangencial.

1.2.1 Modelos de turbulencia.

Según Hinze (1975), la turbulencia, es “una condición irregular de flujo, en el cual, las diversas cantidades muestran una variación aleatoria en el tiempo y el espacio, pero de manera que pueden definirse cantidades promediadas estadísticamente”.

También se puede definir a la turbulencia como [26]:

- Un movimiento tridimensional y caótico de torbellinos de distintos tamaños, superpuestos a un movimiento o flujo principal del fluido.
- Un tipo de movimiento solución de las ecuaciones de N-S.
- Un eficiente mezclador de masa, momento cinético y energía.
- Un disipador importante de energía.

... La turbulencia se inicia por inestabilidades en el flujo causados por los gradientes de velocidades medias. Estos torbellinos (eddies) generan nuevas inestabilidades, dando lugar a torbellinos más pequeños (Fig. 1.1). Este proceso continua hasta que los torbellinos se hacen lo suficientemente pequeños y los gradientes de los términos fluctuantes de las velocidades lo bastante grandes para que el efecto de la viscosidad adquiera importancia y se disipe la energía turbulenta en forma de calor [26].

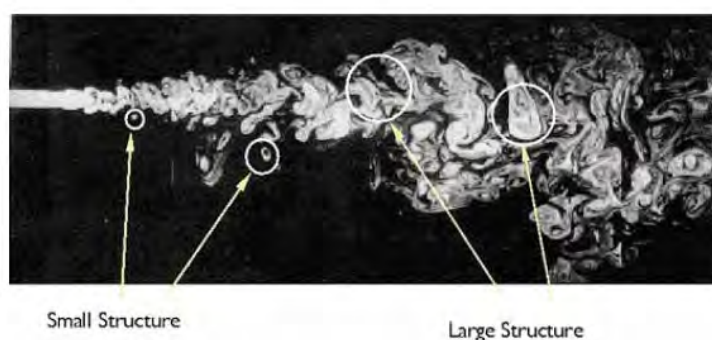


Fig. 1.1 Torbellinos pequeños y grandes en la turbulencia, M. Pittard [27]

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos, varían en el tiempo y en el espacio tridimensional, a esto se le conoce como las ecuaciones de Navier Stokes (N-S) vistas anteriormente. Estas ecuaciones poseen solución analítica únicamente cuando se las trata idealmente, para la mayoría de los casos en las que se presente flujo real, no se conoce la solución analítica, entonces se reemplazan las ecuaciones de N-S por un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales mediante algún método

numérico como el de volúmenes finitos a partir del cual podemos obtener una solución aproximada a las de N-S, este proceso de transformar las ecuaciones en derivadas parciales recibe el nombre de discretización [25].

Para poder solucionar las ecuaciones de N-S computacionalmente, es necesario discretizar el dominio con el tamaño del elemento más pequeño de turbulencia (eddies), pero ello requeriría mucho tiempo de cómputo. Debido a ello se ha planteado diferentes modelos para poder resolver los problemas turbulentos, entre los cuales se tienen [25]:

- RANS (Reynolds Average Navier Stokes)
Modelos de 2 ecuaciones: k - ϵ , k - ω , SST (Shear Stress Transport)
- RSM (Reynolds Stress Models)
- LES (Large Eddie Simulation)
- DES (Detached Eddy Simulation)
- DNS (Direct Numerical Simulation)

En la Fig. 1.2, se muestra el nivel de complejidad de los modelos indicados en función del coste computacional que cada uno de ellos representa [28].

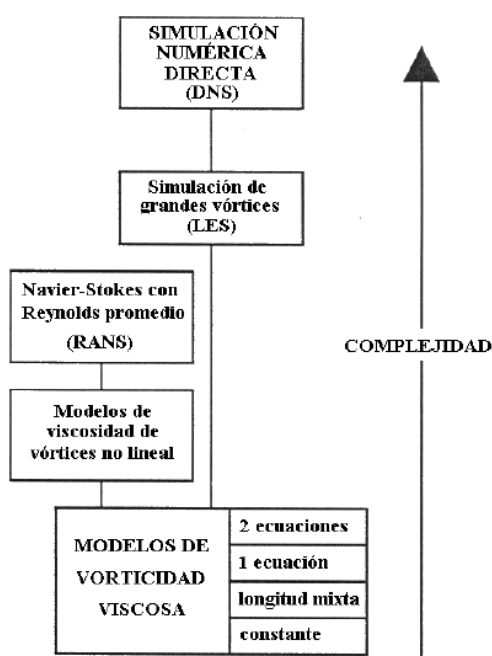


Fig. 1.2 Modelos de turbulencia en función de su coste computacional, J. Sánchez [28].

Direct Numerical Simulation (DNS)

... No se trata de un modelo de turbulencia en sí mismo, sino de la solución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes. Este método resulta inabordable en problemas con altos números de Reynolds, ya que sería preciso resolver todas las escalas del movimiento (desde la dimensión característica del problema hasta la escala de Kolmogorov o de pequeños torbellinos). Para ello, resulta necesario definir un gran número de elementos, que diversos autores estiman del orden de $Re^{9/4}$ aproximadamente. No obstante, los supercomputadores y grandes clusters actuales, han obtenido resultados para flujos simples a números de Reynolds moderados, ayudando así a la comprensión del fenómeno de la turbulencia y al desarrollo de modelos más simples. [26].

El DNS resuelve el sistema de ecuaciones de manera directa pero con un mallado que pueda resolver todas las escalas de turbulencias incluyendo la “microescala de Kolmogorov o pequeños torbellinos” (Ec.10).

$$\frac{\eta_k}{L} = \left(\frac{U_\infty L}{\nu} \right)^{3/4} \quad (10)$$

Donde η_k es el tamaño del Eddy (turbulencia) más pequeño, L es la longitud característica, U_∞ es la velocidad del fluido y ν es la viscosidad cinemática del fluido [25].

Lar de Eddy Simulation (LES)

En flujos turbulentos se tienen diferentes escalas o tamaños de remolinos (eddies) que complican el análisis de los mismos en cierta medida [29] (Fig. 1.3).

... La simulación completa de un flujo turbulento, dependiente del tiempo y a elevados números de Reynolds, es prácticamente imposible por la finura de la discretización que se necesita; el tamaño de los elementos debe ser menor que la más pequeña escala de movimiento. Aparece así el LES como una alternativa más económica que el DNS. El desarrollo del LES se basa en la observación de que las pequeñas escalas de turbulencia poseen un carácter más universal que las grandes. Por lo tanto, la idea es resolver únicamente las grandes escalas de la turbulencia y aproximar el efecto de las pequeñas

escalas (por esto el LES necesita una discretización menos fina que el DNS). Mediante este método y tras un proceso de filtrado de las ecuaciones, se reformula el problema para las velocidades instantáneas (media + turbulenta) que pueden ser capturadas por la malla y se modela el efecto de la disipación viscosa para las escalas menores, que no se pueden resolver correctamente con la malla utilizada. A escalas menores, es de esperar que los movimientos turbulentos sean menos dependientes del problema y se puedan modelar de forma más general. Existen diversos métodos de aproximación para las escalas pequeñas, los más simples son: el de longitud de mezcla, proporcional a la tamaño de la malla y el modelo de Smagorinsky. [26].

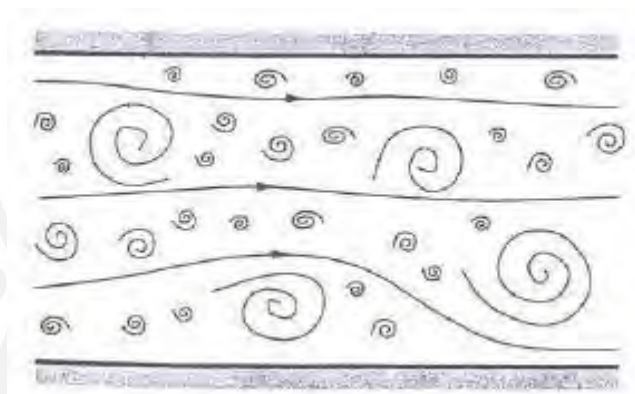


Fig. 1.3 Diferentes escalas de remolinos en fluidos turbulentos, J. A. Capote. [29].

Una estrategia práctica de tratar problemas bifásicos es seleccionar la escala de turbulencia que se necesita resolver. En los modelos LES las grandes escalas de turbulencia de naturaleza anisotrópica son resueltas directamente, mientras que las escalas pequeñas son modeladas. Se realiza un promediado espacial de las ecuaciones de transporte empleando un tamaño de filtro en el orden del tamaño de los elementos de la malla, el cual establece la cantidad de energía que debe ser resuelta y la restante que debe ser modelada. La ecuación (11) representa la aproximación LES del flujo.

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}_i \bar{v}_j) = -\nabla \bar{p} + \nabla(\mu \nabla \bar{v}_i) - \nabla \tau_{ij} \quad (11)$$

El término τ_{ij} se denomina tensiones turbulentas de subescala (Sub-Grid Scale - SGS) y se define mediante la ec 12.

$$\tau_{ij} = \rho[\overline{v_i v_j} - \bar{v}_i \bar{v}_j] \quad (12)$$

Las tensiones SGS representan el efecto de las pequeñas escalas de turbulencia y el proceso de modelizarlas las considera isotrópicas y se emplea modelos de viscosidad artificial (modelos SGS), tales como Smagorinsky-Lilly, WALE, dinámico de subescala (DSGS), de transporte de energía cinética, entre otros. Por otro lado, cabe mencionar que el costo computacional de LES es alto en comparación con los modelos de turbulencia RANS, ya que se requiere de una malla más fina y menores pasos de tiempo.

Varios autores reportan el uso del modelo RANS $k - \omega$ SST para estudiar el comportamiento de flujos turbulentos bifásicos con buenos resultados [21], [19]. Mientras que Pittard [22] utiliza el modelo LES – Smagorinsky-Lilly para estudiar la turbulencia en un tramo corto de tubería, recomendando su uso para el estudio de la turbulencia. Sin embargo, de acuerdo con lo estudiado, la modelación de las pequeñas escalas de turbulencia con la aproximación WALE produciría mejores resultados.

Reynolds Average Navier Stokes (RANS)

...El siguiente nivel de aproximación es el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS). Esta aproximación, propuesta por Reynolds en 1895, está basada en la descomposición de las variables de flujo en un valor medio y otro fluctuante. Las ecuaciones de Navier-Stokes se reformulan en función de las variables promedio, obteniendo así un nuevo sistema de ecuaciones, denominado RANS, muy parecido al original pero con un término adicional desconocido que hace falta modelar. Se han propuesto una gran variedad de modelos de turbulencia para cerrar las ecuaciones RANS; estos modelos se dividen en ecuaciones de cierre de primer y de segundo orden. En los modelos de primer orden, cabe destacar el turbulent eddy viscosity model (modelo de viscosidad turbulenta de torbellinos); y en los de segundo orden, el modelo Reynolds Stress Transport model (RST o modelo de transporte de los esfuerzos de Reynolds), y el modelo algebraico de los esfuerzos de Reynolds. Las ecuaciones de cierre de primer orden se clasifican a su vez en modelos de ninguna, una o múltiples ecuaciones, correspondientes al número de ecuaciones que se utilicen.[26].

Suponiendo que las fluctuaciones de densidad son insignificantes, las ecuaciones

para el flujo transitorio pueden promediarse. A continuación, se puede resolver un conjunto modificado de ecuaciones de transporte mediante la introducción de componentes promediados y fluctuantes para la simulación transitoria. Las ecuaciones resultantes se llaman URANS (ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds inestables). Sustituir las cantidades promediadas en las ecuaciones originales resulta en las ecuaciones promediadas de Reynolds. En este enfoque, las variables en la ecuación de Navier Stokes se descomponen en la parte media ($\bar{\varphi}$) y fluctuante (φ'). Esto se conoce como descomposición de Reynolds. La descomposición de Reynolds se puede escribir como:

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \quad (13)$$

Al sustituir las variables de flujo de la ecuación de gobierno en esta forma, se obtendrá los promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier Stokes. La forma tensorial de la ecuación en el sistema de coordenadas cartesianas se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho u'_i u'_j) \end{aligned} \quad (14)$$

Donde i, j son índices del tensor y δ_{ij} es delta de Kronecker. Esta ecuación es similar a la forma general de la ecuación de Navier Stokes, pero esta descomposición de las variables de flujo introduce un nuevo término en el lado derecho de la ecuación, llamado el esfuerzo de Reynolds, que se desconoce. La principal motivación de este enfoque es modelar los esfuerzos de Reynolds. La hipótesis de Boussinesq relaciona los esfuerzos de Reynolds con los gradientes de velocidad medios que se da como:

$$-\rho u'_i u'_j = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + u_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (15)$$

Donde μ_t es la viscosidad turbulenta, k es la energía cinética. Esta hipótesis se usa en modelos de turbulencia como el modelo Spalart-Allmaras, los modelos k- ϵ y los modelos k- ω .

Modelo RANS k- ϵ

Es uno de los modelos de turbulencia más utilizados, pero no se desempeña bien en los casos donde se tienen altos gradientes de presión. Según diversas literaturas, este modelo funciona bastante bien para flujos internos y entre paredes, donde los gradientes de presión son pequeños y captando relativamente bien la turbulencia libre. Este modelo es utilizado frecuentemente para flujos incompresibles de baja velocidad para turbulencia isotrópica. Este modelo trabaja con dos variables desconocidas que son K (energía cinética turbulenta) y ϵ (disipación de la energía cinética turbulenta), es por ello que se deben agregar dos ecuaciones que contengan a K y ϵ que se derivan de las ecuaciones de momento [25].

Modelo RANS k- ω

La idea general acerca de este modelo de turbulencia fue generada por Kolmogorov en 1942, donde asoció la turbulencia con la vorticidad. La principal ventaja de la formulación del modelo k- ω , es la buena predicción que el mismo genera en zonas cercanas a la pared para números de Reynolds relativamente bajos, siendo mucho más preciso y robusto que el modelo k- ϵ , requiriendo un $\Delta Y^+ < 2$ para el primer elemento cercano a la pared, a diferencia del modelo k- ϵ que necesita un $\Delta Y^+ < 0.2$ por su vago comportamiento en zonas cercanas a la misma [25].

Shear Stress Transport (SST).

El modelo de turbulencia SST, fue desarrollado por Menter en 1993 y es actualmente el modelo de turbulencia más utilizado. Este modelo combina los aspectos de dos formulaciones: la formulación del k- ϵ y la del k- ω . El modelo SST, utiliza la formulación k- ω para las zonas internas de la sub-capa viscosa (cercanas a la pared) mientras que cambia su formulación a la de k- ϵ en la zona de turbulencia libre en el centro del volumen. En general, este modelo de turbulencia genera un buen comportamiento en gradientes adversos de presión y en las zonas donde existe separación del flujo [25].

De lo visto anteriormente se puede inferir que sería conveniente realizar una comparación entre los modelos RANS y LES, con la finalidad de seleccionar el

modelo más adecuado para capturar la carga variable sobre la pared interna de la tubería.

1.2.2 Modelos multifásicos

Los modelos multifásicos son aplicados cuando se tienen fluidos en dos o más fases, nuestro caso contempla el estudio de los flujos bifásicos, específicamente fase líquida y gaseosa. La interacción de ambas fases generará ciertas morfologías llamadas patrones de flujo o flujos multifásicos, que responden a determinadas parámetros como son las velocidades superficiales de ambas fases, propiedades del fluido y la fracción de vacío [30]. Por tanto un flujo multifásico es el flujo simultáneo a través de una tubería o un canal de dos o más fases. Estas fases pueden ser cualquier combinación de gas, líquido miscible, líquido o sólidos inmiscibles. El flujo multifásico se produce en los yacimientos de petróleo y de gas natural y en muchos casos de producción de hidrocarburos, como en pozos de petróleo, también en la industria de la minería en lo que son los relaves mineros, [31].

En el presente estudio analizaremos principalmente los flujos de dos fases, gas – líquido (Fig. 1.4), como son el aire y el agua, Estos flujos bifásicos se pueden clasificar según la distribución de dichas fases "patrones de flujo" o "régimenes de flujo".

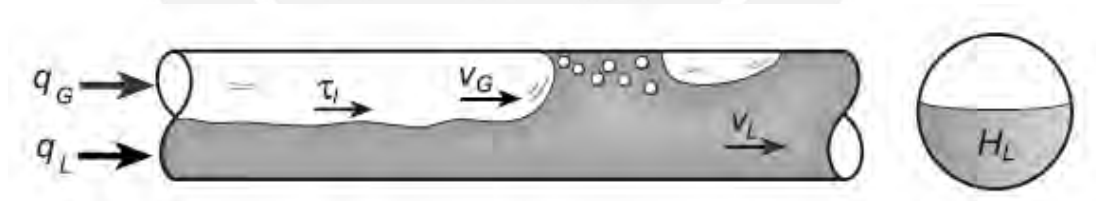


Fig. 1.4 Flujo bifásico en una tubería horizontal, O. Shoham [9]

La clasificación de los patrones de flujo en una tubería horizontal como se muestra en la Fig. 1.5 son: stratified-smooth, stratified-wavy, elongated-bubble, slug, annular, wavy-annular and dispersed-bubble [9].

- **Stratified smooth flow:** Ocurre a bajas velocidades de líquido y gas. Las dos fases se separan por una interfaz suave.
- **Stratified wavy flow:** Para bajas velocidades de líquido y gas, pero con la

velocidad del gas mayor que en la del estratificado suave. Las dos fases se separan por una interfaz ondulada, sin tocar la parte superior de la tubería.

- **Elongated bubble o Plug Flow:** Con el aumento de la velocidad de flujo, se forman tapones o pistones de líquido que se llaman también de golpes o pistones de líquido y no son aireados. Forma parte de los flujos intermitentes.
- **Slug Flow:** Se da para velocidades de líquido un poco más altas que en el plug flow. Con el aumento de la velocidad de flujo, se forman pistones de líquido que tocan la parte superior de la tubería, separando dos grandes burbujas de gas. Las zonas de gas concentran una capa de líquido estratificado en la parte inferior del conducto. Este régimen requiere un puente completo de líquido entre los pistones de gas. La fase líquida es altamente aireada. También forma parte de los flujos intermitentes.
- **Annular Flow:** Se genera para velocidades de gas muy altas, el gas se concentra en la parte central del conducto, con una película de líquido estable tocando toda la pared de la tubería, formando un anillo. Las gotas de agua se dispersan en el aire.
- **Dispersed Bubble:** Presente en velocidades altas del líquido y baja relación gas / líquido. Aquí las burbujas tienden a fluir en la parte superior del fluido por ser menos densas. Cuanto mayor es la velocidad del líquido, las burbujas quedan más pequeñas y dispersas.

Un hecho importante a ser destacado es que cada autor posee diferentes definiciones para patrones de flujo, aumentando o disminuyendo la lista arriba citada [32].

El patrón de flujo que con más frecuencia se puede encontrar en los sistemas de tuberías es el Slug o flujo tapón (Fig. 1.6), y el presente estudio se enfocará en dicho patrón por lo descrito anteriormente.

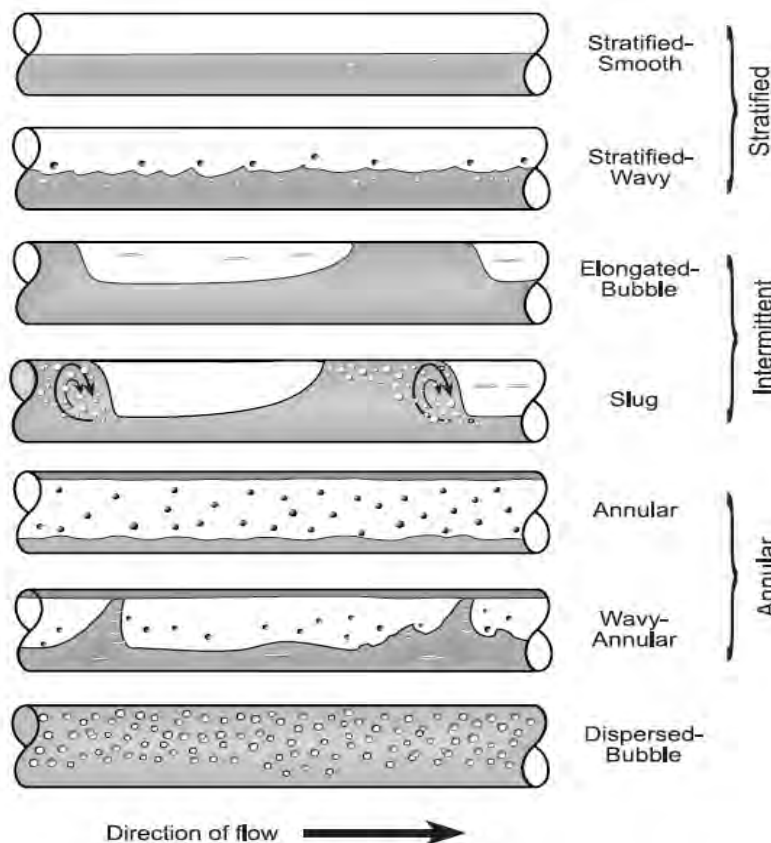


Fig. 1.5 Patrones de flujo en una tubería horizontal a) Bubbly flow, b) Slug flow, c) Stratified smooth d) Stratified. O. Shoham [9].

Patrón de flujo Slug

Este patrón característico se genera cuando las ondas crecientes del líquido llegan a cubrir toda la sección transversal al interior de la tubería intermitentemente, generando burbujas alargadas por tramos, alternando con el flujo disperso. Estas burbujas o slug se mueven a una velocidad mayor que la velocidad media del líquido.

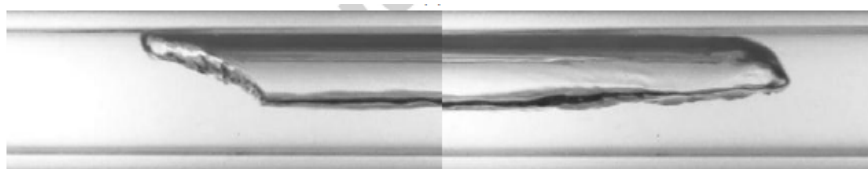


Fig. 1.6 Burbuja Slug, Deendarlianto [19].

El patrón Slug es el más común en el transporte de hidrocarburos. Como se ha mencionado anteriormente, este régimen de flujo se caracteriza por el paso de zonas líquidas continuas (barras) a lo largo del canal, separado por grandes zonas de

burbujas de gas. En los slug, la fase líquida es continua, pero puede contener una dispersión de burbujas más pequeñas; Estas burbujas son arrastradas al frente de los slug y son descargadas continuamente a la cola del slug (Fig. 1.7). En las regiones de burbujas de gas grandes, el líquido descargado de la cola del slug puede fluir como una capa estratificada a lo largo del fondo de la región de la burbuja de gas antes de unirse al slug siguiente [19].

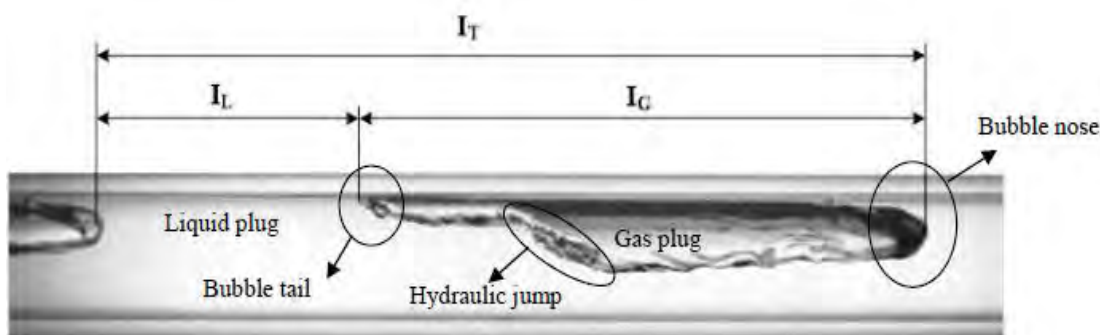


Fig. 1.7 Morfología del patrón slug en una tubería horizontal, Deendarlianto [19].

El patrón slug es un flujo bastante complejo e inherentemente inestable. A pesar de que el caudal del líquido y gas permanece estable, los caudales máxicos, las velocidades de fase y la presión, en cualquier sección transversal de la tubería, presentan una gran variación con respecto al tiempo. Como resultado, procesos como la transferencia de calor y masa son inestables. Además, la naturaleza intermitente del caudal del slug provoca vibraciones y una alta caída de presión a lo largo de la tubería. Esto aumenta la posibilidad de dañar los soportes de la tubería y de erosionar y corroer si el flujo contiene arena [19].

Es importante conocer y entender el proceso de formación del patrón slug (Fig. 1.8), ya que inicialmente a la entrada, el flujo en una tubería se estratifica con una capa líquida que fluye en la parte inferior y el gas sobre ella; La capa líquida experimenta fuerzas de cizallamiento debido a la pared y comienza a desacelerar. A medida que la velocidad del líquido disminuye, las ondas comienzan a formarse en la interfaz gas-líquido con una distribución de longitudes de onda y tasas de crecimiento. La amplitud de ciertas ondas aumenta eventualmente llenando toda la tubería formando un bloque gaseoso conocido como "precursor del slug". Esto bloquea el flujo de gas y hace que la presión aguas arriba del precursor se acumule, acelerando la corriente aguas abajo [31].

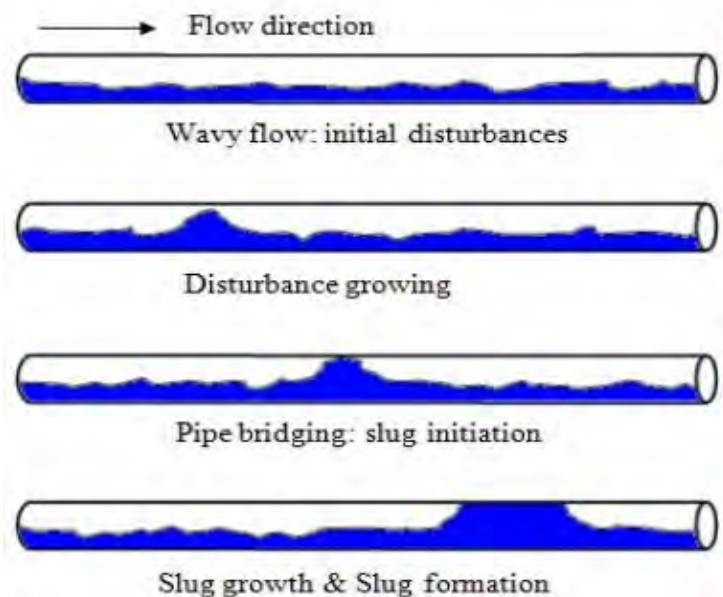


Fig. 1.8 Proceso de formación del patrón slug de estratificado a slug, M. Lu [33].

Velocidades superficiales y fracción de vacío.

Teniendo en cuenta que tanto el gas como el líquido fluyen simultáneamente a través de un tubo de área A (m^2), el gas, el líquido y los caudales de inyección total (m^3/s) son Q_G , Q_L y Q , respectivamente. Las fracciones del caudal de inyección de gas y líquido son respectivamente [17]:

$$C_L = \frac{Q_L}{Q_L + Q_G}, \quad C_G = \frac{Q_G}{Q_L + Q_G} \quad (16)$$

Las velocidades superficiales o los flujos volumétricos de gas, J_G y líquido, J_L , y la velocidad de mezcla, J , se calculan a partir de los caudales de inyección y el área de la tubería:

$$J_L = \frac{Q_L}{A}, \quad J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (17)$$

$$J = \frac{Q}{A} = J_G + J_L = \frac{Q_L + Q_G}{A}$$

La velocidad superficial es un parámetro muy importante porque, entre otras cosas, siempre se sabe y se calcula fácilmente. Sin embargo, no es una velocidad real ya que considera que cada fase fluye sola en la tubería. En el flujo bifásico se supone

que cada fase está contenida en diferentes partes del área de la sección transversal del tubo. Así, las velocidades de fase real o las velocidades in situ se definen en función de los caudales y la fracción de área para cada fase ocupada. Las velocidades in situ de gas, V_G y líquido, V_L , son definidas [17]:

$$V_L = \frac{Q_L}{A_L}, \quad V_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (18)$$

La diferencia de las velocidades de cada fase se conoce como velocidad de deslizamiento V_{slip} y está definida como:

$$V_{slip} = V_G - V_L \quad (19)$$

El flujo de dos fases se ve afectado por la cantidad de gas presente en el fluido en una sección de tubería, a esto se le conoce como fracción de vacío o fracción de volumen β (Fig. 1.9), de igual forma, a la cantidad de líquido presente en el fluido en la misma sección de la tubería, se le conoce como retención de líquido o liquid holdup (H_L):

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L}, \quad A_G = \beta A_T \quad (20)$$

$$H_L = \frac{A_L}{A} \quad (21)$$

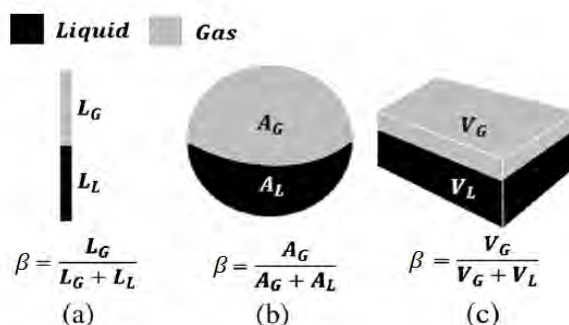


Fig. 1.9 Definiciones de fracción de vacío (a) enfoque lineal (b) enfoque superficial y (c) enfoque volumétrico, J. López. [21].

Tres variables son de particular interés para ser capaces de comprender adecuadamente el flujo bifásico: patrón de flujo, velocidad superficial de las fases (J)

y la fracción de vacío (β), por la distribución de cada una de las fases descritas en una sección, por la velocidad de cada una de las fases, por los parámetros de interacción de los fluidos y por las configuraciones geométricas de las tuberías [21],

Mapa de patrón de flujos

Con el fin de establecer las condiciones en las que cada patrón de flujo se produce, grandes cantidades de datos sobre patrones de flujo multifásico se han recogido de estudios anteriores y estos datos han sido cartografiados utilizando una amplia variedad de modelos empíricos y semi-empíricos. Normalmente, los mapas de patrones de flujo empíricos se construyen trazando datos experimentales usando grupos adimensionales, velocidades superficiales de fase, flujos de masa, calidades o flujos de momento como ejes de coordenadas.

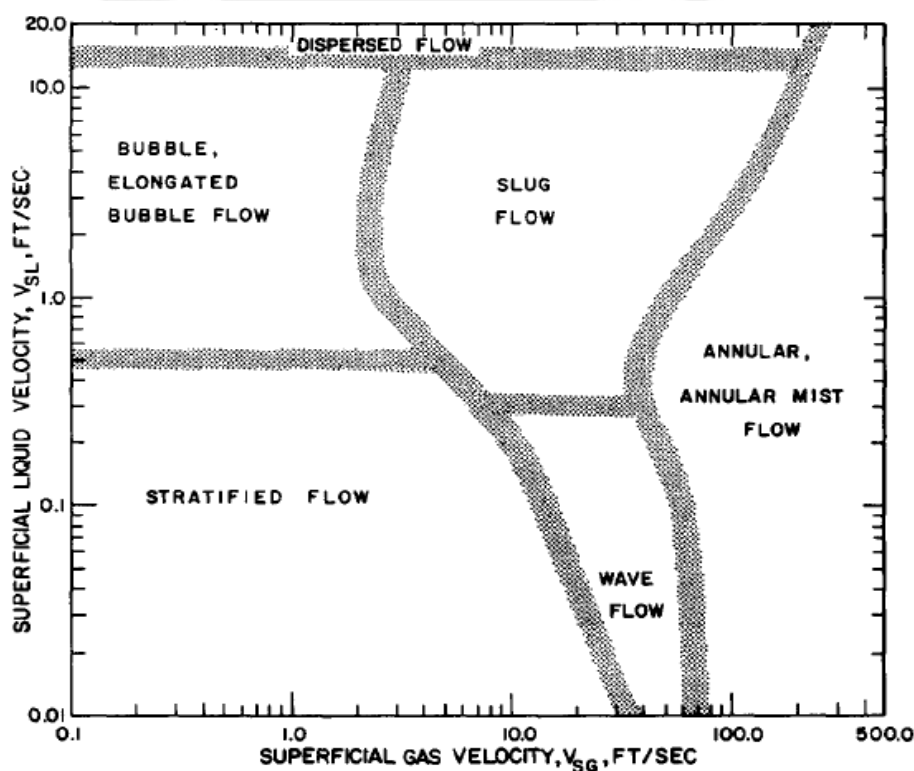


Fig. 1.10 Mapa de patrones de flujo de Mandhane [34].

En estos mapas, varios patrones de flujo de dos fases se presentan en forma de regiones divididas por líneas de transición. Mandhane (1974) usó 5935 observaciones del patrón de flujo del banco de datos de tuberías con flujo multifásicos de la Universidad de Calgary para generar un mapa de patrón de flujo básico de la velocidad superficial del gas (J_G) frente a la velocidad superficial del

líquido (J_L), como se muestra en la Fig. 1.10.

El mapa se basó en datos de flujo aire-agua y se dividió en cinco regiones: estratificado ondulado, burbujeante o bubbly, slug, dispersa y anular. A pesar de su limitación en ser un enfoque puramente correlacional, se construyó utilizando una base de datos comparativamente grande (aproximadamente 6000 puntos de observación) y proporcionando una mejor predicción en un rango más amplio [33].

“Los avances en la mecánica de fluidos computacional han proporcionado la base para una mayor comprensión de la dinámica de flujos multifásicos. Actualmente se tienen dos enfoques para el cálculo numérico de flujos multifásicos” [35]:

- ✓ El enfoque de Euler - Lagrange
- ✓ El enfoque de Euler - Euler.

Para poder determinar adecuadamente el modelo multifásico que ha de ser usado de acuerdo a las condiciones del fluido, es necesario describir los enfoques arriba mencionados.

✓ **Enfoque de Euler – Lagrange**

..La fase fluida se trata como un continuo mediante la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, mientras que la fase dispersa se resuelve mediante el seguimiento de un gran número de partículas, burbujas, o gotitas a través del campo de flujo calculado. La fase dispersa puede intercambiar impulso, masa y energía con la fase fluida”.

Un supuesto fundamental realizado en este modelo es que la fase secundaria dispersa ocupa una fracción de volumen bajo, a pesar de una alta carga masiva ($m_{particulas} \geq m_{líquido}$) es aceptable. Las trayectorias de las partículas o gotitas son computadas de forma individual a intervalos determinados durante el cálculo de la fase fluida. Esto hace que el modelo apropiado para el modelado de secado de sprays, combustión de carbón y combustibles líquidos, y algunos flujos de partículas cargadas, pero inapropiado para el modelado de mezclas de líquido-líquido, lechos fluidizados, o cualquier aplicación en la que la fracción de volumen de la segunda fase no es despreciable. [35].

✓ **Enfoque de Euler - Euler.**

...En el enfoque Euler-Euler, las diferentes fases se tratan matemáticamente como interpenetrating continua. Dado que el volumen de una fase no puede ser ocupado por las otras fases, se introduce el concepto de fracción de volumen fásico. Estas fracciones de volumen se supone que son funciones continuas de espacio y tiempo y su suma es igual a uno. Las ecuaciones de conservación para cada fase se derivan para obtener un conjunto de ecuaciones, que tienen una estructura similar para todas las fases. Estas ecuaciones están cerradas, proporcionando relaciones constitutivas que se obtienen a partir de información empírica, o, en el caso de flujos granulares, por aplicación de la teoría cinética. [35].

Es así que se muestran algunos modelos o métodos de captura de interface Euler-Euler:

- El modelo Volumen of Fluid (VoF),
- El modelo Mixture,
- El modelo Eulerian.

Modelo Volume of Fluid (VoF)

Se involucra uno de los regímenes de flujo multifásico llamado superficie libre (gas líquido); la superficie libre es una interfaz entre un líquido y un gas. El método VOF es una técnica numérica popular utilizada para detectar la superficie libre del dominio computacional. Hay dos enfoques generales disponibles en el modelado de flujo multifásico, como el enfoque Euler-Lagrange y el enfoque Euler-Euler. El primer enfoque considera la fase fluida como un continuo y resuelve la ecuación de Navier Stokes; por otro lado, la fase dispersa se resuelve mediante el seguimiento de las partículas en todo el campo de flujo. El último trata las diferentes fases como interpenetrantes continuas e introduce un término llamado función de indicador de fase o fracción de volumen. El modelo VoF pertenece al enfoque de Euler-Euler, que puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo las ecuaciones de flujo promediadas en volumen y rastreando el volumen de fracción de los fluidos en todo el dominio computacional. En cada volumen de control, la suma de la fracción de volumen de todas las fases es igual a uno [36]. Por ejemplo, si la fracción de volumen de la fase 1 en la celda se da como γ , entonces son posibles los siguientes

tres casos:

- $\gamma = 0$, indica que el volumen de control particular no contiene este fluido.
- $\gamma = 1$, indica que el volumen de control está completamente ocupado por el fluido.
- $0 < \gamma < 1$, este volumen de control contiene la interfaz entre este n-ésimo fluido y otro.

