



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

RESPUESTA DINÁMICA DE CONDUCTOS  
CIRCULARES DE MATERIALES DIFERENTES  
SOMETIDOS A UNA DESPRESURIZACIÓN  
SÚBITA

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Olvera Mata Alan Josue

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Enrique Guzmán Vázquez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018

## **Jurado Asignado**

Presidente: **Dr. Jaime Gonzalo Cervantes de Gortari**  
Secretario: **Dr. Marco Antonio Reyes Huesca**  
Suplente: **M.I. Yahvé Abdul Ledezma Rubio**  
Suplente: **Dra. Flor Lizeth Torres Ortíz**  
Vocal: **Dr. Enrique Guzmán Vázquez**

## Agradecimientos

Agradezco a mi tutor el Dr.J. Enrique Guzmán Vázquez por todo su apoyo y guía en este importante proceso, por las oportunidades que me ha brindado, el tiempo dedicado y todo el conocimiento que me ha compartido.

A toda mi familia, a mi madre por darme la vida y su apoyo incondicional, por enseñarme a no rendirme nunca e inspirarme a ser mejor día a día, por todo lo necesario para crecer como una persona responsable, resiliente y amorosa. Gracias mamá, por esperarme cada noche, por tus letanías en la mañana, por confiar en mi como nadie más lo ha hecho y darme una vida llena de amor. A mi padre, porque aún en la carencia, nunca permitió que me faltara lo más importante en la vida, por ponernos a mi hermana y a mi antes que a ti, gracias papá por la libertad necesaria para ser el hombre que ahora soy, y que por tanto esfuerzo que has hecho he podido salir adelante y estar donde ahora estoy. Agradezco a mi hermana por ser un ejemplo a seguir, por ser mi amiga y estar ahí en las buenas y en las malas y siempre darme empujones para seguir adelante. A mi cuñado Alberto, por el apoyo y tolerancia que me ha ofrecido.

Gracias a todos aquellos que me brindaron de su tiempo para compartir sus conocimientos. Gracias a Gerardo Juárez, Alan Lobato, Marcel, JC, Angel Baez y Enrique León, por esas salidas en las que nos quitábamos el estrés y todo el apoyo que me dieron en todo este proceso, por compartir sus valiosas opiniones y el gusto por los retos y el de seguir aprendiendo. Sobre todo, gracias a mi gran amigo Gerardo Juárez Chávez por su amistad incondicional, por mostrarme que en la vida aun nos faltan muchas por aprender, por soportarme durante toda la carrera y levantarme cuando estaba derrotado, por nunca dudar en ayudarme, por compartir tantas aventuras y por enseñarme a ser mejor persona.

Gracias a todos esos amigos de la Facultad de Ingeniería que estén donde estén fueron parte importante mi formación. Gracias a todos mis sinodales por su critica y apoyo incondicional y permitirme mejorar. Agradezco a la Dra. Flor Lizeth Torres Ortiz por la ayuda y el tiempo brindado en este proceso.

Este trabajo fue realizado dentro del proyecto PAPIIT IN105716 "Estudios de procesos multiescala", cuya responsable es la Dra. Alejandra Arciniega Ceballos, del Instituto de Geofísica, con la finalidad de mejorar los experimentos que serán llevados a cabo en ese contexto. Agradezco mucho el apoyo y las valoraciones de la Dra. Arciniega.

# RESUMEN

Esta tesis muestra los resultados obtenidos experimentalmente de la respuesta de secciones de tubos deformables a una despresurización súbita. Se analizan las diferencias a las señales que se detectan en cada uno de los tubos. Se reportan de manera cuantitativa y cualitativa las diferencias existentes entre cada una de las señales. Se presentan los procesos para la obtención de datos, como lo fue, la construcción de un sistema experimental y la instrumentación del mismo. Se muestra el proceso experimental y los datos experimentales en crudo de las pruebas realizadas.

Se reportan indicadores como lo son las desviaciones estándar y coeficientes de correlación entre cada una de las pruebas, para verificar la repetibilidad de la información obtenida en cada una de la repeticiones experimentales. Los resultados que se muestran corresponden a distintas frecuencias de muestreo, en los que se explicará lo que se observa en cada uno y el por qué son, o no, válidos para realzar comparaciones entra cada uno de ellos. Al realizar comparaciones entre las respuestas, se obtuvieron diferencias medibles que resultan intuitivas según las propiedades mecánicas de cada tubo. En cuanto a las características de las señales, se observó que son de baja frecuencia, y que la forma de onda es identificable en cada una de las señales. Las magnitudes de las deformaciones están en el orden de  $\times 10^{-7}$ .

Todo el proceso de análisis, cálculos y obtención de gráficas fueron por medio de un programa de computo (Matlab ©). Se hacen recomendaciones que mejoren la adquisición de datos y facilite la obtención de mayor y mejor información de los fenómenos de estudio.

# Contenido

<b>RESUMEN</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Interacciones de fluido-estructura en conductos deformables . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	3
1.3. Objetivo de la tesis . . . . .	6
1.3.1. Objetivos particulares . . . . .	7
1.3.2. Alcances . . . . .	7
1.3.3. Hipótesis . . . . .	7
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.0.1. Ecuaciones de Continuidad . . . . .	8
2.1. Transformada discreta de Fourier . . . . .	9
2.2. Estadística básica para el análisis de señales . . . . .	10
2.2.1. Dispersión estadística . . . . .	10
2.2.2. Coeficiente de correlación . . . . .	10

<b>3. PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>12</b>
3.1. Dispositivo experimental . . . . .	12
3.1.1. Instrumentación . . . . .	17
3.2. Series experimentales . . . . .	24
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>27</b>
4.1. Mediciones . . . . .	27
4.1.1. Procesamiento de datos . . . . .	32
4.2. Análisis y Discusión . . . . .	48
4.2.1. Características de las deformaciones . . . . .	48
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>63</b>
5.1. Resumen . . . . .	63
5.2. Contribuciones . . . . .	64
5.3. Recomendaciones y trabajo futuro . . . . .	64
<b>A. Coeficientes de Correlación de Pruebas Experimentales</b>	<b>66</b>
<b>B. Dispersiones estadísticas</b>	<b>71</b>
<b>C. Señales de Presión</b>	<b>76</b>
<b>D. Espectros</b>	<b>79</b>

# Lista de Figuras

1.1. Fuentes de fluido transitorio y movimiento en tuberías [31] . . . . .	2
1.2. Sistema experimental en el estudio de FSI por golpe de ariete [11] . . . . .	3
1.3. Sistema experimental para el estudio de detección de fugas en tubería de PVC [19] . . . . .	4
1.4. Sistema experimental para el estudio de modos de vibración en mangueras debido a un flujo pulzante [1] . . . . .	5
1.5. Sistema experimental para el estudio de flujos transitorios en arterias. . . . .	6
3.1. Parte superior del contenedor. . . . .	13
3.2. Sección horizontal del sistema de tubería. . . . .	13
3.3. Dispositivo de pruebas. . . . .	14
3.4. Sujeciones. . . . .	15
3.5. Uniones. . . . .	15
3.6. Tubos para la sección de pruebas . . . . .	16
3.7. Parte 1. . . . .	17
3.8. Parte 2. . . . .	17
3.9. Sistemas de medición y de control de válvula. . . . .	18

3.10. Instrumentos. . . . .	19
3.11. Esquema de sección de pruebas instrumentada. . . . .	20
3.12. Esquema conexión de instrumentos. . . . .	21
3.13. Esquema tarjeta de adquisición [23]. . . . .	21
3.14. Código en arduino para control de válvula. . . . .	23
3.15. Esquema de control de válvula. . . . .	23
3.16. Esquema experimental. . . . .	25
4.1. Señales registradas por los sensores piezoeléctricos para el tubo No. 1, cuyo módulo de Young es de $2.7 \times 10^9$ Pa. . . . .	28
4.2. Señales registradas por los sensores piezoeléctricos para el tubo No. 2, cuyo módulo de Young es de $1.1 \times 10^9$ Pa. . . . .	29
4.3. Señales registradas por los sensores piezoeléctricos para el tubo No. 3, cuyo módulo de Young es de $2 \times 10^9$ Pa. . . . .	30
4.4. Señales de presión para los tres tubos. . . . .	31
4.5. Características físicas de los sensores piezoeléctricos empleados. . . . .	33
4.6. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 1 a 500 Hz. . . . .	35
4.7. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 1 a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	35
4.8. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 1 a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	36
4.9. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 2 a 500 Hz. . . . .	37
4.10. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 2 a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	37
4.11. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 2 a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	38
4.12. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 3 a 500 Hz. . . . .	39

4.13. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 3 a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	39
4.14. Intervalos de pruebas en sensores de tubo 3 a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	40
4.15. Intervalos de pruebas para transductores en tubo 1 . . . . .	41
4.16. Intervalos de pruebas para transductores en tubo 2 . . . . .	41
4.17. Intervalos de pruebas para transductores en tubo 3 . . . . .	42
4.18. Deformaciones para tubo 1 medidas a 500 Hz . . . . .	42
4.19. Deformaciones para tubo 1 medidas a $30 \times 10^3$ Hz . . . . .	43
4.20. Deformaciones para tubo 1 medidas a $100 \times 10^3$ Hz . . . . .	43
4.21. Deformaciones para tubo 2 medidas a 500 Hz . . . . .	44
4.22. Deformaciones para tubo 2 medidas a $30 \times 10^3$ Hz . . . . .	45
4.23. Deformaciones para tubo 2 medidas a $100 \times 10^3$ Hz . . . . .	45
4.24. Deformaciones para tubo 3 medidas a 500 Hz . . . . .	46
4.25. Deformaciones para tubo 3 medido a $30 \times 10^3$ Hz . . . . .	47
4.26. Deformaciones para tubo 3 medido a $100 \times 10^3$ Hz . . . . .	47
4.27. Picos localizados en deformaciones en tubo 1 . . . . .	49
4.28. Picos localizados en deformaciones en tubo 2 . . . . .	49
4.29. Picos localizados en deformaciones en tubo 3 . . . . .	50
4.30. Duraciones de onda detectadas en cada sensor para los tres tubos. $\lambda$ representa la duración y x la posición de los sensores. . . . .	51
4.31. Ubicación en el tiempo de los picos registrado en cada sensor para los 3 tubos. $\tau$ representa la posición temporal de los picos, $\eta$ el número de pico y SP sensor piezoeléctrico. . . . .	52

4.32. Anchos temporales de pico No. 1 localizado en la posición de cada sensor para los 3 tubos.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y  $x$  la posición de los sensores . . . . . 53

4.33. Anchos temporales de pico No. 2 localizado en la posición de cada sensor para los 3 tubos.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y  $x$  la posición de los sensores . . . . . 54

4.34. Anchos temporales de pico No. 3 localizado en la posición de cada sensor para los 3 tubos.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y  $x$  la posición de los sensores . . . . . 55

4.35. Anchos de picos detectados en cada sensor para los 3 tubos.  $\circ$  representa los anchos detectados por el sensor 1,  $*$  representa anchos detectados en el sensor 2,  $+$  representa los anchos detectados en el sensor 3 y  $\diamond$  representa los anchos detectados en el sensor 4.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y  $\eta$  el número de pico . . . . . 56

4.36. Prominencia de pico No. 1 para las posiciones de lo 4 sensores en los 3 tubos.  $\beta$  representa la promiencia del pico y  $x$  la posición de lo sensores. . . . . 57

4.37. Prominencia de pico No. 2 para las posiciones de lo 4 sensores en los 3 tubo.  $\beta$  representa la promiencia del pico y  $x$  la posición de lo sensores. . . . . 58

4.38. Prominencia de pico No. 3 para las posiciones de lo 4 sensores en los 3 tubos.  $\beta$  representa la promiencia del pico y  $x$  la posición de lo sensores. . . . . 59

4.39. Amplitudes de picos detectados en cada sensor para los tres tubos.  $\epsilon$  representa la amplitud y  $x$  la posición de los sensores. . . . . 60

4.40. Modos de vibración en un conducto circular[10] . . . . . 61

A.1. Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 1 para los 4 sensores piezoeléctrios a 500 Hz. . . . . 66

A.2. Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 1 para los 4 sensores piezoeléctrios a  $30 \times 10^3$  Hz. . . . . 67

A.3. Coeficientes de correlación en las pruebas de tubo No. 1 para los 4 sensores piezoeléctrios a  $100 \times 10^3$  Hz. . . . . 67

A.4. Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 2 para los 4 sensores piezoeléctricos a 500 Hz. . . . .	68
A.5. Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 2 para los 4 sensores piezoeléctricos a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	68
A.6. Coeficientes de correlación en las pruebas de tubo No. 2 para los 4 sensores piezoeléctricos a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	69
A.7. Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 3 para los 4 sensores piezoeléctricos a 500 Hz. . . . .	69
A.8. Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 3 para los 4 sensores piezoeléctricos a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	70
A.9. Coeficientes de correlación en las pruebas de tubo No. 3 para los 4 sensores piezoeléctricos a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	70
B.1. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 1 a 500 Hz. . . . .	71
B.2. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 1 a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	72
B.3. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 1 a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	72
B.4. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 2 a 500 Hz. . . . .	73
B.5. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 2 a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	73
B.6. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 2 a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	74
B.7. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 3 a 500 Hz. . . . .	74
B.8. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 3 a $30 \times 10^3$ Hz. . . . .	75
B.9. Desviaciones estándar en pruebas de tubo 3 a $100 \times 10^3$ Hz. . . . .	75
C.1. Señales de presión de los transductores 1 y 2 para tubo 1. . . . .	76
C.2. Señales de presión de los transductores 1 y 2 para tubo 2. . . . .	77

C.3. Señales de presión de los transductores 1 y 2 para tubo 3. . . . .	77
D.1. Espectros de Frecuencias en tubo 1. . . . .	80
D.2. Espectros de Frecuencias en tubo 2. . . . .	81
D.3. Espectros de Frecuencias en tubo 3. . . . .	82

# Lista de Tablas

- 3.1. Variaciones del grosor en pared de tuberías . . . . . 16
- 3.2. Entradas analógicas . . . . . 22
  
- 4.1. Desviaciones estándar máximas en señales de deformación para los tres tubos 34
- 4.2. Posiciones temporales de picos por sensor, (SP es sensor piezoeléctrico). . . . . 52
  
- C.1. Perdidas de presión. . . . . 78

# NOMENCLATURA

## Variables

Amplitud	$A$
Coefficiente de Correlación	$C_c$
Módulo de Young	$E$
Frecuencia	$F$
Vector de aceleraciones	$f$
Aceleración gravitacional	$g$
Longitud característica del sensor	$\ell$
Número de datos	$N$
Presión	$P$
Resistencia	$R$
Covarianza	$S_{xy}$
Desviación estándar	$s$
Tiempo	$t$
Ancho temporal	$\Delta t$
Velocidad	$v$
Desplazamiento	$u$
Variable aleatoria	$x$
Variable aleatoria	$y$
Media de variable aleatoria x	$\bar{x}$
Media de variable aleatoria y	$\bar{y}$

**Letras griegas**

Prominencia del pico	$\beta$
Deformación	$\epsilon$
Número de pico	$\eta$
Longitud de onda	$\lambda$
Constantes de Lamé	$\lambda_e \mu_e$
Viscosidad Dinámica	$\mu$
Densidad del fluido	$\rho$
Densidad del sólido	$\varrho$
Esfuerzo	$\sigma$
Posición temporal de picos	$\tau$

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

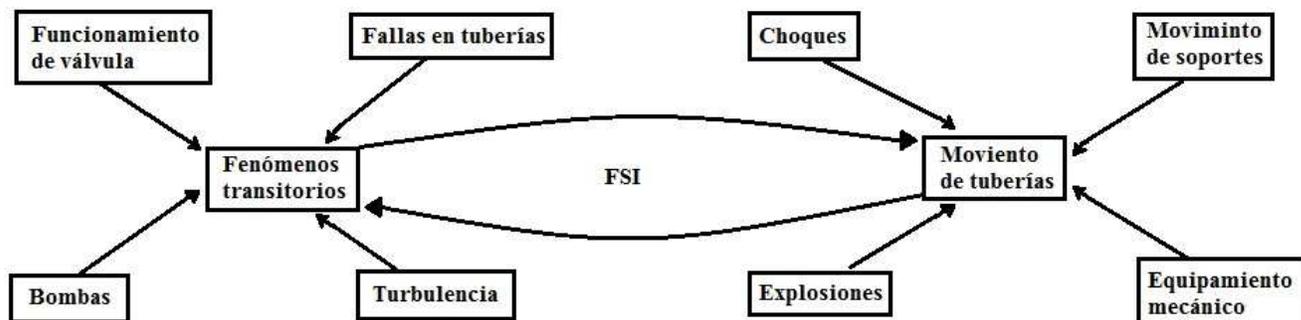
### 1.1. Interacciones de fluido-estructura en conductos deformables

Cuerpos que interactúan con fluidos son estudiados en amplios campos de la ciencia y la ingeniería. Cuando el cuerpo que interactúa con el fluido se deforma, podemos considerar que existen dos casos: hidroelasticidad y aeroelasticidad. La primera de ellas es la que se aborda en esta tesis. El estudio de las interacciones fluido-estructura (IFE) se encarga de analizar las deformaciones en cuerpos como respuesta a excitaciones hidrodinámicas y, simultáneamente, la modificación de esas excitaciones debido a la deformación del cuerpo [2].