VoF no es sólo un simple modelo sino también un método eficiente que usado para rastrear la interfaz gas líquido. Generalmente, el modelo VoF puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastrear la fracción volumétrica de cada uno de los fluidos en todo el dominio. En el caso de flujo de agua en un canal con una región de aire en la parte superior y una entrada de aire separada, el método VoF es la técnica apropiada para la predicción de la interface entre fases.

...La formulación empleada se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se interpenetran. Para cada fase adicional que se añade al modelo, se introduce una variable: la fracción de volumen de la fase en la célula computacional. En cada control de volumen, las fracciones de vacío de todas las fases suman a la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases y representan valores promediados por volumen, siempre que la fracción de volumen de cada una de las fases se conozca en cada ubicación. [37].

F es la función de volumen. Si F es igual a uno en la celda de la rejilla en un determinado momento, indica que esta unidad es una unidad de fluido que está retenida; Si F es igual a cero, esta unidad está retenida por otro fluido y se llama unidad vacía respecto al fluido anterior, cuando F es mayor que cero y menor que uno, esta unidad es la unidad de interfaz que contiene materiales de dos fases [38].

La función de volumen F cambia en el tiempo, que es el cambio de la interfaz libre que representa la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (Fu) = 0 \quad (22)$$

La ecuación de continuidad de la fracción de volumen es:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + u \nabla \alpha_i = 0 \quad (23)$$

Además:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (24)$$

En el modelo VoF, un conjunto de ecuaciones de momento del fluido es compartido por diferentes componentes, es necesario registrar todos los componentes del caudal volumétrico en el campo de flujo del cálculo dentro de cada unidad cuando se calcula, para determinar la posición de la interfaz de movimiento. La ecuación de momento es:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla u + \nabla u^T)] + \rho g + F_s \quad (25)$$

F_s se encuentra el origen de la ecuación de momento que es causada por la tensión superficial y el efecto adherente de la superficie de la pared.

$$F_s = 2\sigma k \alpha_i \nabla \alpha_i \quad (26)$$

Donde σ es la tensión en la superficie, u es el vector velocidad, μ es la viscosidad dinámica, α_i es la fracción de vacío de la fase i , k es la curvatura de la superficie [38].

Modelo Mixture

...El modelo Mixture está diseñado para dos o más fases fluidas (o partículas). Como en el modelo Eulerian, las fases se tratan como interpenetrating continua. El modelo de mezcla resuelve la ecuación de momentum de mezcla y prescribe velocidades relativas para describir las fases dispersas. Aplicaciones del modelo de mezcla incluyen flujos de partículas cargadas de baja carga, los flujos burbujeantes, sedimentación y separadores ciclónicos. El modelo de mezcla también se puede utilizar sin las velocidades relativas de las fases dispersas para modelar flujo multifásico homogéneo. [35].

Modelo Eulerian

...El modelo Eulerian es el más complejo de los modelos multifase disponibles. Soluciona un conjunto de n ecuaciones de momentum y continuidad para cada fase. El acoplamiento se logra a través de los coeficientes de intercambio de presión y de interfase. La forma en que este acoplamiento se maneja depende del tipo de fase que interactúa; los flujos granulares (sólido-fluido) se manejan de manera distinta que los flujos no granulares (fluido-fluido). Para flujos granulares, las propiedades se obtienen de la aplicación de la teoría cinética. El intercambio de momentum entre las fases depende también del tipo de mezcla que se está modelando. [35].

Comparación de modelos

“En general, una vez que haya determinado el régimen de flujo que representa mejor su sistema de múltiples fases, puede seleccionar el modelo apropiado basándose en las siguientes directrices” [35]:

- ✓ Para flujo burbujeante y los flujos cargados de partículas en el que las fases se mezclan y / o fracciones de volumen de la fase dispersa superan el 10%, se debe utilizar el modelo Mixture o el modelo Eulerian.
- ✓ Para flujos slug, debe utilizarse el modelo VoF.
- ✓ Para flujos estratificados y de superficie libre debe utilizarse el modelo VoF.
- ✓ Para el transporte neumático, debe utilizarse el modelo Mixture para el caso de flujo homogéneo o el modelo Eulerian para caso de flujo granular.
Para lechos fluidizados, debe utilizarse el modelo Eulerian por ser un flujo granular.
- ✓ Para flujo de lodos y el hidrotransporte, debe utilizarse el modelo Mixture o el modelo Eulerian.
- ✓ Para el caso de sedimentación deberá utilizarse el modelo Eulerian.

Tal y como se ha discutido en esta sección, el modelo VoF es apropiado para los flujos estratificados o de superficie libre, y el mixture y el modelo Euleriano son apropiados para flujos en los que las fases se mezclan o se separan y / o fracciones de volumen de la fase dispersa superan el 10%. (Flujos en el que las fracciones en volumen de la fase

dispersa son menores o iguales al 10% puede ser modelado utilizando el modelo de fase discreta (DFM)). [35]

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, y por lo referido en la literatura [19], [20], [21], [8], [39], [37], [38], en el presente trabajo se ha seleccionado el modelo VoF como modelo multifásico.

1.3. Análisis de vibración mediante FEM

Para entender de mejor manera el fenómeno de la vibración inducida por flujo, a continuación se describen las principales consideraciones concernientes a la mecánica estructural de una tubería sometida a flujo bifásico que por su naturaleza transitoria y turbulenta genera la respuesta dinámica del sistema representado por un campo de esfuerzos y deformaciones en la pared de la tubería que a su vez repercute en el comportamiento del fluido.

1.3.1 Métodos para el estudio de vibraciones

Para poder determinar la respuesta dinámica de la tubería, se tienen diversos métodos o tipos de análisis dinámicos disponibles para un determinado análisis, por ello, es importante determinar el tipo de análisis dinámico adecuado que represente de mejor manera el fenómeno en estudio y los describimos a continuación:

➤ Análisis Modal

...Es un proceso mediante el cual se describe una estructura en términos de sus propiedades dinámicas o parámetros modales que son la frecuencia, el amortiguamiento y los modos de vibración, para todos los modos en el rango de frecuencias de interés. Todas las estructuras poseen frecuencias naturales y modos de vibración, que dependen básicamente de la masa y de la rigidez de la estructura. En el diseño es necesario identificar estas frecuencias y conocer cómo afecta a la respuesta de la estructura cuando una fuerza actúa sobre la misma. El análisis modal es una herramienta eficiente para describir, comprender y modelar el comportamiento de las estructuras.

Es común utilizar el método de los elementos finitos (FEM) para desarrollar el presente análisis.

Los parámetros modales son importantes porque describen las propiedades dinámicas inherentes de una estructura. El conocimiento del amortiguamiento modal es muy útil

para predecir la vida a fatiga y reducir las respuestas en resonancia. En un ensayo dinámico se aplica una carga dinámica a la estructura. Dicha carga tiene componentes en un cierto rango de frecuencias y la estructura responde a todas las frecuencias, pero entrará en resonancia cuando las componentes coincidan con las frecuencias naturales de la estructura. Una propiedad importante de los modos es que cualquier respuesta de la estructura puede ser expresada como una combinación de una serie de modos. [40]

➤ Análisis Armónico

El análisis de respuesta armónica se utiliza para determinar la respuesta de una estructura a cargas estacionarias, armónicas (variables sinusoidales). Las máquinas rotatorias ejercen fuerzas constantes y alternas sobre los cojinetes y las estructuras de soporte (Fig. 1.11). Estas fuerzas causan diferentes deflexiones y tensiones dependiendo de la velocidad de rotación.

En un sistema estructural, cualquier carga cíclica sostenida producirá una respuesta cíclica o armónica sostenida. “Los resultados del análisis armónico se utilizan para determinar la respuesta de estado estable de una estructura lineal a cargas que varían sinusoidalmente (armónicamente) con el tiempo, lo que le permite verificar si sus diseños superarán con éxito la resonancia, la fatiga y otros efectos nocivos de las vibraciones” [41]

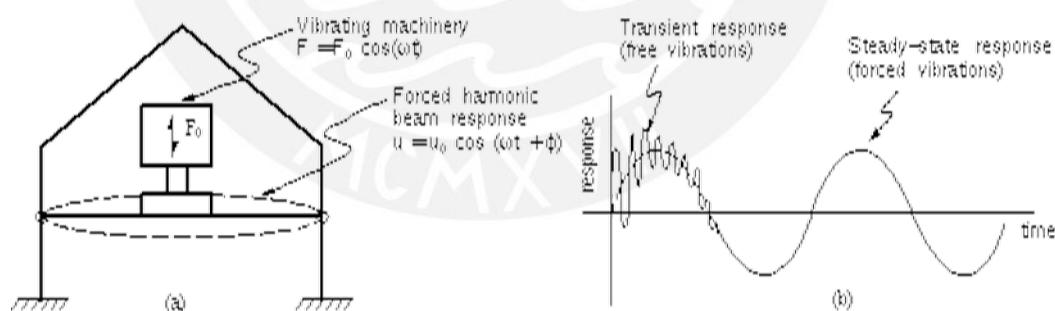


Fig. 1.11 Respuesta armónica de una estructura que soporta una máquina,
<http://www.ansys.stuba.sk>

Esta técnica de análisis solo calcula las vibraciones forzadas de estado estable de una estructura. Las vibraciones transitorias, que ocurren al comienzo de la excitación, no se tienen en cuenta en un análisis armónico.

➤ **Análisis de Espectros de Respuesta**

Se puede usar un análisis de espectro de respuesta para determinar cómo responde un componente a los terremotos o movimientos sísmicos. Los rascacielos, las torres de enfriamiento de una planta de energía y otras estructuras deben soportar múltiples cargas transitorias de choque / impacto de corta duración, comunes en eventos sísmicos.

...Actualmente, el concepto de espectro de respuesta es una importante herramienta de la dinámica estructural, de gran utilidad en el área del diseño sismorresistente. En forma general, podemos definir espectro como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. En estos gráficos, se representa en abscisas el periodo propio de la estructura (o la frecuencia) y en ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento como se muestra en la Fig. 1.12. [42]

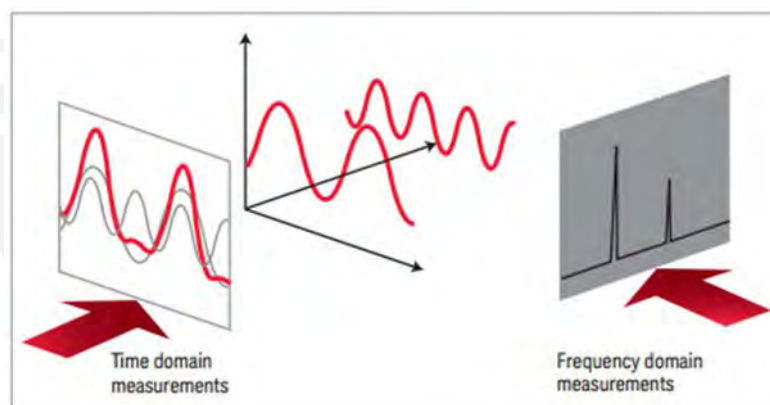


Fig. 1.12 Relación entre el tiempo y el dominio de la frecuencia
<https://www.keysight.com>

➤ **Análisis de Vibración Aleatoria**

Se puede usar un análisis de vibración aleatoria para determinar cómo responde un componente a las vibraciones aleatorias. Las naves espaciales y los componentes de la aeronave deben resistir la carga aleatoria de frecuencias variables durante un período de tiempo sostenido, por ejemplo la Fig. 1.13, muestra el historial de tiempo de amplitud de una vibración aleatoria. La falta de periodicidad es evidente. Una gran diferencia entre la vibración sinusoidal y la vibración aleatoria radica en el hecho de que, para esta última, se pueden excitar numerosas frecuencias al mismo

tiempo. De este modo, las resonancias estructurales de los diferentes componentes pueden excitarse simultáneamente, cuya interacción podría ser muy diferente de la vibración sinusoidal, en la que cada resonancia se excitaría por separado.

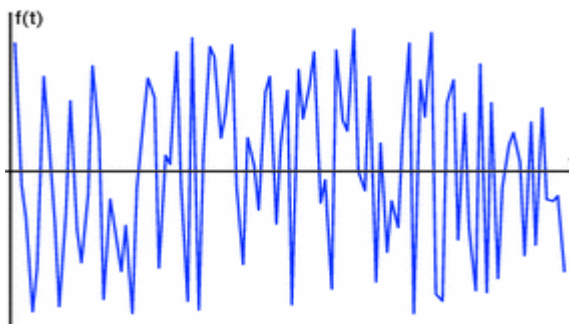


Fig. 1.13 Vibración Aleatoria en amplitud – Tiempo.
<http://www.vibrationresearch.com>

La vibración aleatoria es de alguna manera un nombre inapropiado. Si el significado generalmente aceptado del término "aleatorio" fuera aplicable, no sería posible analizar un sistema sometido a vibración "aleatoria". Además, si este término se considerara en el contexto de no tener un patrón específico (es decir, al azar), no sería posible definir un entorno de vibración, ya que el entorno podría variar de una manera totalmente impredecible. Afortunadamente, este no es el caso. La mayoría de los procesos aleatorios caen en una categoría especial denominada estacionaria. Esto significa que los parámetros por los que se caracteriza la vibración aleatoria no cambian significativamente cuando se analizan estadísticamente en un período de tiempo dado: la amplitud RMS es constante en el tiempo.

➤ **Análisis de Vibración Transitoria.**

Se puede usar un análisis transitorio para calcular la respuesta de una estructura a cargas variables en el tiempo. El análisis dinámico transitorio (a veces llamado análisis de tiempo-historia) es una técnica utilizada para determinar la respuesta dinámica de una estructura bajo la acción de cualquier carga general dependiente del tiempo. Puede usar este tipo de análisis para determinar los desplazamientos, tensiones, esfuerzos y fuerzas variables en el tiempo en una estructura, ya que responde a cualquier combinación de cargas estáticas, transitorias y armónicas. La escala de tiempo de la carga es tal que los efectos de inercia o amortiguación se consideran importantes. Si la inercia y los efectos de amortiguación no son importantes, es posible aplicar sólo un análisis estático.

La vibración transitoria de un sistema mecánico es una vibración sostenida temporalmente. Puede consistir en vibraciones forzadas o libres, o ambas. La carga transitoria, también conocida como impacto o choque mecánico, es una excitación no periódica, que se caracteriza por una aplicación repentina y severa. En el análisis de sistemas que implican un choque mecánico, la mayoría de las veces es necesario idealizar la función (desplazamiento, velocidad, aceleración o fuerza) de dicho sistema, como una función de paso o pulso. En este tipo de análisis se tratan varias formas de paso y funciones de pulso, así como la respuesta del sistema, con respecto al historial de tiempo y la respuesta de frecuencia. En primera instancia, se analiza el sistema SDOF sin amortiguamiento, luego, se puede considerar el efecto de la amortiguación.

En contraste con el análisis estático, tanto la inercia como los efectos de amortiguación son importantes y deben tenerse en cuenta en el análisis transitorio. La ecuación básica de movimiento para el análisis dinámico transitorio es:

$$M\ddot{W} + C\dot{W} + KW = F(t) \quad (27)$$

Donde M , C y K son las matrices de masa, amortiguación y rigidez, respectivamente, $F(t)$ es el vector de carga aplicada externamente, \ddot{W} , \dot{W} y W son los vectores de aceleración, velocidad y desplazamiento, respectivamente. Cabe señalar que los efectos de inercia y amortiguación se desprecian en el análisis estático y la ecuación se reduce a $KW=F(t)$.

Interacción Fluido Estructura (FSI)

...Es un acoplamiento multifísico entre las leyes que describen la dinámica de fluidos y la mecánica estructural. Este fenómeno se caracteriza por interacciones, que pueden ser estables u oscilatorias, entre una estructura deformable o móvil y un flujo de fluido interno o externo.

Cuando un flujo de fluido es aplicado sobre una estructura, se ejercen tensiones y deformaciones sobre el objeto sólido. Estas deformaciones pueden ser bastante grandes o muy pequeñas, dependiendo de la presión y la velocidad del flujo y las propiedades del material de la estructura real como se muestra en la Fig. 1.14. [43].

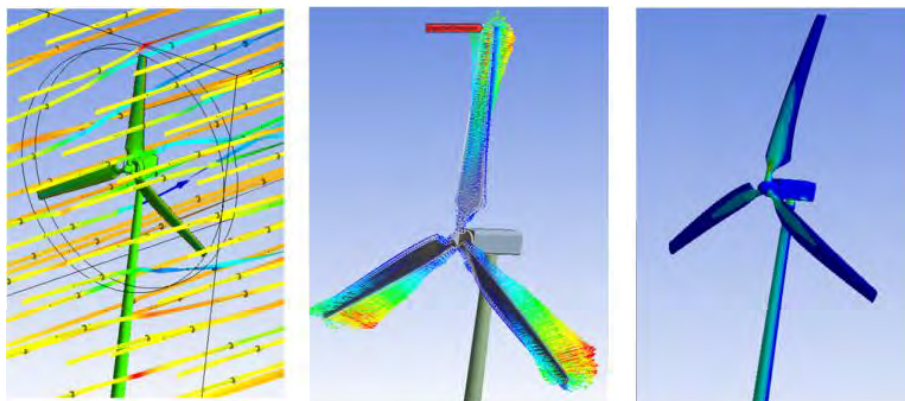


Fig. 1.14 Esfuerzos y deformaciones en un aerogenerador.
<https://www.ansys.com>

...Si las deformaciones de la estructura son bastante pequeñas y las variaciones en el tiempo también son relativamente lentas, el comportamiento del fluido no se verá afectado en gran medida por la deformación, y podemos ocuparnos solo de las tensiones resultantes en las partes sólidas. Sin embargo, si las variaciones en el tiempo son rápidas, superiores a algunos ciclos por segundo, incluso pequeñas deformaciones estructurales provocarán ondas de presión en el fluido. Estas ondas de presión conducen a la radiación del sonido de las estructuras vibratorias. Dichos problemas pueden tratarse como una interacción de estructura acústica, en lugar de una interacción fluido-estructura.

Sin embargo, si las deformaciones de la estructura son considerables, los campos de velocidad y presión del fluido cambiarán, y debemos tratar el problema como un análisis multifísico acoplado bidireccionalmente: los campos de flujo y presión de fluido afectan las deformaciones estructurales, y las deformaciones estructurales afectan el flujo y la presión. [43].

Por tanto, es posible resolver un problema de esta naturaleza por medio de dos métodos, el método desacoplado o unidireccional o one way y el método acoplado llamado también bidireccional o two way, ambos métodos están en función del nivel de deformación que se espera tener en la estructura por efecto del fluido sobre él.

➤ Acoplamiento Unidireccional

El acoplamiento es unidireccional (llamado también one way) si el movimiento de un flujo de fluido influye en una estructura sólida, pero la reacción de un sólido sobre un fluido es despreciable. El caso inverso también es posible, un ejemplo podría ser una hélice de barco.

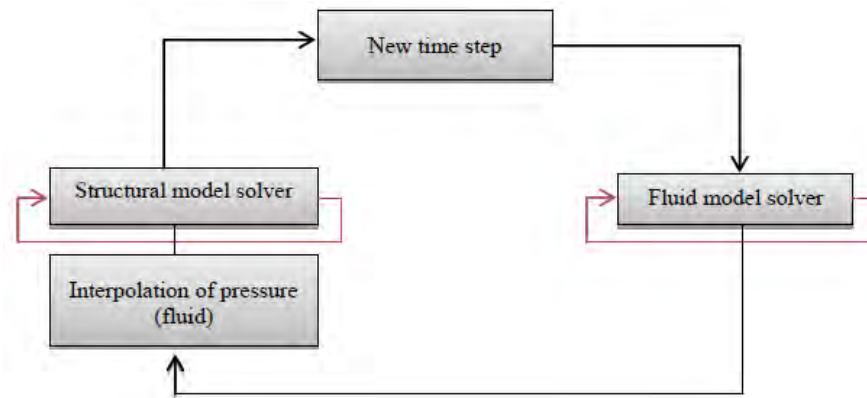


Fig. 1.15 Diagrama de flujo del método desacoplado o one way, R. Raja [36]

La Fig. 1.15 explica el método de acoplamiento unidireccional. Inicialmente, el cálculo del flujo de fluido se realiza hasta que se alcanza la convergencia. Luego, las fuerzas resultantes en la interfaz del cálculo del fluido se interpolan a la malla estructural. A continuación, los cálculos dinámicos estructurales se realizan hasta que se cumpla el criterio de convergencia. Esto se repite hasta que se alcanza el tiempo de finalización [36].

➤ **Acoplamiento Bidireccional**

Este tipo de acoplamiento (llamado también two way) se aplica a problemas en los que el movimiento de un fluido influye en una estructura sólida y, al mismo tiempo, el flujo de fluido se ve influido por la reacción de una estructura sólida, por ejemplo una planta de energía eólica. El diagrama de flujo de trabajo del algoritmo de acoplamiento bidireccional se muestra en la Fig. 1.16. Durante el primer paso de tiempo, las soluciones convergentes del cálculo de fluido proporcionan las fuerzas que actúan sobre el cuerpo sólido. Luego, las fuerzas se interpolan a la malla estructural como en un acoplamiento unidireccional y la solución del estructural es obtenida con las fuerzas ejercidas por el fluido como condiciones de contorno. Como consecuencia, la malla se deforma según la respuesta de la estructura. Estos valores de desplazamiento se interpolan a la malla de fluido lo que da como resultado la deformación del dominio de fluido. Este proceso se repite hasta que los valores de fuerza y desplazamiento convergen por debajo del límite predeterminado [36].

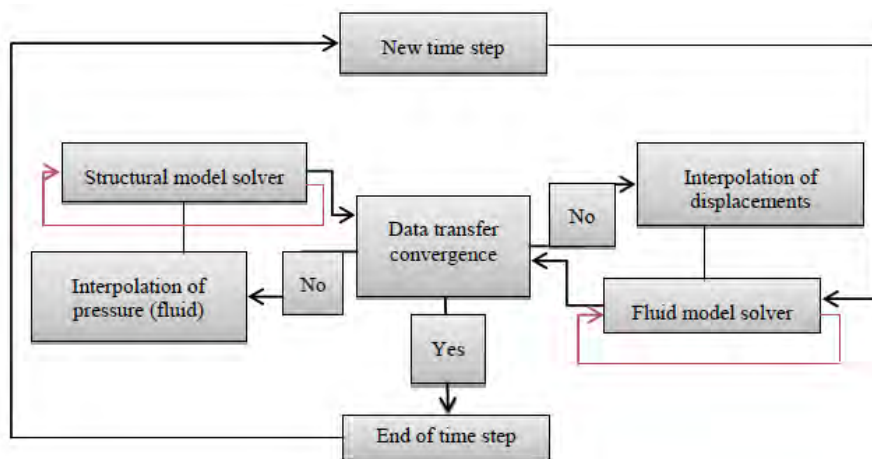


Fig. 1.16 Diagrama de flujo del acoplamiento two way. R. Raja [36].

De lo visto anteriormente se puede inferir que de acuerdo a las particularidades de la vibración inducida por flujo en tuberías, se podrían aplicar los métodos transitorio y modal para poder determinar los parámetros de vibración propios de la naturaleza transitoria del fenómeno.

1.3.2 Métodos empleados en el modelamiento de la vibración inducida por flujo

En el punto anterior se trató de los métodos o tipos de análisis dinámicos que existen en general para estudiar cualquier problema dinámico estructural, en este punto veremos de manera más puntual los métodos aplicados concretamente al fenómeno de la vibración inducida por flujo (FIV) referidos en la literatura.

En el estudio del efecto del flujo bifásico gas líquido en el comportamiento estructural de tuberías, M. Díaz [1], realizó un estudio considerando la interacción fluido estructura (FSI), en el mismo trabajo señala que la mayoría de los autores realizaron sus trabajos con flujos monofásicos y flujo externo y sólo unos pocos realizaron estudios en flujo interno y bifásico como Chen [15], Paidoussis [44] y Hara [45].

De igual forma, M. Pittard [22] realizó un estudio numérico experimental de la vibración inducida por flujo turbulento, en la que considera la interacción acoplada (two way) para la interacción fluido estructura (FSI), ya que en el flujo turbulento, el movimiento relativo del fluido en la capa límite genera perturbaciones de flujo en forma de vórtices o remolinos. A medida que aumenta la velocidad de flujo, también

aumenta la cantidad de turbulencia. Hay una transferencia continua de energía del flujo principal a grandes remolinos, y de los grandes remolinos a remolinos más pequeños, que disipan la mayor parte de la energía. Este proceso ocurre en una franja estrecha dentro de la capa límite, en la vecindad de la pared. Esta disipación de energía produce grandes pérdidas de energía cinética en el fluido. A medida que las moléculas de fluido en los vórtices van desde ubicaciones de mayor energía cinética a regiones de menor energía cinética, es decir, desde cerca del borde de la capa límite hasta cerca de la pared, la energía cinética del fluido se convierte en calor y energía potencial en forma de presión. Estas fluctuaciones de presión excitan oscilaciones vibratorias en la tubería a través de la cual fluye el fluido. El movimiento de la tubería también causa fluctuaciones de presión adicionales. Esta interacción acoplada produce vibración inducida por el flujo [22].

F. Li [8], realiza y recomienda un análisis de interacción acoplada FSI two way en su estudio “vibración inducida por flujo bifásico en una tubería submarina”, adicionalmente a ello realiza un estudio modal para comparar las frecuencias naturales de la tubería con la frecuencia de vibración del sistema estructural.

También S. Miwa [10] realiza un estudio de interacción fluido estructura acoplada two way en su estudio de vibración inducida por flujo bifásico en sistemas de tuberías ya que considera que los fenómenos FIV se combinan con la dinámica estructural a través de la fuerza hidrodinámica que actúa sobre la estructura. Cuando la fuerza hidrodinámica actúa sobre la superficie de la estructura, esta se deforma. La estructura deformada reaccionará y aplicará la fuerza opuesta contra el fluido en función de sus propiedades de material, como la elasticidad, la frecuencia natural, los parámetros de amortiguación, etc. Durante el proceso, el flujo se altera y la dirección y la magnitud de la fuerza hidrodinámica pueden cambiar considerablemente. En consecuencia, FIV se genera debido a la vinculación de las fluctuaciones de fuerza entre estas dos fuerzas dinámicas [10].

A partir de la revisión de la literatura, se concluye que la mayoría de autores considera no sólo el efecto que el campo de fluido tiene sobre el campo estructural, sino también la influencia del campo estructural sobre el campo del fluido. Esta influencia mutua se resuelve a través de un análisis acoplado, conocido como interacción fluido estructura (FSI), cuyo enfoque será utilizado en el presente trabajo.

➤ Análisis de Vibración Inducida por Flujo (FIV).

Es la respuesta dinámica de una estructura sumergida o que transporta el flujo de fluido al interior de la tubería. El flujo de fluido es una fuente de energía que puede inducir oscilaciones estructurales y mecánicas. Las vibraciones inducidas por el flujo describen mejor la interacción que se produce entre las fuerzas dinámicas del fluido y las fuerzas inerciales, amortiguadoras y elásticas de una estructura.

El estudio de las vibraciones inducidas por el flujo se ha desarrollado rápidamente en la ingeniería aeronáutica y no aeronáutica, es así que en la Fig. 1.17, se muestra la vibración inducida por flujo de acuerdo al tipo de flujo.

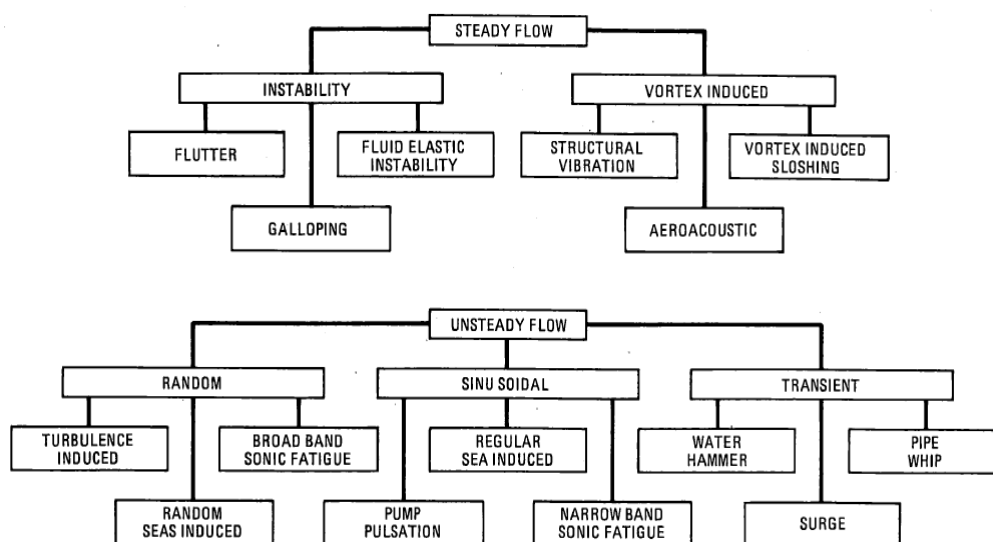


Fig. 1.17 Vibración inducida de acuerdo al tipo de flujo, R. D. Blevins [11].

En aeronáutica, la vibración inducida por flujo a menudo se denomina flutter o aleteo, un tema de aeroelasticidad relacionado con las interacciones mutuas de las fuerzas aerodinámicas, elásticas e inerciales en un objeto volador, sus componentes o sus sistemas de propulsión. La vibración inducida por el flujo también considera el flutter o aleteo clásico de un perfil aerodinámico en un flujo de baja velocidad, el aleteo del estado asociado con un flujo separado y el aleteo del balanceo relacionado con las estelas turbulentas. Las vibraciones no aeronáuticas inducidas por el flujo se encuentran a menudo en embarcaciones, puentes colgantes, líneas de oleoductos, líneas de transmisión de energía, antenas de televisión, tubos intercambiadores de

calor, conjuntos de combustible nuclear y periscopios y cascos submarinos. Todas las estructuras no aeronáuticas no tienen líneas continuas y son susceptibles tanto al aleteo como al aleteo causado por la separación del flujo. La interacción de estas estructuras con una corriente de fluido generalmente es más complicada que la de las estructuras aeronáuticas y ofrece más posibilidades para que el flujo desencadene oscilaciones inestables en las estructuras.

En la industria del petróleo y los hidrocarburos es típico ver que la vibración en un sistema de tuberías pueden causar una variedad de problemas, desde una menor eficiencia del proceso y paradas no planificadas hasta un tiempo de vida útil menor de la estructura o equipo. Es un problema importante para los ingenieros que diseñan sistemas en muchas industrias y ha sido una preocupación específica en el subsector de petróleo y gas en los últimos años, ya que el flujo interno de fluidos dentro de una tubería o sistema de tuberías causa alguna forma de vibración de la tubería.

Los objetivos más importantes en el diseño de sistemas de tuberías son minimizar el riesgo de vibración de la tubería y mejorar la seguridad, confiabilidad y eficiencia de las operaciones de proceso y producción. A través de la simulación de ingeniería, se puede cumplir estos objetivos al tiempo que reducimos el costo. La vibración inducida por el flujo en tuberías puede ser causada por una serie de mecanismos que incluyen:

- ✓ Bombas y compresores que podrían producir pulsaciones de presión, provocando una respuesta en las tuberías cercanas.
- ✓ Flujo fluctuante después de obstrucciones u objetos en el flujo.
- ✓ Flujo multifásico para casos con flujo de fases múltiples (por ejemplo, gas y líquido), regímenes de flujo multifásico específicos y frecuencias de flujo a través de tuberías pueden generar vibraciones (por ejemplo, flujo tapón o slug donde los pistones de líquido impactan las paredes del tubo generando pequeños desplazamientos).
- ✓ Cambios rápidos en las condiciones de flujo o en las propiedades del fluido causados por la apertura de las válvulas, la cavitación u otras variaciones de presión grandes que provocan cambios en el estado, por ejemplo, el destello

de los líquidos al vapor.

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, y pueden ser intrascendentes, o incluso de preocupación leve. Cada perturbación aplicada a la tubería causa una vibración que disminuye con el tiempo.

Clasificación de la vibración inducida por flujo

La clasificación de las vibraciones inducidas por flujo, se indican en términos de las fuentes de excitación de la vibración inducida por flujo.

Según Eduard Naudascher y Donald Rockwell tenemos:

- Osciladores estructurales: consiste de una estructura rígida o parte estructural que es apoyada elásticamente para que pueda realizar movimientos lineales o angulares (por ejemplo una vara), o una estructura o parte estructural que es en sí misma elástica para que pueda realizar movimientos de flexión (por ejemplo, tubos de pared delgada).
- Osciladores de Fluido: o resonadores, consiste de una masa pasiva de líquido que puede experimentar oscilaciones usualmente gobernadas ya sea por compresibilidad líquida o por gravedad.
- Fuentes de excitación: se clasifican en:
 - ✓ Excitación Inducida Externamente (EIE): son causadas por fluctuaciones en la velocidad o las presiones del flujo que son independientes de cualquier inestabilidad del flujo procedente de la estructura e independiente de movimientos estructurales. Un ejemplo es la excitación inducida por turbulencia de un cilindro en flujo debido a las fluctuaciones de presión asociadas con la turbulencia en el flujo, nuestro estudio se encuentra en esta clasificación.
 - ✓ Excitación Inducida por Inestabilidad (IIE): su principal fuente es una inestabilidad del flujo que da lugar a las fluctuaciones del mismo,

sobre si un cierto valor límite de la velocidad del flujo se ha superado con independencia de cualquier excitación inducida por movimiento (MIE) o por una excitación inducida externamente (EIE). se asocia con la inestabilidad del flujo e implica oscilaciones de flujo locales.

- ✓ Excitación Inducida por Movimiento (MIE): se deben a fuerzas fluctuantes que provienen de los movimientos del cuerpo que vibran o del fluido oscilador. las fuerzas fluctuantes surgen de los movimientos del cuerpo; por lo tanto, las vibraciones son autoexcitadas. El aleteo de un ala de un avión y de un fluido transportador de tubería en voladizo son ejemplos de este tipo de excitación. Claramente, ciertos elementos de IIE con retroalimentación elástica fluida y MIE son comunes entre sí; sin embargo, lo que distingue a MIE es que en ausencia de movimiento no hay excitación oscilatoria alguna.

Método Analítico de la vibración inducida por flujo

La respuesta dinámica de una tubería que transporta flujo bifásico puede ser representada por un sistema de amortiguamiento, una masa hidrodinámica y un mecanismo de excitación. Con respecto a la amortiguación, varios estudios han indicado que tanto los componentes de la amortiguación estructural y del flujo bifásico son relevantes en la vibración estructural inducida por esta en una tubería. Este último además es de naturaleza viscosa que depende de la velocidad y ligeramente de la fracción de vacío. En lo concerniente a la masa hidrodinámica bifásica, según L. E. Ortiz [12] no se reporta aún ningún estudio experimental en la literatura. En el caso del mecanismo de excitación del sistema son influyentes la turbulencia y el flujo del fluido bifásico [46], se ha reportado una deducción analítica en la literatura que describe la relación entre la respuesta de vibración y el flujo basado en la turbulencia del sistema [47], ninguna otra formulación en la respuesta vibratoria incluyendo el mecanismo de excitación ha sido encontrado en la literatura [12].

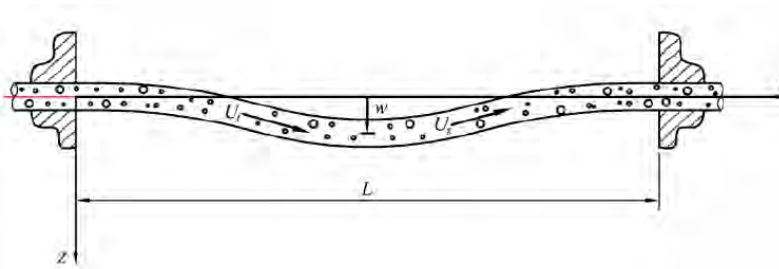


Fig. 1.18 Diagrama esquemático del sistema, D. Castillo [48].