Cuando el movimiento del fluido provoca que el sistema se mueva en cierta medida podemos decir que la IFE es significativa. En las interacciones fluido-estructura son significativas las escalas temporales de la respuesta estructural, del flujo y de la excitación[9]. Los problemas de hidroelasticidad son difíciles de estudiar debido a que los sistemas fluido-sólido no pueden tratarse por separado, es decir, en un análisis teórico, numérico y experimental, se deben tener en cuenta los mecanismos de interacción[2][6][27].

Uno de los ejemplos más comunes de IFE se presenta en los sistemas de tuberías, en donde existe una transferencia de fuerzas y momentos entre el fluido confinado y la tubería. Esta interacción genera vibraciones en la tubería y perturbaciones de la velocidad y presión del flujo. La interacción del fluido con el sistema de tuberías se genera de diversas maneras

Fig[1.1]. En 1994 Rockwell y Naudascher [14] clasificaron las fuentes de excitación en: (a) excitación inducida externamente, (b) excitación inducida por inestabilidad y (c) excitación inducida por movimiento. Païdoussis [24] menciona que la naturaleza de las vibraciones puede ser de tres tipos: (a) vibraciones forzadas, (b) vibraciones autocontroladas en la que existe cierta periodicidad en el flujo, independientemente del movimiento y (c) vibraciones autoexcitadas.



**Figura 1.1:** Fuentes de fluido transitorio y movimiento en tuberías [31]

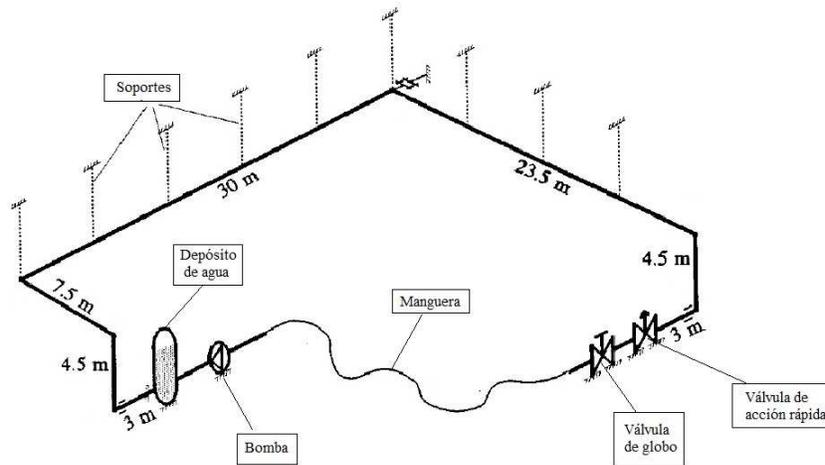
Para los sistemas de tuberías se pueden distinguir tres mecanismos de IFE según Tijsseling [31]. El primero de ellos es el acoplamiento de fricción; el cual representa la fricción existente entre fluido y tubería. El segundo y de mayor relevancia es el acoplamiento de Poisson, el cual, relaciona las presiones en el fluido con los esfuerzos axiales en la tubería a través de las expansiones o contracciones radiales de la pared de la tubería. Al igual que el acoplamiento de fricción el de Poisson actúa a lo largo de la tubería. Por último, el acoplamiento de unión, que actúa en lugares específicos del sistema de tuberías como válvulas, curvas o uniones tipo T.

Los sistemas de tuberías que transportan fluido son frecuentes en muchos campos, como industrias de energía nuclear y eléctrica, industrias de procesos químicos y petroleros, industrias navales y aeroespaciales, e incluso en la vida cotidiana [27]. Un análisis detallado de problemas de FSI representa un gran desafío debido a su no linealidad y a su naturaleza multidisciplinaria y a las limitaciones experimentales [6].

## 1.2. Antecedentes

El transporte de fluidos a través de redes de tuberías es un caso de mucho interés en la industria en general. Como se ha mencionado anteriormente, a lo largo de estas trayectorias hay un serie de factores que alteran el flujo generando fenómenos de tipo IFE de manera significativa. Por ejemplo, el golpe de ariete es uno de los fenómenos de mayor interés en estudios de IFE, debido a los cambios abruptos en las condiciones de flujo[31].

Wiggert y Tijsseling describen que el periodo entre 1970 y 1980 una importante cantidad de la investigación se centró en comprender y cuantificar la interacción mecánica entre un flujo confinado en una tubería y las vibraciones resultantes que este provoca. Experimentalmente ellos solo reportan valores de presión para un flujo continuo en fenómenos de golpe de ariete. El sistema experimental empleado se muestra en Fig.[1.2].

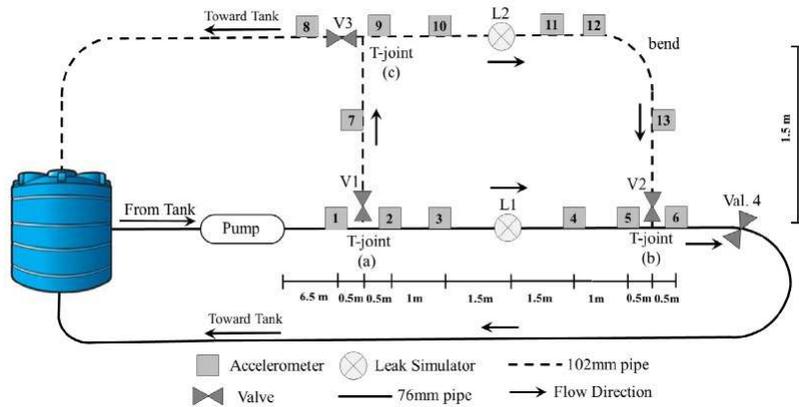


**Figura 1.2:** Sistema experimental en el estudio de FSI por golpe de ariete [11]

El fenómeno de fugas en tuberías para la industria en general, representa un impacto ambiental y económico muy alto. Por esto, se busca hacer detecciones de fugas debido a la IFE que estas generan. Un estudio para la caracterización de fugas en sistemas de tuberías, realizó comparaciones a las respuestas dinámicas de las fugas en tuberías de aluminio y acero con grietas de tamaños conocidos. Los resultados reportados fueron respuestas por debajo de los 1500 Hz para las tuberías de aluminio y menores a 1600 Hz para las tuberías de acero [28].

Otros estudios sobre detección de fugas se han concentrado en el uso de tuberías de políme-

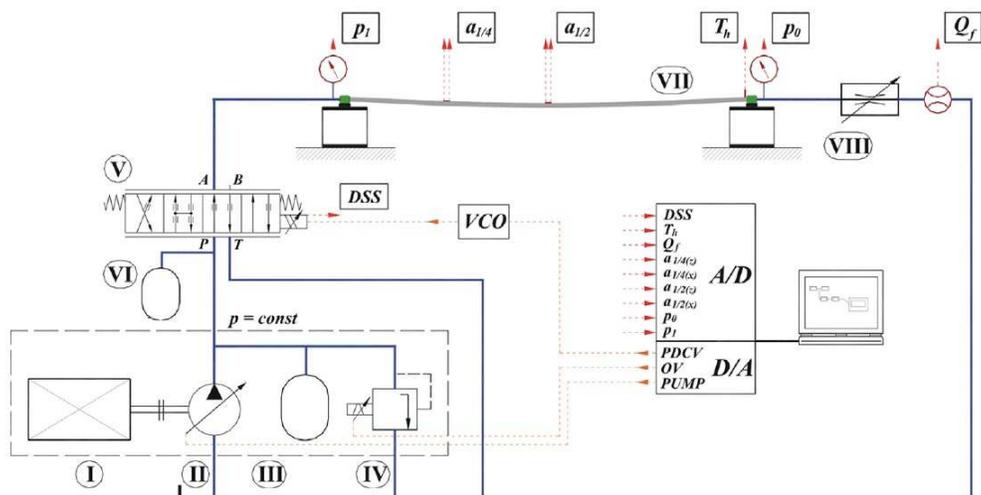
ros. En la Fig.[1.3] se muestra el sistema experimental de tubos de PVC<sup>1</sup> en el que se simulan fugas. Con el uso de acelerómetros se miden las vibraciones que se generan. Las aceleraciones reportadas llegan a alcanzar una frecuencia máxima de 1600 Hz [19]. Sin embargo, en otros estudios se asegura que el contenido de frecuencia de una fuga en tubería de plástico en su mayoría son inferiores a los 50 Hz [32].



**Figura 1.3:** Sistema experimental para el estudio de detección de fugas en tubería de PVC [19]

Los golpes de ariete y las fugas no son los únicos fenómenos que han motivado investigaciones. Un estudio sobre la IFE debido a un flujo pulsante en una sección de manguera, describe los modos de vibración axial que ese flujo genera. En la Fig.[1.4] se muestra el sistema experimental correspondiente. Los parámetros que variaron fueron la velocidad en el flujo y la temperatura en la sección de estudio. Para todos los modos de vibración reportados las frecuencias están por debajo de los 50 Hz, con picos de presión del orden de  $6 \times 10^6$  Pa [1].

<sup>1</sup>El estudio asegura que el uso de PVC se está convirtiendo en una opción cada vez más popular para tuberías de distribución de agua especialmente en diámetros pequeños y medianos.



**Figura 1.4:** Sistema experimental para el estudio de modos de vibración en mangueras debido a un flujo pulsante [1]

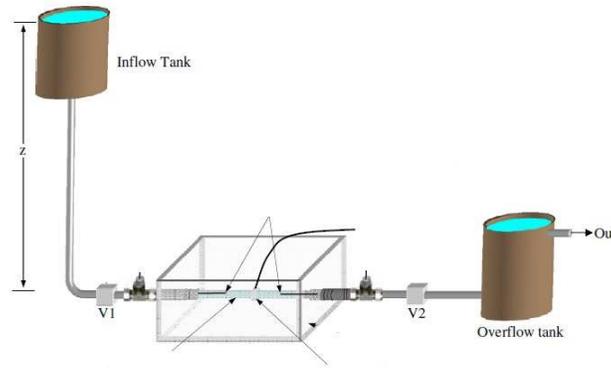
También los flujos en régimen permanente motivan estudios de IFE. En un estudio realizado en las instalaciones de una subestación de distribución de agua en la ciudad de Apulia Italia, caracterizó las vibraciones generadas por el flujo en la tubería metálica para diferentes caudales. Las mediciones se realizaron con medidor de vibraciones láser de efecto Doppler (LDV). En los espectros de aceleración reportados para los tres caudales, la amplitud máxima de aceleración está alrededor de los 25 Hz [20]. Por otra parte el pico de aceleraciones se comporta de manera casi lineal con el aumento de los caudales.

Una revisión de los trabajos enfocados en el estudio de IFE, indica que aproximadamente el 20% de los estudios son de tipo experimental. De la revisión, se concluye que resulta esencial construir un método de evaluación de las respuestas en tuberías con combinaciones de parámetros de las mismas; en las estructuras de los sistemas y en el cambio de condiciones de frontera que se pueda validar experimentalmente. El análisis se tiene que realizar caso por caso debido a las características únicas de cada sistema [27]. Los componentes en un sistema de tuberías son muchos para realizar un análisis individual y podría representar costos económicos y de tiempo muy elevados [6].

En 2003 se realizó un estudio en el que se simuló un conducto cístico humano, con el fin de observar las deformaciones del mismo, ocasionadas al flujo biliar, con y sin cálculos biliares [25]. En 2006 se realizó un estudio de numérico para el transporte de micropartículas en alvéolos pulmonares con el objetivo de cuantificar cómo el tamaño de las partículas,

frecuencia de respiración y propiedades viscoelásticas del tejido, influyen en el transporte de partículas en el pulmón profundo, y también para identificar la importancia relativa de la convección y la difusión en la escala alveolar[16].

Recientemente, se utilizó un modelo numérico de IFE y una serie de experimentos para validar la predicción del flujo transitorio en arterias con el fin de conocer la deformación arterial. En la Fig[1.5] se muestra la instalación experimental utilizada en dicho estudio.



**Figura 1.5:** Sistema experimental para el estudio de flujos transitorios en arterias.

El estudio de IFE en flujos confinados en conductos circulares, permite tener un mejor entendimiento de fenómenos de interés en ciencia e ingeniería. En la minoría de los estudios consultados de IFE para conductos circulares, el cambio de material del conducto no es considerado, ya sea por complicaciones de realizar cambios en los sistemas experimentales o por el nulo interés en hacer comparaciones del fenómeno estudiado en distintos materiales. Por ello en esta tesis, se plantea hacer un cambio de material en los conductos (tubos), para el estudio del fenómeno de IFE debido a una despresurización súbita.

### 1.3. Objetivo de la tesis

Identificar y cuantificar las diferencias en las respuestas dinámicas de conductos deformables, constituidos por 3 distintos materiales, cuando son sometidos a una despresurización súbita.

### 1.3.1. Objetivos particulares

- Construir un sistema experimental en el que se pueda generar un despresurización súbita y que facilite un cambio de sección de pruebas.
- Instrumentar la instalación experimental, calibrar y sincronizar los instrumentos con el equipo de adquisición de datos, el equipo de cómputo y el control de la válvula.
- Obtener y procesar las señales que miden los desplazamientos superficiales en la pared externa del tubo.

### 1.3.2. Alcances

- Las series experimentales consideran dos variables: la frecuencia de muestreo en los sensores y el cambio de sección de diferente material.
- Analizar las series de tiempo mediante técnicas básicas de tratamiento de señales.
- Establecer las características que se modifican en función del material utilizado.

### 1.3.3. Hipótesis

- Los materiales más rígidos presentarán una respuesta dinámica más rápida.
- Las variaciones en la amplitud de la respuesta tendrán un comportamiento lineal con relación al aumento del módulo de Young en cada uno de las secciones de prueba.
- Las condiciones del sistema experimental no son causa de ruido significativo en las señales adquiridas.

# Capítulo 2

## MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan, por una parte, ecuaciones con las que se puede describir una IFE, y por otra parte, las ecuaciones y herramientas matemáticas que se implementaron en el análisis de señales presentadas en este trabajo. Se describen de forma general su significado y todas ellas son optimizadas para emplearse en programas de cómputo.

### 2.0.1. Ecuaciones de Continuidad

El movimiento de un fluido se describe mediante las ecuaciones de conservación de masa y Navier-Stokes. La forma de estas ecuaciones son:

$$\nabla \cdot \rho \bar{v} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

y

$$\rho \frac{D\bar{v}}{Dt} = -\nabla P + \rho \bar{g} + \mu \nabla^2 \bar{v} \quad (2.2)$$

donde  $\bar{v}$  es la velocidad del flujo,  $\rho$  la densidad del fluido,  $P$  la presión,  $\mu$  la viscosidad dinámica, y  $\bar{g}$  la gravedad.

Por otra parte, en mecánica de sólidos, la ecuación que describe el campo de desplazamientos de sólidos de Hook<sup>1</sup> es la ecuación de Navier-Cauchy, cuya forma es:

---

<sup>1</sup>Un sólido hookeano es aquel que la relación entre esfuerzo aplicado y la deformación, es lineal.

$$\varrho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = (\mu_e + \lambda_e) \nabla(\nabla \cdot \bar{u}) + \mu_e \nabla^2 \bar{u} + \varrho \bar{f} \quad (2.3)$$

siendo  $\varrho$  la densidad del sólido,  $\bar{u}$  el desplazamiento,  $\mu_e$  y  $\lambda_e$  los coeficientes de Lamé y  $\bar{f}$  el vector de aceleraciones que comúnmente contiene la gravedad[3]. El conjunto de ecuaciones 2.2 y 2.3 permite estudiar la interacción elastodinámica fluido-sólido. La solución permite predecir el comportamiento de las estructuras al paso de un flujo, así como las modificaciones al flujo debido a la respuesta de la estructura.