A medida que las moléculas del fluido se aproximan a la pared, tienen energía cinética. Esta energía cinética debe convertirse en otra forma de energía a medida que las moléculas alcanzan la pared de la tubería. De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, parte de la energía cinética se convierte en calor a medida que los remolinos turbulentos se disipan, pero la mayoría se convierte en energía potencial en forma de presión aleatoria que originará la fluctuación (desplazamientos) de la pared de la tubería “ w ”. La turbulencia está asociada a la presencia de remolinos de varios tamaños que van decayendo hasta hacerse más pequeños disipando energía.

La Fig. 1.18 representa una tubería sujeta al flujo adiabático interno de dos fases, donde las características de flujo determinan los mecanismos gobernantes de la vibración-excitación, y consecuentemente la respuesta de vibración. La turbulencia y los mecanismos de excitación de flujo bifásico son los más relevantes para el flujo en tuberías tanto líquido como gas-líquido [49]. La turbulencia está asociada a la presencia de remolinos de muchos tamaños que se descomponen en otros más pequeños, disipando energía. Los remolinos en la región cercana a la pared de la tubería generan fluctuaciones de presión aleatorias que lo obligan a vibrar [11].

En el caso del flujo bifásico, además de los remolinos, la reconfiguración instantánea de las fases induce perturbaciones en el fluido. Dependiendo de su naturaleza, estas perturbaciones pueden ser otra fuente de turbulencia o pueden promover el surgimiento de un mecanismo de excitación del flujo de dos fases. Por lo tanto, la relación entre la respuesta estructural y las perturbaciones de flujo es evidente.

El esquema mostrado en la Fig. 1.18, puede ser representado como un sistema de un grado de libertad como se muestra en la Fig. 1.19.

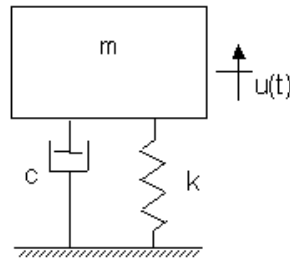


Fig. 1.19 Sistema de un grado de libertad.
<http://www.mecapedia.uji.es>

La dinámica de la interacción fluido-estructura de un sistema de tuberías sometido a flujo bifásico puede representarse como un sistema amortiguado sometido a un conjunto de fuerzas externas, como sigue:

$$[M]\{\ddot{Q}\} + [C]\{\dot{Q}\} + [K]\{Q\} = \{G\} \quad (28)$$

Donde $[M]$, $[C]$ y $[K]$ son, respectivamente, las matrices de masa, de amortiguación y de rigidez, $\{Q\}$ es el vector de desplazamiento estructural generalizado, y $\{G\}$ es el vector de las fuerzas de excitación incluyendo la turbulencia y ruidos acústicos. Esta ecuación, puede reescribirse en una forma extendida mostrando los componentes estructurales (s) y de fluidos (f) de las matrices del sistema, [17].

$$[M_s + M_f]\{\ddot{Q}\} + [C_s + C_f]\{\dot{Q}\} + [K_s + K_f]\{Q\} = \{G\} \quad (29)$$

El mayor problema en el 2-FIV es conocer la masa $[M_f]$, el amortiguamiento $[C_f]$, la rigidez $[K_f]$ y la excitación $[G]$, debido al flujo bifásico, para diversas condiciones de flujo. En general, la ecuación (29) es no lineal, pero la ecuación linealizada es posible en la mayoría de los casos prácticos. La respuesta estructural puede ser oscilatoria periódica, vibraciones aleatorias o movimientos caóticos. Según algunos autores, la respuesta estructural sometida al flujo bifásico está representada por la masa hidrodinámica, amortiguación y mecanismos de excitación [46], [50], [51].

El desarrollo de una formulación analítica de vibración inducida por flujo sometida a flujo bifásico (2-FIV) en tuberías tiene que ver con el establecimiento de una relación entre los parámetros de flujo y estructura. Hasta la fecha, las deducciones matemáticas exactas no están disponibles, principalmente porque algunos temas,

como por ejemplo turbulencia, flujo de dos fases y su interacción, están aún en desarrollo [12].

La formulación matemática para tuberías que transportan flujo bifásico presentada aquí se basa en la formulación clásica de Paidoussis [44]. El sistema está compuesto por (i) un tubo uniforme de longitud L , área de sección transversal interna A , perímetro interno S , densidad de masa lineal m , rigidez a la flexión EI y (ii) un flujo de fluido de dos fases de densidad de masa lineal M con velocidad de flujo de la mezcla J . La ecuación de movimiento se obtiene aplicando la segunda ley de Newton sobre los diagramas de cuerpo libre de los elementos diferenciales tanto del fluido como de la tubería como se muestra en la Fig. 1.20.

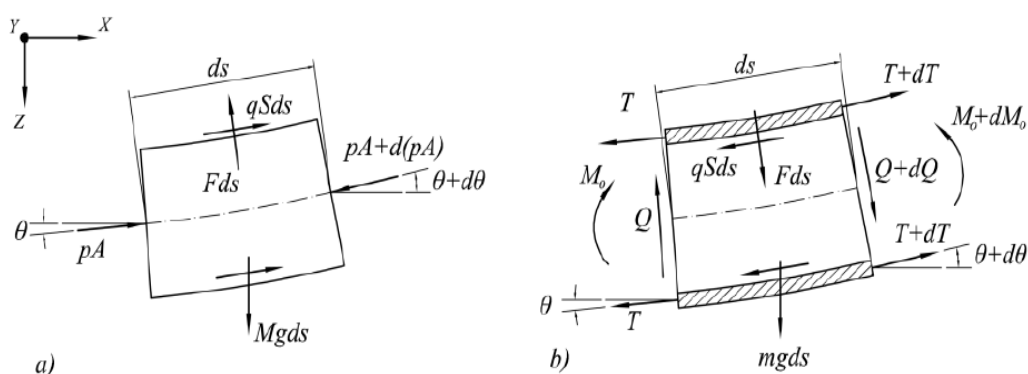


Fig. 1.20 Diagrama de cuerpo libre de los elementos diferenciales ds de una tubería horizontal que transporta fluido, a) fluido b) tubería. L. E. Ortiz [52]

Se adoptan la teoría de Euler-Bernoulli y pequeñas deflexiones. Para el elemento fluido, en las direcciones X y Z , se obtienen las siguientes ecuaciones, respectivamente [52]:

$$-A \frac{\partial p}{\partial x} + qS - F \frac{\partial w}{\partial x} = M \frac{\partial J}{\partial t} \quad (30)$$

$$A \frac{\partial}{\partial x} \left(p \frac{\partial w}{\partial x} \right) - qS \frac{\partial w}{\partial x} - F + Mg = M \left[\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + J^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2J \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t} + \frac{\partial J}{\partial t} \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (31)$$

Donde w es la deflexión de la tubería en la dirección Z . p y g son la presión y gravedad respectivamente. qS y F están relacionados con las fuerzas de reacción de la tubería en el fluido de dos fases, en direcciones tangenciales y normales,

respectivamente.

De la misma forma, para el elemento tubería, se obtiene:

$$\frac{\partial T}{\partial x} - qS + F \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(T \frac{\partial w}{\partial x} \right) + qS \frac{\partial w}{\partial x} + F + \frac{\partial Q}{\partial x} + mg = m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \quad (33)$$

Donde T y Q son la tensión longitudinal y la fuerza de corte transversal, respectivamente. Combinando las Ecs. (30) al (33), y usando el procedimiento de Paidoussis para el cálculo de T y Q , hallamos la ecuación de movimiento:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (M + m)g \left((x - L) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) + MJ^2 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2MJ \frac{\partial^2 w}{\partial t \partial x} \quad (34)$$

$$+ (M + m) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\mu}{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \right) = 0$$

Donde los términos representan respectivamente (de izquierda a derecha): fuerza de flexión, presión y tensión, fuerza centrífuga, fuerza de Coriolis, fuerza de inercia y fuerza de amortiguación estructural. Ω es la frecuencia del sistema [52].

CAPÍTULO 2

SELECCIÓN DEL MODELO DE TURBULENCIA PARA EL ESTUDIO DEL FLUIDO

Como se mencionó anteriormente, el presente estudio comprende un análisis de fluidos y estructura claramente definidos que forman parte del fenómeno en su conjunto, en este capítulo se abordará con mayor énfasis el análisis de los flujos bifásicos en una tubería horizontal, con el fin de poder seleccionar el modelo de turbulencia más adecuado.

2.1. Simulación numérica del flujo turbulento bifásico.

En el capítulo anterior, se mencionaron algunos de los modelos de turbulencia más utilizados para el abordaje CFD, es así que de acuerdo a la literatura, se recomiendan en particular 2 modelos, el modelo RANS $k-\omega$ SST y el modelo LES con sub escala WALE. Ambos modelos serán desarrollados para cada uno de los casos de estudio que se verán a continuación.

El modelo CFD para el fluido requiere de la definición de una geometría discretizada llamada malla o grid. Se deben especificar las condiciones de contorno y las propiedades de flujo. Finalmente, se debe especificar el procedimiento de solución y se debe inicializar el campo de flujo. Estos pasos constituyen la definición de la física del flujo y el esquema numérico para el modelo.

2.1.1 Geometría y condiciones de contorno para el estudio del flujo.

En el presente trabajo se desarrolló el modelo geométrico CAD para el estudio del fluido como se muestran en la Fig. 2.1, con una longitud total de 3000 mm y un

diámetro de 20.4 mm

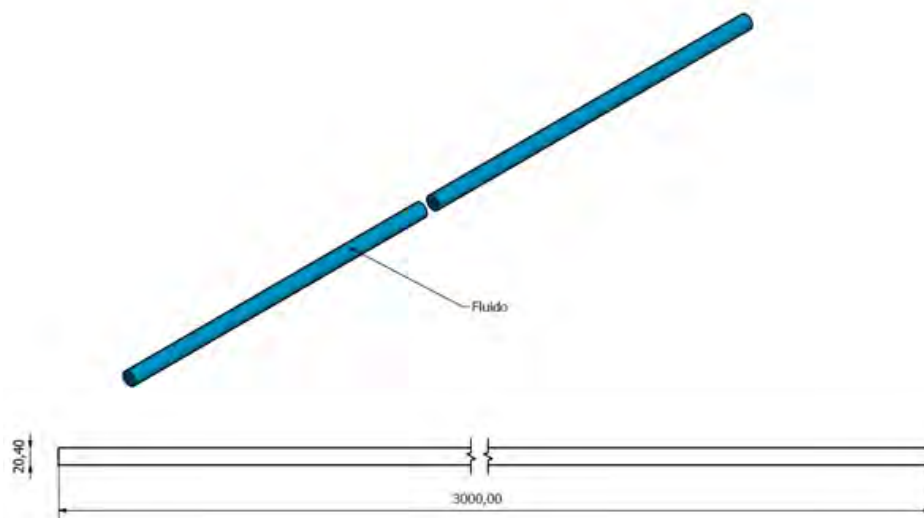


Fig. 2.1 Modelo geométrico CAD del fluido.

Una vez realizado el modelo geométrico 3D, se procede a realizar el mallado o discretización del sólido, Para este tipo de geometría es típico el uso del mallado hexagonal, que es un método de mallado que genera elementos hexaédricos. “La malla hexaédrica se caracteriza por presentar un número reducido de elementos, con lo cual mejora el tiempo de convergencia del modelo. Asimismo, se consigue una reducción del error numérico con lo que se mejora la precisión del cálculo” [53]. Autores como Hernández Pérez [39], recomiendan el método de mallado hexagonal estructurado de barrido tipo O - grid, que es el que se utiliza en la presente investigación (Fig. 2.2).

...Este método genera únicamente elementos hexaédricos los cuales se forman a partir de elementos cuadriláteros que se forman en la superficie a partir de la cual se barre. Posteriormente, se genera una malla 3D de elementos hexaédricos que se barren desde la superficie inicial. Los elementos de la superficie de llegada deben tener la misma topología que los elementos de la superficie inicial. Cabe mencionar que circunstancialmente se pueden crear elementos prismáticos en el barrido. [53].

Adicional a ello permite una distribución regular y homogénea de los elementos sobre el dominio, utilizado para geometrías sencillas como es este caso.

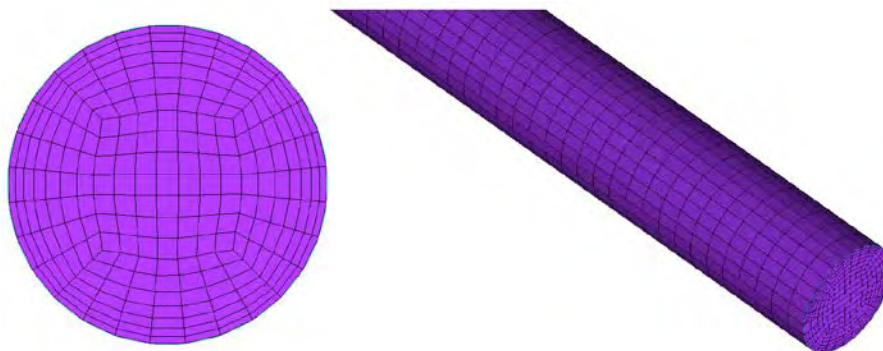


Fig. 2.2 Mallado hexagonal del fluido con ICEM CFD.

El mallado mostrado fue realizado con la herramienta especializada de ANSYS, ICEM CFD, las estadísticas se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Estadísticas del mallado hexagonal

Característica	Descripción		
Número total de elementos	218673		
Número total de nodos	208000		
Calidad	Mínimo=0.60609	Máximo = 1	Promedio=0. 0.8721
Relación de Aspecto	Mínimo=0.0932108	Máximo=0.9999	Promedio=0.25694
Calidad de Ortogonalidad	Mínimo=0.84818	Máximo=1	promedio=0.983061

2.1.2 Configuración del modelo RANS

En este punto, se indican e ingresan los diferentes parámetros que definen el comportamiento de los fluidos para el modelo de turbulencia RANS, recordando que el fenómeno que se presenta es transitorio:

➤ Modelo multifásico

Se hará uso del modelo homogéneo con método de captura de interfase VoF, el detalle de este modelo se encuentra en el capítulo I, se hará uso de la formulación explícita para el modelo, se consideran las fases como primaria para la fase gaseosa, y secundaria para la fase líquida, así mismo se considera el valor de la tensión superficial existente entre las fases.

➤ Modelo de turbulencia

Se hará uso del modelo RANS $k - \omega$ SST.

➤ Condiciones iniciales y de contorno

Como se ve en la Fig. 2.1, el volumen del fluido consiste en una sección de ingreso (inlet), otra de salida (outlet) y de la superficie cilíndrica que representa al fluido en contacto con la pared de la tubería (wall). Es importante precisar el tipo de configuración de ingreso de las fases agua aire a la tubería, por el cual se probó dos tipos de ingreso, concéntrico Fig. 2.3a y partido Fig. 2.3b, de acuerdo a la literatura, autores como Deendarlianto [19] utilizan las configuraciones concéntricas mostradas en la Fig. 2.3a, y Dinaryanto [14] y Hassan [54] la configuración partida de la Fig. 2.3b. en ambas configuraciones se llega a desarrollar el patrón del flujo con normalidad con una suficiente longitud para el desarrollo del flujo, la diferencia radica en que la configuración partida necesita una menor longitud para el desarrollo de la burbuja a diferencia del concéntrico que necesita una longitud un tanto mayor, pero en ambos casos se llega a desarrollar el flujo patrón con normalidad. Por tal motivo se tomará la configuración partida para los casos de estudio que veremos a continuación.

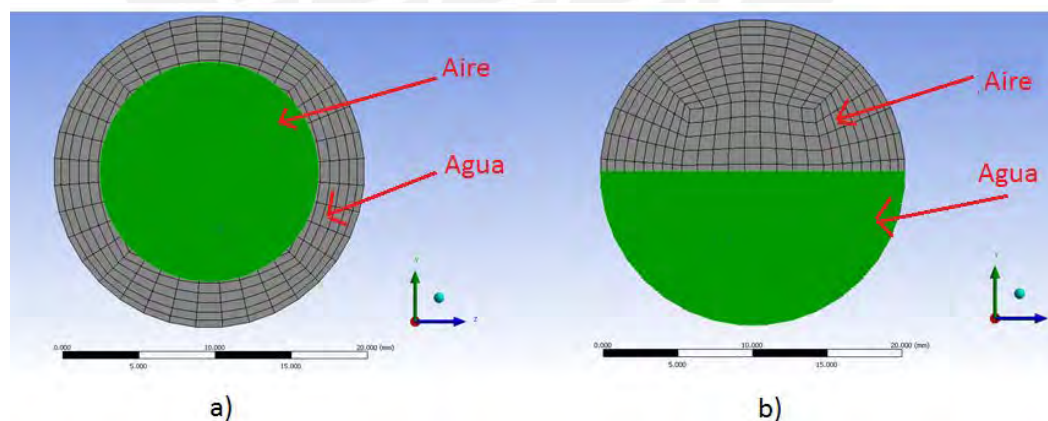


Fig. 2.3 Configuraciones de ingreso de las fases a) concéntrico b) partido

Para efectos de la simulación numérica, también es necesario conocer las propiedades físicas de los fluidos que son comunes para todos los casos de estudio, tales se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Propiedades físicas del agua y aire

Parámetro	Valor
Agua	
Densidad (kg/m ³)	998.22
Viscosidad (kg/(m-s))	0.001003
Temperatura (°C)	20
Aire	
Densidad (kg/m ³)	1.2
Viscosidad (kg/(m-s))	0.00001825
Temperatura (°C)	20

Se definen las condiciones de contorno en el ingreso (*inlet*) las velocidades superficiales de ambas fases, en la salida (*outlet*) la presión manométrica en la sección a la correspondiente longitud, haciendo uso de la expresión dada por Ortiz Vidal [24] mostrada en el Anexo 2, la pared interna de la tubería (*Wall*) toma en cuenta la condición de no slip wall. Las Tabla 2.3, Tabla 2.4, Tabla 2.5, Tabla 2.6 y Tabla 2.7, muestran los parámetros que deben ser ingresados y configurados para cada uno de los casos de simulación.

En la etapa de configuración inicializamos la tubería llena de agua en el primer instante y gradualmente va ingresando la fase gaseosa y líquida en función de la fracción de vacío (β) hasta que ambas fases cubran todo el dominio. La fase líquida se considerada como incompresible y los efectos de la fase gas se toma en cuenta con el uso de la ley de los gases perfectos.

Tabla 2.3 Propiedades físicas de la fase líquida y gaseosa

Parámetro
Densidad (kg/m ³)
Viscosidad (kg/(m-s))
Temperatura (°C)

Tabla 2.4 Condiciones de contorno a la entrada (Inlet).

Parámetro
Velocidad aire V_G (m/s)

Velocidad agua V_L (m/s)
Intensidad de turbulencia %
Relación Viscosidad turbulenta

Tabla 2.5 Condiciones de contorno a la salida (Outlet)

Parámetro
Presión manométrica a la salida (kPa)
Intensidad de turbulencia %
Relación Viscosidad turbulenta

Tabla 2.6 Condiciones de contorno de la pared del fluido (Wall).

Parámetro	Descripción y/o Valor
Tipo de deslizamiento	Sin deslizamiento
Rugosidad	0

Tabla 2.7 Parámetros comunes

Parámetros comunes
Gravedad (m/s^2)
Tensión superficial (N/m)

➤ Esquemas de discretización temporal y espacial

La Tabla 2.8 muestra los esquemas de discretización temporal y espacial usados en la configuración del fluido.

Tabla 2.8 Esquemas de discretización temporal y espacial

Parámetro	Valor
Temporal discretization	First Order implicit
Pressure velocity coupling	SIMPLE
Espacial discretization	
Pressure	PRESTO
Momentum	Second Order upwind
Volume Fraction	Geo - reconstruct

Turbulent kinetic energy (k)	First Order upwind
------------------------------	--------------------

➤ **Inicialización**

Se hizo uso del método de inicialización híbrida, considerando que la tubería se encuentra llena de agua y en reposo en un primer instante y luego van ingresando las fases a la tubería conforme a su velocidad superficial (J) y fracción de vacío (β).

2.1.3 Configuración del modelo LES

En este punto, se indicarán e ingresarán los diferentes parámetros que definen el comportamiento de los fluidos para el modelo de turbulencia LES:

➤ **Modelo multifásico**

Se hará uso del modelo homogéneo con método de captura de interface VoF, el detalle de este modelo se encuentra en el capítulo I, se hará uso de la formulación explícita para el modelo, se consideran las fases como primaria para la fase gaseosa, y secundaria para la fase líquida, así mismo se considera el valor de la tensión superficial existente entre las fases.

➤ **Modelo de turbulencia**

Se hará uso del modelo LES con modelo de sub malla WALE

➤ **Condiciones iniciales y de contorno**

Se definen las condiciones de contorno en el ingreso (*inlet*) las velocidades superficiales de ambas fases, en la salida (*outlet*) la presión manométrica en la sección a la correspondiente longitud, haciendo uso de la expresión dada por Ortiz Vidal [24] mostrada en el Anexo 2, la pared interna de la tubería (*Wall*) toma en cuenta la condición de no slip wall. Las Tabla 2.9, Tabla 2.10, Tabla 2.11, Tabla 2.12 y Tabla 2.13, muestran los parámetros que deben ser ingresados y configurados para cada caso de simulación.

En la etapa de configuración inicializamos la tubería llena de agua en el primer instante y gradualmente irá ingresando la fase gaseosa y líquida en función de la fracción de vacío (β) hasta que ambas fases cubran todo el dominio. La fase líquida

se considerada como incompresible y los efectos de la fase gas se toma en cuenta con el uso de la ley de los gases perfectos

Tabla 2.9 Propiedades físicas de la fase líquida y gaseosa

Parámetro
Densidad (kg/m^3)
Viscosidad (kg/(m-s))
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

Tabla 2.10 Condiciones de contorno a la entrada (Inlet).

Parámetro
Velocidad aire V_G (m/s)
Velocidad agua V_L (m/s)

Tabla 2.11 Condiciones de contorno a la salida (Outlet)

Parámetro
Presión manométrica a la salida (kPa)

Tabla 2.12 Condiciones de contorno de la pared del fluido (Wall).

Parámetro	Descripción y/o Valor
Tipo de deslizamiento	Sin deslizamiento

Tabla 2.13 Parámetros comunes

Parámetros comunes
Gravedad (m/s^2)
Tensión superficial (N/m)

➤ Esquemas de discretización temporal y espacial

La Tabla 2.8 muestra los esquemas de discretización temporal y espacial usados en la configuración del fluido.

Tabla 2.14 Esquemas de discretización temporal y espacial

Parámetro	Valor
Temporal discretization	First Order implicit
Pressure velocity coupling	SIMPLE
Espatial discretization	
Pressure	PRESTO
Momentum	Bounded Central Differencing
Volume Fraction	Geo - reconstruct

➤ Inicialización

Se hizo uso del método de inicialización híbrida, considerando que la tubería se encuentra llena de agua y en reposo en un primer instante y luego van ingresando las fases a la tubería conforme a su velocidad superficial (J) y fracción de vacío (β).

2.2. Aplicación y validación de los modelos RANS y LES

En este acápite se verá el uso y aplicación de los modelos de turbulencia mencionados, de los cuales obtendremos resultados que definirán cual de estos modelos en particular es o no mejor que el otro y luego de ello se validarán estos resultados con los resultados experimentales reportados en la literatura.

2.2.1 Ensayos experimentales de referencia

Es necesario describir brevemente el estudio experimental que hace referencia la literatura, con el fin de poder comparar los resultados de fluidos del estudio experimental con los de la simulación numérica. El trabajo experimental referido en la literatura tomado para el presente trabajo fue realizado por Ortiz Vidal [18].

Banco de ensayos

El circuito de tuberías para flujo bifásico que se muestra en la Fig. 2.4 se construyó específicamente para medir la vibración inducida por flujo bifásico (2-FIV), donde los componentes principales y los instrumentos de medición se designan por letras y números y se enumeran en las Fig. 2.5 y Fig. 2.6 respectivamente.

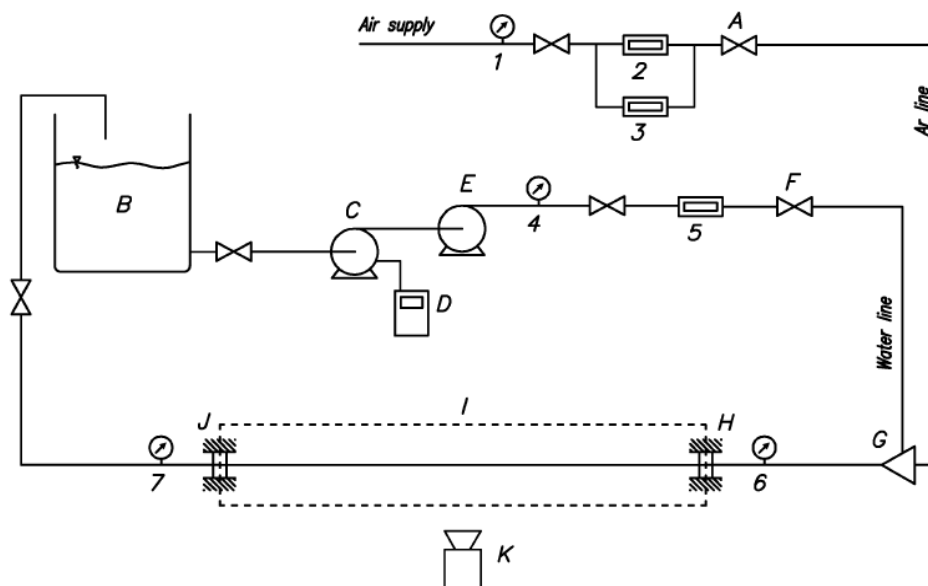


Fig. 2.4 Representación esquemática del circuito cerrado de ensayo bifásico

La sección de prueba o de estudio (I, Fig. 2.4) consiste en una tubería de 3/4" de diámetro nominal de PVC transparente Schedule 40 (Anexo 1); 20,4 mm y 26,7 mm de diámetro interno (d) y externo (D) respectivamente (Tabla 2.15), sujeta a ambos extremos con abrazadera. El tramo está delimitado por la distancia entre las abrazaderas (H y J). La longitud de estudio es de $75d$ ($= 1530$ mm).

Tabla 2.15 Características del banco experimental.

Parámetro	Descripción
Tubería	Transparente PVC – Schedule 40
Diámetro interno	20.4 mm
Diámetro externo	26.7 mm
Número de manómetros diferenciales	2
Distancia entre manómetros	90D (1836 mm)
Primera toma de presión	A 86D del ingreso
Zona de estudio FIV	75D

Letter	Component
A	Air regulation valve
B	Water reservoir
C	Water centrifugal pump
D	Frequency shifter
E	Water centrifugal pump
F	Water regulation valve
G	Air-Water mixer
H	Heavy clamp
I	Test section
J	Heavy clamp
K	High speed camera

Fig. 2.5 Componentes del circuito de ensayo

Number	Component	Range	Accuracy
1	Pressure regulator	0 to 100 psig	---
2	Air flowmeter	0 to 75 slpm	1% FS
3	Air flowmeter	0 to 1000 slpm	1.5% FS
4	Pressure gage	0 to 100 psig	3% FS
5	Water flowmeter	10.18 to 424.18 lpm	0.25% RD
6	Pressure transducer	0 to 50 psig	0.05% FS
7	Pressure transducer	0 to 50 psig	0.05% FS

Fig. 2.6 Equipos e instrumentación

El caudal de aire fue medido y regulado por los caudalímetros 2 y 3 y la válvula A, respectivamente. El agua y el aire se mezclaron en el mezclador G, de la cual de acuerdo a las condiciones de velocidad superficial de las fases y fracción de vacío, se generan los patrones de flujo a través de la sección de prueba I. Luego, los fluidos fueron separados en el tanque atmosférico B.

Se usaron sensores de acelerómetro y galgas extensiométricas para monitorear la respuesta de vibración en la sección de prueba. Los sensores se ubicaron en la posición media y la entrada de la tubería, respectivamente. También se instalaron transductores de presión (6 y 7, Fig. 2.4) para estimar la presión de aire para cada condición de flujo de dos fases. Además, para su correcta caracterización, las imágenes de los patrones de flujo bifásico, se tomaron usando una cámara de alta velocidad K. Un acelerómetro triaxial ubicado en la posición media fue usado para monitorear la respuesta de vibración de la sección de prueba. El eje x es paralelo a la dirección del flujo (dirección axial). Ambos ejes z e y son perpendiculares al eje de la tubería y el eje z se encuentra en la dirección de la gravedad.

Condiciones de estudio experimentales

En el trabajo experimental de Ortiz Vidal [24], se consideran 32 condiciones o experimentos realizados (ANEXO 2), cada uno de los cuales considera distintos valores en sus parámetros característicos, la velocidad de la mezcla, J ($= J_L + J_G$), y la fracción de vacío homogénea (sin deslizamiento), β ($= J_G / (J_L + J_G)$), se usaron para especificar los puntos experimentales. Los valores nominales de las velocidades de la mezcla variaron de 0.5 a 25 m / s y los valores homogéneos de las fracciones de vacío fueron $\beta = 10\%$, 25%, 50%, 75% y 95%. Para efectos del presente trabajo se han escogido cinco de los 32 experimentos, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 2.16 Casos o condiciones de estudio de flujo bifásico agua-aire

Condición de flujo	Velocidad superficial del agua / aire		Fracción de vacío β [%]	Caída de presión por longitud dP/dL_F [kPa/m]	Presión salida [kPa]
	J_L [m/s]	J_G [m/s]			
1	1.49	1.50	50	3.268	116.23
2	1.25	3.80	75	4.207	119.44
3	0.24	4.75	95	0.826	104.15
4	1.01	0.99	50	1.615	109.62
5	0.38	0.12	25	0.188	104.84

La Fig. 2.7 muestra la ubicación de los cinco casos de estudio en el mapa de Mandhane [34], elaborado por Ortiz-Vidal [18] para sus ensayos experimentales.

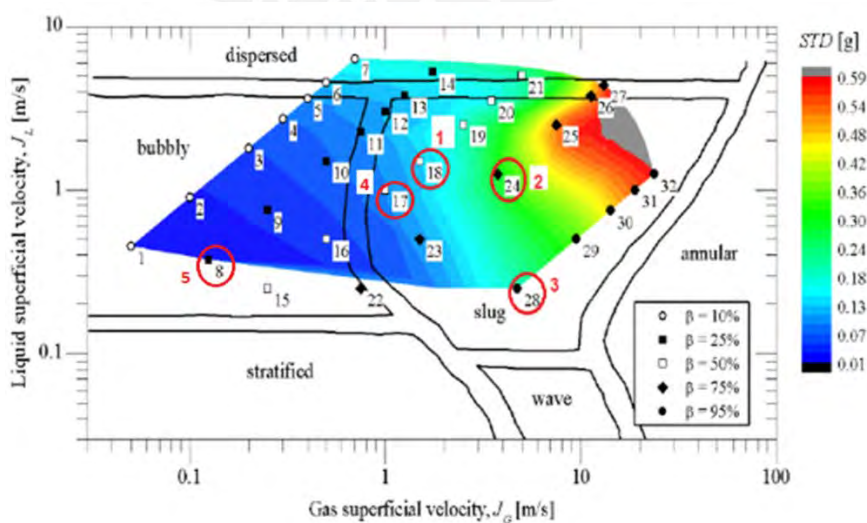


Fig. 2.7 Casos de estudio en el mapa de Mandhane, L. E. Ortíz [7].

2.2.2 Resultados de los casos de estudio seleccionados

Como se mencionó, se evalúan dos modelos de turbulencia: un modelo RANS y un modelo LES, bajo diferentes condiciones de flujo bifásico turbulento agua-aire, con el objetivo de captar la distribución de presión en función del tiempo sobre la pared de una tubería horizontal. Estos modelos serán utilizados para evaluar diferentes condiciones de flujo y sus resultados serán comparados entre sí para determinar cuál es el más adecuado para la aplicación analizada. La tubería horizontal transporta flujo bifásico agua-aire, a temperatura ambiente igual a 20°C, bajo las condiciones que se muestran en la Tabla 2.16.

Las condiciones de contorno consisten en imponer la velocidad real de cada fase en la entrada del flujo y la presión manométrica calculada a la salida del mismo. Como ya se mencionó, se seleccionaron los modelos de turbulencia RANS $k-\omega$ SST y LES con modelo de submalla WALE. Asimismo, el modelo VoF en su formulación explícita fue seleccionado para simular el flujo bifásico. Se consideró al aire como fase primaria y se designó una constante de tensión superficial agua aire de 0.072 N/m entre las fases. Se seleccionó el método SIMPLE y una formulación implícita de segundo orden para resolver las ecuaciones de conservación de forma desacoplada. Para todos los casos de simulación RANS se tiene que en las condiciones de contorno tanto a la entrada como a la salida, la intensidad de turbulencia es 5% y la relación de viscosidad turbulenta es 10. Se definieron 45 iteraciones para alcanzar la convergencia en cada paso de tiempo. El paso de tiempo para la simulación RANS $k-\omega$ SST se definió en 0.001s y para la simulación LES – WALE en 0.0001 s.

Para todos los casos de simulación se considera la gravedad ($g = -9.81m/s^2$). Para las curvas de variación de presión que se muestran a continuación se tomaron dos puntos de referencia en el fluido, uno en la parte superior (pto 1) y la otra en la parte inferior (pto 2) como se muestra en la Fig. 2.8, ambos puntos se encuentran a 2.235 m de la entrada de la tubería, ya que ese es el punto medio del tramo de la tubería considerada para la zona de estudio FIV.



Fig. 2.8 Puntos para ploteo de presiones variables en el fluido

Con la finalidad de determinar cuál de los modelos es el más adecuado para captar la distribución de presión sobre la pared de la tubería, se procesaron los resultados de presión en función del tiempo de los puntos contenidos que se ubican de forma diametralmente opuesta de la sección.

Caso 1 - Modelo RANS

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.9 se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 1 RANS para diferentes instantes de tiempo, donde se revela la formación del patrón slug, que es uno de los tipos de patrones que pueden formarse en un flujo turbulento bifásico.

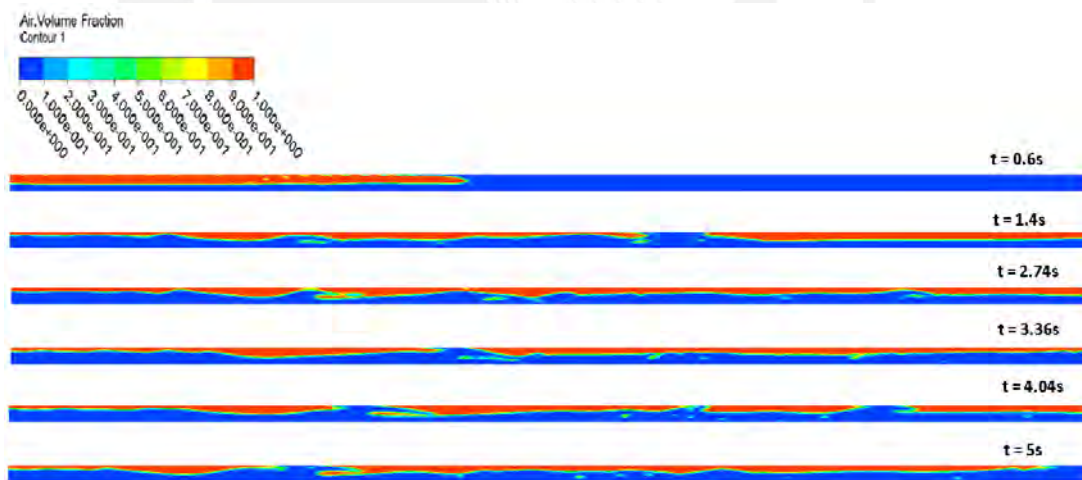


Fig. 2.9 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 1.modelo RANS $k-\omega$ SST

En la Fig. 2.10 se puede apreciar la distribución de presión en la sección de estudio ubicada a 2235 mm de la entrada de la tubería para diferentes instantes de tiempo, en ella se puede apreciar una ligera variación de presión en la sección, ello indicaría que las fases (agua - aire) tienen prácticamente la misma presión en cualquier punto de la sección independientemente a la fase.