## 2.1. Transformada discreta de Fourier

La transformada discreta de Fourier (TDF), para el análisis de señales discretas en el tiempo, es una técnica matemática que permite pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Así, podemos interpretar la señal como una suma de funciones senoidales de distintas amplitudes y frecuencias. La transformada de Fourier es un transformada integral de la forma:

$$X(F) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi Ft} dt \quad (2.4)$$

En las pruebas experimentales lo que se obtiene son series discretas de datos, y no una señal continua; por lo se puede usar la TDF, que tiene la forma:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{n=1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad (2.5)$$

siendo  $x(n)$  es la secuencia de datos de longitud  $N$  [18]. Para el propósito de este trabajo la transformada de Fourier permite observar los espectros de frecuencia de las señales de deformación, ver apéndice D.

## 2.2. Estadística básica para el análisis de señales

Se implementó el uso de estadística para realizar comparaciones entre la repeticiones experimentales.

### 2.2.1. Dispersión estadística

La desviación estándar es un indicador de la dispersión de los datos obtenidos. Ésta se define como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^N |x - \bar{x}|^2}{N}} \quad (2.6)$$

donde  $\bar{x}$  representa el valor medio de los datos y N el número total de datos. La desviación estándar (s) representa una medida de las desviaciones de cada uno de los valores de la muestra[8][26]. Conociendo s y haciendo la consideración de que es el valor medio de las desviaciones, se puede generar un intervalo que cubre todos los valores obtenidos experimentalmente, esto es, sumando y restando s a el valor medio de las 10 repeticiones.

### 2.2.2. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es un indicador de que tanto se relacionan linealmente dos variables. El coeficiente puede fluctuar en un rango de  $-1 \leq C_c \leq 1$ .

- Si  $C_c=1$ , la relación es positiva perfecta, es decir, una relación directa.
- Si  $0 < C_c < 1$ , la relación es positiva.
- Si  $C_c=0$ , las dos variables son linealmente independientes.
- Si  $-1 < C_c < 0$ , la relación es negativa.
- Si  $C_c=-1$ , la relación es negativa perfecta, es decir, una relación inversa.

El coeficiente de correlación se:

$$C_c = \frac{S_{xy}}{s_x s_y} \quad (2.7)$$

donde  $S_{xy}$  representa la covarianza de las dos variables dada por:

$$S_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{N} . \quad (2.8)$$

El coeficiente resulta útil en la comparación entre cada una de las pruebas. Esto es, se puede saber la relación que existe entre las repeticiones realizadas, esperando que estas tengan un valor en mayor medida cercano a 1. Es decir, cuando una de las variables aumenta, la otra también lo hace en proporción constante, teniendo una relación directa positiva<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Cabe mencionar que el coeficiente, no indica la magnitud de la pendiente de la relación lineal.

# Capítulo 3

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### 3.1. Dispositivo experimental

El dispositivo para las pruebas experimentales, consiste en una estructura constituida de tres soportes metálicos de 2.5 m de alto y 0.285 m de ancho, anclados al piso por medio de tornillos de expansión<sup>1</sup>. Los primeros dos soportes están colocados de forma paralela con una separación de 0.755 m y, conectados con perfiles metálicos dispuestos en forma de “x” de 1.08 m de largo. El tercer soporte está colocado de manera centrada a 0.585 m, y girado 90° con respecto a los otros dos; este último está conectado a los dos primeros por medio de arreglos en “v” de perfiles metálicos de 0.84 m de largo. Una canaleta en vertical que funciona como guía para los sensores de la sección de pruebas se sujeta al tercer soporte Fig.[3.3].

A 2 metros de altura, entre los dos soportes en paralelo, está colocado un contenedor de 70 Lt de capacidad. El cual en la parte superior cuenta con una conexión rápida para el suministro de aire con un manómetro y una válvula de globo acoplados, así como una pequeña tapa para depositar algún otro fluido. En la parte inferior del contenedor se le colocó un cople de rosca interna de 1 in NPT<sup>2</sup> al que se le conecta la tubería.<sup>3</sup>. El sistema empieza por una sección continua en vertical de 1.78 m de largo, seguido de un codo a 90° en dirección al tercer soporte, de la que sigue una sección horizontal de 0.54 m en la que está acoplado un segundo manómetro, una tuerca unión de PVC, una válvula solenoide (de la marca DEWIT

---

<sup>1</sup>Entre el piso y los soportes se usaron aislantes de caucho.

<sup>2</sup>El cople es de hierro y está soldado al contenedor metálico.

<sup>3</sup>El sistema de tubería es de PVC de 1 in cédula 80 de la marca SPEARS.

modelo 2W) y una pequeña sección de tubería continua <sup>4</sup> que llega hasta un segundo codo a 90°. La sección en horizontal está sujeta por un pequeño soporte anclado al piso y, antes del segundo codo, localizado en el tercer soporte Fig.[3.2].



**Figura 3.1:** Parte superior del contenedor.



**Figura 3.2:** Sección horizontal del sistema de tubería.

---

<sup>4</sup>Después de la válvula solenoide toda sección de tubería es de PVC transparente de 1 in, cédula 80.

La última sección del sistema empieza con un tramo de tubería de 0.22 m en dirección vertical que se le acopla una tuerca de unión donde se sujetan las secciones; de pruebas, el segundo punto de sujeción esta acoplado a un tramo de tubería de de 0.42 m de longitud. Finalmente se acopla un manguera del mismo diámetro para conducir los fluidos a un depósito abierto Fig.[3.3].



(a) Dispositivo de pruebas vista frontal



(b) Dispositivo de pruebas vista lateral

**Figura 3.3:** Dispositivo de pruebas.

Para las uniones y sujeciones en el dispositivo de pruebas se utilizaron cojinetes de caucho para reducir el ruido y para evitar que durante las pruebas se detectasen señales ajenas al evento de interés, ver Fig.[3.4] y Fig.[3.5]. Esto ha permitido una reducción importante de vibraciones en el sistema [15].



(a) Sujeción de codos



(b) Sujeción de tubería

**Figura 3.4:** Sujeciones.

(a) Uniones en soportes



(b) Uniones entre soportes

**Figura 3.5:** Uniones.

Para la sección de pruebas se pueden colocar tres secciones de tubería de diferentes materiales de un diámetro nominal<sup>5</sup> de 1 in, y una longitud de 0.5 m Fig.[3.6]. Para efectos de cálculo, se utilizó el valor promedio del grosor de pared de cada uno de los tubos, esto con motivo las variaciones del mismo por defectos del tubo. En la Tabla[3.1] se presentan las variaciones del grosor para cada uno de los tubos.

<sup>5</sup>Se dice nominal ya que la medida no corresponde al diámetro externo ni al interno, y este último varía en cada tubo según el grosor de pared.



**Figura 3.6:** Tubos para la sección de pruebas

**Tabla 3.1:** Variaciones del grosor en pared de tuberías

Angulo	Variaciones mm		
	Tubo 1 (transparente)	Tubo 2 (gris)	Tubo 3 (rojo)
0°	0.5	0.38	0.54
20°	0.5	0.39	0.5
40°	0.5	0.37	0.5
60°	0.5	0.35	0.5
80°	0.5	0.35	0.5
100°	0.49	0.37	0.5
120°	0.49	0.4	0.52
140°	0.49	0.4	0.51
160°	0.5	0.42	0.54
180°	0.5	0.47	0.55
200°	0.49	0.46	0.55
220°	0.5	0.43	0.53
240°	0.5	0.43	0.5
260°	0.5	0.41	0.52
280°	0.52	0.43	0.53
300°	0.52	0.43	0.55
320°	0.52	0.41	0.55
340°	0.5	0.4	0.55
PROMEDIO	0.50111	0.40556	0.52444

El material para el tubo transparente es PVC rígido transparente con módulo de Young de  $E=2.7 \times 10^9$  Pa [29]. El tubo gris es de PVC plastificado traslucido con una malla de poliéster

[5], con módulo de Young de  $E=1.1 \times 10^9$  Pa. Por último, el tubo rojo es de PVC flexible 100 % virgen negro, reforzado con un trenzado de poliéster y una cubierta de PVC <sup>6</sup> con módulo de Young de  $E=2 \times 10^9$  Pa [21].

### 3.1.1. Instrumentación

En la etapa de instrumentación se pueden diferenciar dos partes. La primera de ellas es la colocación y conexión de los instrumentos de medición en las secciones de pruebas, y la segunda se refiere a la automatización de la válvula solenoide. Ambas partes se acoplan para lograr una sincronía en los experimentos y las mediciones, figuras[3.7], [3.8] y [3.9].

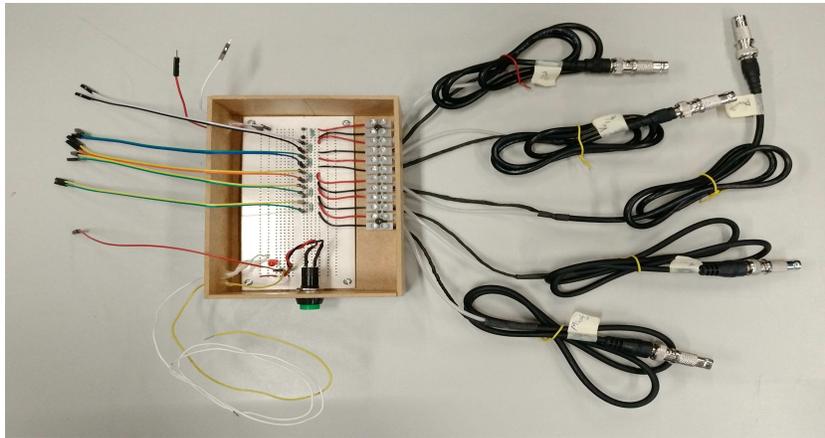


Figura 3.7: Parte 1.

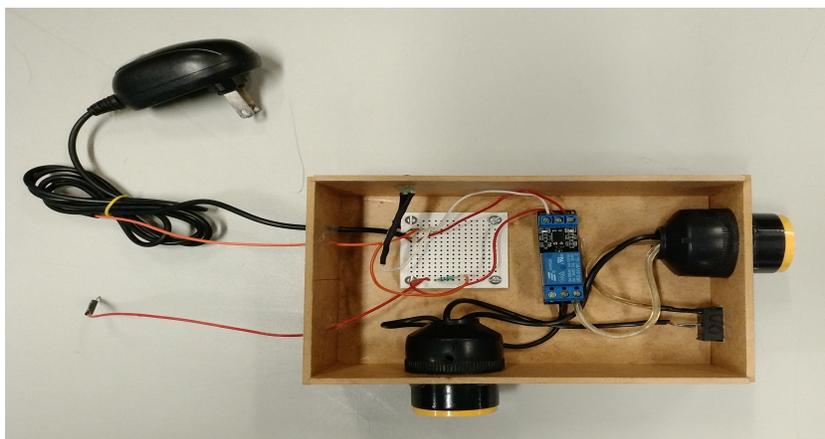
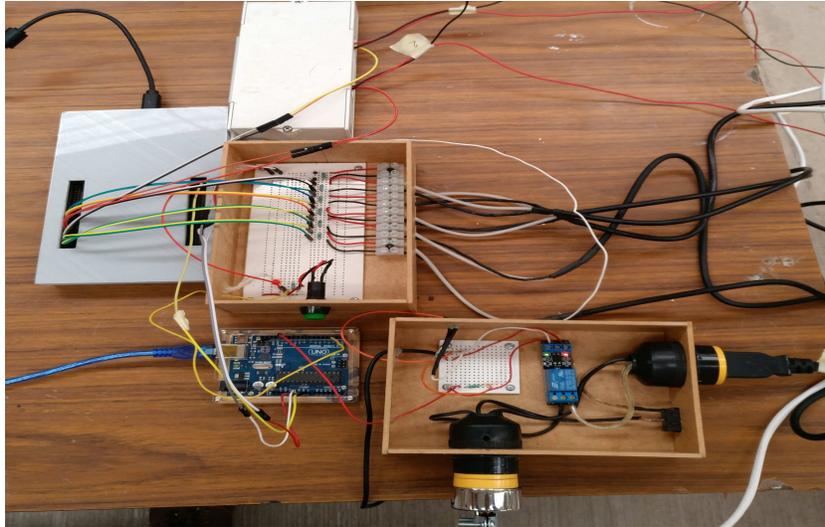


Figura 3.8: Parte 2.

---

<sup>6</sup>El proveedor no especifica que PVC es el recubrimiento.

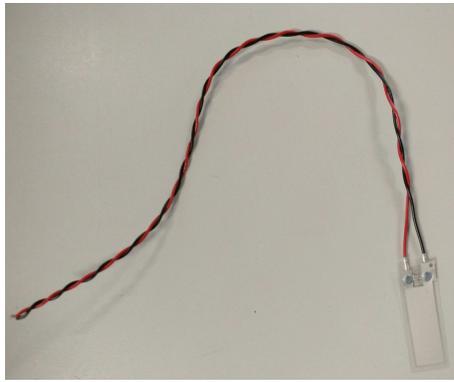


**Figura 3.9:** Sistemas de medición y de control de válvula.

Los instrumentos de medición que se utilizaron para la primera parte de instrumentación fueron 4 sensores piezoeléctricos modelo LDT1-028K Fig.[3.10a], y dos transductores de presión modelo U5354 Fig.[3.10b] de la marca Measurement Specialities. Para instalar los sensores piezoeléctricos se les adaptaron conexiones del tipo BNC<sup>7</sup> Fig.[3.10c], con cable de diferentes colores para su identificación. Los transductores de presión ya estaban adaptados para conectar y adquirir señales colocando solo extensiones de cable en sus salidas.

---

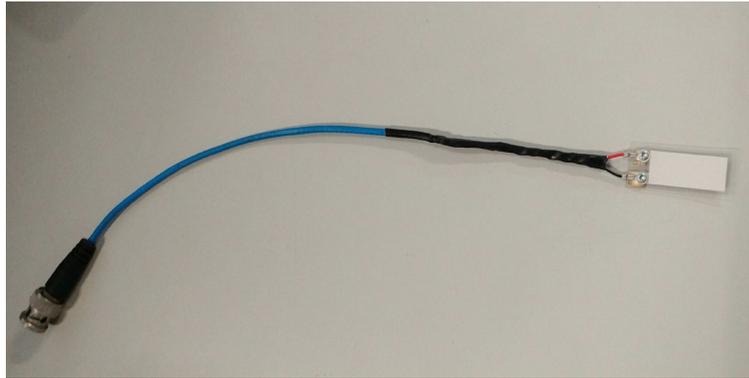
<sup>7</sup>Son conexiones que se pueden implementar fácilmente y con buen aislamiento



(a) Sensor piezoeléctrico



(b) Transductor de presión



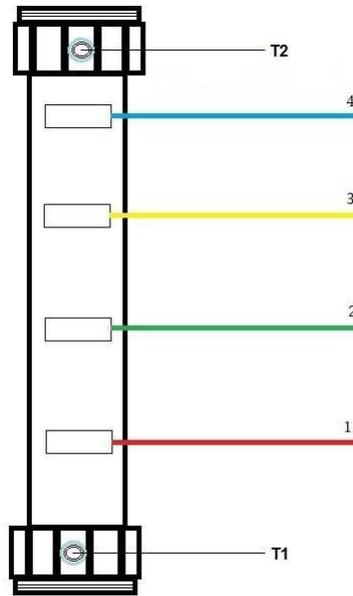
(c) Sensor piezoeléctrico con conexión BNC

**Figura 3.10:** Instrumentos.

La colocación de los instrumentos en las secciones de pruebas fue uno de los procesos que más tiempo requirió, pues se trata de un proceso que se tenía que repetir para cada sección y cada barrido de frecuencias. El orden en que se colocaron los instrumentos en la secciones de pruebas se muestra en la Fig.[3.11]. Se puede observar que las secciones tienen barrenos roscados en los extremos donde se colocaron los transductores de presión, el transductor No. 1 en la parte inferior, y el transductor No. 2 en la parte superior. Los sensores piezoeléctricos se colocaron con una separación de 0.1 m, justo después de la turca unión de la parte inferior, y siempre en el mismo orden de colores que se ve en la Fig.[3.11]. A diferencia de los transductores, los cuales se atornillaban a la sección gracias a los barrenos roscados, los sensores piezoeléctricos se unieron a la sección con cinta adhesiva para mantenerlos fijos en sus posiciones. Es importantes señalar que se agregó una delgada capa de grasa<sup>8</sup> entre la sección y los sensores para un mejor acoplamiento.

---

<sup>8</sup>Grasa disipadora de calor marca SILITEK



**Figura 3.11:** Esquema de sección de pruebas instrumentada.

Una vez colocados los instrumentos en la sección de pruebas, se procedió a realizar las conexiones Fig.[3.9]. En el caso de los sensores piezoeléctricos se les colocó una resistencia en serie con un valor de  $10 \times 10^6 \Omega$  como lo especifica su datasheet [30]. La conexión a la tarjeta de adquisición de datos se hizo mediante cables “jumpers” Fig.[3.13] conectados en paralelo con las resistencias acopladas a cada sensor. Las conexiones de los transductores de presión se realizaron al final, ya que a diferencia de los sensores piezoeléctricos, los transductores son de tipo pasivo<sup>9</sup>. La conexión de los instrumentos se observa en la Fig.[3.12]<sup>10</sup>. En la Tabla[3.2] se indican las entradas analógicas para cada uno de los instrumentos en la manera en que se usaron en cada prueba.

<sup>9</sup>Requieren de una fuente de energía externa para generar señales representativas de las magnitudes a medir [13].

<sup>10</sup>El esquema mostrado en la figura solo muestra 2 de los 4 sensores piezoeléctricos, pues las conexiones son iguales para los otros dos.

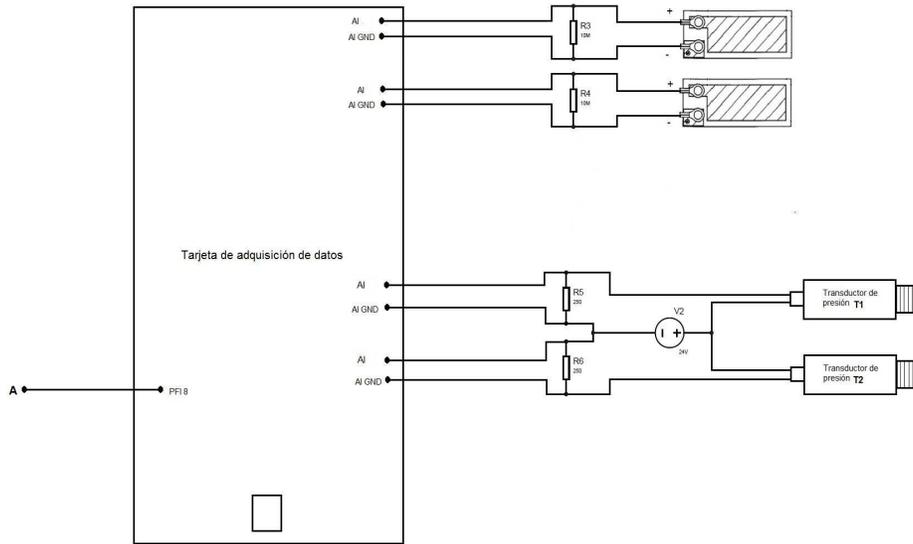


Figura 3.12: Esquema conexión de instrumentos.

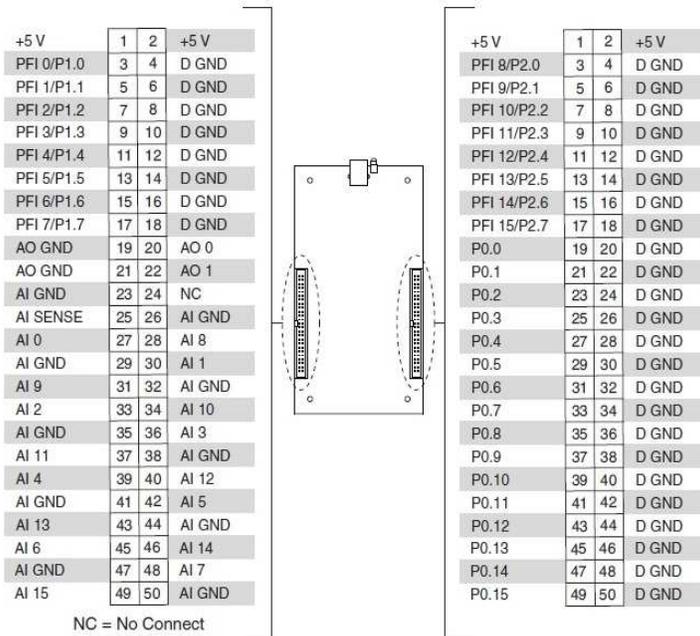


Figura 3.13: Esquema tarjeta de adquisición [23].

**Tabla 3.2:** Entradas analógicas

Instrumento	Entrada Analógica
Piezo azul	7
Piezo amarillo	0
Piezo verde	8
Piezo rojo	9
Transductor 1	13
Transductor 2	11

La segunda parte de la instrumentación como ya se mencionó es la automatización de válvula solenoide. Para la selección de válvula se tomaron en consideración tres aspectos fundamentales. Con el fin de tener una recolección de datos de la mejor calidad posible, fue indispensable tomar en cuenta la velocidad de apertura de válvula, la sincronía de la adquisición de datos con la despresurización y el golpe mecánico que genera la válvula.

La velocidad de apertura de válvula, en este caso se requirió que fuera lo más rápido posible, y que pudiese realizarse en el mismo momento para cada prueba. Lo que nos lleva al segundo aspecto, la sincronía de la adquisición de datos con la despresurización. El uso de un disparador se planteó para comenzar con la lectura de datos justo antes del momento de apertura de válvula. Con lo que se aseguraba adquirir los datos en el mismo momento para cada una de las pruebas. El último de los aspectos a considerar es el golpe mecánico que genera la válvula, esto es, por la velocidad requerida de la apertura de la misma, el choque de sus componentes en la apertura total de la válvula es ruido para los sensores. Por lo cual era necesario que este ruido fuera siempre el mismo para cada prueba, con el fin de caracterizarlo y en caso de ser significativo en las señales, eliminarlo.

Con el conocimiento de esos tres aspectos se optó por un válvula que se pudiera automatizar su apertura evitando aperturas manuales. La válvula seleccionada fue una de tipo solenoide marca DEWIT modelo 2W de uso general, normalmente cerrada<sup>11</sup>. La válvula es de acción directa que puede funcionar a presión cero y a una presión máxima de 125 psi. Su tiempo de apertura es del orden de 300 ms [12] y esta apertura es accionada por una bobina que funciona con una fuente de 24 VDC <sup>12</sup>.

<sup>11</sup>Existen válvulas de dos tipos normalmente abiertas o cerradas que cambian su estado al energizar.

<sup>12</sup>Se seleccionó esa alimentación para la válvula pues es la misma alimentación para los transductores de presión.

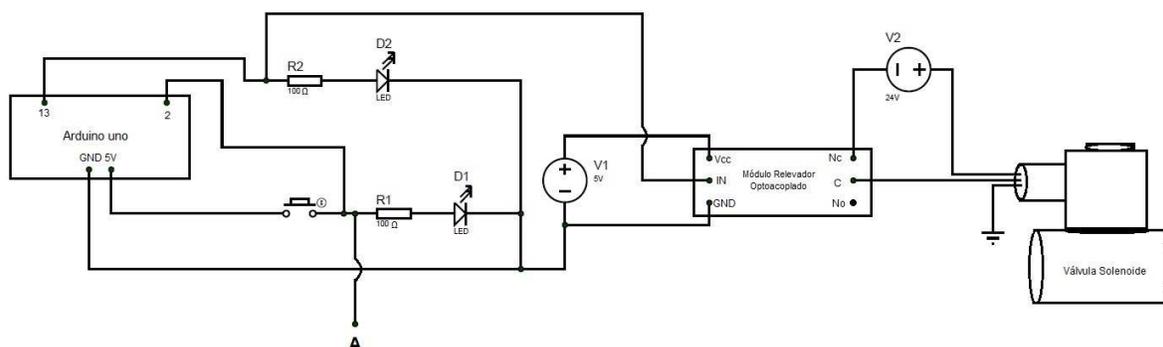
Para su automatización se utilizó un arduino uno con el programa de la Fig.[3.14]. El propósito del programa es mantener energizada la válvula durante un tiempo definido cuando se genera un pulso, el cual es utilizado para la sincronía con los instrumentos. La señal que sale del arduino que es de 5 V la cual activa un módulo de relevador optoacoplado cerrando el circuito con la fuente de 24 V que alimenta a la válvula solenoide. Después de pasar el tiempo ya definido, el arduino deja de mandar la señal de 5 V y el circuito se abre de nuevo cerrando la válvula.

```

int ledPin = 13; // Pin de salida para el LED (Válvula)
int inPin = 2; // Pin de entrada (donde está conectado el trigger)
void setup() {
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
  pinMode(inPin, INPUT);
}
void loop() {
  if (digitalRead(inPin) == HIGH){ // Si se activa interruptor
    delay(250); //Pausa 0.25 segundos
    digitalWrite(ledPin, HIGH); // Enciende el LED (Enciende Válvula)
    delay(10000); // Pausa 10 segundos
    digitalWrite(ledPin, LOW); // Apaga el LED (Apaga Válvula)
    delay(1000); // Pausa 1 segundo
  }
}

```

**Figura 3.14:** Código en arduino para control de válvula.



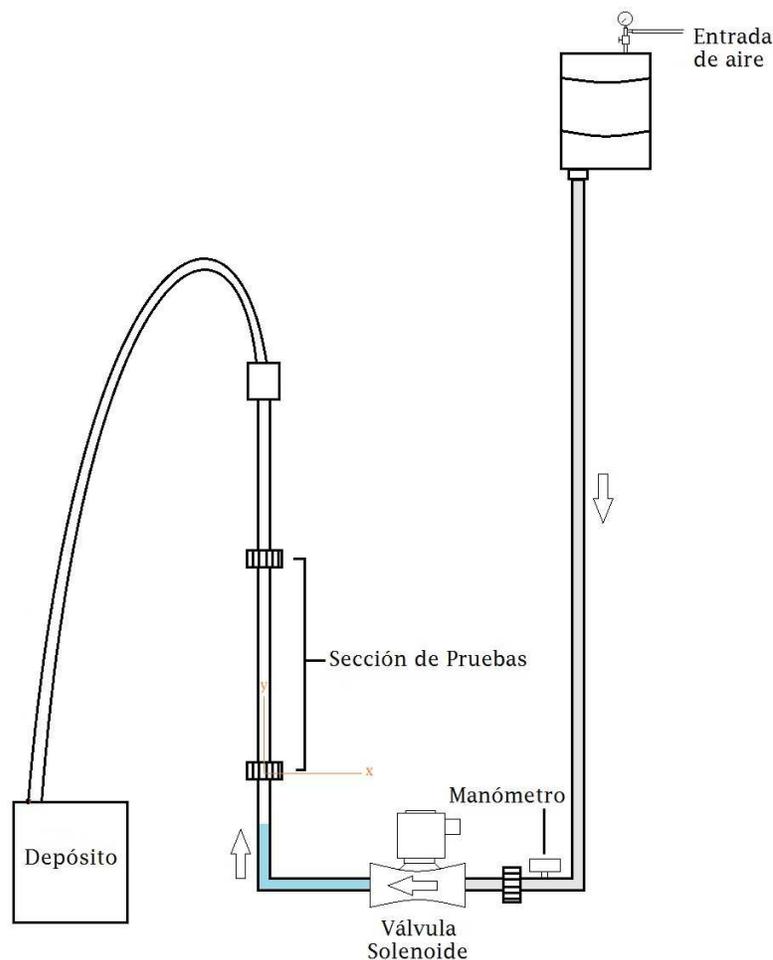
**Figura 3.15:** Esquema de control de válvula.

Por último lo que activa la grabación de datos y la apertura de válvula es el pulso de 5 V que es alimentado por el arduino como se ve en la Fig.[3.15]. Al presionar el botón disparador se manda una señal al nodo A que se dirige a la tarjeta en la Fig.[3.12]; luego comienza la

grabación de datos y 0.250 s después se abre la válvula. Después de 10 s la válvula se vuelve a cerrar. De este modo se sincronizaron ambas partes de la instrumentación y se redujo el ruido en las señales del fenómeno.

## 3.2. Series experimentales

El fenómeno de interacción fluido estructura que se analizó consistió en la despresurización súbita de aire comprimido que a su vez desplaza un bloque de agua de volumen conocido. Este movimiento genera perturbaciones en el ducto que lo contiene. Dichas perturbaciones se manifiestan en forma de vibraciones que pueden ser captadas por los instrumentos utilizados sobre las sección de pruebas. Cabe mencionar que no solo se puede obtener información sobre las señales de las vibraciones sino, también de la magnitud de las presiones internas. La Fig.[3.16] muestra el estado en  $t_0$  de los experimentos, en el que se resalta en color azul el bloque de agua de volumen conocido y en gris la sección de tubería aguas arriba de la válvula.



**Figura 3.16:** Esquema experimental.

El agua es introducida con un vaso de precipitado ya con el volumen requerido de agua en este caso 150 ml. Se desconecta la sección que guía el fluido al depósito y se vacía el agua, posteriormente se vuelve a colocar la sección guía. La entrada de aire es alimentada por un compresor y es controlada manualmente con un regulador de presión. En  $t_0$  se activa el disparador, y se comienzan a registrar datos; 0.25 segundos después se abre la válvula solenoide y la tarjeta de adquisición de datos graba durante 20 s. Una vez cerrada la válvula se repite todo para dejar el sistema en estado de  $t_0$  y proseguir con la siguiente prueba.

Para obtener datos se realizó un barrido de 3 frecuencias para cada una de las secciones de pruebas. Se hicieron 10 repeticiones para cada una de esas frecuencias por cada tubería.

Para la frecuencia más baja se obtuvieron señales de los 6 sensores, mientras que para las dos frecuencias posteriores, solo se obtuvieron señales de los sensores piezoeléctricos.

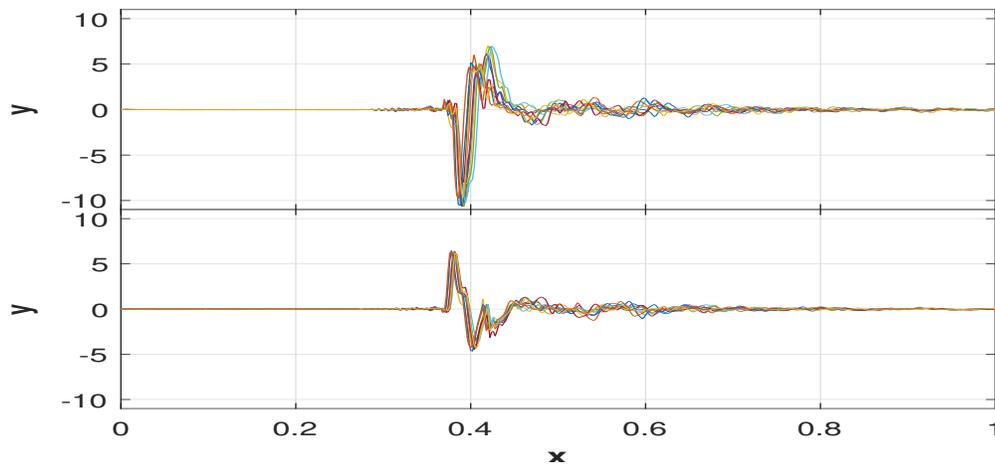
# Capítulo 4

## RESULTADOS

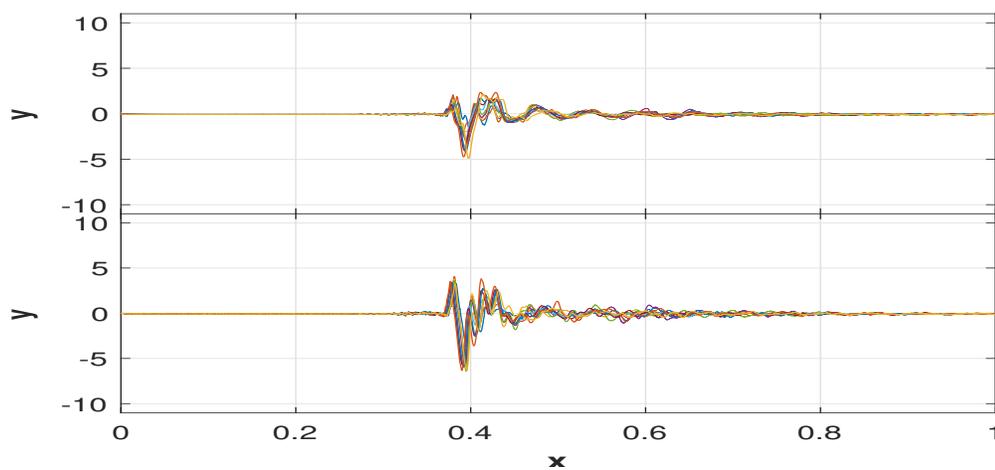
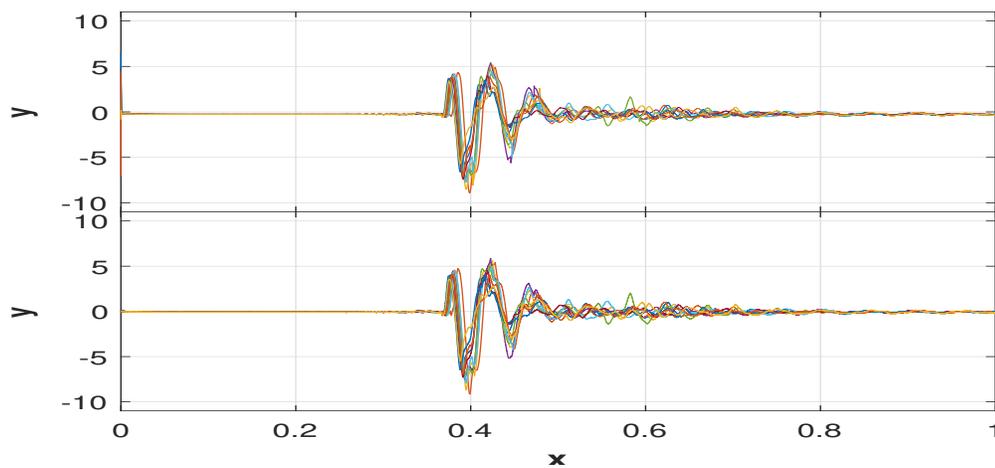
### 4.1. Mediciones