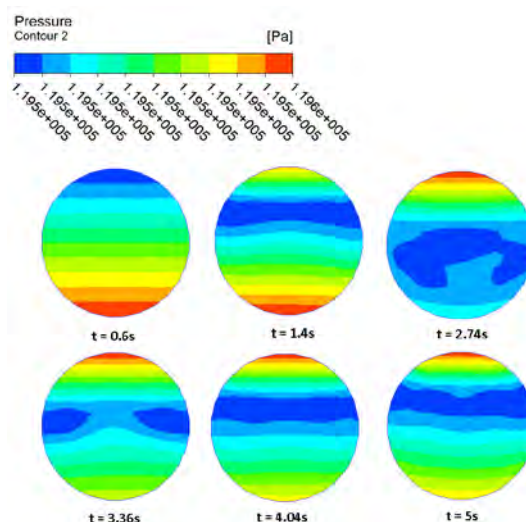


Fig. 2.10 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 1 RANS $k-\omega$ SST

La Fig. 2.11 muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería de los puntos 1 y 2 como se muestran en la Fig. 2.8, se puede ver que la tendencia de ambas curvas es prácticamente la misma (superpuesta).

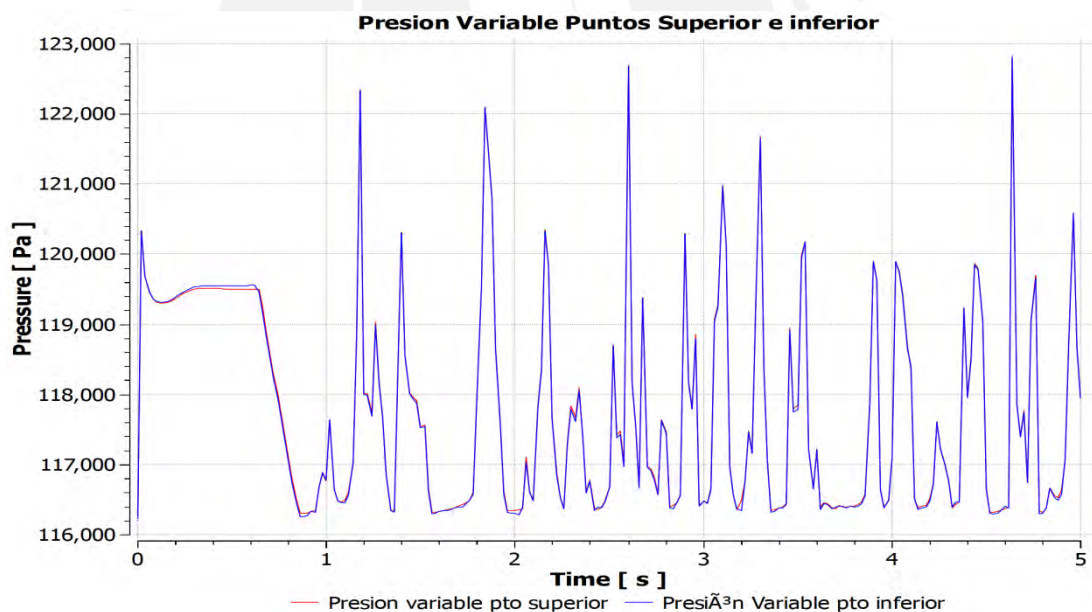


Fig. 2.11 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 1.modelo RANS $k-\omega$ SST

Caso 1 - Modelo LES

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.12, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 1 LES para diferentes segundos de análisis, donde se puede ver que la formación del patrón slug es similar al del modelo RANS.

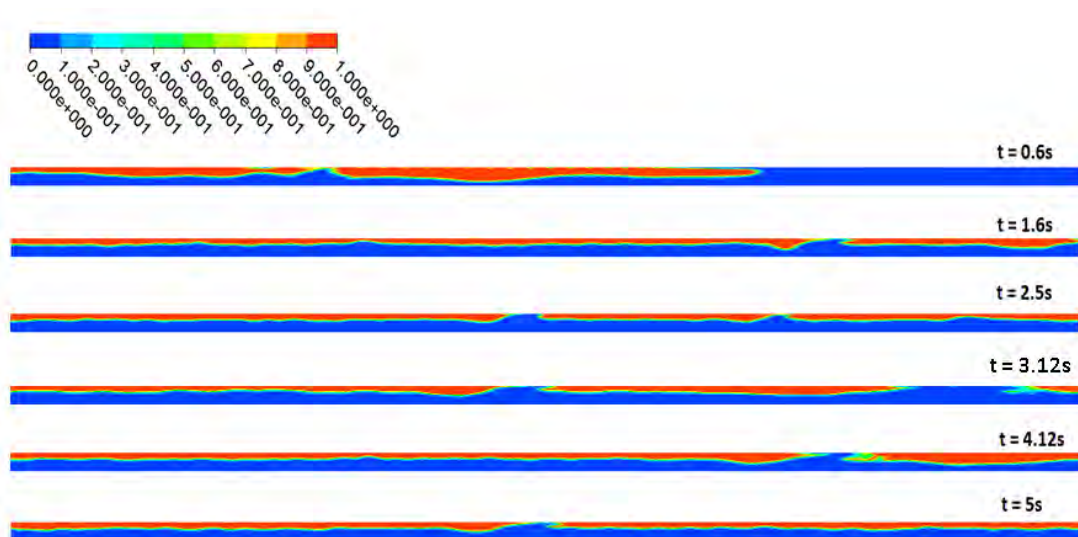


Fig. 2.12 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 1.modelo LES

La Fig. 2.13 muestra la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella también como en el caso anterior se puede apreciar una ligera variación de presión en la sección, ello indicaría que las fases (agua - aire) tienen prácticamente la misma presión.

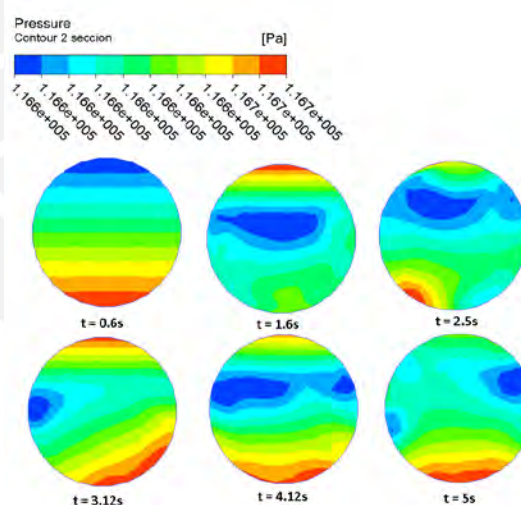


Fig. 2.13 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 1 LES

Mientras que la Fig. 2.14 muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería, en la que se puede apreciar una tendencia similar al del caso RANS sobre todo porque alcanzan los mismos valores de presión en los puntos 1 y 2 como se muestran en la Fig. 2.8, se puede ver que la tendencia de ambas curvas (punto superior y punto inferior) son similares.

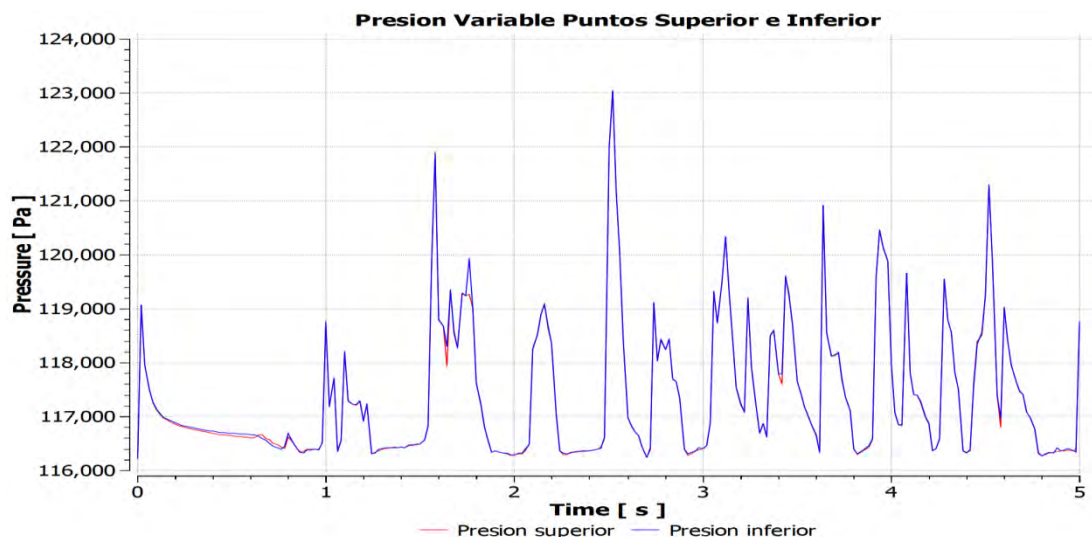


Fig. 2.14 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 1.modelo LES

La Fig. 2.15 muestra la comparación cualitativa entre lo experimental y los resultados numéricos para el caso 1 RANS y LES, ambos ploteos fueron extraídos de los instantes 4.04s y 3.12s respectivamente de las Fig. 2.9 y Fig. 2.12, las imágenes experimentales fueron compartidas por el autor Luis Enrique Ortíz Vidal para la elaboración de este trabajo.

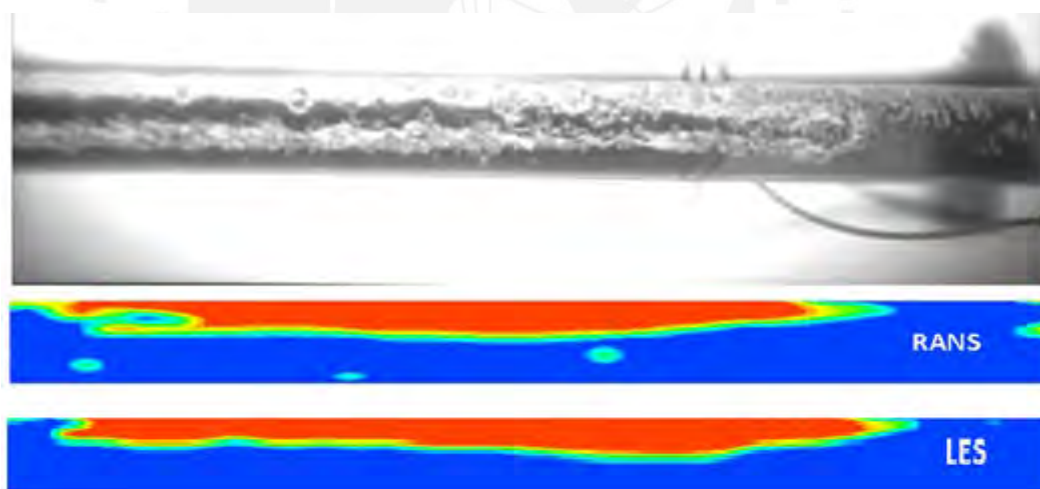


Fig. 2.15 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado numérico del caso 1

En la Fig. 2.16 se muestra una comparación entre las presiones del punto superior de la tubería para los casos analizados RANS y LES, en ella se puede apreciar que en ambos casos se logra captar adecuadamente la fluctuación de presión en la pared de la tubería y los valores en amplitud se encuentran en la misma escala.

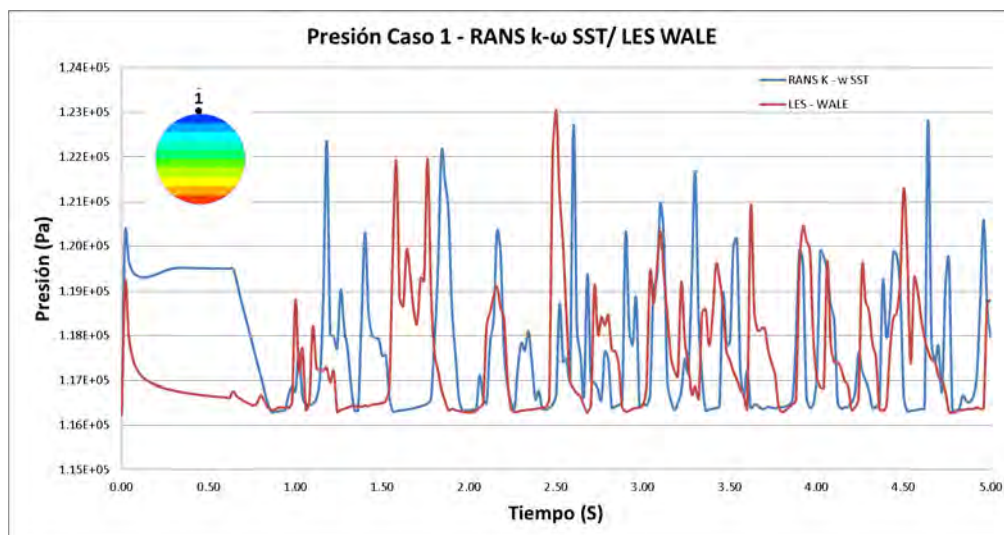


Fig. 2.16 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 1

Caso 2 - Modelo RANS

Las condiciones de flujo para este caso son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.17 se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 2 RANS para diferentes segundos de análisis, donde se revela la formación del patrón slug, en este caso se puede apreciar que hay un mayor porcentaje de aire en la mezcla, debido a la fracción volumétrica.

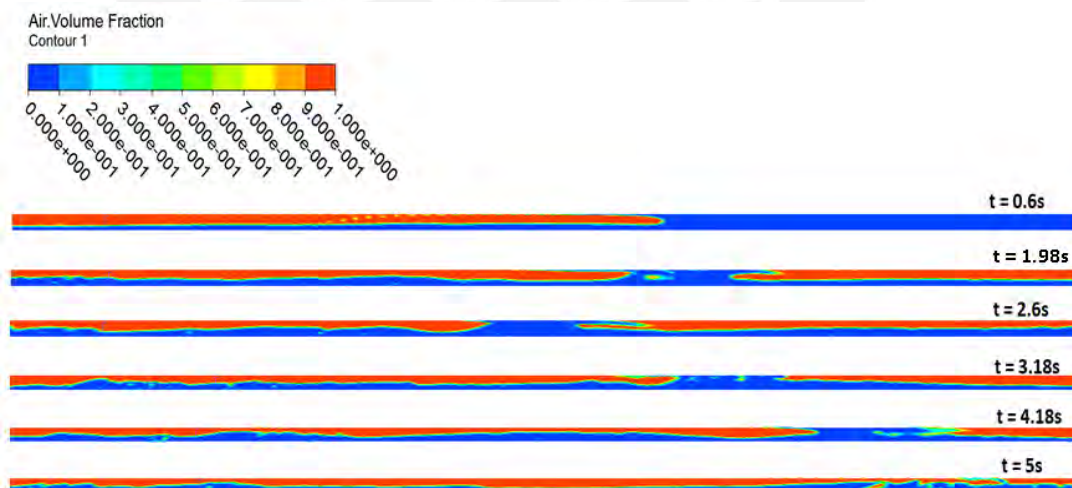


Fig. 2.17 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 2.modelo RANS k- ω SST

En la Fig. 2.18 se puede apreciar la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella se puede apreciar de igual forma que en los casos anteriores una ligera variación de presión en la sección

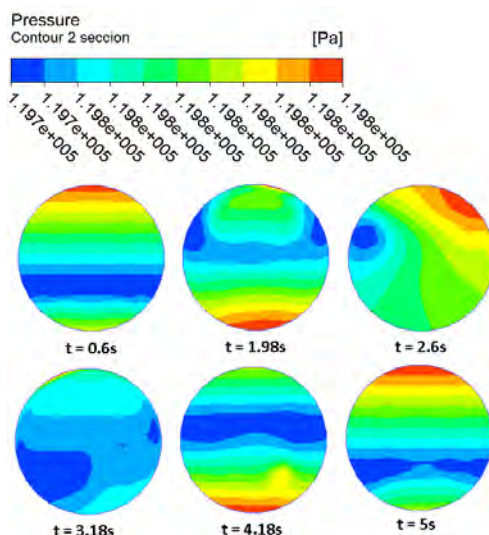


Fig. 2.18 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 2 RANS $k-\omega$ SST

En la Fig. 2.19 muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería de los puntos 1 y 2 como se muestran en la Fig. 2.8, se puede ver que ambas curvas tienen la misma tendencia.

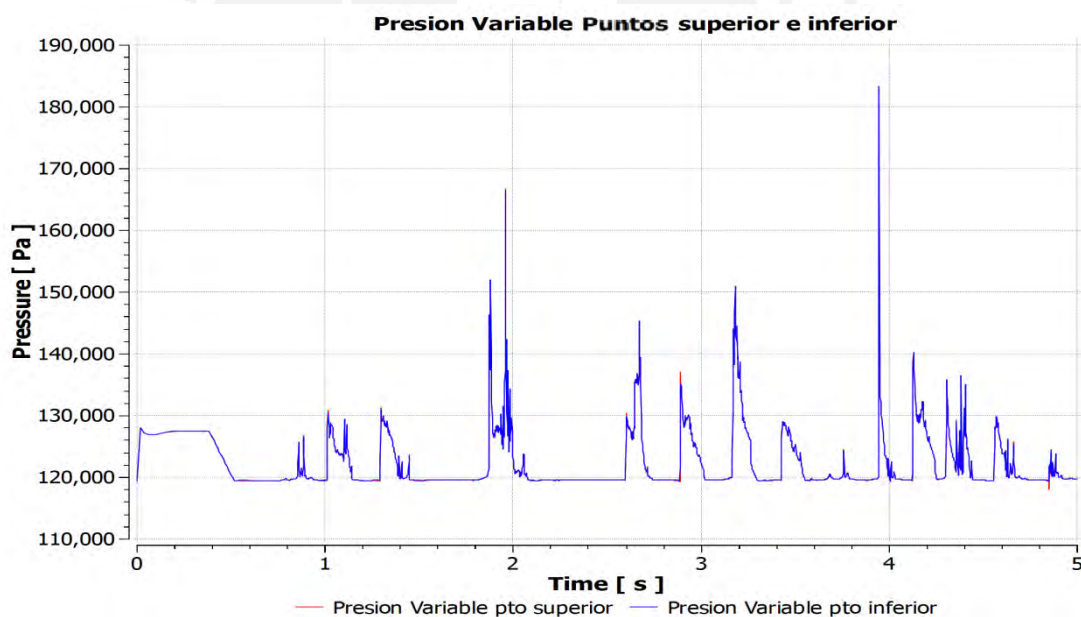


Fig. 2.19 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 2.modelo RANS $k-\omega$ SST

Caso 2 - Modelo LES

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.20, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 2 LES para diferentes segundos de análisis, donde se puede ver que la formación del patrón slug es similar al del modelo RANS.

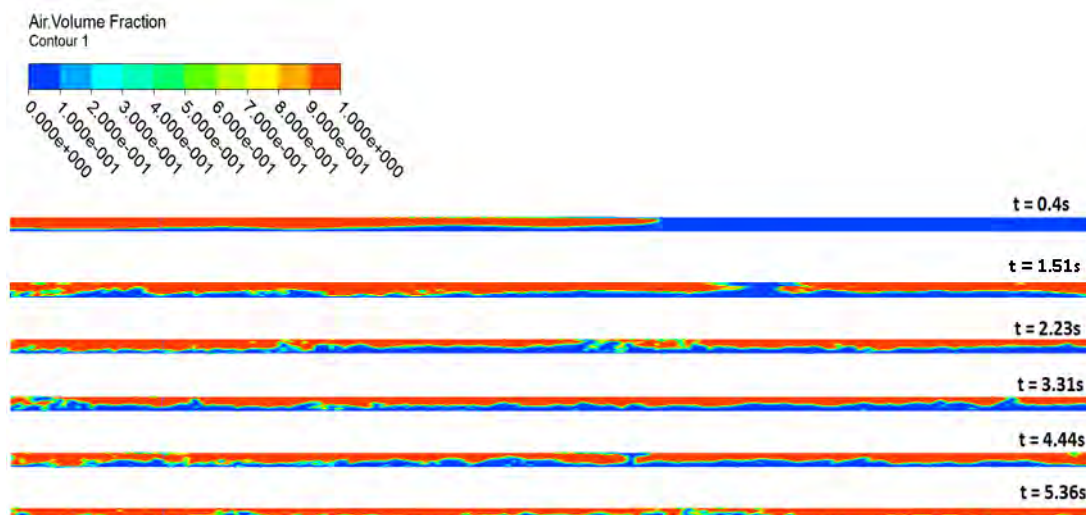


Fig. 2.20 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 2.modelo LES

La Fig. 2.21, muestra la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella también como en el caso anterior se puede apreciar una ligera variación de presión en la sección, ello indicaría que las fases (agua - aire) se encuentran a la misma presión.

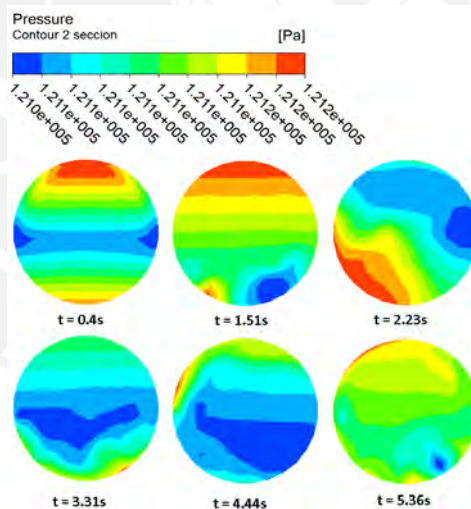


Fig. 2.21 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 2 LES

La Fig. 2.22, muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería, en la que se puede apreciar una tendencia similar al del caso RANS sobre todo porque alcanzan valores similares de presión, se puede ver que la tendencia de ambas curvas (punto superior y punto inferior) son prácticamente las mismas.

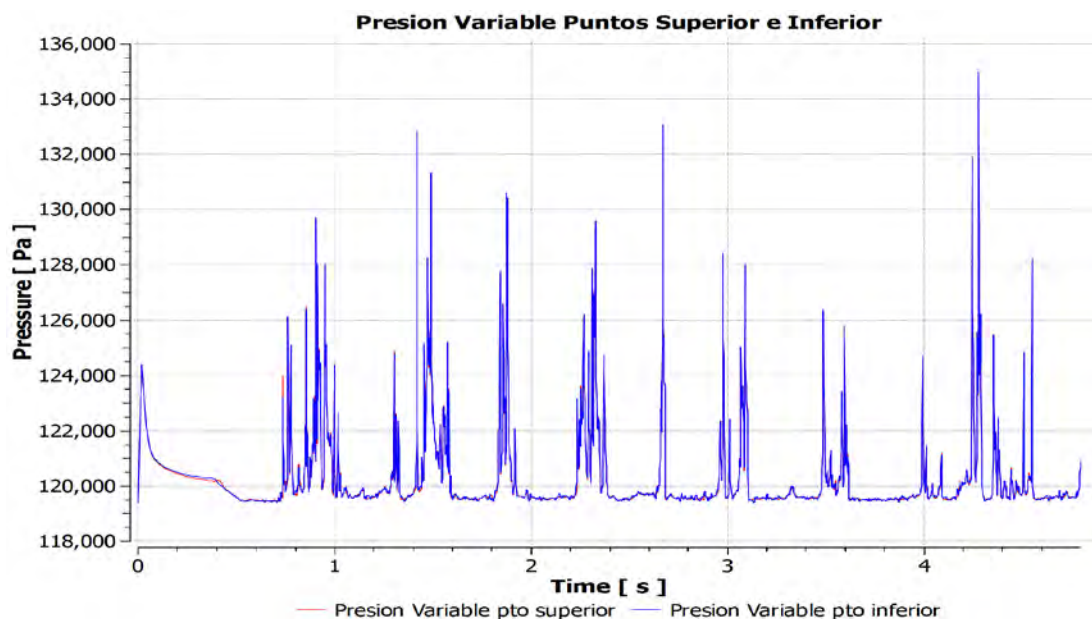


Fig. 2.22 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 2.modelo LES

La Fig. 2.23, muestra la comparación cualitativa entre lo experimental y los resultados numéricos para el caso 2 RANS y LES, ambos ploteos fueron extraídos de los instantes 1.98s y 1.51s respectivamente de las Fig. 2.9 y Fig. 2.12, la imagen experimental fue extraída del trabajo de tesis doctoral de L. E. Ortíz Vidal [55].

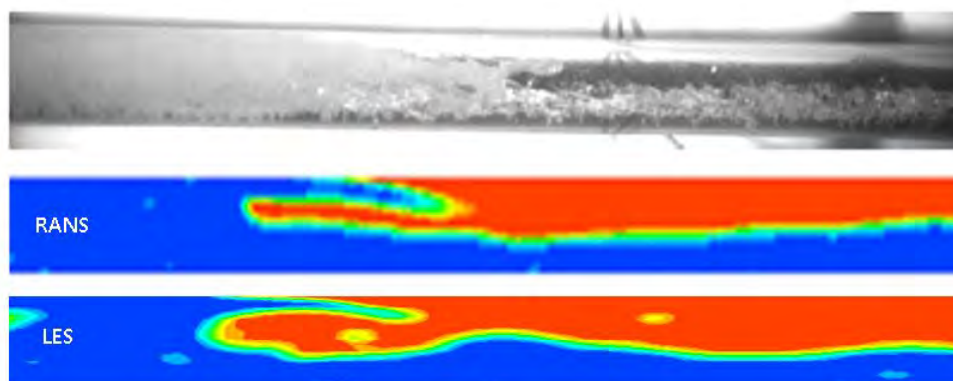


Fig. 2.23 Comparación cualitativa entre lo experimental (L. E. Ortíz Vidal [55]) y el resultado de la simulación del caso 2

En la Fig. 2.24 se muestra una comparación entre las presiones del punto superior de la tubería para los casos analizados RANS y LES, en ella se puede apreciar que en ambos casos se logra captar la fluctuación de presión en la pared de la tubería y los valores en amplitud se encuentran próximos.

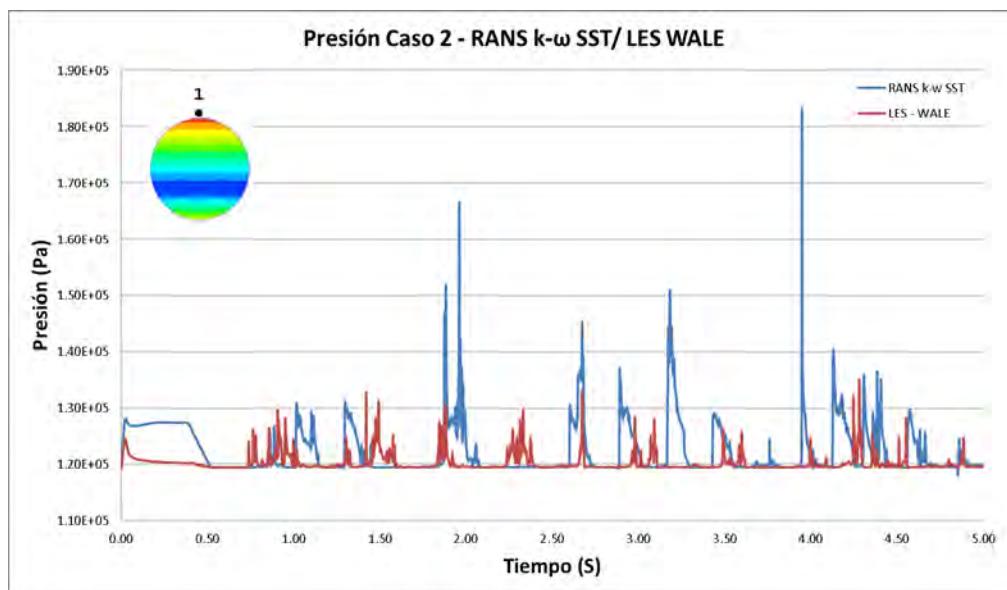


Fig. 2.24 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 2

Caso 3 - Modelo RANS

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.25, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 3 RANS para diferentes segundos de análisis, donde se aprecia un patrón slug bastante alargado, en este caso a diferencia de los anteriores se puede ver que el porcentaje de aire en la mezcla es mucho mayor, debido a que su fracción volumétrica también es mucho mayor en comparación con los casos anteriores.

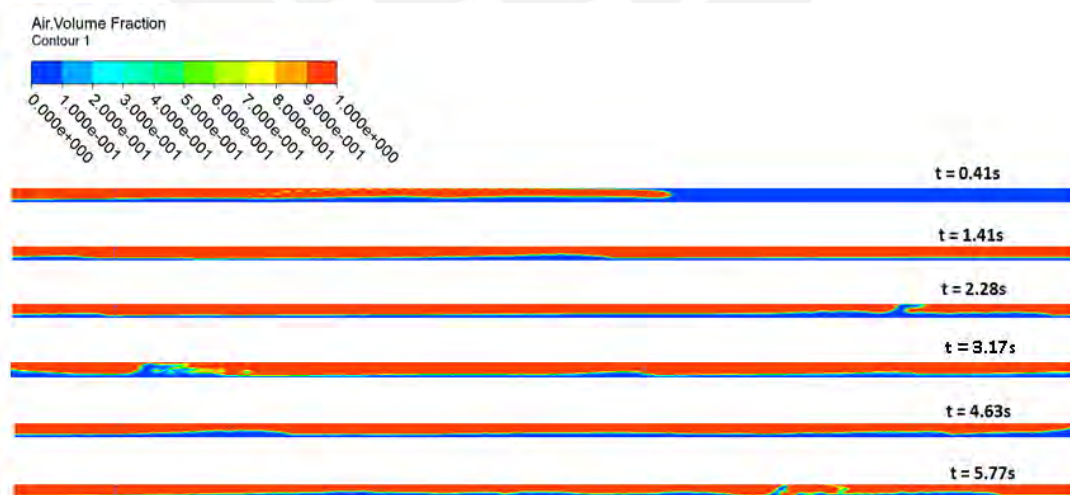


Fig. 2.25 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 3.modelo RANS k- ω SST

En la Fig. 2.26 se puede apreciar la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella se puede apreciar de igual forma que en

los casos anteriores una ligera variación de presión en la sección para los diferentes instantes de tiempo.

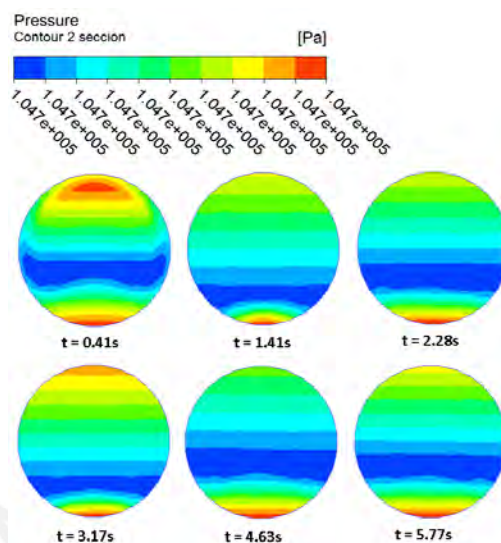


Fig. 2.26 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 3 RANS $k-\omega$ SST

Mientras que la Fig. 2.27 muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería de los puntos 1 y 2 como se muestran en la Fig. 2.8, se puede ver que la tendencia de ambas curvas se superponen unas a otras.

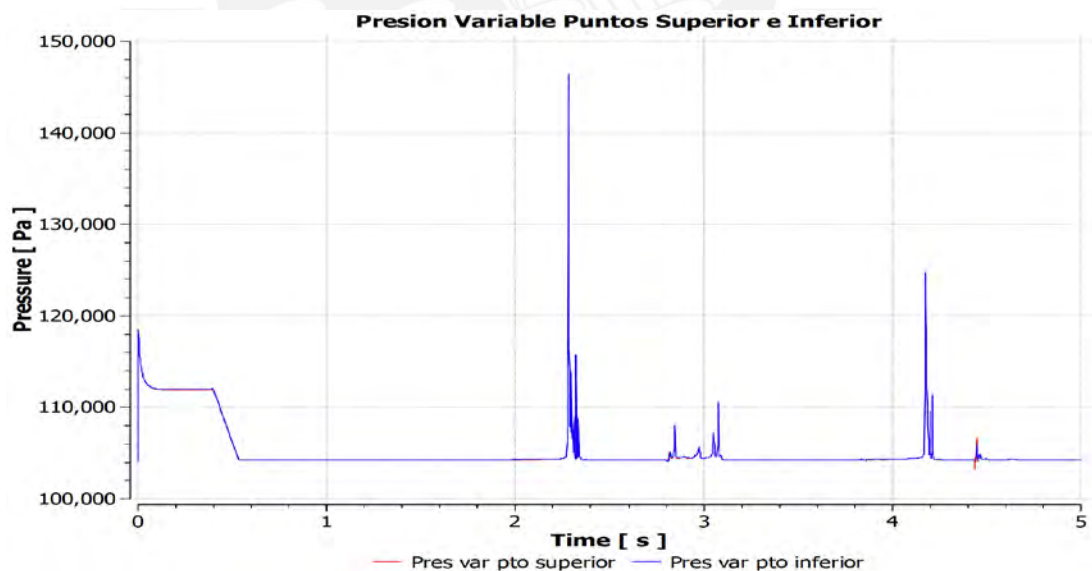


Fig. 2.27 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 3.modelo RANS $k-\omega$ SST

Caso 3 - Modelo LES

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.28, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 3 LES para diferentes instantes de análisis, en ella se puede apreciar que la formación del patrón slug es

similar al del modelo RANS.

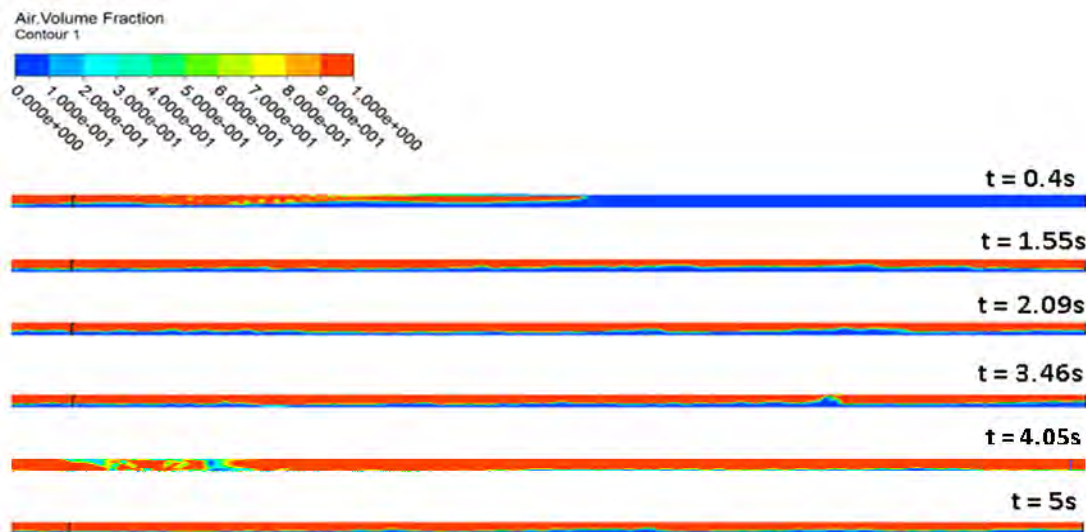


Fig. 2.28 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 3.modelo LES

La Fig. 2.29, muestra la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella como en el caso anterior se puede apreciar una ligera variación de presión en todos los puntos de la sección y para los diferentes instantes de tiempo, ello indicaría que las fases (agua - aire) se encuentran a la misma presión.

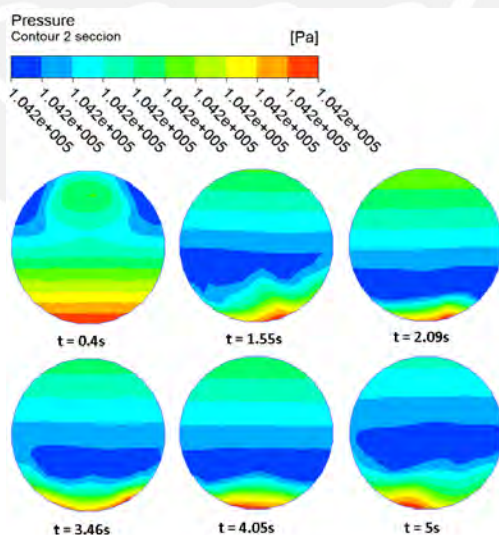


Fig. 2.29 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 3 LES

Mientras que la Fig. 2.30, muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería, en la que se puede apreciar una tendencia similar al del caso RANS sobre todo porque alcanzan valores de presión similares, también se puede ver

que las tendencias de ambas curvas son iguales.

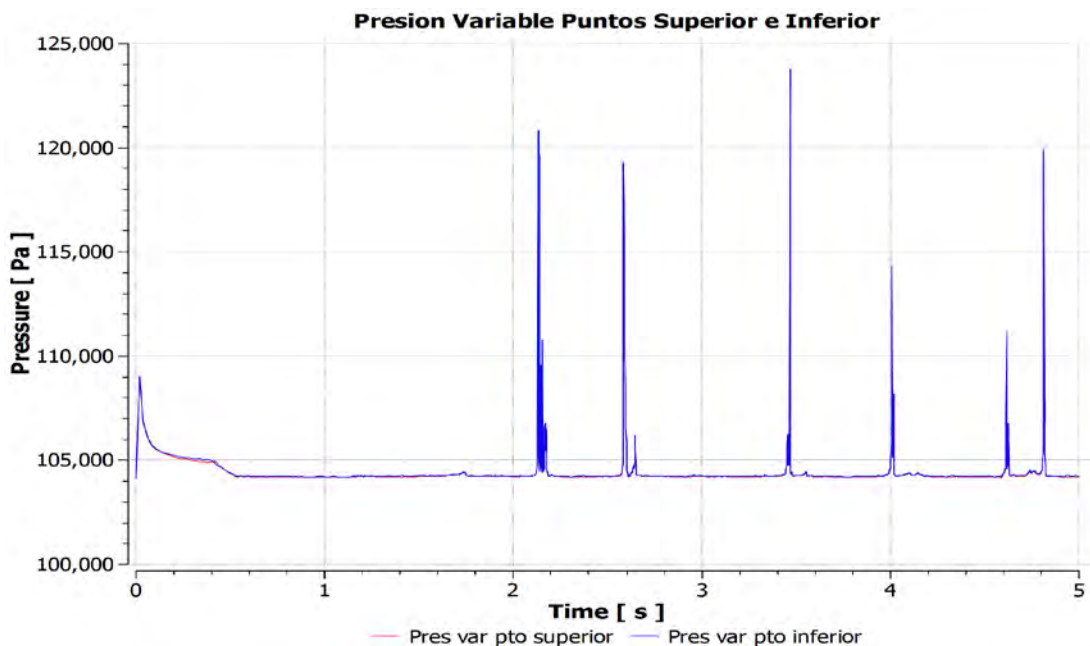


Fig. 2.30 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 3.modelo LES

La Fig. 2.31, muestra la comparación cualitativa entre lo experimental y los resultados numéricos para el caso 3 RANS y LES, ambos ploteos fueron extraídos de los instantes 3.17s y 4.05s respectivamente de las Fig. 2.25 y Fig. 2.28.

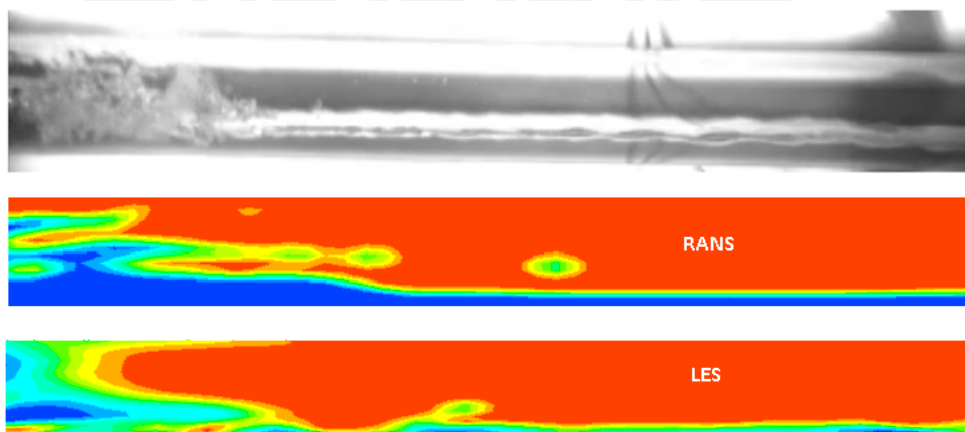


Fig. 2.31 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado de la simulación del caso 3

En la Fig. 2.32, se muestra una comparación entre las presiones del punto superior de la tubería para los casos analizados RANS y LES, en ella se puede apreciar que en ambos casos se logra captar la fluctuación de presión en la pared de la tubería y los

valores en amplitud se encuentran en la misma escala.

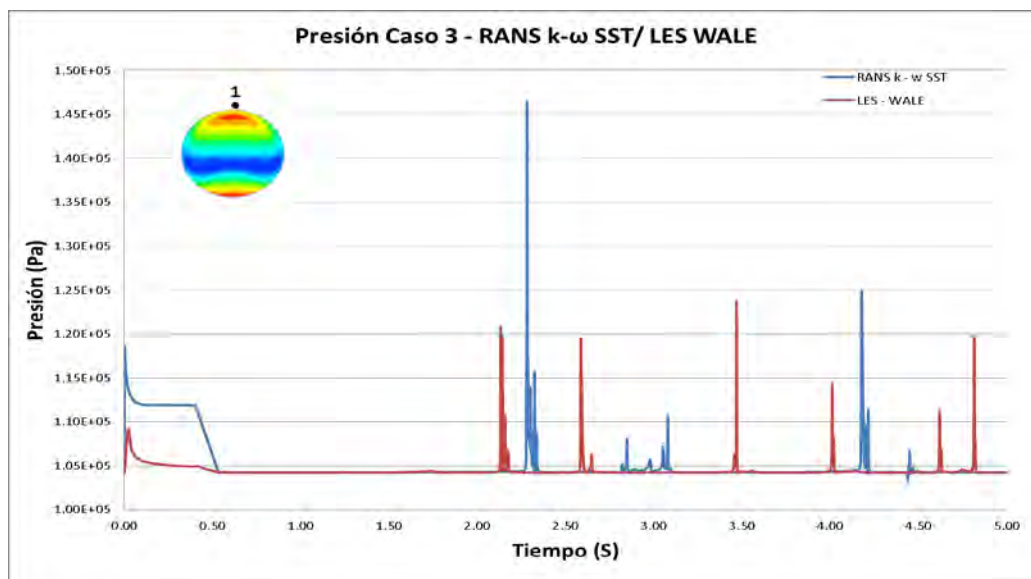


Fig. 2.32 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 3

Caso 4 - Modelo RANS

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.33, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 4 RANS para diferentes segundos de análisis, donde se aprecia un patrón slug bastante definido, esto debido a que las velocidades superficiales son menores y cuya fracción de vacío es el 50%.

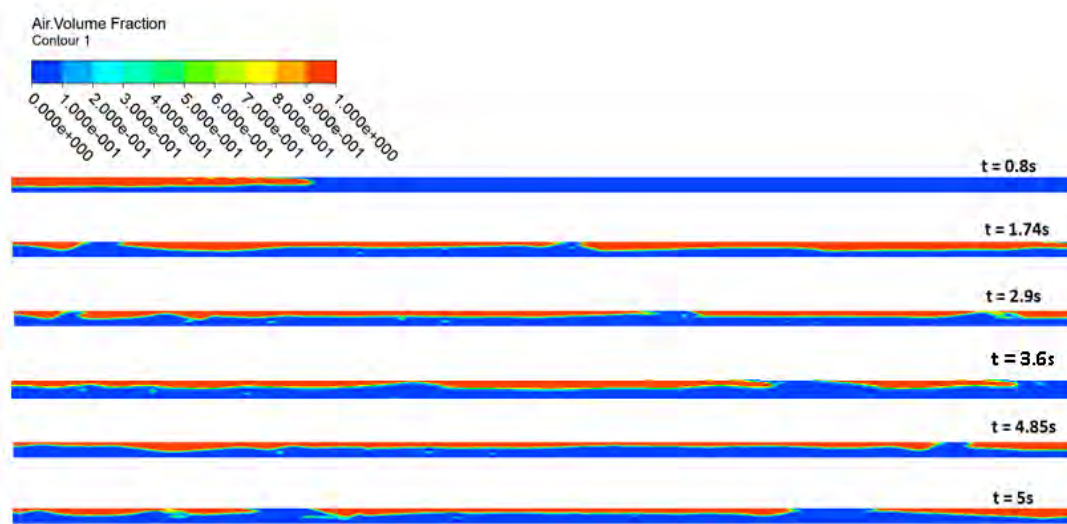


Fig. 2.33 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 4. modelo RANS k-omega SST

En la Fig. 2.34 se puede apreciar la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en la que se puede apreciar una variación no muy

significativa de presión en todos los puntos de la sección y para los diferentes instantes de tiempo.

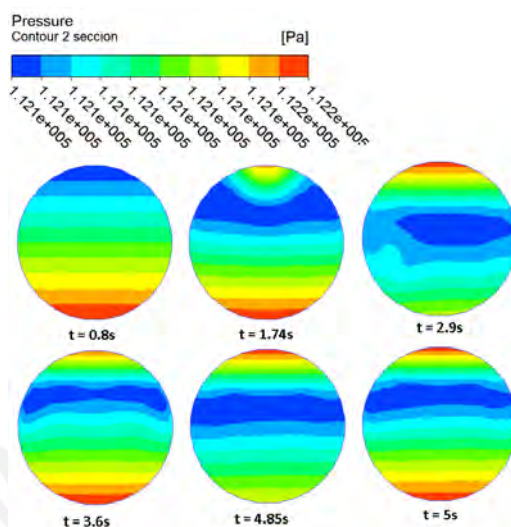


Fig. 2.34 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 4 RANS $k-\omega$ SST

En la Fig. 2.35, muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería (puntos 1 y 2), en ella se puede apreciar que la tendencia de ambas curvas se superponen unas a otras.

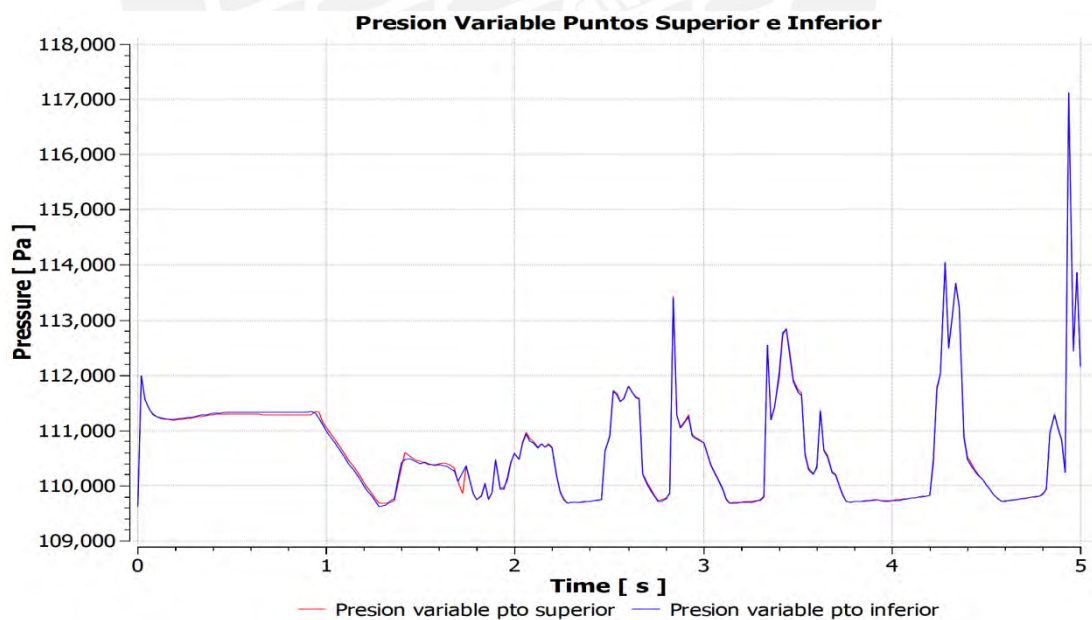


Fig. 2.35 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 4.modelo RANS $k-\omega$ SST

Caso 4 - Modelo LES

Las condiciones de flujo para este caso, son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.36, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 4 LES

para diferentes segundos de análisis, donde se puede ver que la formación del patrón slug es bastante similar al del modelo RANS.

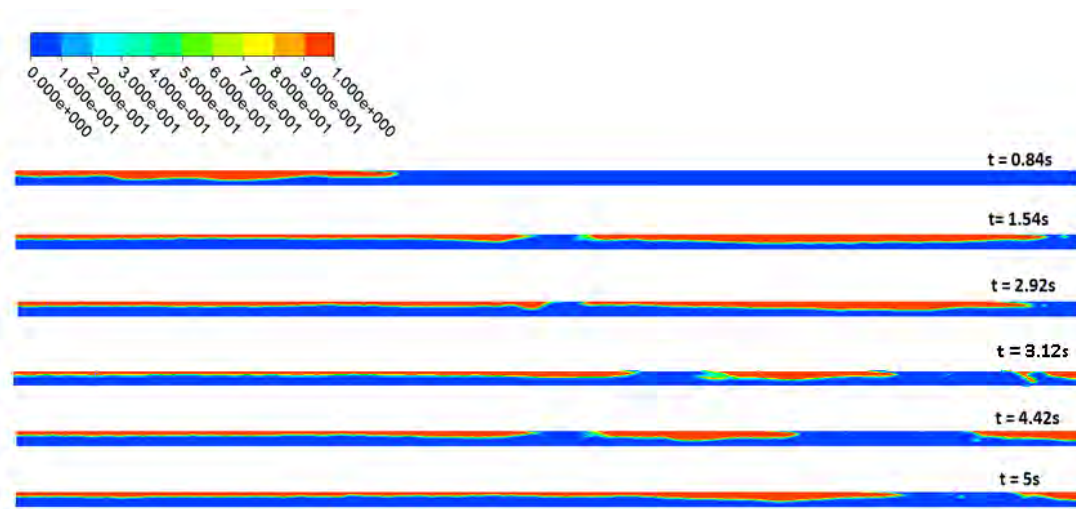


Fig. 2.36 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 4.modelo LES

La Fig. 2.37, muestra la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella como en el caso anterior se puede apreciar una ligera variación de presión en todos los puntos de la sección y para los diferentes instantes de tiempo, ello indicaría que las fases (agua - aire) tienen la misma presión en toda la sección.

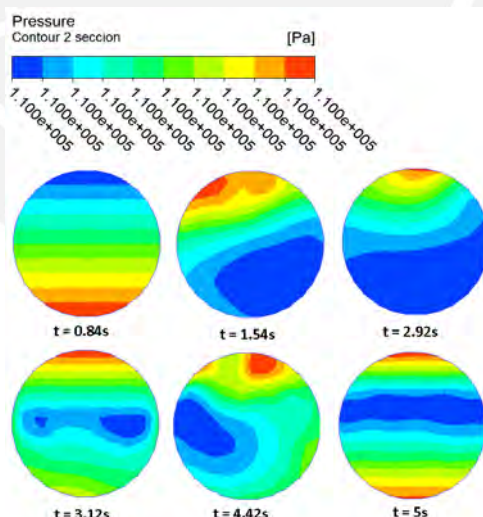


Fig. 2.37 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 4 LES

La Fig. 2.38, muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería, en la que se puede apreciar una tendencia similar al del caso RANS sobre todo porque alcanzan valores de presión similares, se puede ver que la tendencia de

ambas curvas (punto superior y punto inferior) se superponen.

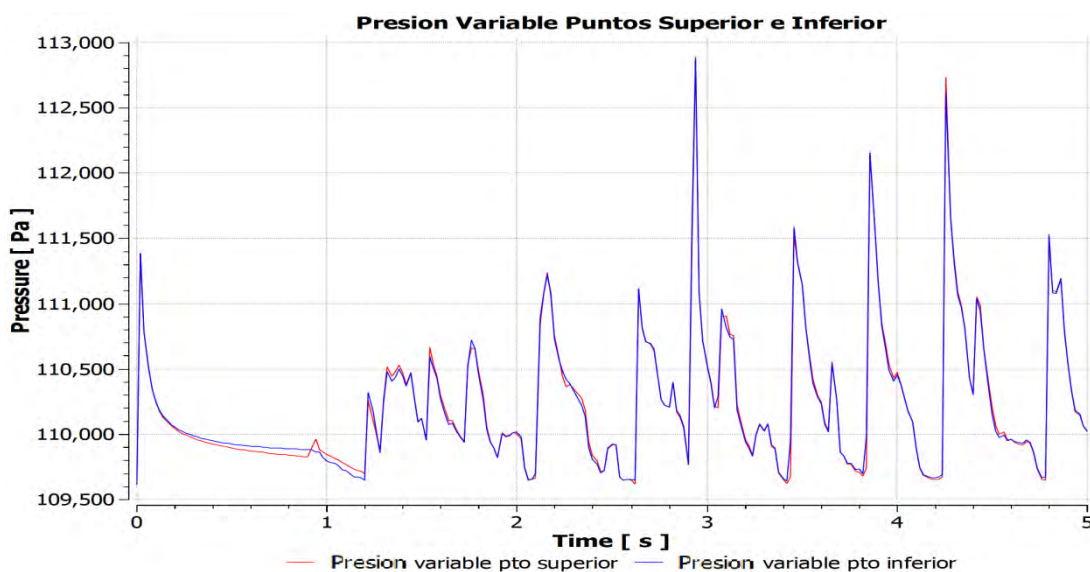


Fig. 2.38 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 4.modelo LES

La Fig. 2.39, muestra la comparación cualitativa entre lo experimental y los resultados numéricos para el caso 4 RANS y LES, ambos plots fueron extraídos de los instantes 3.6s y 3.12s respectivamente de las Fig. 2.28 y Fig. 2.33, las imágenes experimentales fueron compartidas por el autor Luis Enrique Ortíz Vidal para la elaboración de este trabajo.

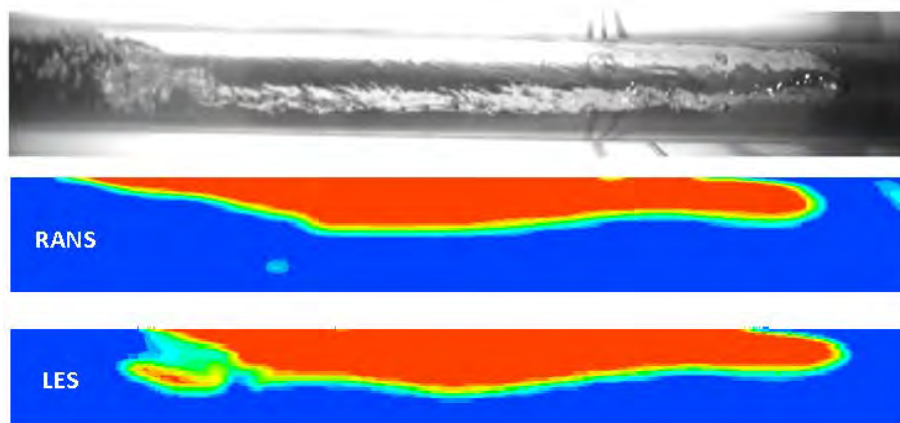


Fig. 2.39 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado de la simulación del caso 4.

En la Fig. 2.40, se muestra una comparación entre las presiones del punto superior de la tubería para los casos analizados RANS y LES, en ella se puede apreciar que en ambos casos se logra captar la fluctuación de presión en la pared de la tubería y los valores en amplitud se encuentran en la misma escala.

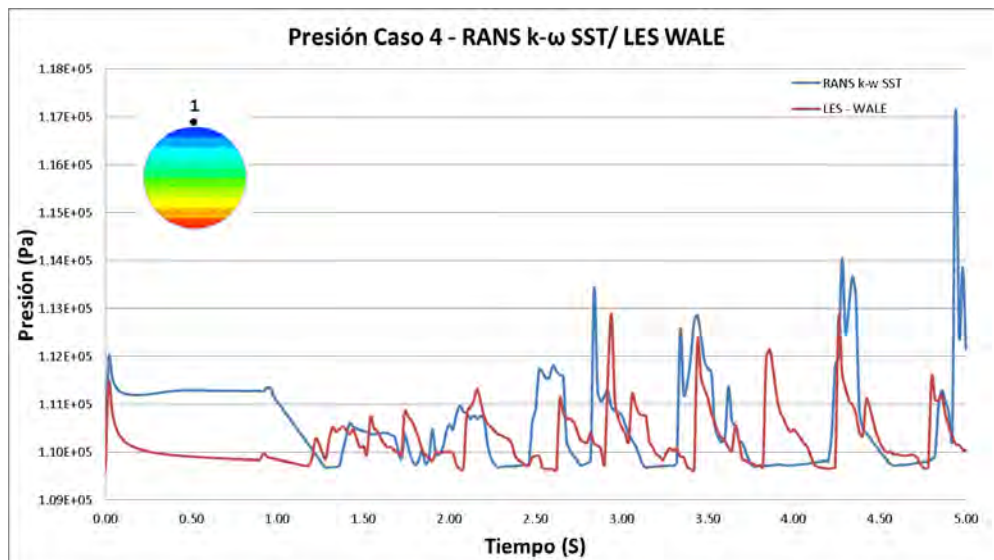


Fig. 2.40 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 4.

Caso 5 - Modelo RANS

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.41, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 5 RANS para diferentes segundos de análisis, donde se aprecia un patrón slug bastante bien definido, debido a que las velocidades superficiales de cada fase son menores y cuya fracción de vacío es también mucho menor (25%).

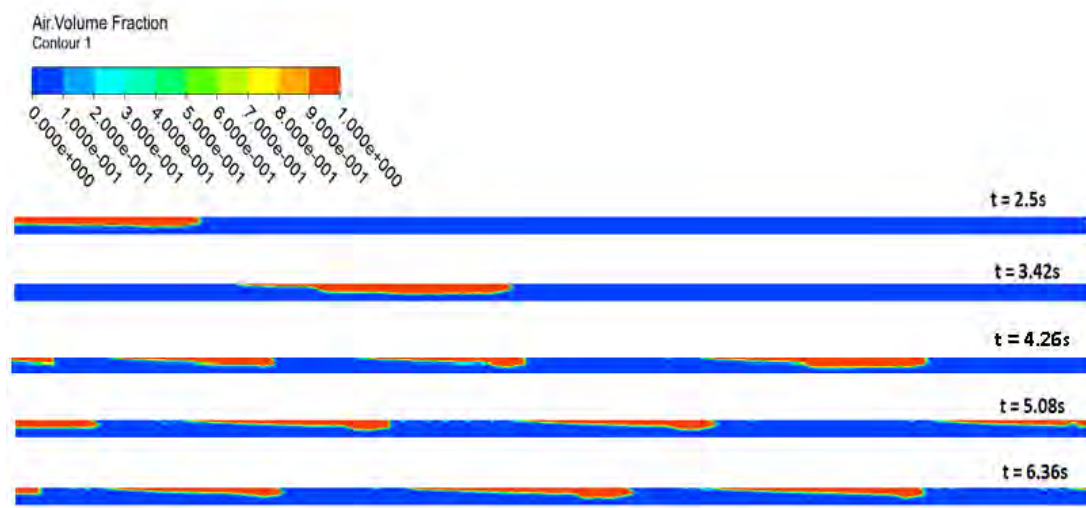


Fig. 2.41 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 5.modelo RANS k- ω SST.

En la Fig. 2.42 se puede apreciar la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en la que se puede apreciar una variación no muy significativa de presión en la sección y para los diferentes instantes de tiempo.

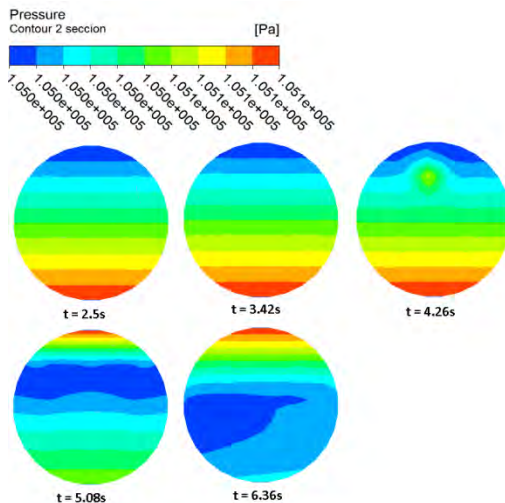


Fig. 2.42 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 5 RANS $k-\omega$ SST

Mientras que la Fig. 2.43, muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería de los puntos 1 y 2, se puede ver que la tendencia de ambas curvas ya no son del todo iguales como en los casos anteriores, esto debido a las velocidades superficiales bajas y la fracción de vacío ya que ahora el porcentaje de agua en la mezcla es mucho mayor afectando la presión en la sección de la tubería.

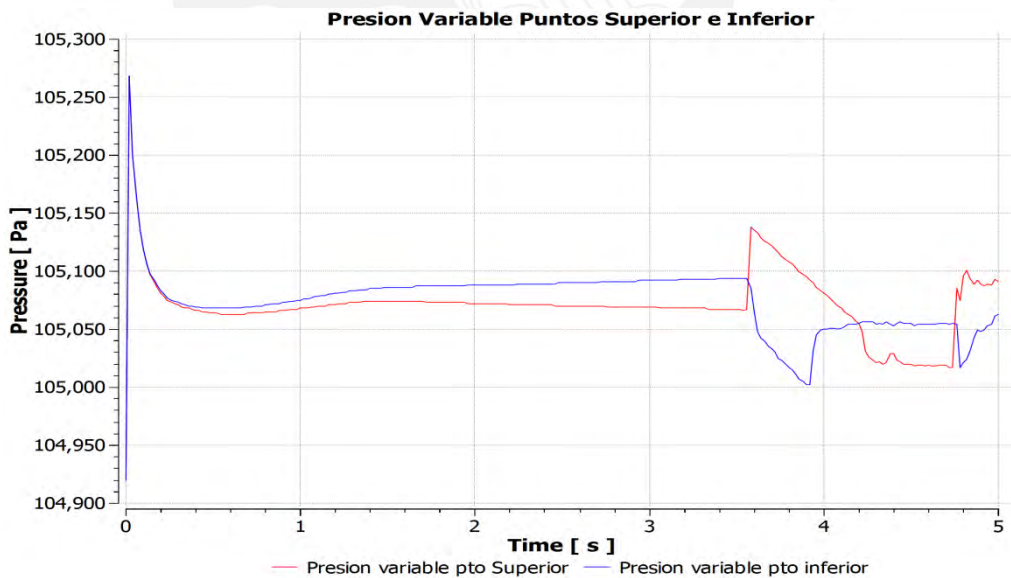


Fig. 2.43 Variación de presión de puntos superior en inferior - Caso 5.modelo RANS $k-\omega$ SST

Caso 5 - Modelo LES

Las condiciones de flujo son las que se muestran en la Tabla 2.16. En la Fig. 2.44, se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 5 LES para diferentes

segundos de análisis, donde se puede ver que la formación del patrón slug es bastante similar al del modelo RANS.

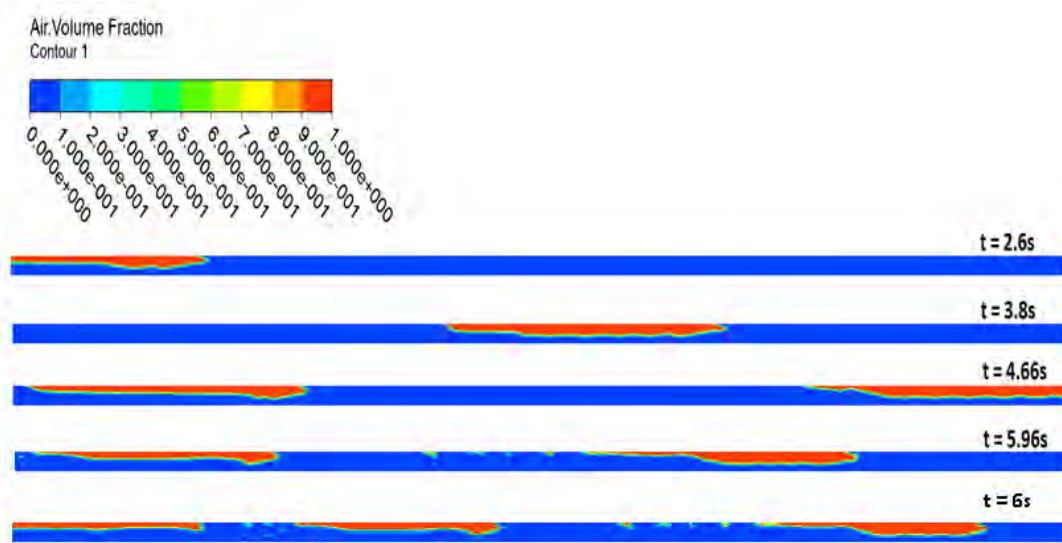


Fig. 2.44 Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 5.modelo LES

La Fig. 2.45, muestra la distribución de presión en la sección de estudio para diferentes instantes de tiempo, en ella se puede apreciar una ligera variación de presión en todos los puntos de la sección y para los diferentes instantes de tiempo, ello indicaría que las fases (agua - aire) tienen la misma presión en toda la sección.

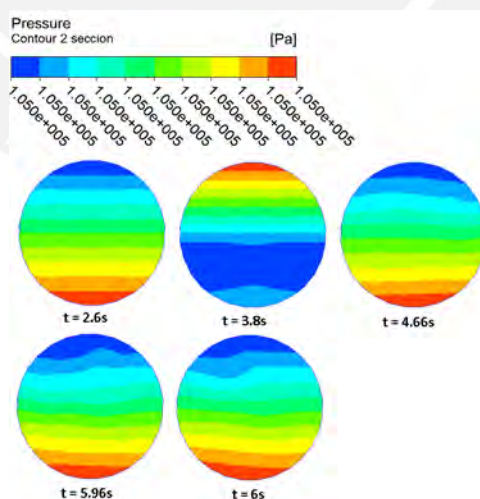


Fig. 2.45 Resultados de presión en la sección de estudio Caso 5 LES

La Fig. 2.46, muestra los resultados de la presión variable del fluido en la pared de la tubería, en la que se puede apreciar una tendencia similar al del caso RANS sobre todo porque alcanzan valores de presión similares, se puede ver de igual forma que

en el caso RANS, la tendencia de ambas curvas (punto superior y punto inferior) son diferentes.

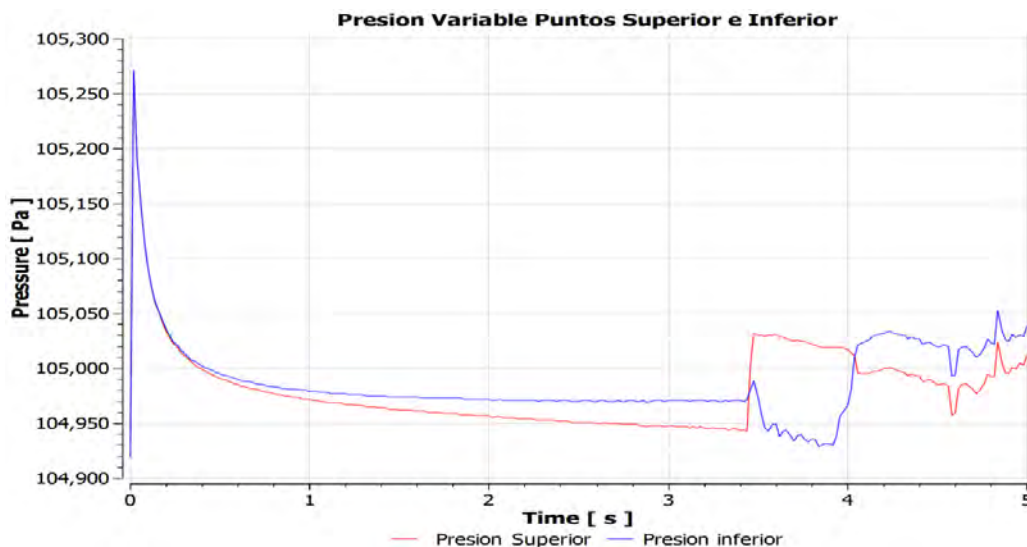


Fig. 2.46 Variación de presión de puntos superior e inferior - Caso 5.modelo LES

La Fig. 2.47, muestra la comparación cualitativa entre lo experimental y los resultados numéricos para el caso 3 RANS y LES, ambos plots fueron extraídos de los instantes 4.26s y 6s respectivamente de las Fig. 2.41 y Fig. 2.44, las imágenes experimentales fueron compartidas por el autor Luis Enrique Ortíz Vidal para la elaboración de este trabajo.

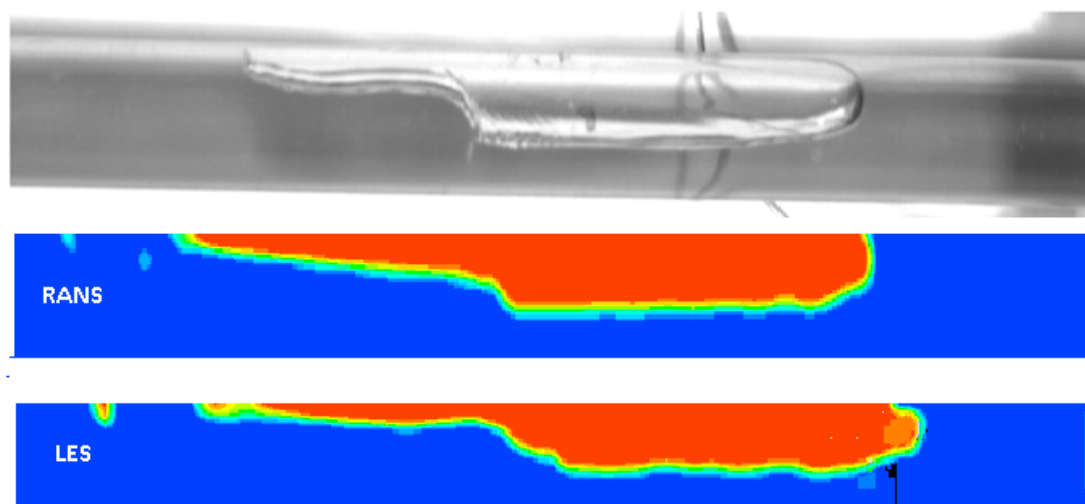


Fig. 2.47 Comparación cualitativa entre lo experimental (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)) y el resultado de la simulación del caso 5

En la Fig. 2.48, se muestra una comparación entre las presiones del punto superior de

la tubería para los casos analizados RANS y LES, en ella se puede apreciar que en ambos casos se logra captar la fluctuación de presión en la pared de la tubería y los valores en amplitud se encuentran en la misma escala.

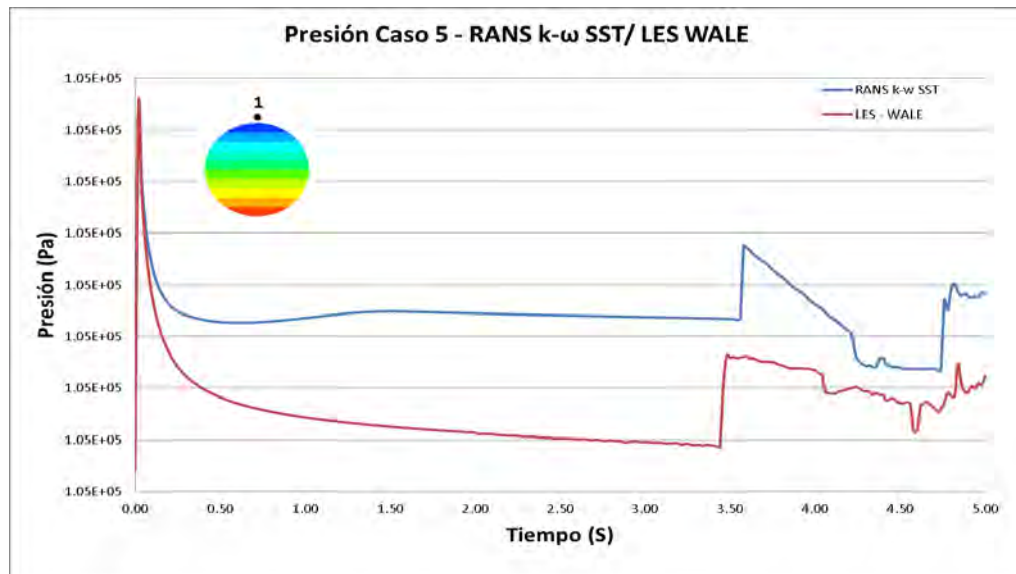


Fig. 2.48 Comparación de resultados RANS y LES - Caso 5

Se mostraron los resultados de los casos de estudios en ambos modelos de turbulencia RANS y LES, llegándose a determinar que los modelos RANS al igual que los modelos LES captan adecuadamente el fenómeno, sobre todo la fluctuación de la presión variable en el tiempo en la pared de la tubería y sus valores están en un mismo orden de magnitud, esto avalado con la comparación cualitativa entre los resultados experimentales y los numéricos encontrándose una buena correlación entre ambos métodos, si bien es cierto los modelos LES muestran una mayor sensibilidad en cuanto a la captación de la turbulencia y las fluctuaciones de presión, Cabe señalar que el costo computacional del modelo LES es muy superior comparado con el modelo RANS, corroborando de esta forma lo indicado en la literatura sobre el tema. Por todo lo mencionado anteriormente, se decide seleccionar el modelo RANS como el modelo de turbulencia más adecuado para proseguir con el análisis FSI.