En este capítulo se presentaran los datos obtenidos de las series experimentales. Posteriormente se analizan las diferencias que provoca el cambio de material de las secciones de pruebas en el fenómeno de estudio. Una vez finalizadas las pruebas correspondientes para cada una de las secciones, se graficaron los datos con el fin de establecer la repetibilidad de los experimentos. En las figuras[4.1], [4.2] y [4.3] se muestran las repeticiones para las 3 secciones en las tres frecuencias de muestreo en los sensores 1 y 4 en conformidad con el orden indicado en la Fig.[3.11].

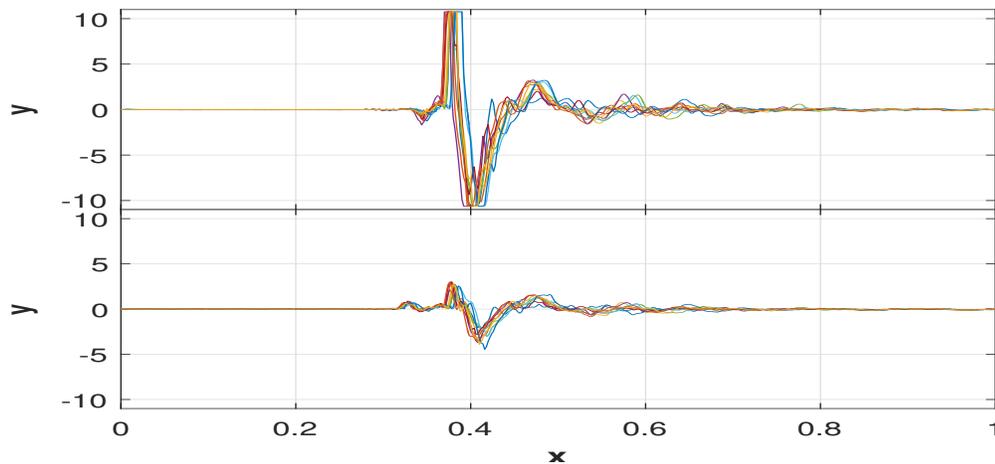
Para la frecuencia de 500 Hz, como ya se mencionó, se utilizaron transductores de presión cuyas señales se graficaron igualmente. Lo factores de correlación para las señales de presión en ambos transductores rondan por encima 0.99 para los tres tubos, siendo los coeficientes de correlación más altos.



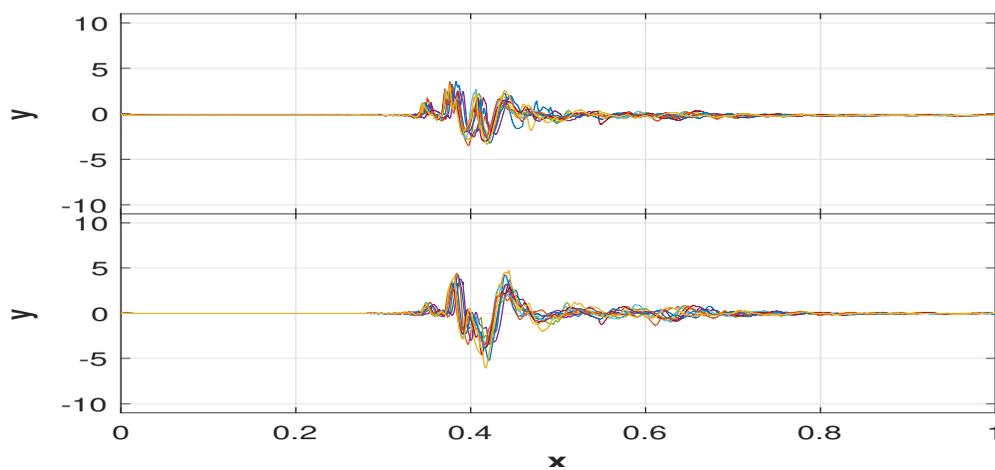
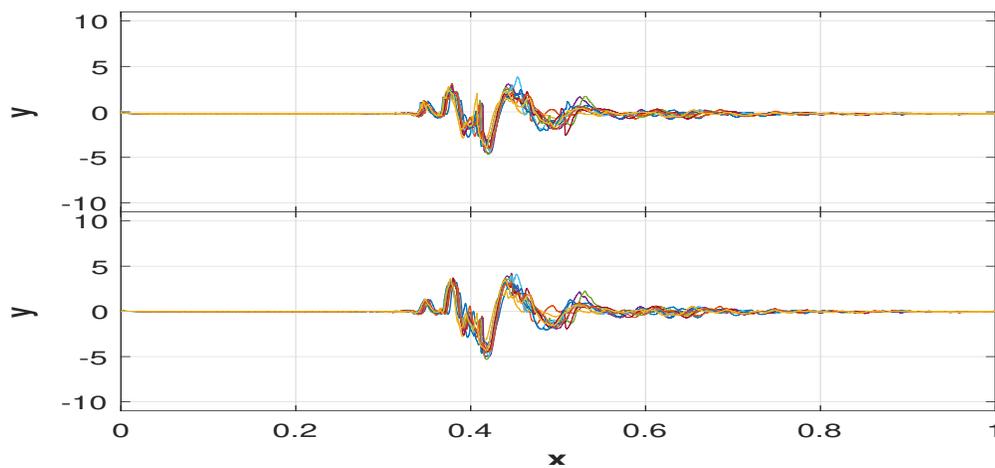
(a) 10 pruebas en tubo 1, sensores 1 y 4 a 500 Hz

(b) 10 pruebas en tubo 1, sensores 1 y 4 a  $30 \times 10^3$  Hz(c) 10 pruebas en tubo 1, sensores 1 y 4 a  $100 \times 10^3$  Hz

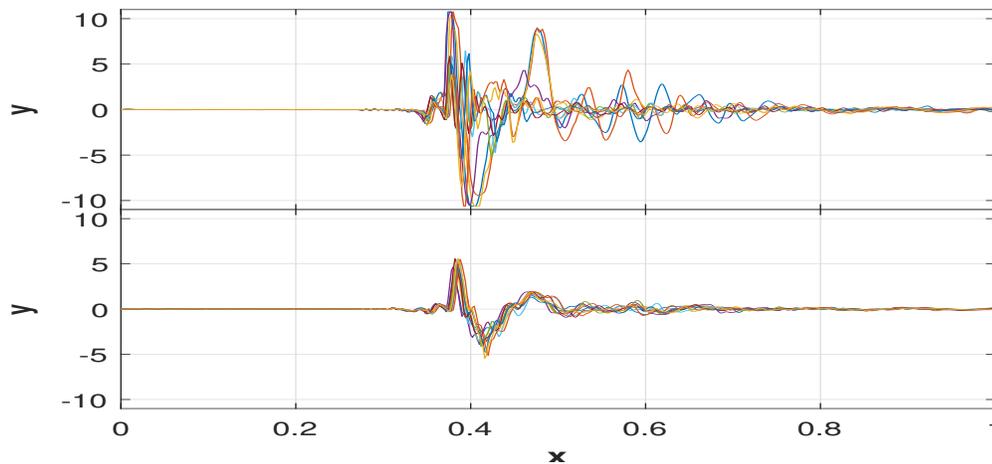
**Figura 4.1:** Señales registradas por los sensores piezoeléctricos para el tubo No. 1, cuyo módulo de Young es de  $2.7 \times 10^9$  Pa.



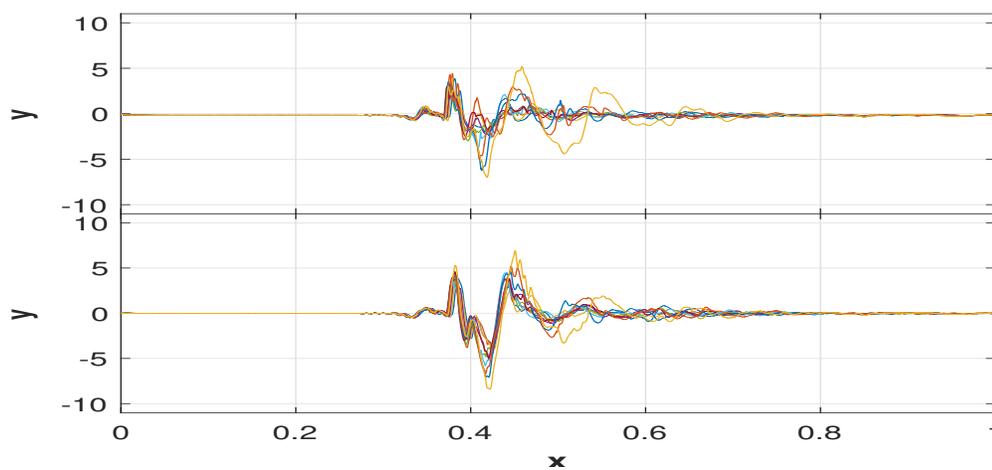
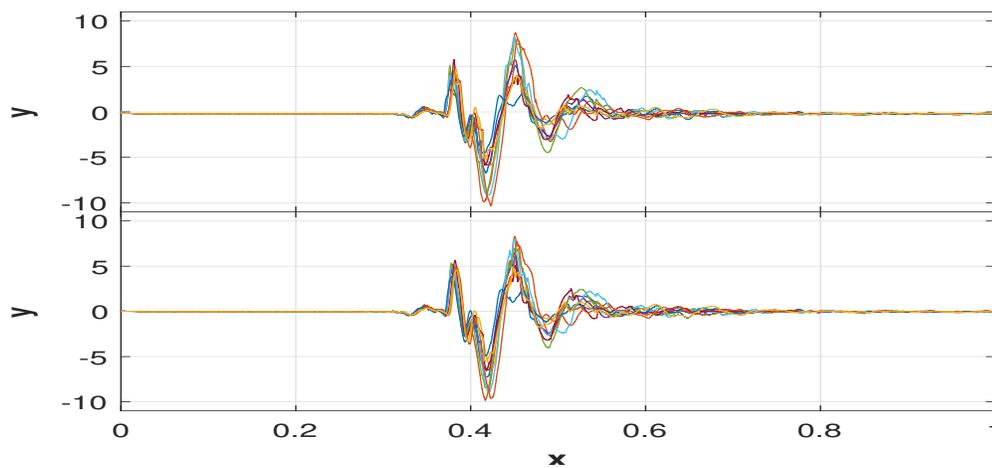
(a) 10 pruebas en tubo 2, sensores 1 y 4 a 500 Hz

(b) 10 pruebas en tubo 2, sensores 1 y 4 a  $30 \times 10^3$  Hz(c) 10 pruebas en tubo 2, sensores 1 y 4 a  $100 \times 10^3$  Hz

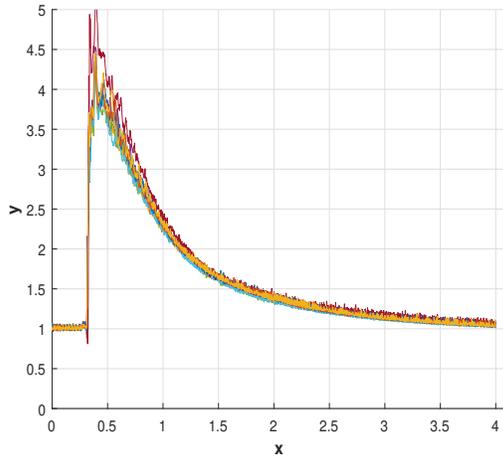
**Figura 4.2:** Señales registradas por los sensores piezoeléctricos para el tubo No. 2, cuyo módulo de Young es de  $1.1 \times 10^9$  Pa.



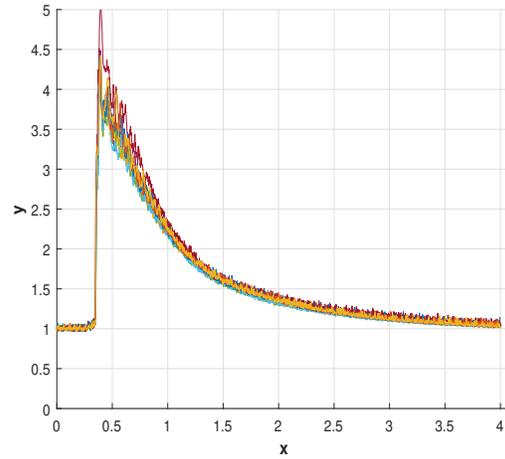
(a) 10 pruebas en tubo 3, sensores 1 y 4 a 500 Hz

(b) 10 pruebas en tubo 3, sensores 1 y 4 a  $30 \times 10^3$  Hz(c) 10 pruebas en tubo 3, sensores 1 y 4 a  $100 \times 10^3$  Hz

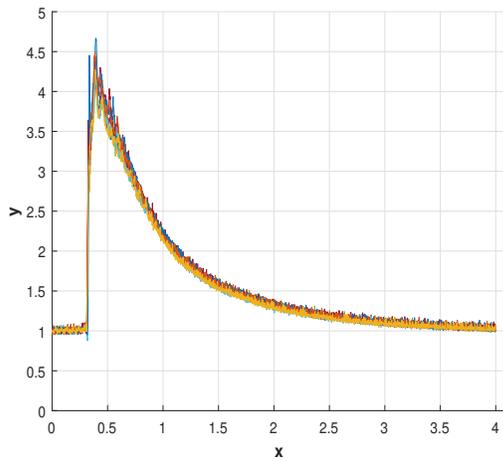
**Figura 4.3:** Señales registradas por los sensores piezoeléctricos para el tubo No. 3, cuyo módulo de Young es de  $2 \times 10^9$  Pa.



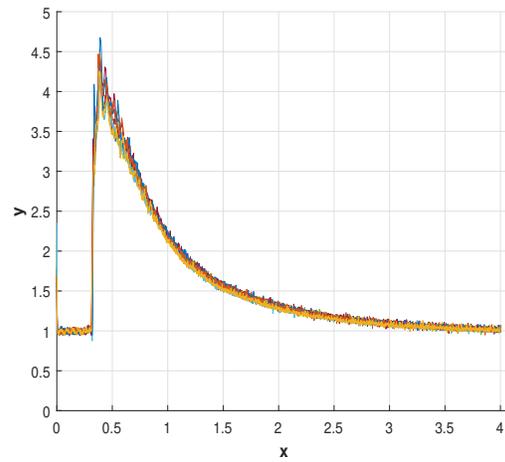
(a) Transductor 1 en tubo 1.