CAPÍTULO 3

MODELAMIENTO DE LA VIBRACION INDUCIDA POR FLUJO

En este capítulo se presentará y analizará en conjunto el comportamiento fluidodinámico y estructural del sistema. Esto debido a que las fluctuaciones de presión originado por el flujo turbulento al interior de la tubería, se transfiere a la pared de la tubería como cargas actuantes variantes en el tiempo, originando pequeñas deformaciones sobre la estructura.

Para poder apreciar el fenómeno de la vibración inducida por flujo, se necesita de dos campos, el campo de fluidos y el campo estructural, el primero fue desarrollado enteramente en el Capítulo II, y el campo estructural es el que se verá a continuación

3.1. Simulación numérica de la estructura (tubería)

El modelo FEM para la estructura requiere también de la definición de una geometría discretizada al igual que en el fluido, y de la misma manera, se deben especificar las condiciones de contorno y las propiedades del material de la tubería.

La configuración de simulación de la parte estructural es más simple en comparación con la de fluidos. El trabajo de configuración consiste en definir las condiciones de contorno, las cargas y el procedimiento de análisis.

3.1.1 Geometría y condiciones de contorno para la estructura.

El modelo geométrico de la tubería se muestra en la Fig. 3.1, en este tramo se realizará el estudio propiamente dicho de la interacción fluido estructura (FSI), por el cual, las cargas dinámicas originadas por la turbulencia de flujo bifásico, es

transferida a la pared de la tubería, originando pequeñas deformaciones o desplazamientos en la pared. Si esta deformación es lo suficientemente apreciable, repercutirá también en el comportamiento dinámico del fluido. este tramo de tubería tiene una longitud de 1530 mm, con un diámetro interior coincidente con el diámetro utilizado para el fluido igual a 20.4 mm y un diámetro exterior igual a 26.7 mm.

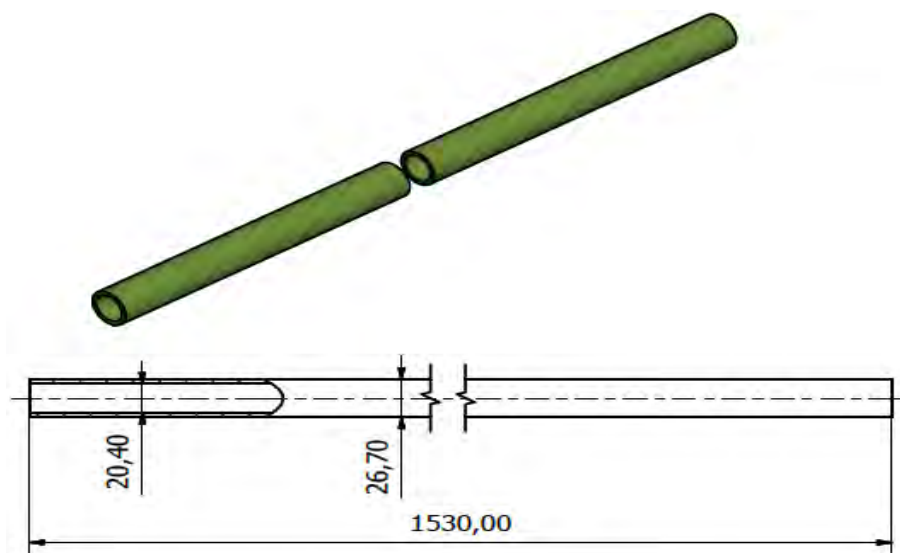


Fig. 3.1 Modelo geométrico de la tubería

Para el mallado de la tubería se hizo uso de la herramienta de mallado ICEM CFD, cuyo resultado se muestra en la Fig. 3.2.

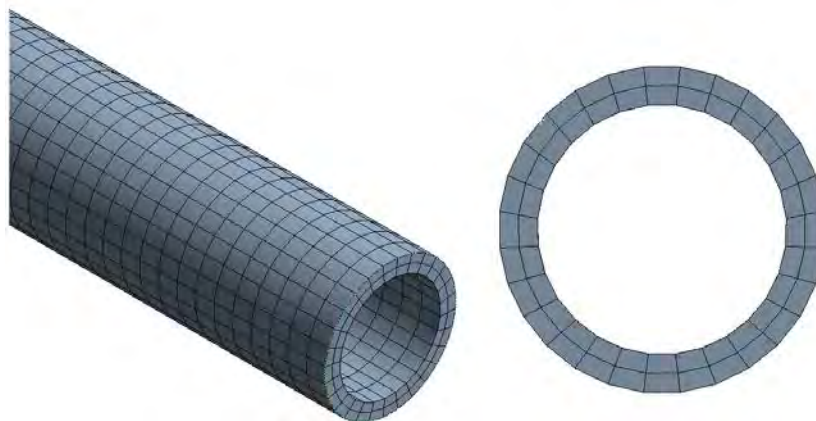


Fig. 3.2 Mallado de la tubería con ICEM CFD.

De forma similar al dominio del fluido, la discretización del modelo geométrico de la tubería se realizó con una malla hexagonal estructurada, con una adecuada distribución de elementos en la sección y a lo largo de la tubería, cuyas estadísticas se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Estadísticas del mallado de tubería.

Característica	Descripción		
Número total de elementos	45808		
Número total de nodos	34272		
Calidad	Mínimo=0.837204	Máximo = 1	Promedio=0.9304534
Relación de Aspecto	Mínimo=0.418507	Máximo=0.7949	Promedio=0.5600140
Calidad de Ortogonalidad	Mínimo=0.981993	Máximo=1	promedio=0.993294

3.1.2 Configuración del modelo estructural

Se considera al modelo estructural como elástico lineal en la que no hay grandes desplazamientos y tampoco efectos de la temperatura.

➤ Definición del material de la tubería

En esta sección definimos el material de la tubería e introducimos sus propiedades térmicas y mecánicas como se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Propiedades térmicas y mecánicas de la tubería.

Parámetro
Densidad (kg/m ³)
Coefficiente de expansión térmica (k ⁻¹)
Módulo de elasticidad (MPa)
Módulo de Poisson
Módulo de corte (Pa)
Resistencia a la tensión (Mpa)
Resistencia a la compresión (Mpa)

➤ Condiciones iniciales y de contorno

La Fig. 3.3, muestra la configuración general del miembro estructural. Se restringen los desplazamientos en las tres direcciones en las secciones transversales de ambos extremos de la tubería considerándolos empotrados y las fuerzas de fluido calculadas se aplican sobre la superficie de la tubería que se describe como una interfaz sólido – fluido.

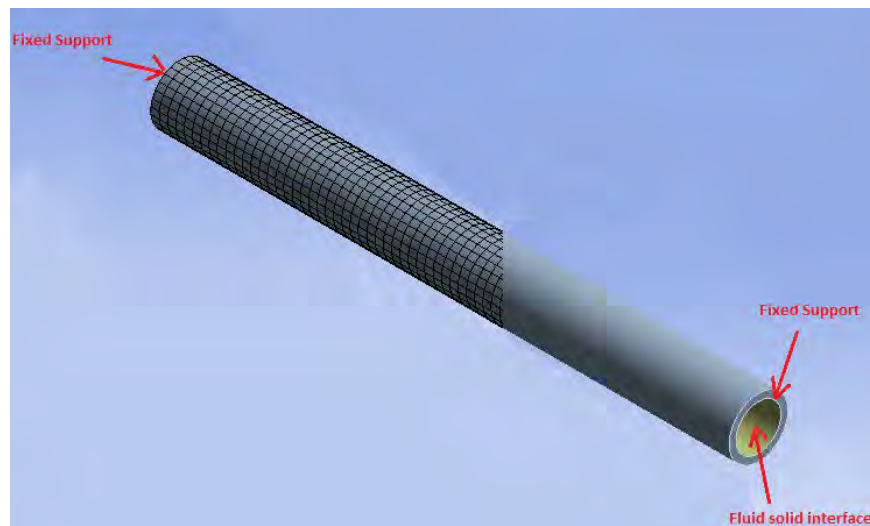


Fig. 3.3 Condiciones de contorno del problema estructural

La presión que el fluido ejerce sobre la pared de la tubería se obtiene a partir de la simulación fluidodinámica, los valores de la presión se importan para cada paso de tiempo, a través de la interface entre el fluido y la tubería.

3.2. Análisis modal de la tubería

En el presente acápite se verá el análisis modal del sistema para una tubería vacía y para una tubería conteniendo fluido

3.2.1 Tubería vacía

Es posible encontrar las frecuencias naturales de los primeros modos de vibración transversal del sistema considerando la tubería doblemente empotrada, despreciando los efectos de la inercia de rotación y deformación por cizallamiento. Es así que las frecuencias naturales ω_n de vibración transversal según Rao [56], pueden ser expresadas por:

$$\omega_n = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \quad (35)$$

Donde E e I son el módulo de elasticidad y el momento de inercia de área respectivamente, L la longitud entre empotramientos, ρ la densidad, A el área de la sección transversal, el producto ρA es la densidad lineal de la sección transversal de la tubería. La solución para las cuatro primeras frecuencias naturales para una tubería doblemente empotrada, está dada por:

$$\beta_n L = \frac{(2n + 1)\pi}{2} \quad (36)$$

Donde n es el número de modos de vibración que reemplazando en la ec 46, se obtiene:

$$\begin{aligned} \beta_1 L &= 4.7300 \\ \beta_2 L &= 7.8532 \\ \beta_3 L &= 10.9956 \\ \beta_4 L &= 4.7300 \end{aligned} \quad (37)$$

Reemplazando las propiedades del sistema como son el diámetro interno $d = 0.0204 \text{ m}$, el diámetro externo $D = 0.0267 \text{ m}$, $E = 2.4 \text{ GPa}$, $\rho A = 0.336 \text{ kg/m}$ y $L = 1.53 \text{ m}$ y las ecuaciones 37 en la ec 35, se obtienen las frecuencias naturales teóricas siguientes:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 16.46 \text{ Hz} \\ \omega_2 &= 45.34 \text{ Hz} \\ \omega_3 &= 88.87 \text{ Hz} \\ \omega_4 &= 146.91 \text{ Hz} \end{aligned} \quad (38)$$

También fue posible encontrar las frecuencias naturales y sus respectivos modos de vibración mediante simulación numérica, para ella se consideraron las propiedades de material de la tubería y las condiciones de contorno, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3.3 y Fig. 3.4.

Tabla 3.3 Frecuencias naturales de simulación

Frecuencias naturales
$\omega_1 = 16.62 \text{ Hz}$
$\omega_2 = 45.62 \text{ Hz}$
$\omega_3 = 88.88 \text{ Hz}$
$\omega_4 = 145.79 \text{ Hz}$

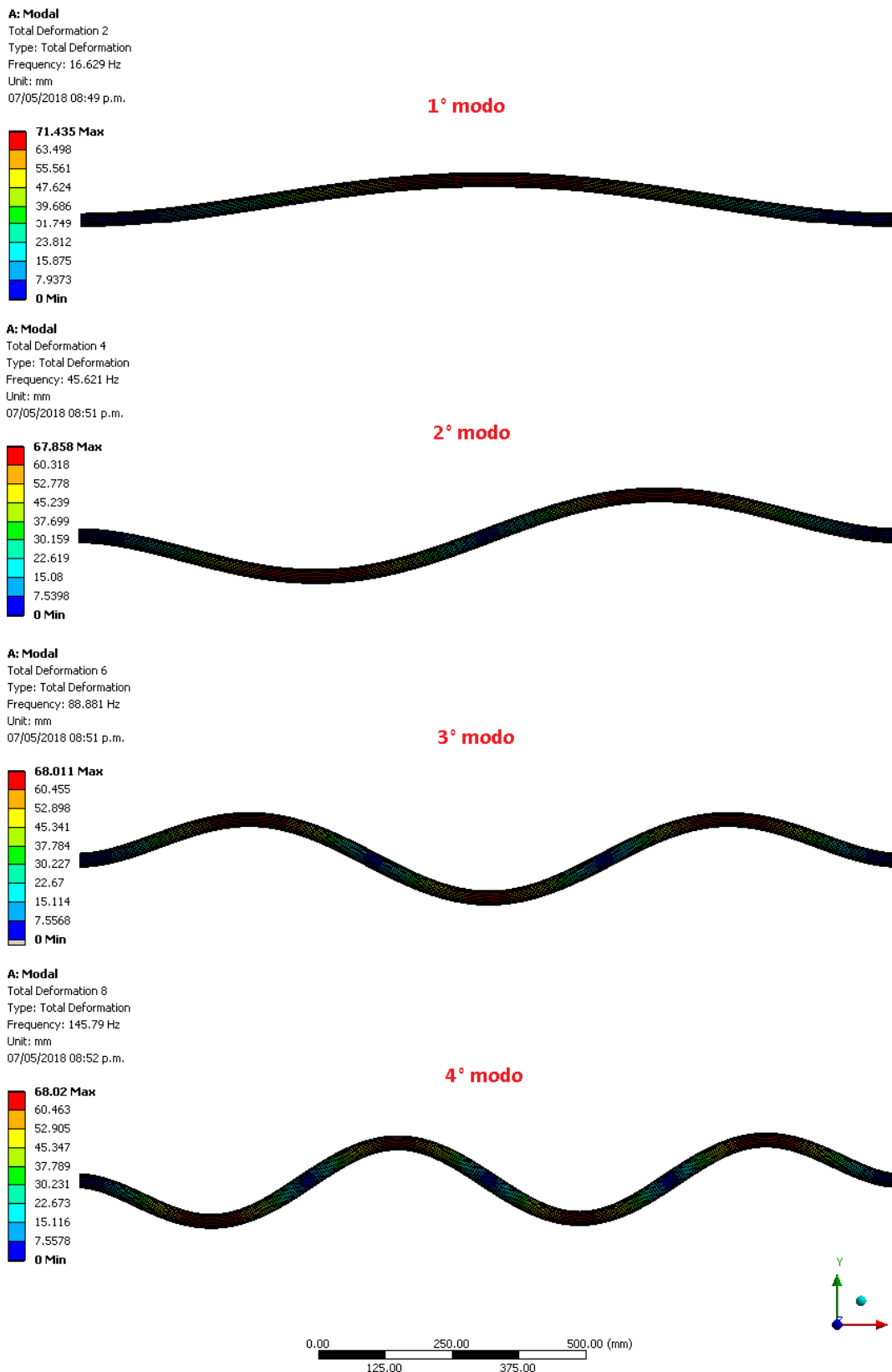


Fig. 3.4 Frecuencias naturales y modos de vibración de la tubería.

De lo visto anteriormente, es posible realizar una comparación entre los resultados

obtenidos teóricamente y los obtenidos mediante simulación con los resultados experimentales reportados por L. E Ortiz [55] (ANEXO 4). Como se puede ver se encuentra una muy buena correspondencia entre los resultados mostrados por ambos métodos (analítico y numérico) con los resultados experimentales.

3.2.2 Tubería con fluido

Para el presente análisis, se consideraron los 3 primeros casos de los cinco vistos en el estudio de fluidos, estos tres casos consideran fracciones volumétricas del 50%, 75% y 95% respectivamente. Por ello para encontrar las frecuencias naturales se consideraron las condiciones de contorno, las propiedades del material de la tubería y fluido y la fracción volumétrica del mismo.

A continuación se muestran las frecuencias naturales de los primeros 4 modos de vibración. Los modos de vibración son similares a los vistos en el acápite anterior.

Caso 1 ($\beta = 50\%$)

Tabla 3.4 Frecuencias naturales caso 1

Frecuencias naturales
$\omega_1 = 16 \text{ Hz}$
$\omega_2 = 42.15 \text{ Hz}$
$\omega_3 = 80.63 \text{ Hz}$
$\omega_4 = 131.18 \text{ Hz}$

Caso 2 ($\beta = 75\%$)

Tabla 3.5 Frecuencias naturales caso 2

Frecuencias naturales
$\omega_1 = 16.30 \text{ Hz}$
$\omega_2 = 44.30 \text{ Hz}$
$\omega_3 = 85.93 \text{ Hz}$
$\omega_4 = 140.59 \text{ Hz}$

Caso 3 ($\beta = 95\%$)

Tabla 3.6 Frecuencias naturales caso 3

Frecuencias naturales
$\omega_1 = 16.94 \text{ Hz}$
$\omega_2 = 46.24 \text{ Hz}$
$\omega_3 = 89.85 \text{ Hz}$
$\omega_4 = 147.15 \text{ Hz}$

Como se puede apreciar, las frecuencias naturales ω_n van incrementándose gradualmente al incrementarse también la fracción de vacío β , ya que a mayor masa de agua presente en el sistema, se tendrá un valor de frecuencia natural menor.

3.3. Simulación numérica del problema de interacción fluido estructura FSI

Como se mostró en el capítulo II, se ha desarrollado todo lo concerniente al campo de fluidos, en el acápite anterior se desarrolló también todo lo concerniente al campo estructural. Es en esta sección que se presentará la interacción de ambos campos a la vez, la llamada interacción fluido estructura FSI. El tiempo de simulación para todos los casos FIV es de 5 segundos

3.3.1 Configuración del modelo FSI

El modelo geométrico para el análisis FSI es la combinación de los modelos geométricos utilizados para los análisis de fluido y estructural, el cual se puede apreciar en la Fig. 3.5. Asimismo, el mallado y las condiciones de contorno son los mismos para cada campo que los descritos en sus acápites correspondientes. Como se puede apreciar, la zona de contacto entre el fluido y la tubería es de 1530 mm, la cual se configura en el módulo System Coupling.

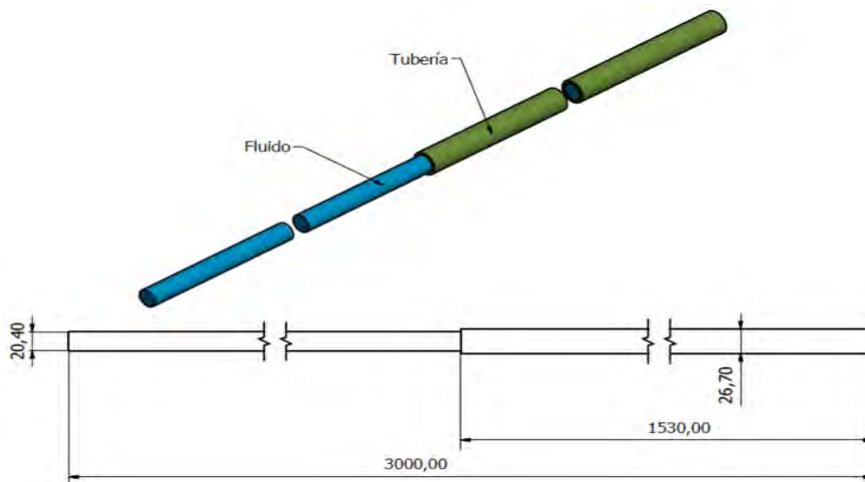


Fig. 3.5 Modelo geométrico del análisis FSI.

De acuerdo a L. E. Ortíz [12], el tramo de tubería utilizado para estudiar el comportamiento vibratorio de la tubería es 1530 mm. En este tramo de la tubería se realiza el estudio de la interacción fluido estructura (FSI), por el cual, las cargas dinámicas originadas por la turbulencia de flujo bifásico, son transferidas a la pared de la tubería, originando pequeñas deformaciones o desplazamientos en la pared de la misma debido a la fricción del fluido con la pared. Si esta deformación es lo suficientemente apreciable, repercutirá también en el comportamiento dinámico del fluido.

Es importante conocer las propiedades mecánicas y térmicas del material de la tubería, en este caso el material es PVC transparente Schedule 40 (Anexo 1). En la Fig. 3.6 y Tabla 3.7, se muestran las dimensiones y propiedades térmicas y mecánicas de este material.

Schedule 40					
Pipe Size (in.)	O.D.	Avg. I.D.	Min. Wall	Nominal Wt./ft.	Max. W.P. PSI
1/4	0.540	0.344	0.088	0.086	390
3/8	0.675	0.473	0.091	0.115	310
1/2	0.840	0.602	0.109	0.170	300
3/4	1.050	0.804	0.113	0.226	240
1	1.315	1.029	0.133	0.333	220
1-1/4	1.660	1.360	0.140	0.450	180
1-1/2	1.900	1.590	0.145	0.537	170
2	2.375	2.047	0.154	0.720	140
2-1/2	2.875	2.445	0.203	1.136	150
3	3.500	3.042	0.216	1.488	130
3-1/2	4.000	3.521	0.226	1.789	120
4	4.500	3.998	0.237	2.118	110
6	6.625	6.031	0.280	3.733	90
6x1/8*	6.625	6.335	0.125	1.647	45
8	8.625	7.942	0.322	5.619	80

Fig. 3.6 Especificaciones tubería PVC Schedule 40, Anexo 1

Tabla 3.7 Propiedades térmicas y mecánicas de tubería PVC Schedule 40

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (ρ)	1400 kg/m ³
Coefficiente de expansión térmica	7E-05 K ⁻¹
Módulo de elasticidad (E)	2942 MPa
Coefficiente de Poisson	0.4
Módulo de corte (G)	1.05E+09 Pa
Esfuerzo a la tracción	49 MPa
Esfuerzo a la compresión	60 MPa
Esfuerzo último a la tensión	52 MPa

El acoplamiento de sistema es una herramienta utilizada para integrar diferentes solucionadores de dominio en simulaciones numéricas de fenómenos multifísicos. El principio de funcionamiento y el procedimiento del acoplamiento del sistema se muestran en la Fig. 3.7, que representa la configuración del análisis FSI, utilizando el acoplamiento del sistema con Fluent y ANSYS mechanical como solucionadores numéricos. Inicialmente, se ejecutan las configuraciones de simulación de ambos solucionadores que se indicaron en las etapas anteriores, y luego el componente de configuración de los solucionadores se integra en el componente de configuración del acoplamiento del sistema como se muestra. Esto hace que el acoplamiento del sistema sincronice las condiciones numéricas de ambos solucionadores e identifique la interfaz fluido estructura.

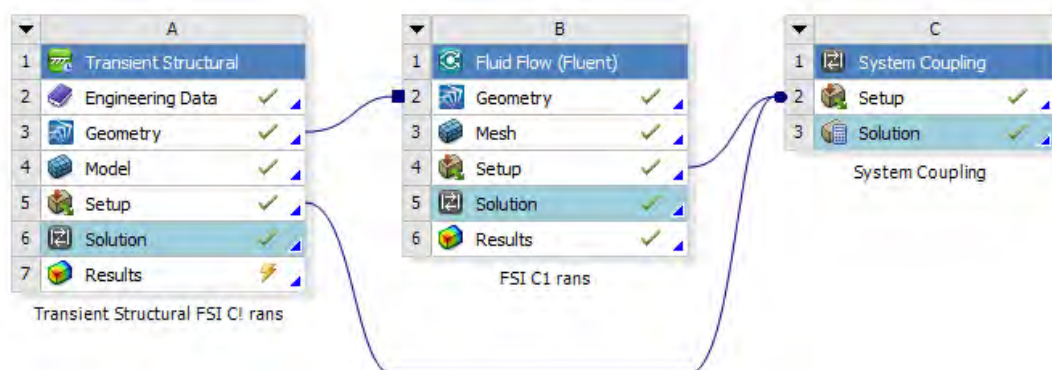
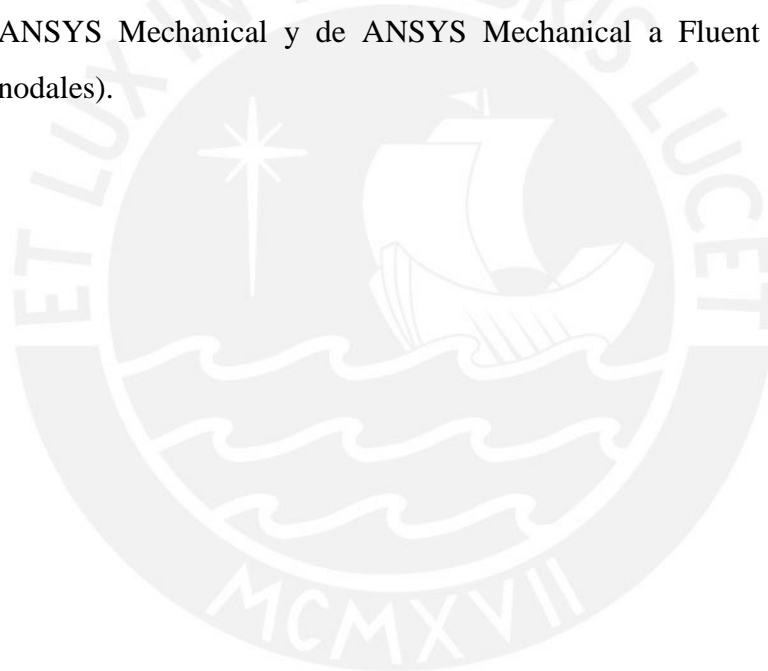


Fig. 3.7 Esquema de análisis FSI usando la herramienta system coupling.

El siguiente paso es asignar las configuraciones de simulación en el acoplamiento del sistema. Esto consta del siguiente procedimiento.

- *Configuración de análisis o system coupling*: esta configuración incluye el paso de tiempo (time step size), el tiempo de finalización (end time) y el número máximo y mínimo de iteración de acoplamiento para cada paso de tiempo. Generalmente, aparte de la iteración de acoplamiento para cada paso de tiempo, la información requerida se alimenta automáticamente al acoplamiento del sistema una vez que los solucionadores están acoplados.
- *Transferencia de datos o data transfer*: Ésta es la parte más importante del acoplamiento que incluye y gestiona la secuencia de transferencia de datos entre los dos solucionadores numéricos, en ella se muestra la transferencia de datos para el análisis de acoplamiento bidireccional. El análisis de acoplamiento bidireccional se realiza transfiriendo datos (fuerzas) de Fluent a ANSYS Mechanical y de ANSYS Mechanical a Fluent (desplazamientos nodales).



CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS IMPLEMENTADOS

Una vez realizado el estudio y configuración numérica del fenómeno de la vibración inducida por flujo FIV, se muestran los resultados numéricos obtenidos de los casos de estudio seleccionados, como son los esfuerzos, desplazamientos, aceleraciones y frecuencias. Posteriormente se procede a la validación de los mismos con trabajos experimentales referidos en la literatura disponible. Para evaluar el comportamiento dinámico de la tubería, que es el objeto de estudio de la presente investigación, para ello se tomaron los tres primeros casos, de los cinco descritos en el análisis del fluido, pues el análisis FSI es muy demandante en recursos computacionales, el tiempo de simulación para cada caso fue de 5 segundos.

4.1. Resultados del estudio numérico de los casos FIV seleccionados.

Para evaluar el comportamiento dinámico de la tubería, que es el objeto de estudio de la presente investigación, se toman los tres primeros casos, de los cinco descritos en el análisis del fluido, pues el análisis FIV es muy demandante en recursos computacionales, requiriendo prolongados tiempos de simulación. Como se mencionó anteriormente, fue el modelo de turbulencia RANS el que se determinó para el presente estudio FIV y el tiempo de simulación para cada caso fue de cinco segundos cuyos resultados se muestran a continuación.

Simulación FIV Caso 1

Como se vio en los capítulos II y III, cada caso de estudio necesita de sus respectivas condiciones de contorno para el fluido, tanto a la entrada de la tubería, a la salida, en la pared de la tubería y las condiciones de contorno para la estructura, y las propiedades mecánicas, térmicas y físicas de la estructura y fluidos. Es así que en la Fig. 4.1 se muestra la distribución de esfuerzos a lo largo de la longitud de la tubería, en ella se puede apreciar que la tubería se encuentra a aproximadamente 0.32 MPa, el cual es un valor que está muy por debajo de su esfuerzo de fluencia de 49MPa dada por el material de la tubería.

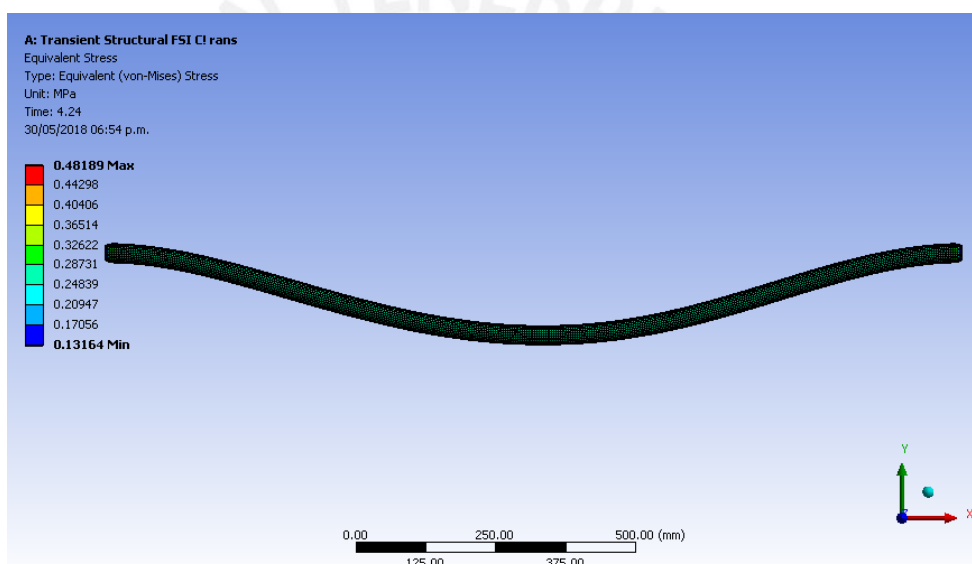


Fig. 4.1 Esfuerzos en la tubería - Caso 1

En la Fig. 4.2 se pueden apreciar los desplazamientos de la tubería para el instante de tiempo de 1 seg, llegando a un valor mínimo de $-10 \mu\text{m}$ y un valor máximo de $48 \mu\text{m}$ aproximadamente.

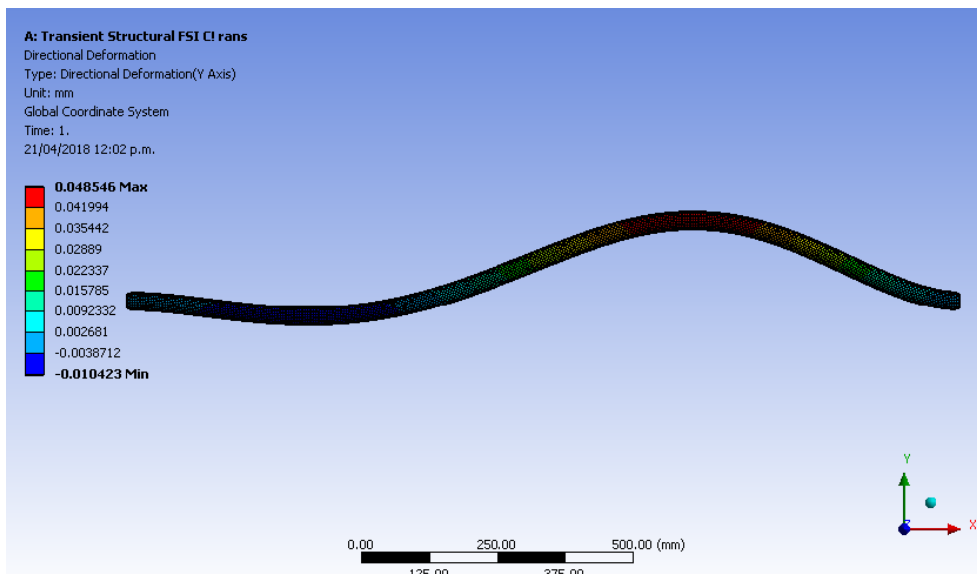


Fig. 4.2 Desplazamientos de la tubería (t = 1 s) – Caso 1.

En la Fig. 4.3 se pueden apreciar los desplazamientos en el instante de tiempo de 3 seg, llegando a un valor mínimo de -53 μm y un valor máximo de 2 μm aproximadamente.

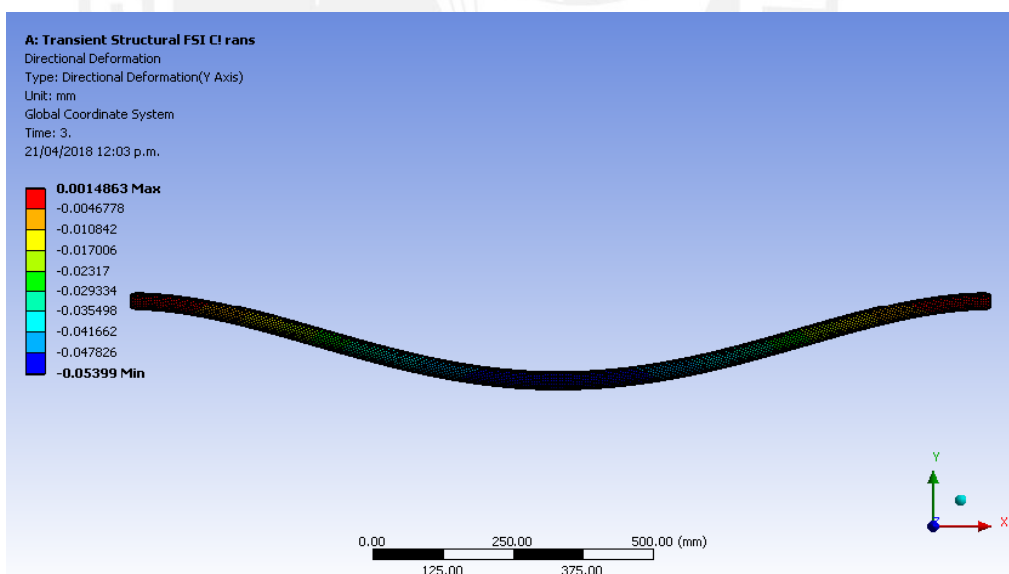


Fig. 4.3 Desplazamientos de la tubería (t = 3 s) – Caso 1.

En la Fig. 4.4 se puede apreciar el desplazamiento del punto medio de la tubería en función del tiempo. Existe una perturbación significativa (ruido) en la parte inicial de la curva, que se debe a las condiciones iniciales, por el cual, la tubería inicialmente se encuentra llena de agua y luego el aire ingresa en la tubería, hasta que el sistema se estabiliza.



Fig. 4.4 Desplazamiento del punto medio de la tubería – Caso 1.

Se hace necesario considerar únicamente la parte estabilizada del fenómeno para obtener un resultado más adecuado, para ello se ha eliminado el intervalo de tiempo inicial que corresponde a 1.3 s aproximadamente, que da lugar a la gráfica mostrada en la Fig. 4.5. En esta gráfica se puede apreciar un comportamiento más uniforme, con valores que oscilan entre $-65 \mu\text{m}$ y $-30 \mu\text{m}$, para una amplitud de vibración máxima de aproximadamente $17.5 \mu\text{m}$.

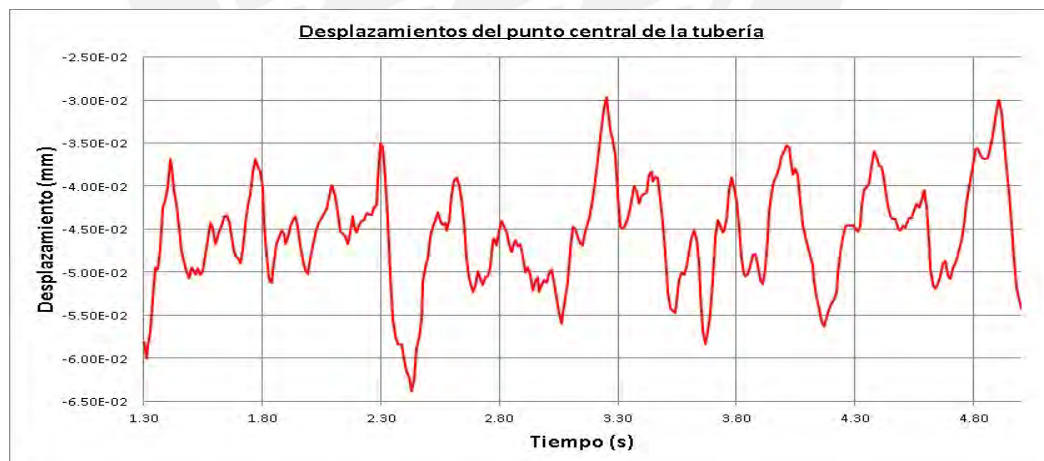


Fig. 4.5 Desplazamiento estabilizado del punto medio de la tubería – Caso 1.

Es posible también apreciar la aceleración del punto medio de la tubería en función del tiempo en la Fig. 4.6. En esta gráfica ya se ha eliminado el ruido inicial, permitiendo observar el comportamiento del sistema estabilizado. Los valores oscilan entre -0.07 m/s^2 y 0.08 m/s^2 .

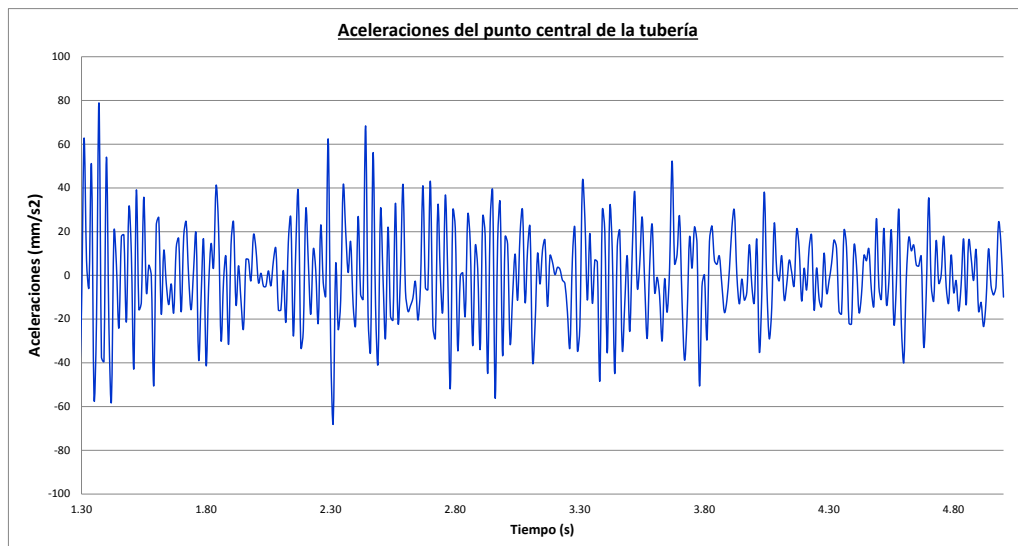


Fig. 4.6 Aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 1.

Es muy común en el campo de las vibraciones hacer uso de los espectros de respuesta de las aceleraciones y determinar así la cantidad de energía contenida en una determinada frecuencia, a esto se le conoce como *Densidad Espectral de Potencia* PSD, por sus siglas en inglés (Power Spectral Density). En la Fig. 4.7 se muestra el PSD para el caso 1. Este tipo de gráfico nos permite definir el rango de frecuencias (ancho de banda), donde se concentran las máximas aceleraciones. En este caso se puede apreciar que las aceleraciones máximas ocurren entre 10 Hz a 15 Hz y entre 30 Hz a 35 Hz.

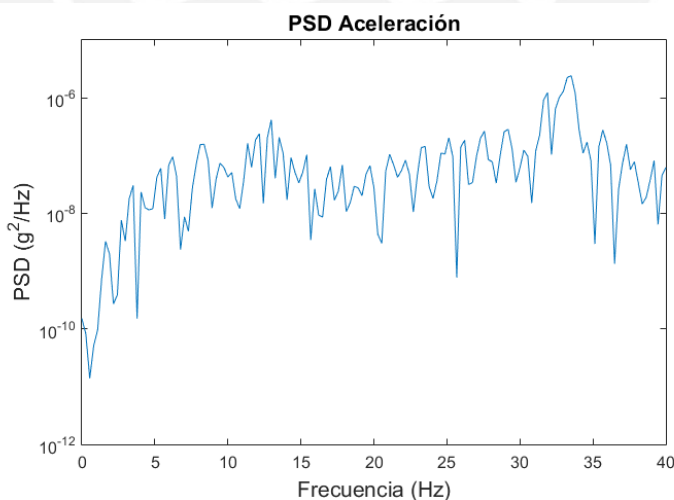


Fig. 4.7 PSD de la aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 1.

Simulación FIV Caso 2

Para este segundo caso, se muestra la distribución de esfuerzos a lo largo de la

longitud de la tubería en la Fig. 4.8.

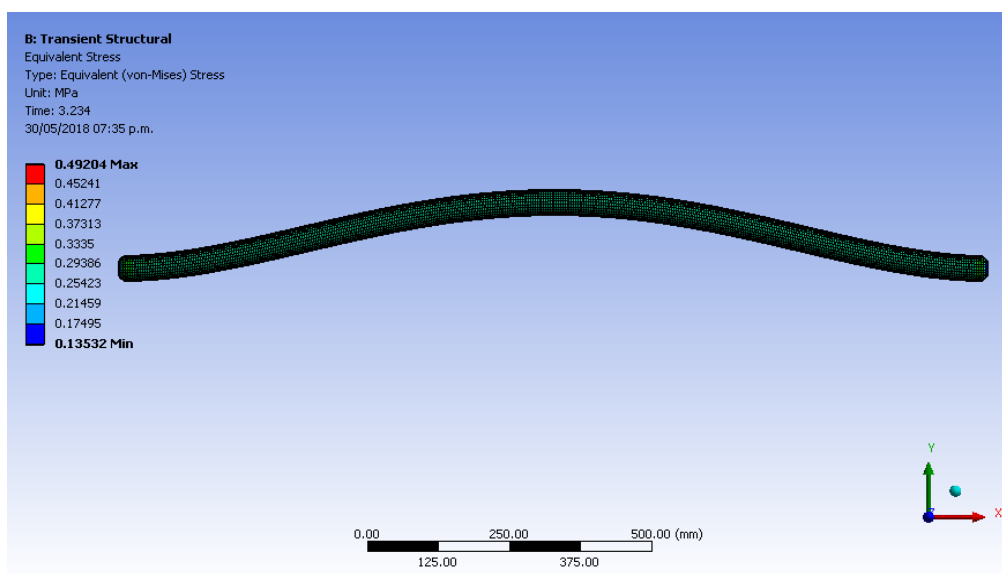


Fig. 4.8 Esfuerzos en la tubería - Caso 2

En ella se puede apreciar que la tubería se encuentra a aproximadamente 0.30 MPa, el cual es un valor que está muy por debajo de su esfuerzo de fluencia de 49MPa dada por el material de la tubería. En la Fig. 4.9 los desplazamientos para el instante de tiempo 1.8 seg, llegando a un valor mínimo de $-6 \mu\text{m}$ y un valor máximo de $2 \mu\text{m}$ aproximadamente.

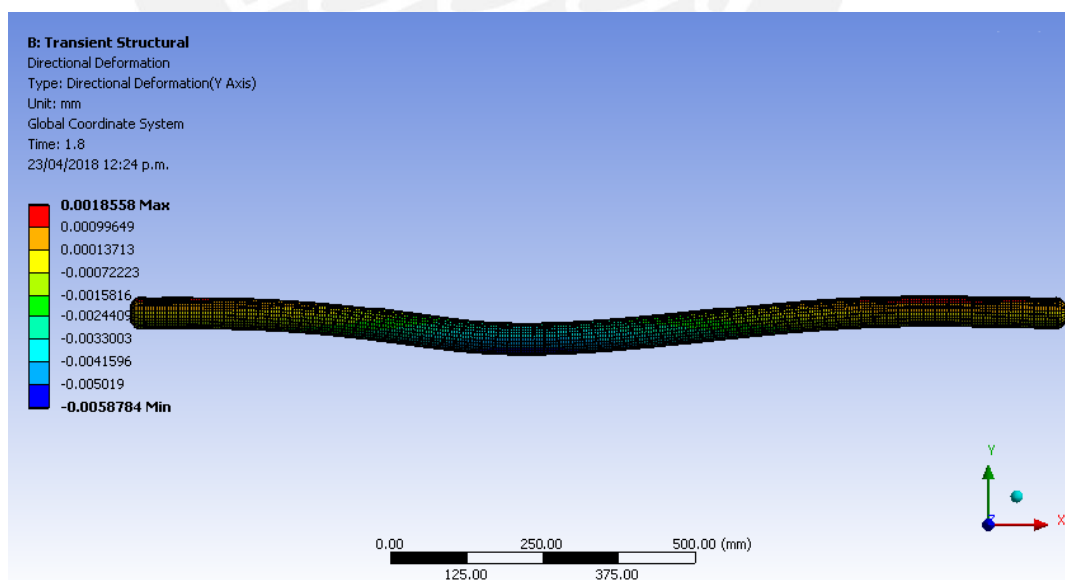


Fig. 4.9 Desplazamientos de la tubería ($t = 1.8 \text{ s}$) – Caso 2

En la Fig. 4.10 se pueden apreciar los desplazamientos en el tiempo 3.2 seg, llegando

a un valor mínimo de $-2 \mu\text{m}$ y un valor máximo de $11 \mu\text{m}$ aproximadamente.

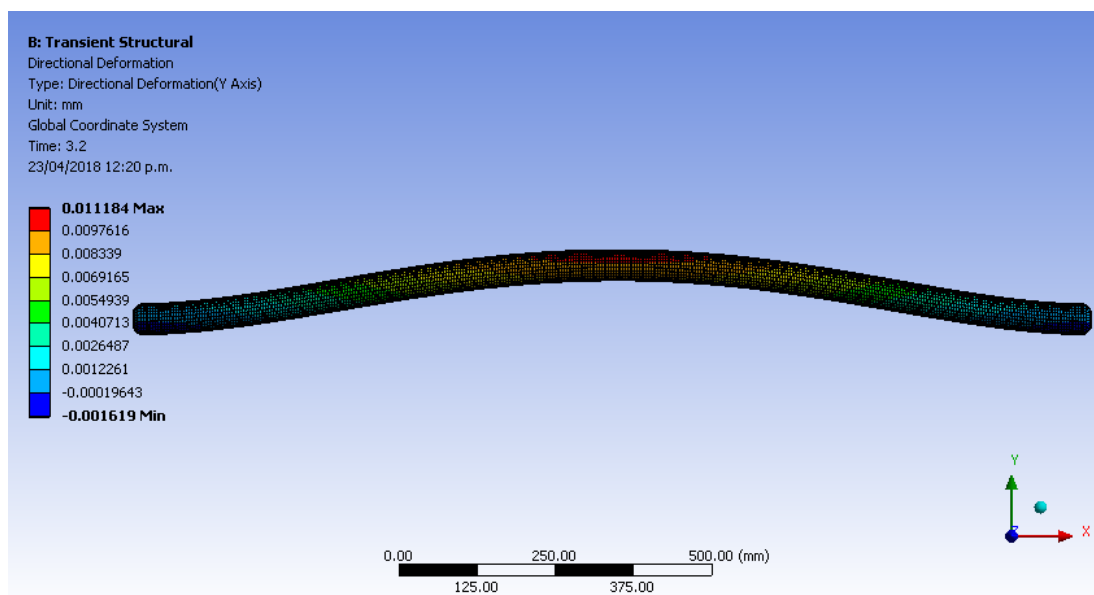


Fig. 4.10 Desplazamientos de la tubería (t = 3.2 s) – Caso 2

En la Fig. 4.11 se puede apreciar el desplazamiento del punto medio de la tubería en función del tiempo. Existe una perturbación significativa (ruido) al igual que en el caso 1 en la parte inicial de la curva, que se debe a las condiciones iniciales antes mencionadas. Sin embargo, a diferencia del caso 1, se observa que la vibración se amortigua en el rango de tiempo analizado (5seg). Esto puede deberse al aumento de la velocidad del aire y de la fracción volumétrica.

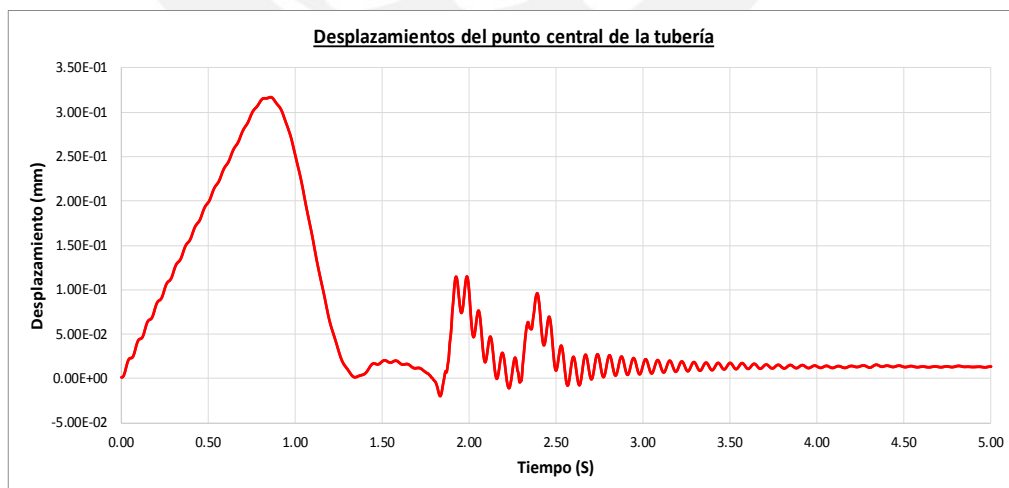


Fig. 4.11 Desplazamiento del punto medio de la tubería – Caso 2.

Al igual que en el primer caso, se ha eliminado el intervalo de tiempo inicial, correspondiente en este caso a 1.8 s aproximadamente, que se muestra en la Fig.

4.12. En esta gráfica se puede apreciar claramente el amortiguamiento de la vibración, con desplazamientos extremos que oscilan entre $-20 \mu\text{m}$ y $120 \mu\text{m}$ inicialmente, para una amplitud de vibración máxima de aproximadamente $70 \mu\text{m}$ en la parte inicial.

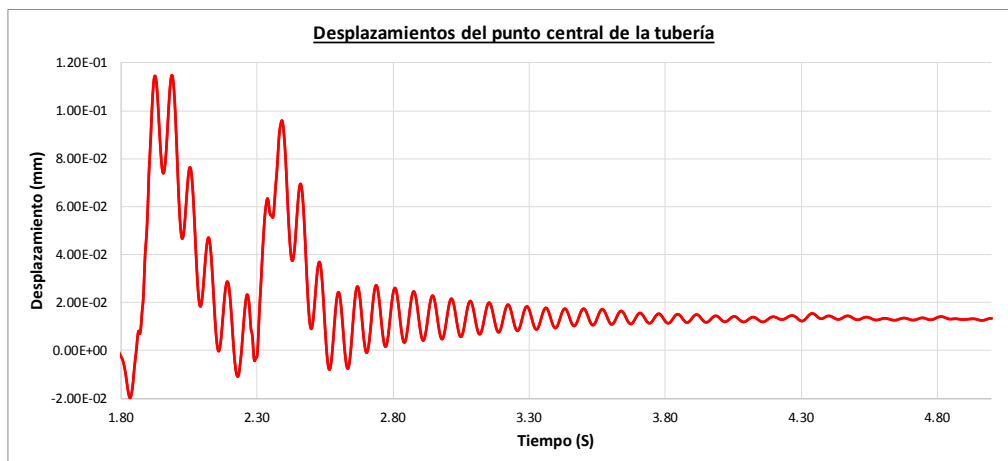


Fig. 4.12 Desplazamiento estabilizado del punto medio de la tubería – Caso 2.

La aceleración del punto medio de la tubería en función del tiempo, se muestra en la Fig. 4.13, en esta gráfica también se ha eliminado el ruido inicial, permitiendo observar su comportamiento amortiguado. Los valores de aceleración oscilan entre -0.7 m/s^2 y 0.8 m/s^2 en la parte inicial.

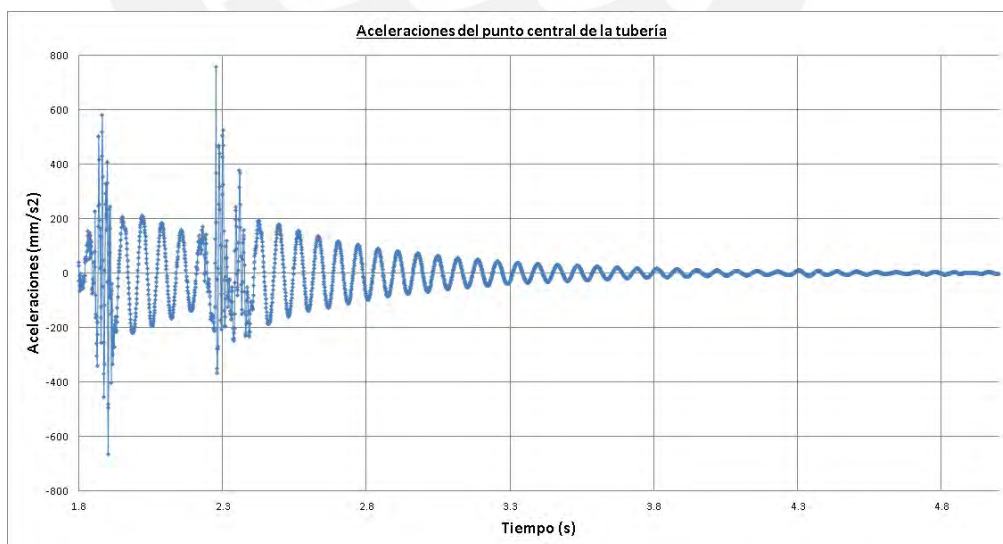


Fig. 4.13 Aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 2.

En la Fig. 4.14 se muestra la densidad espectral de potencia de la aceleración para el caso 2 (PSD). En este caso se puede apreciar que las aceleraciones máximas ocurren

entre los 14 Hz y 15 Hz.

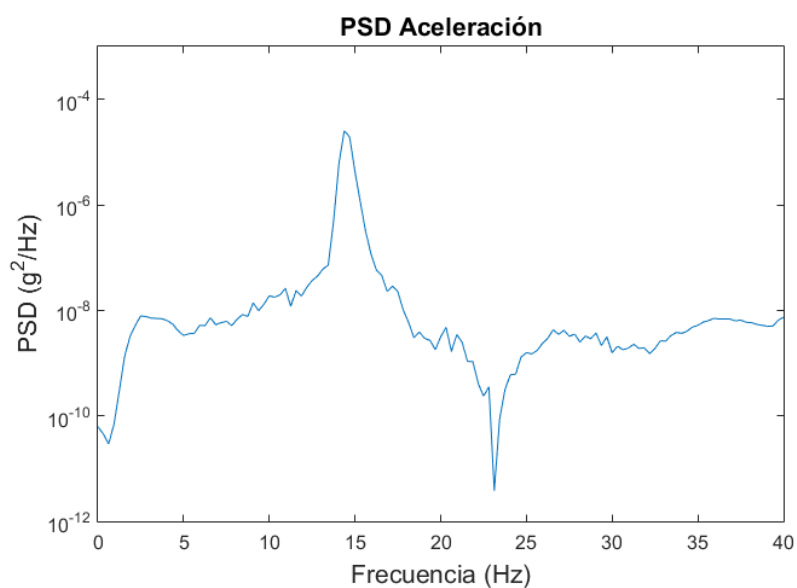


Fig. 4.14 PSD de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 2.

Simulación FIV Caso 3

Para este tercer caso, se muestra la distribución de esfuerzos a lo largo de la longitud de la tubería en la Fig. 4.15, en ella se puede apreciar que la tubería se encuentra a aproximadamente 0.25 MPa, valor que está muy por debajo de su esfuerzo de fluencia de 49MPa.

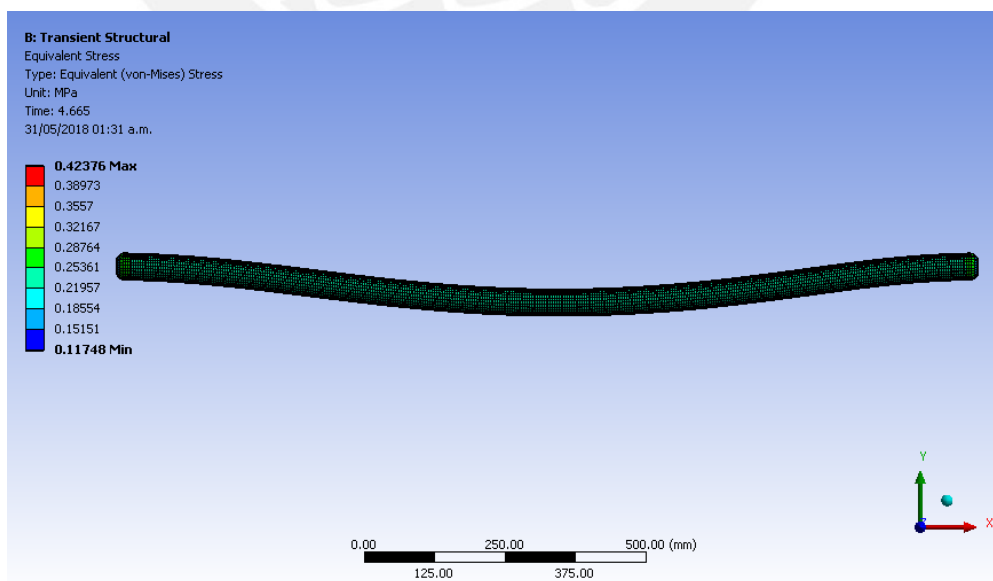


Fig. 4.15 Esfuerzos en la tubería - Caso 3.

Se muestra en la Fig. 4.16, los desplazamientos para el instante de tiempo de 1 seg, llegando a un valor mínimo de $-1 \mu\text{m}$ y un valor máximo de $12 \mu\text{m}$ aproximadamente.

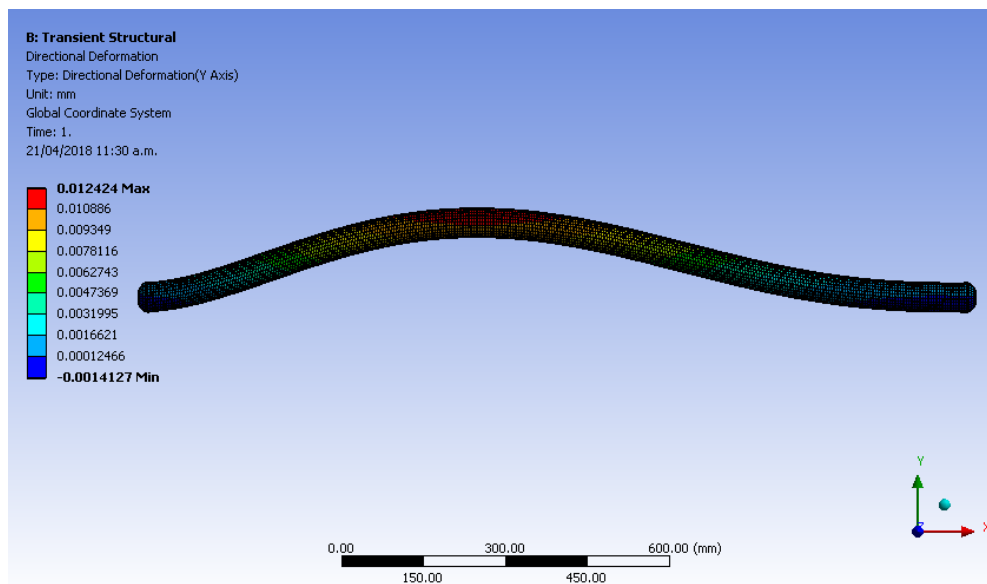


Fig. 4.16 Desplazamientos de la tubería (t = 1 s) – Caso 3

En la Fig. 4.17, se pueden apreciar los desplazamientos de la tubería en el instante de tiempo 3 seg, llegando a un valor mínimo de $-2 \mu\text{m}$ y un valor máximo de $18 \mu\text{m}$ aproximadamente.

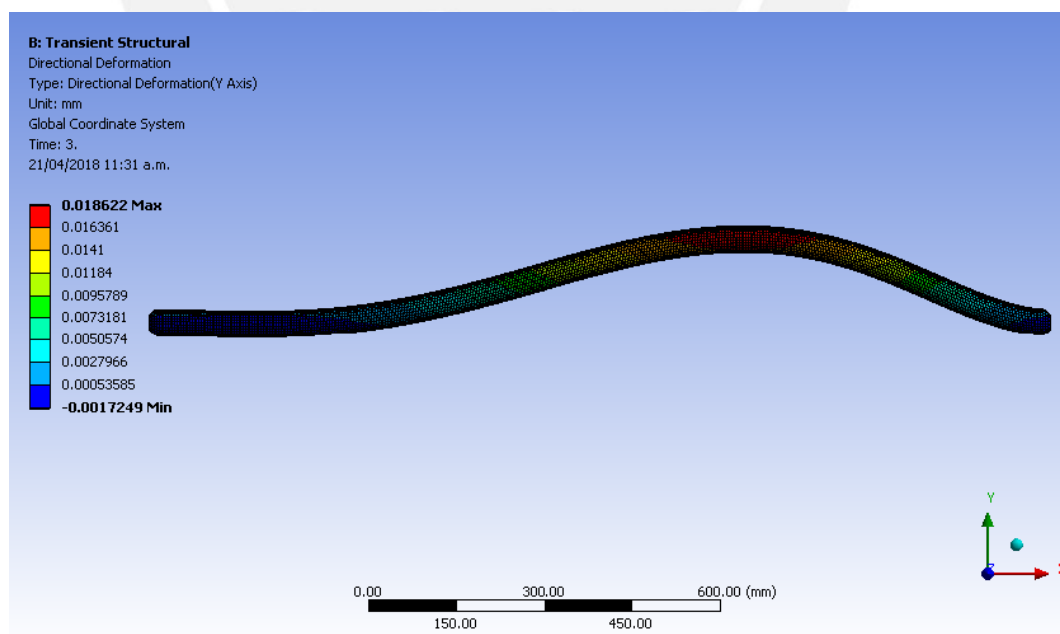


Fig. 4.17 Desplazamientos de la tubería (t = 3 s) – Caso 3.

En la Fig. 4.18 se puede apreciar el desplazamiento del punto medio de la tubería en

función del tiempo. Este caso tiene un comportamiento similar al caso 2, con un ruido en la parte inicial de la curva y un posterior amortiguamiento. Sin embargo, a diferencia del caso 2, se observa una curva más suave.

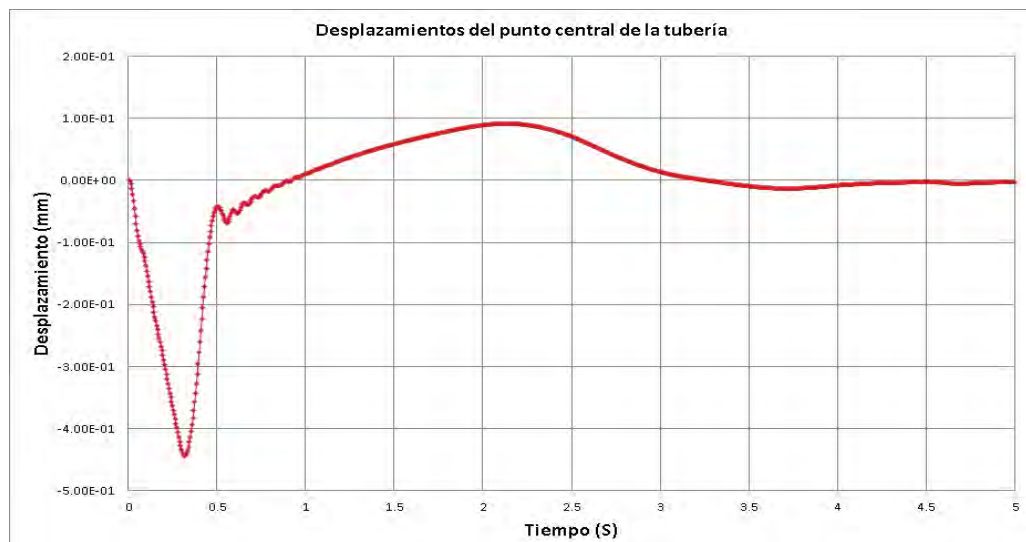


Fig. 4.18 Desplazamiento del punto medio de la tubería – Caso 3.

De forma similar a lo realizado en los primeros casos, se ha eliminado el intervalo de tiempo inicial, correspondiente en este caso a 0.5 s aproximadamente, dando lugar a la gráfica mostrada en la Fig. 4.19. Se observan desplazamientos extremos cuyos valores oscilan entre $-70 \mu\text{m}$ y $90 \mu\text{m}$, para una amplitud de vibración máxima de $80 \mu\text{m}$.



Fig. 4.19 Desplazamiento estabilizado del punto medio de la tubería – Caso 3.

En la Fig. 4.20 se puede apreciar la aceleración del punto medio de la tubería en función del tiempo para el caso 3. En esta gráfica ya se ha eliminado el ruido inicial,

permitiendo observar su comportamiento amortiguado, aunque a partir de los 4.5 seg se visualiza el inicio de una nueva perturbación. Los valores extremos de aceleración oscilan entre -0.08 m/s^2 y 0.09 m/s^2 en la parte inicial.

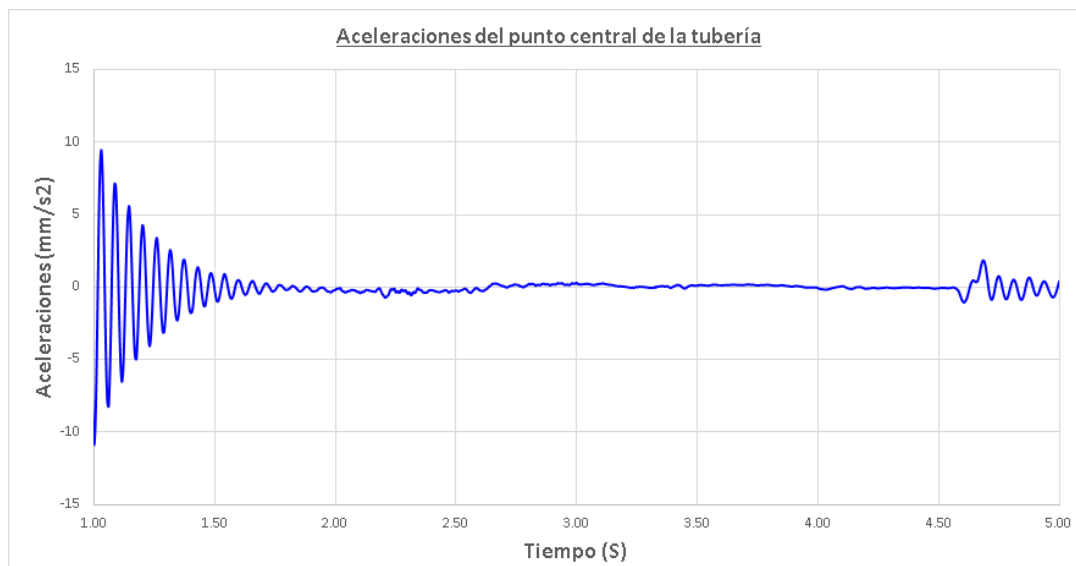


Fig. 4.20 Aceleración estabilizada del punto medio de la tubería – Caso 3

En la Fig. 4.21 se muestra la densidad espectral de potencia de la aceleración para el caso 3 (PSD). En ella se puede apreciar que las aceleraciones máximas se encuentran entre 15 Hz y 17 Hz aproximadamente.

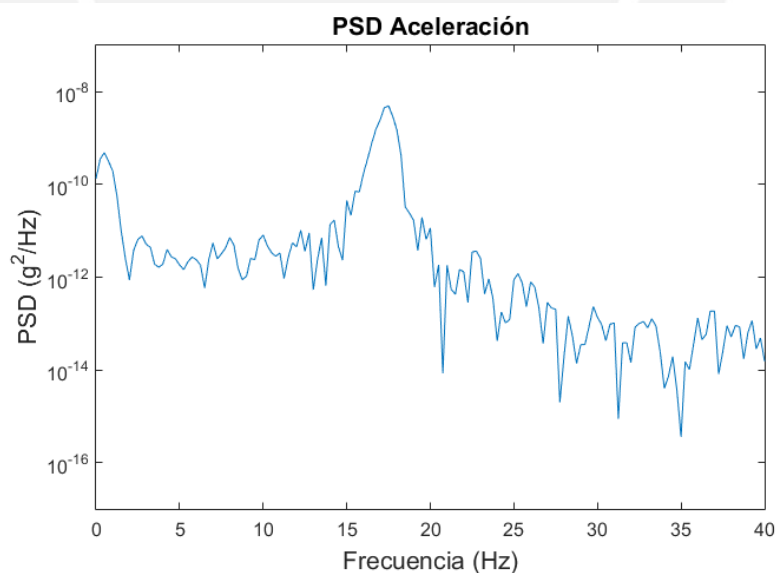


Fig. 4.21 PSD de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 3.

4.2. Validación de resultados

Se procede a validar los resultados hallados en el acápite anterior con resultados

experimentales reportados en la literatura [12]. Para los casos experimentales 1 y 3 se tienen sus PSD's por cortesía del L. E. Ortíz como material inédito y el PSD para el caso 2 experimental es referenciado en el artículo [12] del mismo autor, por ende se muestran PSD's resultados de la simulación numérica que son comparadas con los PSD's experimentales.

PSD Caso 1

En la Fig. 4.22, se muestra el PSD experimental para el caso 1, en el que se puede apreciar que las aceleraciones máximas ocurren entre 10 Hz a 15 Hz, esta gráfica a diferencia del PSD numérico se muestra mucho más suavizada y fina, esto es debido al paso de tiempo bastante corto y fino de los acelerómetros usados en la experimentación y a la cantidad de datos de aceleración procesados correspondientes a más de 100 seg a diferencia de los numéricos que alcanzan los 5 seg. Sin embargo en el caso numérico también se logra captar el pico de aceleración máxima que se muestra entre los 13 Hz y 15 Hz.

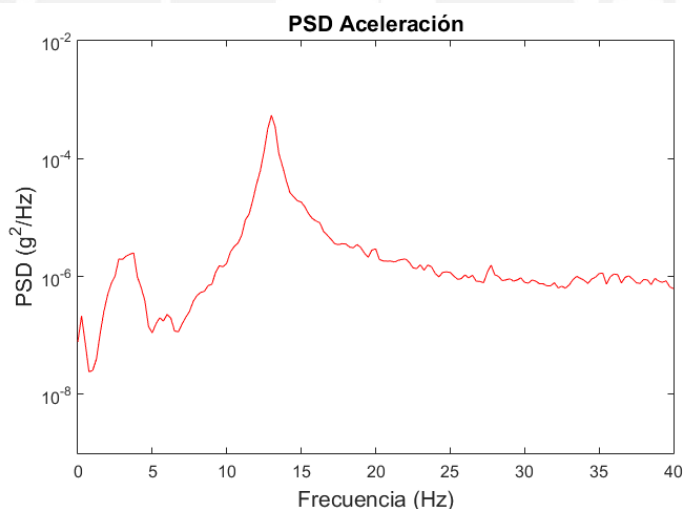


Fig. 4.22 PSD experimental de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 1 (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)).

PSD Caso 2

En la Fig. 4.23, se muestra el PSD experimental para el caso 2, en el que se puede apreciar que las aceleraciones máximas ocurren también entre 13 Hz a 15 Hz, esta gráfica a diferencia del PSD numérico de igual manera se muestra más suavizada y fina, esto es debido al paso de tiempo bastante corto de los acelerómetros usados en la experimentación y a la cantidad de datos de aceleración procesados. Para el caso numérico también se muestra una adecuada correspondencia ya que los valores

máximo hallados también se encuentran en el rango de 13 Hz y 15 Hz como se muestra en la Fig. 4.14, así mismo la curva obtenida numéricamente es más suavizada que en el caso 1, esto es debido a que el paso de tiempo configurado es menor que en el caso 1.

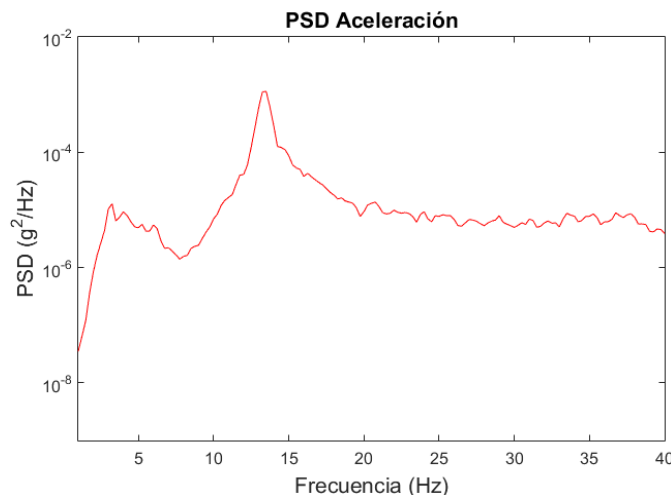


Fig. 4.23 PSD experimental de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 2 (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)).