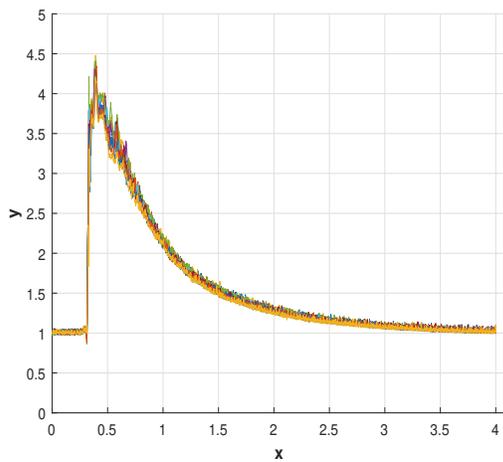
(b) Transductor 2 en tubo 1.



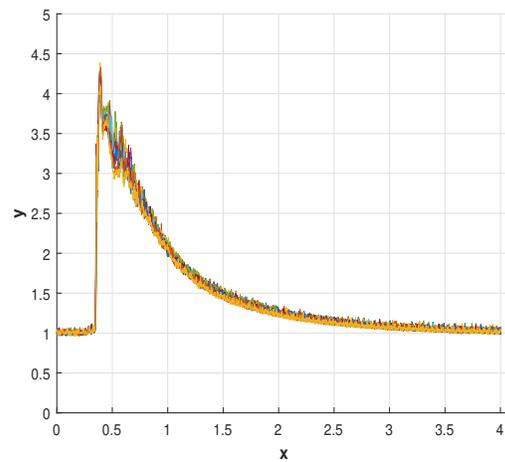
(c) Transductor 1 en tubo 2.



(d) Transductor 2 en tubo 2.



(e) Transductor 1 en tubo 3.



(f) Transductor 2 en tubo 3.

**Figura 4.4:** Señales de presión para los tres tubos.

Las gráficas de las Figuras[4.1][4.2][4.3][4.4] muestran solo la relación para el tipo de onda que existe entre cada prueba de la series experimentales. Lo que se observa es que, si bien, el fenómeno no tiene una repetibilidad exacta es apreciable el tipo de señal que se obtiene para cada caso<sup>1</sup>.

Los coeficientes de correlación para estas señales, de manera general, tienen una relación positiva considerable. En las se señales medidas en frecuencias de 500 y  $30 \times 10^3$  Hz, se presentan las mayores variaciones en los coeficientes, esto es, en los sensores 4 y 3 se llegan a presentar coeficientes negativos cercanos a 0 indicando una relación débil entre pruebas y en los demás sensores con relaciones positivas fuertes. Los coeficientes de correlación con menor variación y en rangos de una correlación fuerte o perfecta<sup>2</sup> son los correspondientes a las señales adquiridas con la frecuencia de muestreo de  $100 \times 10^3$  Hz. Para mayor detalle de los coeficientes ver apéndice A.

#### 4.1.1. Procesamiento de datos

Para los transductores de presión la señal de salida varía en un rango de 4 mA a 20 mA para presiones de 0 a 15 psi, respectivamente, con un comportamiento lineal. Esto permite aplicar la ecuación

$$P_{(Pa)} = \left[ \left[ \frac{P(V)}{R} \right] 937.5 - 3.75 \right] 6894.76 \quad (4.1)$$

de la que se obtienen los valores de presión en pascales mediante un factor de conversión  $1 \text{ psi} = 6894.76 \text{ Pa}$ , y donde R es el valor de la resistencia en la que se realizó la medición Fig[3.12].

En el caso de las señales de los sensores piezoeléctricos se utilizó una constante de esfuerzo  $g_{31}$  y una longitud característica (en este caso en la dirección 1 del sensor según la Fig.[4.5a]). Con estos datos obtenemos los esfuerzos

---

<sup>1</sup>Otra forma de decirlo es que las diferencias para cada repetición son muy notorias, sin embargo, la forma de la señal que genera el fenómeno en cada sensor para cada frecuencia, independientemente de las amplitudes, es muy clara.

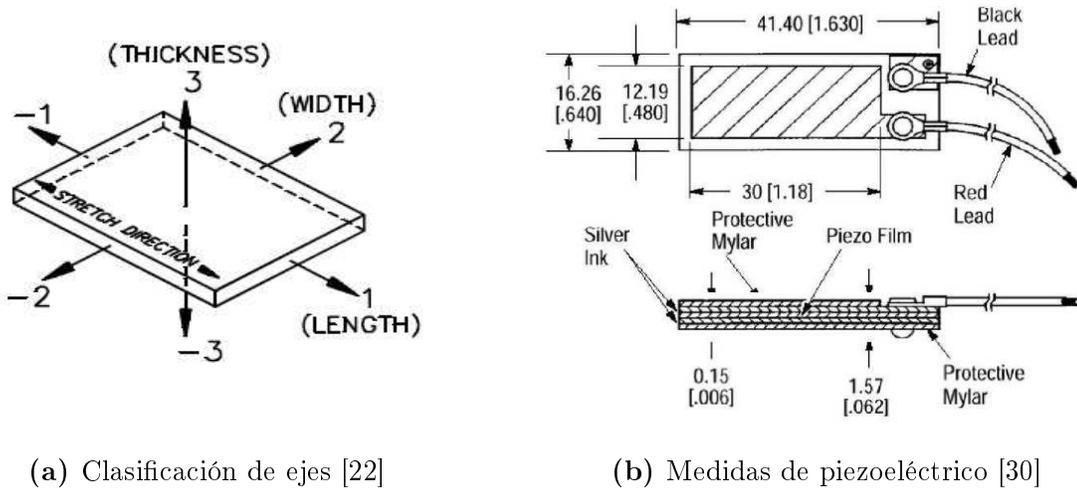
<sup>2</sup>La relación que indican los rangos de los coeficientes se toman de [7]

$$\sigma_{(Pa)} = \frac{\sigma_{(V)}}{g_{31} \ell} \quad (4.2)$$

donde  $g_{31}$  es  $0.216 \text{ (V m)/N}$  y  $\ell$  es  $0.03 \text{ m}$  Fig.[4.5b]  $\sigma_V$  es el esfuerzo en voltaje y  $\sigma_{Pa}$  el esfuerzo en presión. Si sabemos que la relación entre el esfuerzo y la deformación en el rango elástico es lineal, siendo el módulo de young la constante de proporcionalidad<sup>3</sup>[17], podemos obtener los valores de deformación para cada sección de prueba por medio de

$$\epsilon = \frac{\sigma_{(Pa)}}{E} \quad (4.3)$$

donde los módulos de Young empleados para el cálculo en cada uno de los tubos fueron de  $2.7 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $1.1 \times 10^9 \text{ Pa}$  y de  $2 \times 10^9 \text{ Pa}$ , para el tubo No. 1, el tubo No. 2 y el tubo No. 3, respectivamente.



(a) Clasificación de ejes [22]

(b) Medidas de piezoelectrico [30]

**Figura 4.5:** Características físicas de los sensores piezoelectricos empleados.

También se compararon las pruebas en términos de las desviaciones estándar de las mediciones correspondientes. En la tabla[4.1] se muestran los valores máximo de las desviaciones estándar en las tres frecuencia de muestreo y para los tres tubos. Estos máximos son de las desviaciones en general se detectaron en los sensores 3 y 4, ver apéndice B. Los valores de desviación estándar son de señales de deformación  $\epsilon$  por lo que resultan adimensionales.

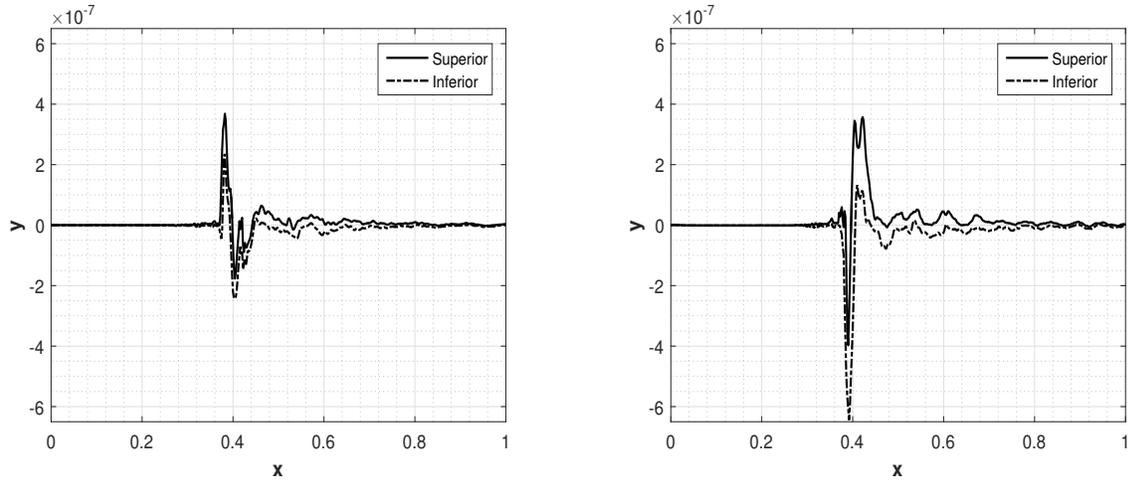
<sup>3</sup>A esto se le conoce como Ley de Hook y tiene la forma  $\sigma = E\epsilon$

**Tabla 4.1:** Desviaciones estándar máximas en señales de deformación para los tres tubos

Frecuencia Hz	Tubo No. 1	Tubo No. 2	Tubo No. 3
500	$2.82 \times 10^{-7}$	$9.42 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$
$30 \times 10^3$	$1.4 \times 10^{-7}$	$4.98 \times 10^{-7}$	$2.35 \times 10^{-7}$
$100 \times 10^3$	$1.93 \times 10^{-7}$	$4.71 \times 10^{-7}$	$2.1 \times 10^{-7}$

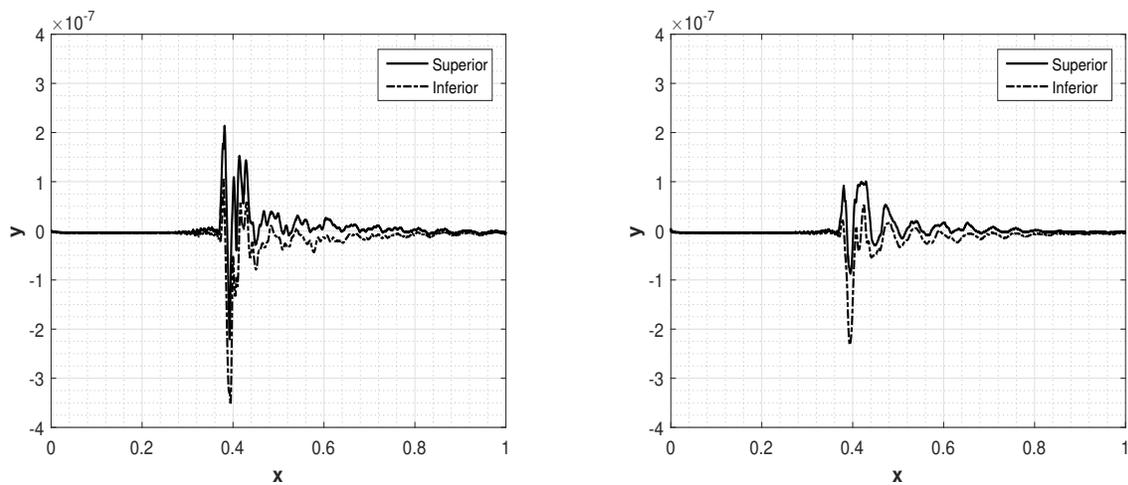
Con los valores de desviación estándar a lo largo del eje temporal, se pueden generar intervalos que cubran todos los posibles valores que se pueden obtener experimentalmente. Para el límite superior del intervalo, lo que se hizo fue sumar la desviación estándar a la señal promedio de las 10 pruebas. Para el límite inferior, lo que se hizo fue restar la desviación estándar a la señal promedio de las 10 pruebas. En las siguientes figuras se muestran los intervalos para cada uno de los tubos en las correspondientes frecuencias de muestreo. Sólo para los sensores 1 y 4.

En los intervalos mostrados para el tubo 1 en la frecuencia de 500 Hz, Fig.[4.6], se observa que el intervalo correspondiente al sensor 1 es más estrecho que el correspondiente al sensor 4. La distancia entre límites del intervalo del sensor 4 aumentan en la zonas correspondientes a los máximos y mínimos de la señal. En el caso de las mediciones a  $30 \times 10^3$  Hz, los intervalos de ambos sensores son estrechos a excepción de la zona de los máximos y mínimos donde a distancia entre límites es mayor en ambos sensores, Fig.[4.7]. Para los intervalos correspondientes a la frecuencia de muestreo más alta,  $100 \times 10^3$  Hz, se observa con mayor claridad que las distancias mas grandes entre límite superior e inferior, están en la zonas de los máximos y mínimos, Fig[4.8].



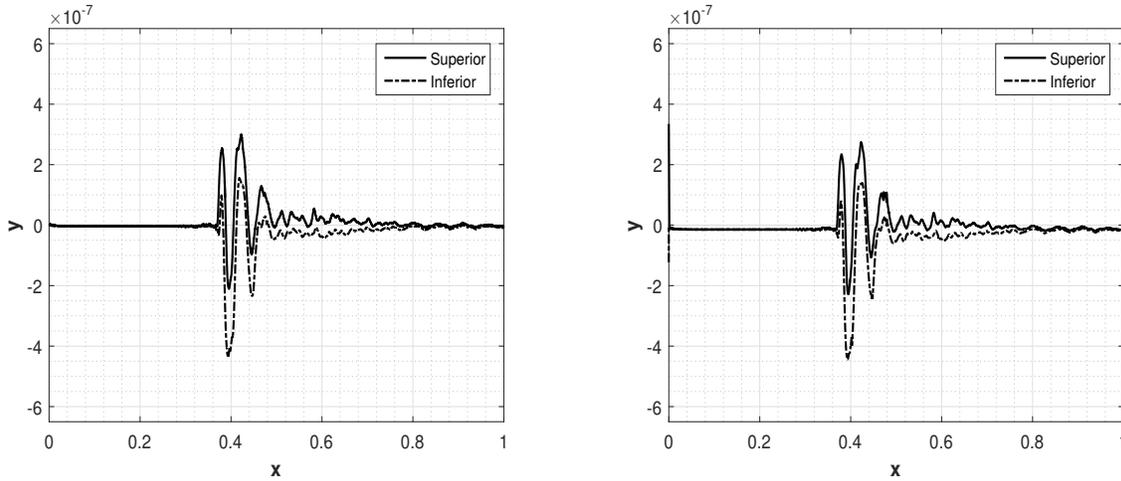
(a) Intervalo de mediciones en sensor 1 en tubo 1 a 500 Hz. (b) Intervalo de mediciones en sensor 4 en tubo 1 a 500 Hz.

**Figura 4.6:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 1 a 500 Hz.



(a) Intervalo de mediciones en sensor 1 en tubo 1 a  $30 \times 10^3$  Hz. (b) Intervalo de mediciones en sensor 4 en tubo 1 a  $30 \times 10^3$  Hz.

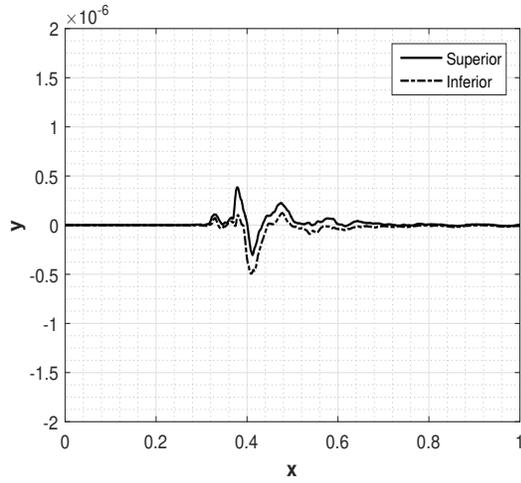
**Figura 4.7:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 1 a  $30 \times 10^3$  Hz.