Como se mencionó anteriormente para este caso 2 se tiene la validación con lo reportado en la literatura como se muestra en la Fig. 4.24. reportados por Ortiz-Vidal [12], [55], en la que se indica el pico más alto correspondiente a este caso (Caso 2 = C24), con una frecuencia de 14 Hz aproximadamente.

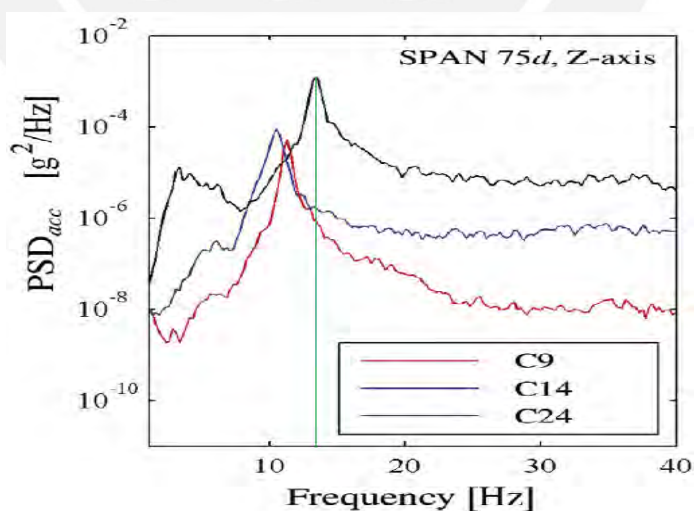


Fig. 4.24 PSD de la aceleración experimental – Caso 2 = C24, L. E. Ortíz [12].

PSD Caso 3

En la Fig. 4.25, se muestra el PSD experimental para el caso 3, en el que se puede

apreciar que las aceleraciones máximas ocurren aproximadamente a 15 Hz, esta gráfica a diferencia del PSD numérico de igual manera se muestra más suavizada y fina debido al paso de tiempo bastante corto de los acelerómetros y a la cantidad de datos de aceleración procesados. En el caso numérico se captaron también los valores de aceleración máxima cercana a los 17 Hz.

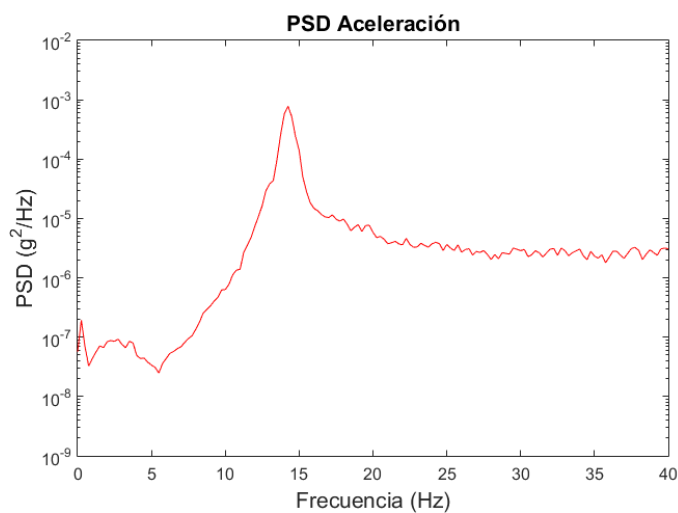


Fig. 4.25 PSD experimental de la aceleración del punto medio de la tubería – Caso 3 (Cortesía de Luis Enrique Ortíz (inédita)).

Como se muestra existe una buena correspondencia entre los PSD's hallados numéricamente respecto de los experimentales mostrando los rangos de frecuencia en los cuales se producen las máximas aceleraciones.

CONCLUSIONES

La revisión del estado del arte sugiere que para el adecuado abordaje del estudio del flujo turbulento bifásico, pueden emplearse modelos de turbulencia reportados en la literatura, de los cuales diversos autores recomiendan dos en particular, el modelo RANS y el modelo LES.

Considerando los patrones de flujo, los dos modelos de turbulencia empleados para el análisis del flujo bifásico agua-aire en la tubería horizontal responden adecuadamente a los resultados experimentales reportados en la literatura y plasmados en el mapa de Mandhane, en ella se muestra que cuatro de las cinco condiciones de flujo analizadas pertenecen al patrón de flujo slug, y uno al patrón de flujo elongated bubble.

Se llegó a determinar una adecuada correspondencia cualitativa entre los resultados de los modelos de turbulencia RANS y LES con los resultados experimentales reportados en la literatura, en ella se llegó a captar la morfología de la burbuja correspondiente a cada caso de estudio de acuerdo a parámetros de velocidad superficial de las fases, fracciones de vacío y presiones de salida correspondientes.

En el análisis del fluido se llegó a determinar la distribución de la presión sobre la pared de la tubería en función del tiempo, ésta ofrece resultados similares al emplear ambos modelos de turbulencia. Sólo puede apreciarse que el modelo LES – WALE es más sensible y capta con mayor detalle las fluctuaciones de la presión.

Teniendo en cuenta que los resultados del análisis numérico desarrollado no presentan grandes diferencias entre los dos modelos de turbulencia utilizados y que el modelo LES – WALE es aproximadamente 2.5 veces más costoso en tiempo de CPU que el modelo RANS $k - \omega$ SST, se considera que este último es más adecuado para estudiar el comportamiento de la presión variable en el tiempo sobre la pared de la tubería, por tanto es el modelo de turbulencia RANS el seleccionado para realizar el estudio FIV, mediante un modelo FSI.

El estudio FIV se realizó a través de un modelo FSI transitorio, que permitió captar

adecuadamente las vibraciones en la tubería que transporta flujo bifásico, obteniéndose esfuerzos, desplazamientos, aceleraciones y frecuencias oscilantes y variables en función del tiempo. En el primero de los tres casos analizados se aprecia una vibración sostenida en el tiempo, con cierta uniformidad, en la segunda se aprecia que después de iniciado el fenómeno, el sistema parece amortiguarse pero luego de unos instantes comienza otra vez a oscilar, y finalmente en el tercer caso la vibración parece amortiguarse, lo cual se supone que se debe al aumento de la velocidad del aire y de la fracción volumétrica en el sistema.

En los tres casos de estudio FIV se obtuvieron las densidades espectrales de potencia de la aceleración (PSD), procedimiento que permite captar las frecuencias a las cuales se producen las máximas aceleraciones. Uno de los casos fue comparado con resultados experimentales reportados en la literatura, encontrándose una adecuada correspondencia en los valores del ancho de banda detectado entre el resultado numérico y el experimental.

El modelo numérico desarrollado en el presente trabajo puede ser aplicado a otros fluidos tales como petróleo y gas, ingresando para ello sus respectivas propiedades inherentes a cada fase.

Para poder aplicarlo a un caso real, el modelo numérico necesita de parámetros tales como las velocidades de entrada de cada una de las fases, la fracción volumétrica, la presión a la salida del sistema, temperatura ambiente, propiedades de los fluidos participantes y del material de la tubería.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. C. Díaz, D. González, A. Parra, E. Casanova, and M. Asuaje, “Effect of Gas-Liquid Two Phase Flow in the Structural Behavior of Pipelines,” *8th Int. Conf. Multiph. Flow*, pp. 1–16, 2013.
- [2] M. T. Pittard, “Large Eddy Simulation Based Turbulent Flow-induced Vibration of Fully Developed Pipe Flow,” no. December, 2003.
- [3] T. P. Shurtz, “Analysis of Induced Vibrations in Fully-Developed Turbulent Pipe Flow Using a Coupled LES and FEA Approach,” 2009.
- [4] J. M. Fernández Oro, *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté, 2012.
- [5] B. Kapusuzo, “Modeling of Immiscible Incompressible Turbulent Two-Phase Stratified Pipe Flow,” 2016.
- [6] J. M. Mandhane, G. A. Gregory, and K. Azul, “A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 1(4), 1974.
- [7] L. E. Ortiz-vidal, “AN EXPLORATORY EXPERIMENTAL TECHNIQUE TO PREDICT TWO-PHASE FLOW PATTERN FROM VIBRATION RESPONSE,” pp. 1–9, 2013.
- [8] F. Li, J. Cao, M. Duan, C. An, and J. Su, “Two-phase Flow Induced Vibration of Subsea Span Pipeline,” pp. 1153–1160, 2016.
- [9] O. Shoham, “Mechanistic Modeling of gas liquid two phase flow in pipes,” p. 396, 2006.
- [10] S. Miwa, M. Mori, and T. Hibiki, “Two-phase flow induced vibration in piping systems,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 78, no. 2015, pp. 270–284, 2015.
- [11] R. D. Blevins, *Flow-Induced-Vibration-by-Robert-D-Blevins-2nd-Ed.pdf*. 1990.
- [12] L. E. Ortiz-Vidal, N. W. Mureithi, and O. M. H. Rodriguez, “Vibration response of a pipe subjected to two-phase flow: Analytical formulations and

- experiments,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 313, pp. 214–224, 2017.
- [13] H. Gu and L. Guo, “Experimental Investigation of Slug Development on Horizontal Two-phase Flow,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 16, no. 2, pp. 171–177, 2008.
- [14] O. Dinaryanto *et al.*, “Experimental investigation on the initiation and flow development of gas-liquid slug two-phase flow in a horizontal pipe,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 81, pp. 93–108, Feb. 2017.
- [15] S. S. Chen, “Flow-induced vibration of circular cylindrical structures,” *Other Inf. Portions this Doc. are illegible Microfich. Prod. Orig. copy available until Stock is exhausted*, p. 619, 1985.
- [16] R. Franco, H. Yépez, R. M. Yupa, and D. Abarca, “ESTUDIO DEL FLUJO TURBULENTO BIFÁSICO EN UNA TUBERÍA HORIZONTAL UTILIZANDO DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS DE TURBULENCIA,” pp. 23–26, 2017.
- [17] L. Enrique, O. Vidal, O. Mauricio, and H. Rodriguez, “Flow-Induced Vibration Due To Gas-Liquid Pipe Flow : Knowledge Evolution,” *Cobem2011*, 2011.
- [18] L. Enrique, O. Vidal, O. Mauricio, H. Rodriguez, and N. Mureithi, “Structural Excitation Response of a Straight Pipe Subjected To Air-Water Internal Flow,” pp. 7–8, 2012.
- [19] Deendarlianto, M. Andrianto, A. Widyaparaga, O. Dinaryanto, Khasani, and Indarto, “CFD Studies on the gas-liquid plug two-phase flow in a horizontal pipe,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 147, pp. 779–787, 2016.
- [20] T. Frank, “Numerical Simulation of Slug Flow Regime for an Air-Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipes,” *11th Int. Top. Meet. Nucl. React. Therm.*, pp. 1–13, 2005.
- [21] J. López, H. Pineda, D. Bello, and N. Ratkovich, “Study of liquid-gas two-phase flow in horizontal pipes using high speed filming and computational fluid dynamics,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 76, pp. 126–134, 2016.
- [22] M. T. Pittard, R. P. Evans, R. D. Maynes, and J. D. Blotter, “Experimental and

- numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, no. 7, pp. 2393–2401, 2004.
- [23] C. An and J. Su, “Dynamic behavior of pipes conveying gas-liquid two-phase flow,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 292, pp. 204–212, 2015.
- [24] L. E. Ortiz-Vidal, N. Mureithi, and O. M. H. Rodriguez, “Two-Phase Friction Factor in Gas-Liquid Pipe Flow,” *15th Brazilian Congr. Therm. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 81–88, 2014.
- [25] F. José and L. Ferro, “EFECTO DEL FLUJO EXTERNO TURBULENTO Y DEL FLUJO INTERNO BIFÁSICO EN LA VIBRACIÓN DE TUBERÍAS SUBMARINAS,” 2012.
- [26] E. De Navier-stokes, “Fenomenos turbulentos.” [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+2.pdf>.
- [27] M. T. Pittard, “LES Based Turbulent Flow-Induced Vibration of Fully Developed Pipe Flow,” 2003.
- [28] J. Sanches, “Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas,” 2004.
- [29] J. A. Capote, D. Alvear, O. V Abreu, M. Lázaro, and P. Espina, “Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios,” *Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing.*, vol. 24, no. 3, pp. 227–245, 2008.
- [30] L. E. Ortiz-Vidal, O. M. H. Rodriguez, and N. W. Mureithi, “An Exploratory Experimental Technique to Predict Two-Phase Flow Pattern From Vibration Response,” *ASME2013 Press. Vessel. Pip. Conf. Vol. 4 Fluid-Structure Interact.*, p. V004T04A061, 2013.
- [31] M. Lu, “Experimental and computational study of two-phase slug flow,” 2015.
- [32] S. Pipeline-riser, “Vanessa Galdino Pessanha,” 2014.
- [33] M. Lu, “Experimental and computational study of two-phase slug flow,” no. June, 2015.

- [34] J. M. Mandhane, "A FLOW PATTERN MAP FOR GAS--LIQUID FLOW IN HORIZONTAL PIPES," vol. 1, pp. 537–553, 1974.
- [35] Z. Pina, "Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio Índice," 2016.
- [36] R. S. Raja, "Coupled fluid structure interaction analysis on a cylinder exposed to ocean wave loading," 2012.
- [37] S. Y. Razavi and M. M. Namin, "Numerical Model of Slug Development on Horizontal Two-phase Flow," pp. 53–57, 2011.
- [38] X. Liu, W. Chen, L. Liu, and D. Liu, "The numerical simulation of oil-water two phase flow in horizontal pipeline based on the VOF model," vol. 0, no. 2, pp. 741–745, 2013.
- [39] V. Hernandez-Perez, M. Abdulkadir, and B. Azzopardi, "Grid Generation Issues in the CFD Modelling of Two-Phase Flow in a Pipe," *J. Comput. Multiph. Flows*, vol. 3, no. 1, pp. 13–26, 2011.
- [40] A. Modal, "Análisis modal," 2000. [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3828/fichero/Capitulos%252F5+Análisis+modal.pdf>.
- [41] H. Response, "Harmonic Response." [Online]. Available: http://www.ansys.stuba.sk/html/guide_55/g-str/GSTR4.htm.
- [42] F. Crisafulli, "Espectros de respuesta y de diseño 1.," 2002. [Online]. Available: <http://blog.uca.edu.ni/estructuras/files/2011/02/espectros-de-respuesta-y-de-diseño.pdf>.
- [43] C. Multiphysics and E. Comsol, "Modelado de problemas de interacción fluido- estructura con COMSOL," 2016. [Online]. Available: <https://www.addlink.es/noticias/comsol/2616-modelado-de-problemas-de-interaccion-fluido-estructura-con-comsol>.
- [44] M. P. Païdoussis, *Fluid-Structure Interactions Fluid-Structure Interactions Slender Structures 2 nd Edition*, vol. 2. .
- [45] F. Hara, "Two Phase Flow Induced Vibration in a Horizontal Piping System," Konno, T. "Physical Chem. Chang. Med. Mix. with Adsorbents Solid State. IV.

Study Reduced-pressure Mix. Pract. Use Amorph. Mix. Flufenamic Acid.”
Chem. Pharm. Bull. 38, no. 7 2, vol. 117, pp. 415–434, 1997.

- [46] M. J. Pettigrew and C. E. Taylor, “Two-Phase Flow-Induced Vibration : An Overview,” vol. 116, no. August 1994, 2016.
- [47] R. P. Evans, J. D. Blotter, and A. G. Stephens, “Flow Rate Measurements Using Flow-Induced Pipe Vibration,” *J. Fluids Eng.*, vol. 126, no. 2, pp. 280–285, 2004.
- [48] Q. Castillo, David G. Ortiz, L. E. Valverde, “CRITICAL FLOW VELOCITY FOR COLLAPSE OF A CLAMPED-CLAMPED PIPE CONVEYING GAS-LIQUID FLOW,” pp. 1–4, 2018.
- [49] M. J. Pettigrew, C. E. Taylor, N. J. Fisher, M. Yetisir, and B. A. W. Smith, “Flow-induced vibration: recent findings and open questions,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 185, pp. 249–276, 1998.
- [50] S. S. Chen, “Flow-Induced Vibrations in Two- Phase Flow,” *J. Press. Vessel Technol. Asme*, 1991.
- [51] K. Fujita, “Flow-Induced Vibration and Fluid-Structure Interaction in Nuclear Power Plant Components,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 33, no. 1, pp. 405–418, 1990.
- [52] L. Enrique Ortiz-Vidal, D. G. Castillo, and Q. Valverde, “Theoretical Study on the Dynamic Behavior of Pipes Conveying Gas-Liquid Flow,” *MATEC Web Conf.*, vol. 148, p. 01004, 2018.
- [53] R. Yupa Villanueva, “ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y MODAL DE LA HÉLICE DE UN AEROGENERADOR DE 3kW DE POTENCIA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA COMPUTACIONAL,” PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ, 2016.
- [54] H. Pouraria, J. K. Seo, and J. K. Paik, “Numerical modelling of two-phase oil-water flow patterns in a subsea pipeline,” *Ocean Eng.*, vol. 115, pp. 135–148, 2016.
- [55] L. E. Ortiz Vidal, “Método Inverso Baseado em Sinais de Vibração Estrutural para a Determinação de Velocidade da Mistura , Fração de Vazio Homogênea

e Padrões de Escoamento Bifásico em Tubulações,” 2014.

[56] S. S. Rao, *Vibration of continuous systems*. 2007.



ANEXOS

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE TUBERÍA PVC


PRODUCT SPECIFICATION CLEAR PVC Pipe Schedule 40 and Schedule 80
APPLICATION:

Corrosion resistant CLEAR pressure pipe, IPS sizes 1/4" through 8", for use at temperatures up to and including 140°F. Pressure rating (130 psi to 570 psi) varies with schedule, pipe size, and temperature as stated on page 2 of this specification and in Harvel Plastics, Inc. Clear bulletin (Product Bulletin HPB-107). Generally resistant to most acids, bases, salts, aliphatic solutions, oxidants, and halogens. Chemical resistance data should be referenced for proper material selection. Pipe exhibits excellent physical properties and flammability characteristics. Typical applications include process, sight glass, and dual containment piping for: chemical processing, high purity applications, food processing, pharmaceuticals, laboratory use, waste treatment, plating, and other applications involving fluid transfer where visual monitoring of process lines is warranted.

SCOPE:

This specification outlines minimum manufacturing requirements for CLEAR Polyvinyl Chloride (PVC) schedule 40 & schedule 80 iron pipe size (IPS) pressure pipe. This pipe is intended for use in systems where the fluid conveyed does not exceed 140°F. This pipe meets and or exceeds applicable industry standards and requirements as set forth by the American Society for Testing and Materials (ASTM).

PVC MATERIALS:

The material used in the manufacture of the pipe shall be a rigid polyvinyl chloride (PVC) compound, with a Cell Classification of 12454 as defined in ASTM D1784. This compound shall comply with the provisions of Title 21 United States FDA Code of Federal Regulations and shall be safe for use with food contact applications. This compound shall be transparent in color, and shall be approved by NSF International for use with potable water (NSF Std 61).

DIMENSIONS:

PVC Clear Schedule 40 and Schedule 80 pipe shall be manufactured in strict accordance with the dimensional requirements of ASTM D1785 to schedule 40 or schedule 80 dimensions and tolerances as applicable. All PVC Clear pipe shall meet the minimum burst pressure requirements and water pressure rating requirements of PVC Type II, Grade I, established for PVC 2110 as defined in ASTM D1785. Each production run of pipe shall also meet or exceed the test requirements for materials, workmanship, flattening, and extrusion quality defined in ASTM D1785. All belled-end pipe shall have tapered sockets to create an interference-type fit, which meet or exceed the dimensional requirements and the minimum socket length for pressure-type sockets as defined in ASTM D2672.

MARKING:

All Clear PVC Schedule 40 & Sch 80 pipe shall be permanently embossed with the manufacturers name or (or the manufacturers trademark when privately labeled).

SAMPLE SPECIFICATION:

All PVC Schedule 40 & Schedule 80 CLEAR pipe shall be manufactured from a Type I, Grade I Polyvinyl Chloride (PVC) compound with a Cell Classification of 12454 per ASTM D1784. The pipe shall be manufactured in strict compliance to ASTM D1785, consistently meeting and/or exceeding the applicable Quality Assurance test requirements of this standard with regard to material, dimensions, workmanship, burst pressure, flattening, and extrusion quality. The pipe shall be manufactured in the USA by an ISO 9002 certified manufacturer. All PVC CLEAR pipe shall be packaged immediately after its manufacture to prevent damage, and shall then be stored indoors at the manufacturing site until shipped from factory. All pipe shall be manufactured by HARVEL PLASTICS, INC.



PRODUCT SPECIFICATION CLEAR PVC Pipe Schedule 40 and Schedule 80

Schedule 40					
Pipe Size (in.)	O.D.	Avg. I.D.	Min. Wall	Nominal Wt./ft.	Max. W.P. PSI
1/4	0.540	0.344	0.088	0.086	390
3/8	0.675	0.473	0.091	0.115	310
1/2	0.840	0.602	0.109	0.170	300
3/4	1.050	0.804	0.113	0.226	240
1	1.315	1.029	0.133	0.333	220
1-1/4	1.660	1.360	0.140	0.450	180
1-1/2	1.900	1.590	0.145	0.537	170
2	2.375	2.047	0.154	0.720	140
2-1/2	2.875	2.445	0.203	1.136	150
3	3.500	3.042	0.216	1.488	130
3-1/2	4.000	3.521	0.226	1.789	120
4	4.500	3.998	0.237	2.118	110
6	6.625	6.031	0.280	3.733	90
6x1/8"	6.625	6.335	0.125	1.647	45
8	8.625	7.942	0.322	5.619	80

*This size does not meet Schedule 40 criteria. Pressure ratings shown are for water, non-shock@73°F

Schedule 80					
Pipe Size (in.)	O.D.	Avg. I.D.	Min. Wall	Nominal Wt./ft.	Max. W.P. PSI
1/4	0.540	0.282	0.119	0.105	570
3/8	0.675	0.403	0.126	0.146	460
1/2	0.840	0.526	0.147	0.213	420
3/4	1.050	0.722	0.154	0.289	340
1	1.315	0.936	0.179	0.424	320
1-1/4	1.660	1.255	0.191	0.586	260
1-1/2	1.900	1.476	0.200	0.711	240
2	2.375	1.913	0.218	0.984	200
3	3.500	2.864	0.300	2.010	190
4	4.500	3.786	0.337	2.938	160
6	6.625	5.709	0.432	5.610	140

Physical Properties

Property	value	test method
Cell Classification	12454	ASTM D1784
Specific Gravity	1.337	ASTM D792
	g/cm ³ @73°F	
Izod Impact	.76 ft-lbs / inch notch @ 73°F	ASTM D256
Tensile Strength @ yield	7094 psi @ 73°F	ASTM D638
Modulus of Elasticity	435,000 psi	ASTM D638
Flexural Strength	13,500 @ 75°F	ASTM D790
Flexural Modulus	458,000 @ 75°F	ASTM D790
Compressive Strength	8,300 @ 75°F	ASTM D695
Compressive Modulus	307,000 @ 75°F	ASTM D695
Coefficient of Linear Expansion	3.77 x 10 ⁻⁵ in / in °F	ASTM D696
Flammability	V-0	UL-94
Heat Distortion Temperature	158°F	ASTM D256
Glass Transition Temperature	176°F	
Hardness, Shore D	76 ± 3	ASTM D2240
Hardness, Rockwell	76/79R	ASTM D785

Chemical resistance data should be referenced for proper material selection and possible de-rating when working with fluids other than water. Refer to Harvel Plastics 112/401 Product Bulletin for chemical resistance and installation data.

De-rating Factor	
Operating Temp. (°F)	De-rating Factor
73	1.00
80	0.88
90	0.75
100	0.62
110	0.51
120	0.40
130	0.31
140	0.22

The pressure ratings given are for water, non-shock, @ 73°F. The following temperature de-rating factors are to be applied to the working pressure ratings (WP) listed when operating at elevated temperatures.

Multiply the working pressure rating of the selected pipe at 73°F, by the appropriate de-rating factor to determine the maximum working pressure rating of the pipe at the elevated temperature chosen.

EX: 4" PVC SCH 40 CLEAR @ 120°F = ?
 110 psi x 0.40 = 44 psi max. @ 120°F

THE MAXIMUM SERVICE TEMPERATURE FOR PVC CLEAR IS 140°F.

Solvent cemented joints should be utilized when working at or near maximum temperatures. Harvel Plastics does not recommend the use of PVC for threaded connections at temperatures above 110°F; use flanged joints, unions, or roll grooved couplings where disassembly is necessary at elevated temperatures.

Threading of Sch 40 PVC Clear pipe is not a recommended practice due to insufficient wall thickness.

Note: Although Harvel Clear maintains its physical properties when exposed to many substances, exposure to certain chemicals can affect the clarity of the product overtime. Certain nitrogen containing organics, bleaches, oxidative agents and acids may result in discoloration. Testing under actual use conditions is recommended.

Exposure to sunlight (U.V.R.) will also affect clarity. Clear products do not contain U.V. stabilizers and are not recommended for outdoor use unless adequate protection is applied.

Contact Harvel Tech Services for additional information.

Tabla A. 1 Propiedades físicas y térmicas del material de la tubería

Características Físicas y Térmicas	Valor	Unidades
Densidad	1,37 a 1,42	Kg/dm. ³
Peso específico	1.36 - 1.40	gr/cm ³ a 25°C
Variación longitudinal máx.	> 5 segundos NCh 1649	%
Inflamabilidad	Autoextingible	-
Coefficiente de fricción	n = 0.009 c = 150	Manning Hazen - Williams

Punto Vicat	76 (T° de ablandamiento)	°C
Constante dieléctrica	4	50/60 ciclos
	3,4	800 ciclos
	3	>1 Millón de ciclos
Factor de disipación	0,02-0,04	800 mil a 1 millón de ciclos
Resistencia dieléctrica	20	Kw / mm
Conductividad térmica	0,12-0,25	W m ⁻¹ K ⁻¹
Calor Específico	1000-1500	J K ⁻¹ kg ⁻¹
Coefficiente de Expansión Térmica	75-100	x10 ⁻⁶ K ⁻¹
Temperatura Máxima de Utilización	50-75	°C
Temperatura Mínima de Utilización	-30	°C
Características Mecánicas		
Tensión de diseño	100	kg/cm ²
Resistencia a la tracción	450 a 550	kg/cm ²
Resistencia a la compresión	610	kg/cm ²
Módulo de elasticidad	30.000	kg/cm ²
Resistencia al aplastamiento	Hasta 0,4 veces el Ø sin fisuras ni roturas (según normativa chilena)	-
Elongación hasta la rotura	15	%



ANEXO 2: DATOS EXPERIMENTALES REFERIDOS EN LA LITERATURA

Paper: L. Enrique, O. Vidal, O. Mauricio, H. Rodriguez, and N. Mureithi, "Structural Excitation Response of a Straight Pipe Subjected To Air-Water Internal Flow," pp. 7–8, 2012.

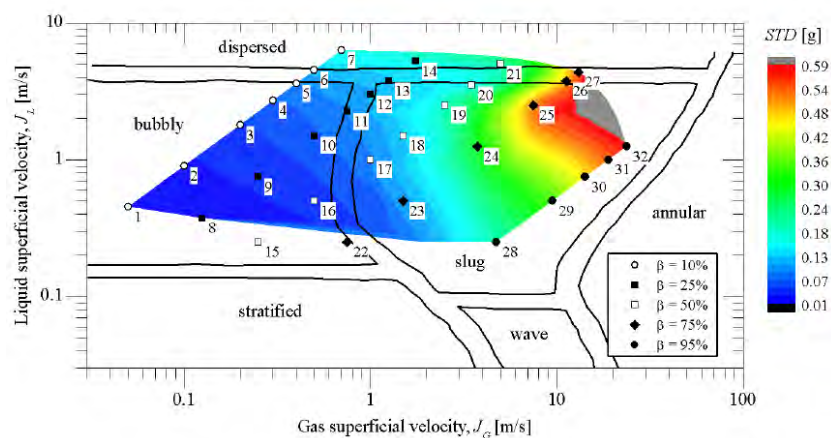


Fig. A. 1 Mapa de Mandhane con las condiciones experimentales dadas por L. E. Ortíz [7]

Paper: L. E. Ortiz-Vidal, N. Mureithi, and O. M. H. Rodriguez, "Two-Phase Friction Factor in Gas-Liquid Pipe Flow," 15th Brazilian Congr. Therm. Sci. Eng., vol. 13, no. 2, pp. 81–88, 2014.

Tabla A. 2 Resultados experimentales de L. E. Ortiz Vidal

	JL [m/s]	JG [m/s]	P_{system} [kPa]	dP/dL_f [kPa/m]	Pressure drop uncertainty (\pm)
	0.45	0.05	104.9	0.188	7.03%
	0.91	0.10	107.1	0.714	4.37%
	1.81	0.20	112.9	2.442	2.25%
	2.70	0.29	123.5	5.033	1.18%
	3.60	0.40	138.5	8.189	0.70%
	4.51	0.50	157.4	12.095	0.46%
	6.30	0.67	211.4	21.486	0.23%
C5	0.38	0.12	105.0	0.188	6.94%
	0.75	0.25	107.0	0.676	4.51%
	1.50	0.49	113.4	2.329	2.13%
	2.25	0.73	122.8	4.770	1.21%
	3.00	0.99	137.2	7.888	0.72%
	3.75	1.23	156.3	11.081	0.47%
	5.25	1.73	214.2	17.993	0.22%
	0.26	0.25	104.5	0.150	7.86%
	0.50	0.50	105.6	0.376	5.85%
C4	1.01	0.99	110.3	1.615	2.85%
C1	1.49	1.50	117.6	3.268	1.58%
	2.50	2.49	144.2	7.926	0.59%
	3.50	3.55	181.9	12.997	0.31%
	5.00	4.97	258.9	21.448	0.16%
	0.24	0.75	104.3	0.263	8.39%
	0.50	1.53	106.5	0.826	4.94%
C2	1.25	3.80	121.2	4.207	1.30%
	2.50	7.47	170.3	11.720	0.37%
	3.75	11.07	276.1	24.153	0.14%
	4.36	12.97	353.4	31.290	0.10%
C3	0.24	4.75	104.5	0.826	8.47%
	0.50	9.56	111.4	2.667	2.58%
	0.75	14.27	125.3	5.597	1.09%
	1.00	18.93	146.1	9.992	0.58%
	1.25	23.67	181.1	14.762	0.32%

ANEXO 3: TABLAS DE LAS PROPIEDADES DEL AIRE A 1 ATM DE PRESIÓN

ÇENGEL, Yunus A. y John M. CIMBALA, “Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones”, 1ª edición, McGraw-Hill, 2006. Tabla A-9.

Tabla A. 3 Tabla de las propiedades del aire a 1 atm de presión

894 FLUID MECHANICS							
TABLE A-9							
Properties of air at 1 atm pressure							
Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Density $\rho, \text{kg/m}^3$	Specific Heat c_p $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Thermal Conductivity $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Thermal Diffusivity $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Dynamic Viscosity $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Kinematic Viscosity $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Prandtl Number Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Note: For ideal gases, the properties c_p , k , μ , and Pr are independent of pressure. The properties ρ , ν , and α at a pressure P (in atm) other than 1 atm are determined by multiplying the values for ρ at the given temperature by P and by dividing ν and α by P .

Source: Data generated from the EES software developed by S. A. Klein and F. L. Alvarado. Original sources: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198; and Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermanns, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-30607020-8.

ANEXO 4: FUNDAMENTOS DE LA VIBRACIÓN

El movimiento oscilatorio puede repetirse regularmente, como en el caso de un péndulo simple, o puede presentar considerables irregularidades, como ocurre con el movimiento del suelo durante un terremoto. Si el movimiento se repite en intervalos de tiempo iguales se denomina movimiento periódico. El tipo más simple de movimiento periódico es el movimiento armónico [32]

Amplitud - Es el máximo desplazamiento de un cuerpo vibratorio en relación a su posición de equilibrio.

Frecuencia natural - Si, después de una perturbación inicial, un sistema continúa vibrando por sí mismo sin la acción de fuerzas externas, la frecuencia con que el sistema oscila es conocida como su frecuencia natural. Un sistema vibratorio con n grados de libertad tendrá, en general, n frecuencias naturales de vibración distintas

Decibel - Las varias cantidades encontradas en el área de la vibración y la acústica (como desplazamiento, velocidad, aceleración, presión y fuerza) se representan con frecuencias utilizando la notación de decibelios. Un decibelio (dB) se define originalmente como una razón entre potencias eléctricas, P / P_0 , como:

$$dB = 10 \log(P/P_0) \quad (39)$$

Donde P_0 es algún valor de referencia de potencia. Dado que la potencia eléctrica es proporcional al cuadrado de la tensión (V), el decibelio también puede expresarse como:

$$dB = 10 \log \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 = 20 \log(V/V_0) \quad (40)$$

Donde V_0 es una tensión de referencia. En la práctica, la ecuación 29 se utiliza para expresar las razones entre otras cantidades como desplazamientos, velocidades, aceleraciones y presiones [32].

Función de Transferencia y Transformada de Fourier

La función de transferencia representa la respuesta en régimen permanente de un sistema. El sistema de un grado de libertad representado en la Figura 4.2, que consiste de una masa, m , conectada a una referencia fija por un resorte de rigidez, k , y un amortiguador con coeficiente de amortiguación viscoso c y una fuerza F actuando sobre el sistema.

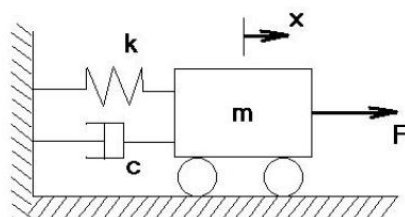


Fig. A. 2 Sistema de un grado de libertad

La ecuación de movimiento para este sistema es dada por:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (41)$$

La Transformada de Laplace de un diferencial de segundo orden con condición inicial está dada por:

$$\mathcal{L}[\ddot{x}(t)] + s^2x(s) - sx(0) = \dot{x}(0) \quad (42)$$

Donde $x(0)$ y $\dot{x}(0)$ son las condiciones iniciales de desplazamiento y velocidad, respectivamente, y $x(s)$ es la Transformada de Laplace de $x(t)$. Por otro lado, como estamos interesados en la función de transferencia, que representa la respuesta en régimen permanente del sistema, las condiciones iniciales se toman igual a cero y la transformada de Laplace, dada por la ecuación (31), se convierte en:

$$\mathcal{L}[\ddot{x}(t)] = s^2x(s) \quad (43)$$

Aplicando la Transformada de Laplace en la Ec. (4.13), tenemos:

$$ms^2x(s) + csx(s) + kx(s) = F(s) \quad (44)$$

Donde $F(s)$ es la Transformada de Laplace de $F(t)$. La función de transferencia, por definición, es la función que relaciona la respuesta del sistema a una excitación a ella aplicada. En este caso, toma la siguiente forma:

$$H(w) = \frac{x(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (45)$$

La transformada de Fourier puede ser considerada como un caso especial de la transformada de Laplace con $s = jw$. La transformada de Fourier La transformada de Fourier de una señal $x(t)$ está definida por:

$$x(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-iwt} dt \quad (46)$$

La transformada de Fourier inversa de $x(w)$ es dada por:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(w)e^{-iwt} dw \quad (47)$$

La transformada de Fourier puede ser obtenida de la serie de Fourier exponencial y es bastante usada en aplicaciones de procesamiento de señales, pues transforma una respuesta del dominio del tiempo al dominio de frecuencia.

**ANEXO 5: RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS FRECUENCIAS
NATURALES DE LOS PRIMEROS 4 MODOS DE VIBRACION**

Los siguientes cuatro modos de vibración y sus respectivas frecuencias naturales, fueron reportados por Ortiz Vidal [55].

Tabla A. 4 Propiedades modales experimentales del sistema de los cuatro primeros modos de vibración [55]

Eixo	Propiedades	1° modo	2° modo	3° modo	4° modo
Y	ω_d	16.1752	47.7174	97.1065	155.1240
	ζ_e	0.0189	0.0131	0.0239	0.0238
	ω_n	16.1781	47.7215	97.1342	155.1679
Z	ω_d	16.2894	48.3901	97.4224	156.2057
	ζ_e	0.0133	0.0104	0.0128	0.0129
	ω_n	16.2909	48.3928	97.4304	156.2188