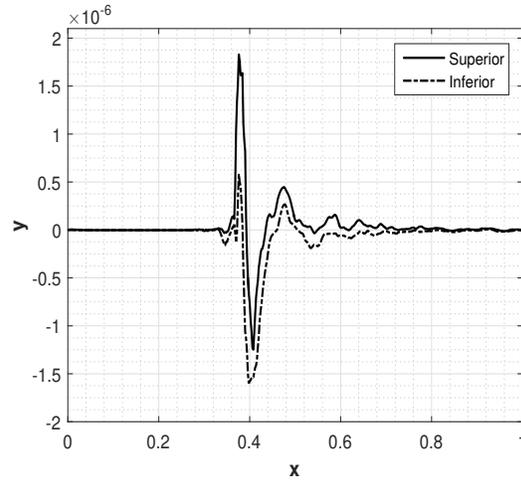
(a) Intervalo de mediciones en sensor 1 en tubo 1 a  $100 \times 10^3$  Hz.      (b) Intervalo de mediciones en sensor 4 en tubo 1 a  $100 \times 10^3$  Hz.

**Figura 4.8:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 1 a  $100 \times 10^3$  Hz.

Los intervalos generados para el tubo 2 se presentan en las figuras [4.9], [4.10] y [4.11]. Se observa una diferencia considerable en las distancias entre los límites superior e inferior de los intervalos de los sensores 1 y 4 en la frecuencia correspondiente de 500 Hz. En el intervalo del sensor 1 la distancia en la zona del valor máximo es de  $0.375 \times 10^{-6}$ , mientras que para el intervalo del sensor 4 es de  $1.25 \times 10^{-6}$ , teniendo un aumento alrededor del 233 %. Para el caso de los intervalos de las mediciones con una frecuencia de  $30 \times 10^3$  Hz, el intervalo correspondiente al sensor 1, muestra valores de mayor magnitud que el intervalo del sensor 4, caso contrario a los intervalos para 500 Hz. Por último, los intervalos correspondientes a la frecuencia más alta de muestreo ( $100 \times 10^3$  Hz), señalan (para ambos sensores) una zona muy estrecha y una zona con una distancia apreciable entre límites. La zona estrecha se observa para valores anteriores a los 0.44 s y posterior a este tiempo, la distancia se vuelve considerable entre límites hasta un tiempo de 0.8 s.

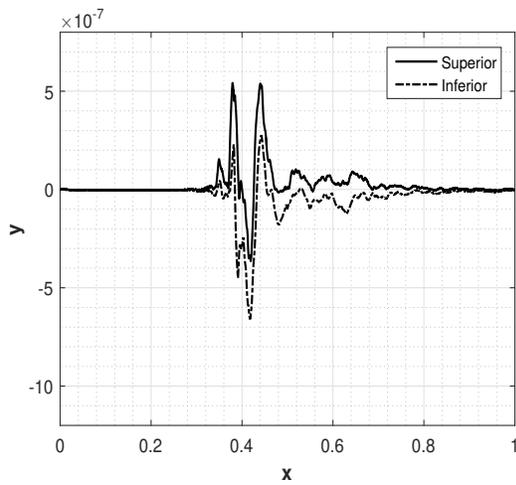


(a) Intervalo de medidas en sensor 1 en tubo 2 a 500 Hz.

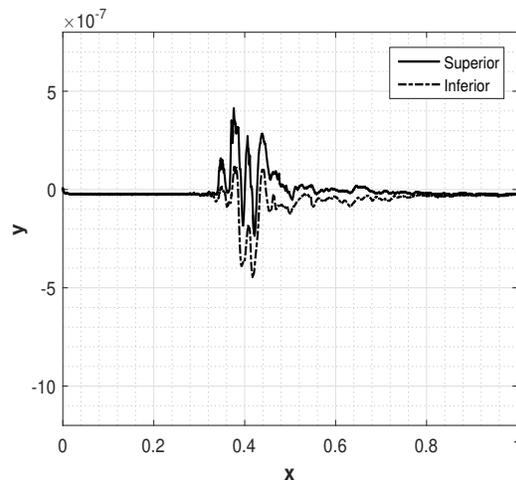


(b) Intervalo de medidas en sensor 4 en tubo 2 a 500 Hz.

**Figura 4.9:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 2 a 500 Hz.

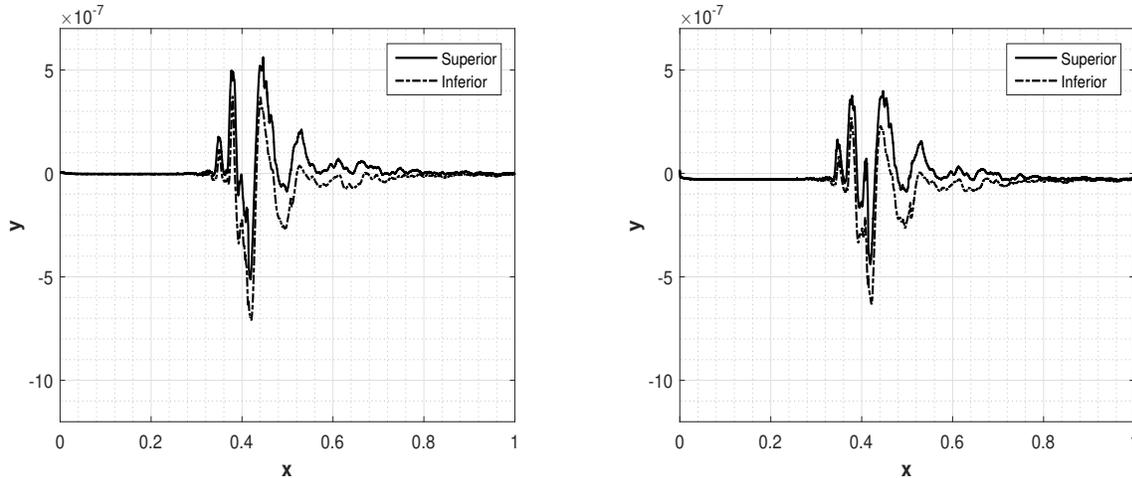


(a) Intervalo de medidas en sensor 1 en tubo 2 a  $30 \times 10^3$  Hz.



(b) Intervalo de medidas en sensor 4 en tubo 2 a  $30 \times 10^3$  Hz.

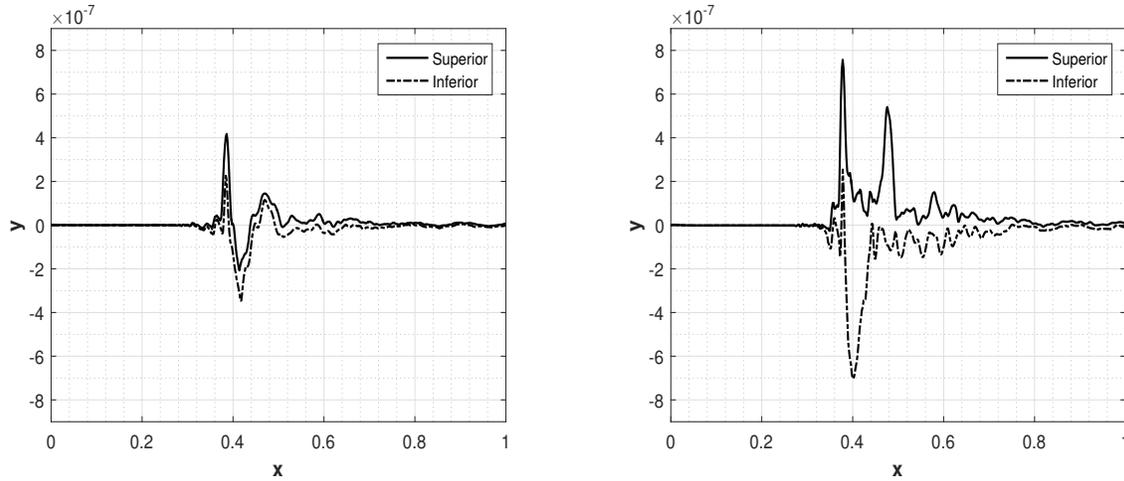
**Figura 4.10:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 2 a  $30 \times 10^3$  Hz.



(a) Intervalo de medidas en sensor 1 en tubo 2 a  $100 \times 10^3$  Hz. (b) Intervalo de medidas en sensor 4 en tubo 2 a  $100 \times 10^3$  Hz.

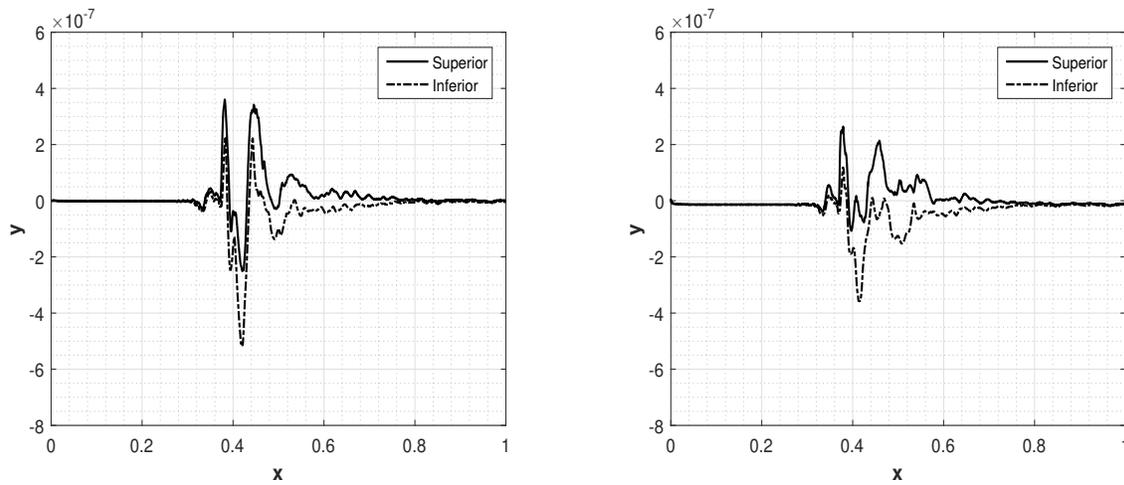
**Figura 4.11:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 2 a  $100 \times 10^3$  Hz.

Para el tubo 3, los intervalos de las mediciones en cada una de las frecuencias se presentan en las figuras [4.12], [4.13] y [4.14]. El intervalo en el sensor 4 para la frecuencia de 500 Hz, presenta la distancia más grande para cualquier intervalo de los tres tubos, con una distancia máxima entre límites de  $8 \times 10^{-7}$ . En tanto al intervalo del sensor 1 en la frecuencia más baja, la distancia máxima es 300 % más pequeña que la del sensor 4. Para el caso de los intervalos en la frecuencia de  $30 \times 10^3$  Hz, el intervalo correspondiente al sensor 4, presenta zonas de distancias considerables del orden  $3 \times 10^{-7}$ . Mientras que el intervalo correspondiente al sensor 1 presenta una zona estrecha y una zona de distancias apreciables (un comportamiento similar a los intervalos a  $100 \times 10^3$  Hz del tubo 2). Por último, para los intervalos de ambos sensores en la frecuencia de  $100 \times 10^3$  Hz, son relativamente estrechos con distancias considerables en los máximos y mínimos (un comportamiento parecido a los intervalos de  $100 \times 10^3$  Hz del tubo 1).



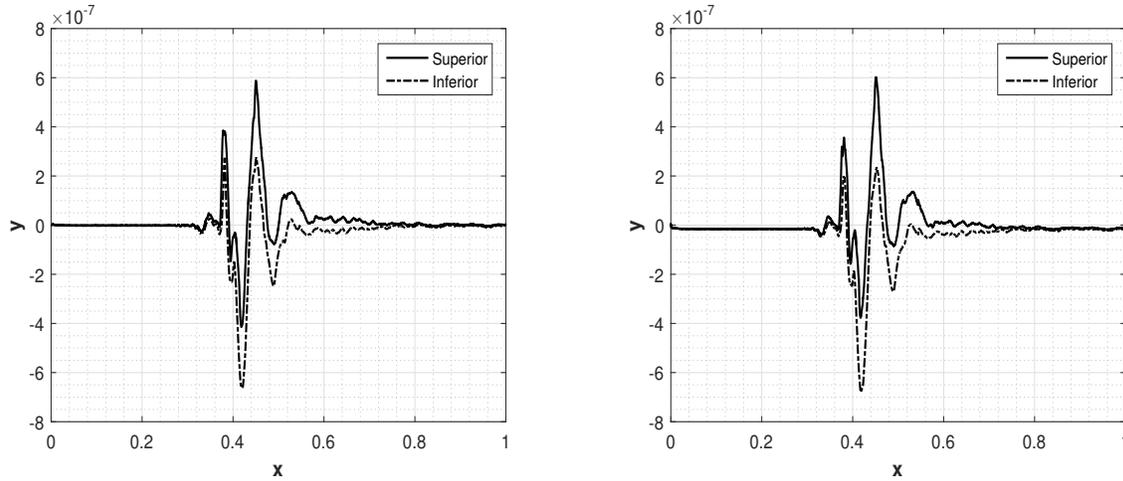
(a) Intervalo de medidas en sensor 1 en tubo 3 a 500 Hz. (b) Intervalo de medidas en sensor 4 en tubo 3 a 500 Hz.

**Figura 4.12:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 3 a 500 Hz.



(a) Intervalo de medidas en sensor 1 en tubo 3 a  $30 \times 10^3$  Hz. (b) Intervalo de medidas en sensor 4 en tubo 3 a  $30 \times 10^3$  Hz.

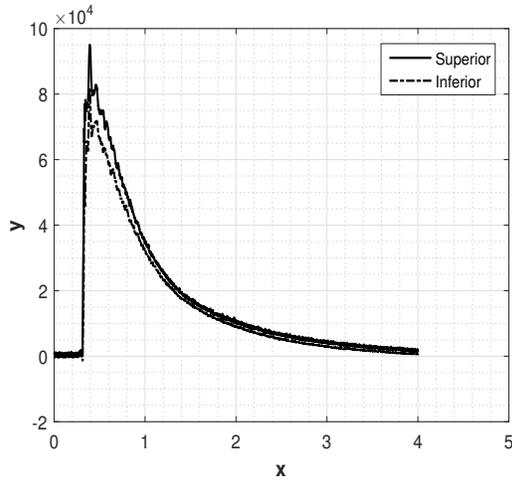
**Figura 4.13:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 3 a  $30 \times 10^3$  Hz.



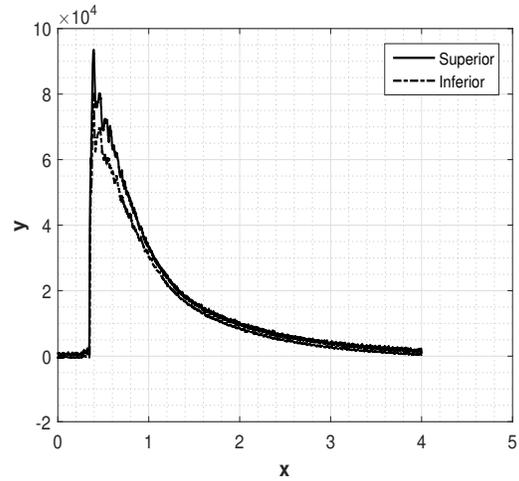
(a) Intervalo de medidas en sensor 1 en tubo 3 a  $100 \times 10^3$  Hz. (b) Intervalo de medidas en sensor 4 en tubo 3 a  $100 \times 10^3$  Hz.

**Figura 4.14:** Intervalos de pruebas en sensores de tubo 3 a  $100 \times 10^3$  Hz.

Por último, los intervalos correspondientes a las señales de presión se muestran en las figuras [4.15], [4.16] y [4.17]. De forma general, los intervalos de las señales de presión en los tres tubos son estrechos. Las distancias entre límites son apreciables, justo en el momento en el que el valor máximo comienza a decaer. Los máximos de las desviaciones estándar de las señales de presión rondan entre  $13 \times 10^3$  Pa y  $17 \times 10^3$  Pa. A pesar de que las señales de presión se midieron con una tasa de muestreo de 500 Hz, los intervalos son en mayor medida más estrechos que los intervalos de las señales de deformación en esta frecuencia.

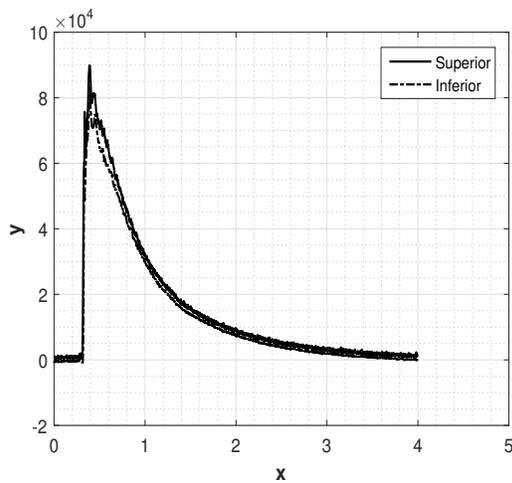


(a) Intervalo de presiones en transductor 1 en tubo 1

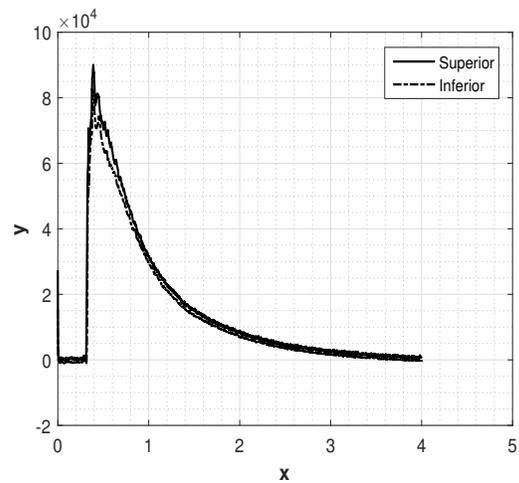


(b) Intervalo de presiones en transductor 2 en tubo 1

**Figura 4.15:** Intervalos de pruebas para transductores en tubo 1

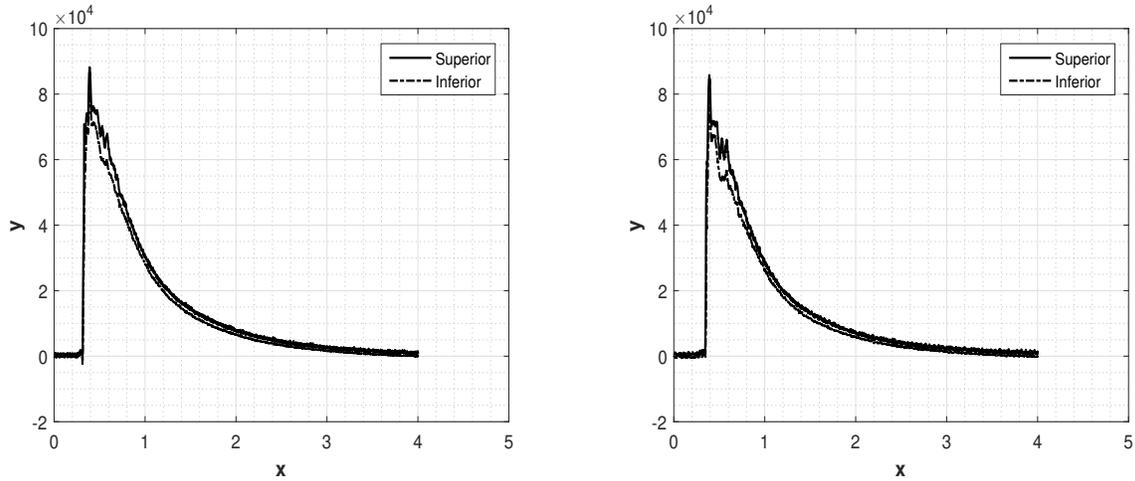


(a) Intervalo de presiones en transductor 1 en tubo 2



(b) Intervalo de presiones en transductor 2 en tubo 2

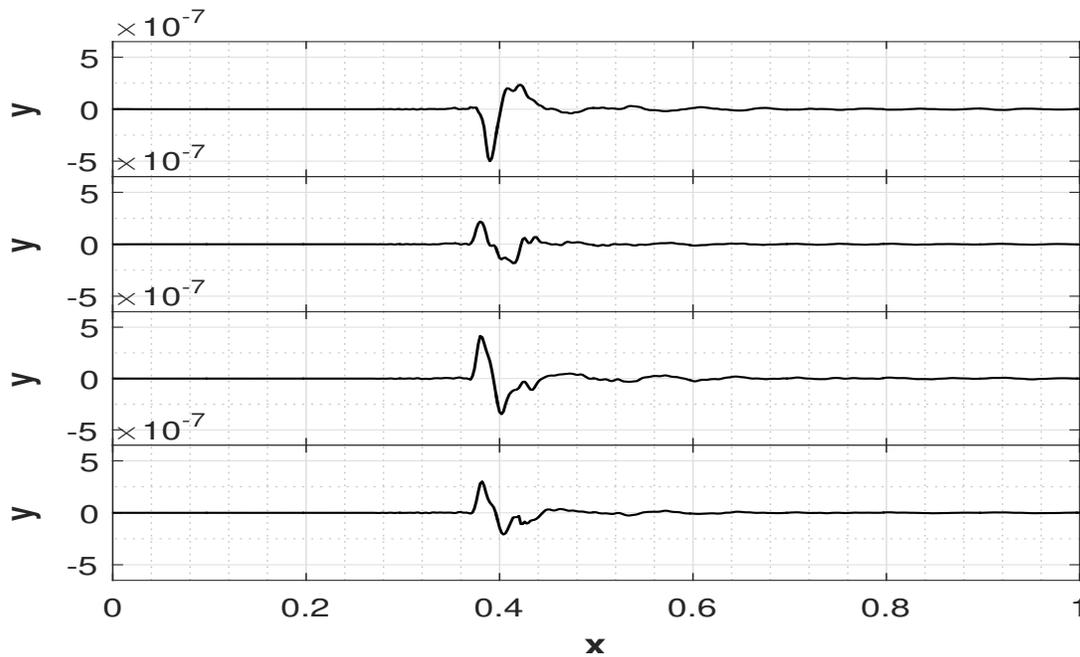
**Figura 4.16:** Intervalos de pruebas para transductores en tubo 2



(a) Intervalo de presiones en transductor 1 en tubo 3      (b) Intervalo de presiones en transductor 2 en tubo 3

**Figura 4.17:** Intervalos de pruebas para transductores en tubo 3

Las deformaciones superficiales en la pared externa de los tubos se muestran a continuación en la siguiente secuencia de figuras.



**Figura 4.18:** Deformaciones para tubo 1 medidas a 500 Hz

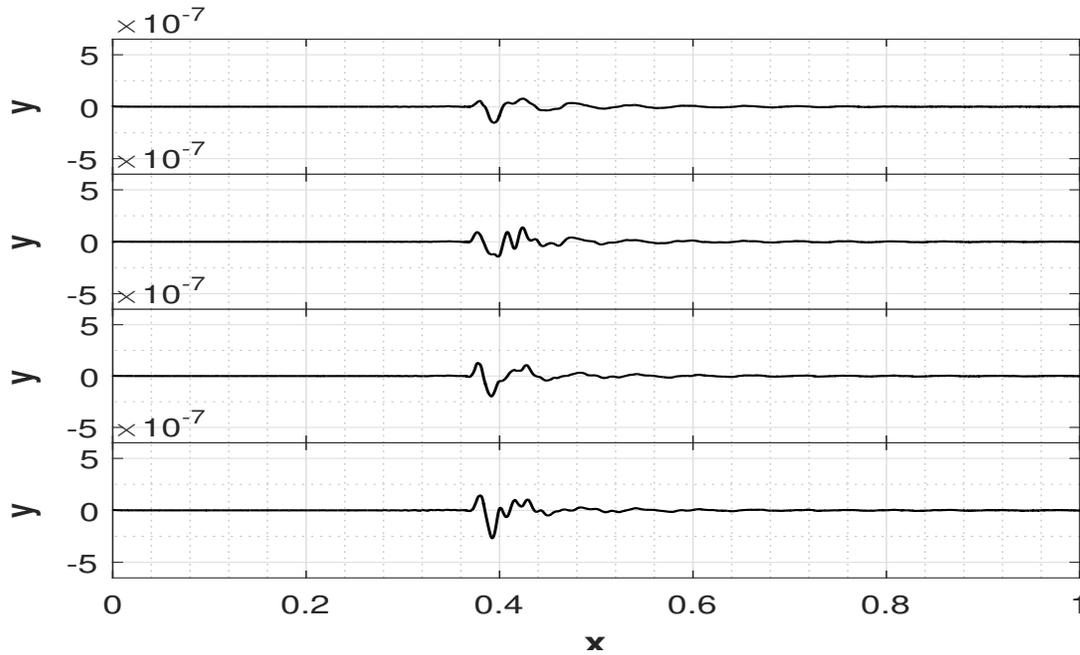


Figura 4.19: Deformaciones para tubo 1 medidas a  $30 \times 10^3$  Hz

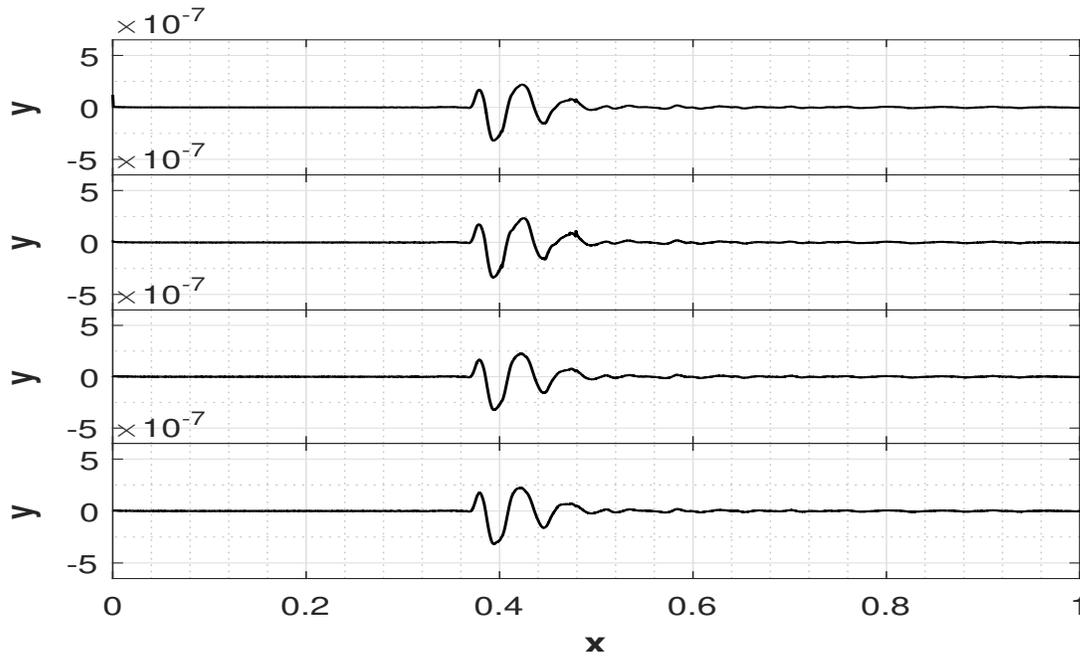


Figura 4.20: Deformaciones para tubo 1 medidas a  $100 \times 10^3$  Hz

Las gráficas de las figuras [4.18], [4.19] y [4.20], muestran las deformaciones en el tubo 1 (la

posición de los piezoeléctricos es mostrada en la Fig.[3.12]). Las deformaciones medidas en la frecuencia más baja, señalan un cambio en la forma de onda desde la parte inferior donde el primer pico es un máximo, hasta la parte superior donde el primer pico es un mínimo con una amplitud 20 % más grande que el máximo en la parte inferior. Las deformaciones medidas en la frecuencia de  $30 \times 10^3$  Hz, señalan de forma general amplitudes más pequeñas que para los otras dos frecuencias implementadas. El máximo en esta frecuencia es alrededor de 192 % más pequeño que el máximo en 500 Hz y 64 % más pequeño que el máximo en  $100 \times 10^3$  Hz. Las deformaciones en esta última frecuencia presentan formas de onda muy similares a lo largo del tubo. Desde la parte inferior hasta la parte superior, los cambios en las amplitudes de las señales no son apreciables a simple vista.

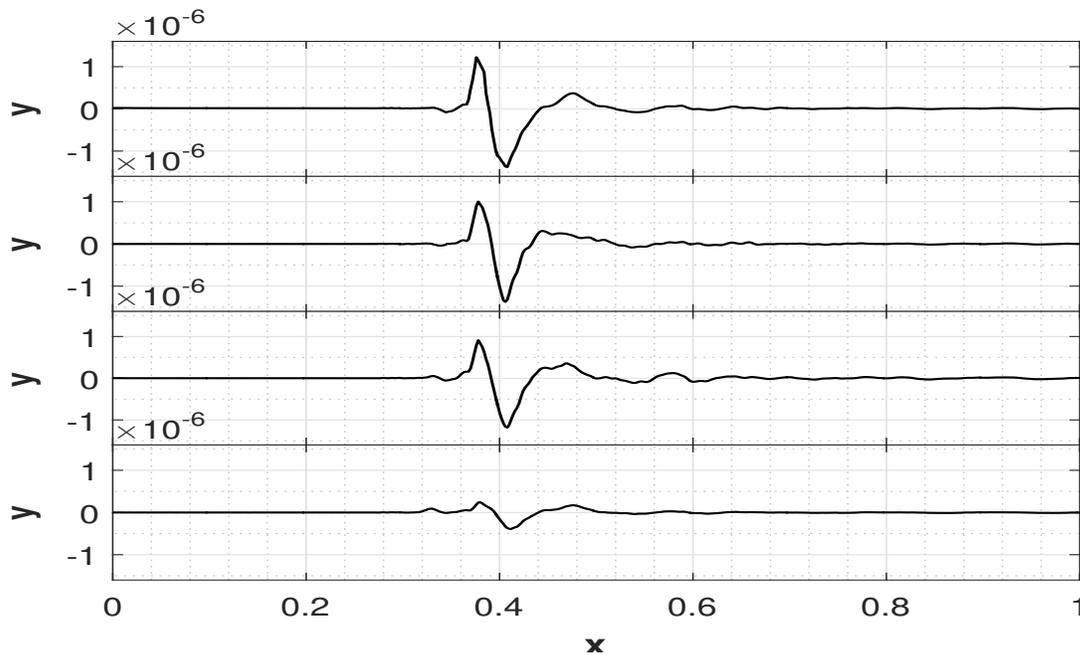


Figura 4.21: Deformaciones para tubo 2 medidas a 500 Hz

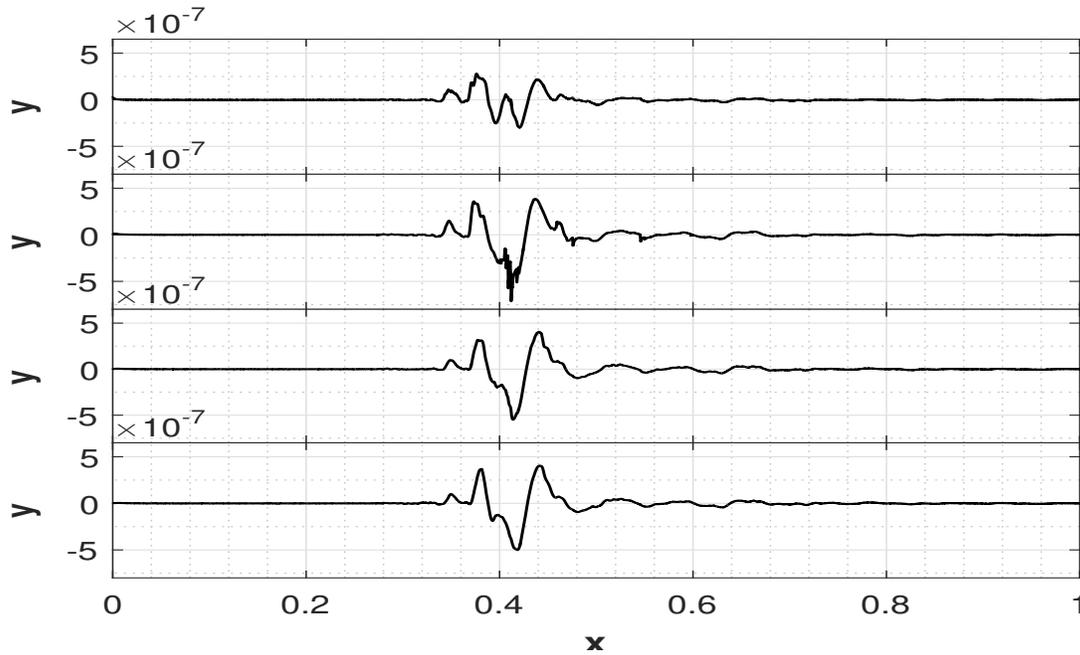


Figura 4.22: Deformaciones para tubo 2 medidas a  $30 \times 10^3$  Hz

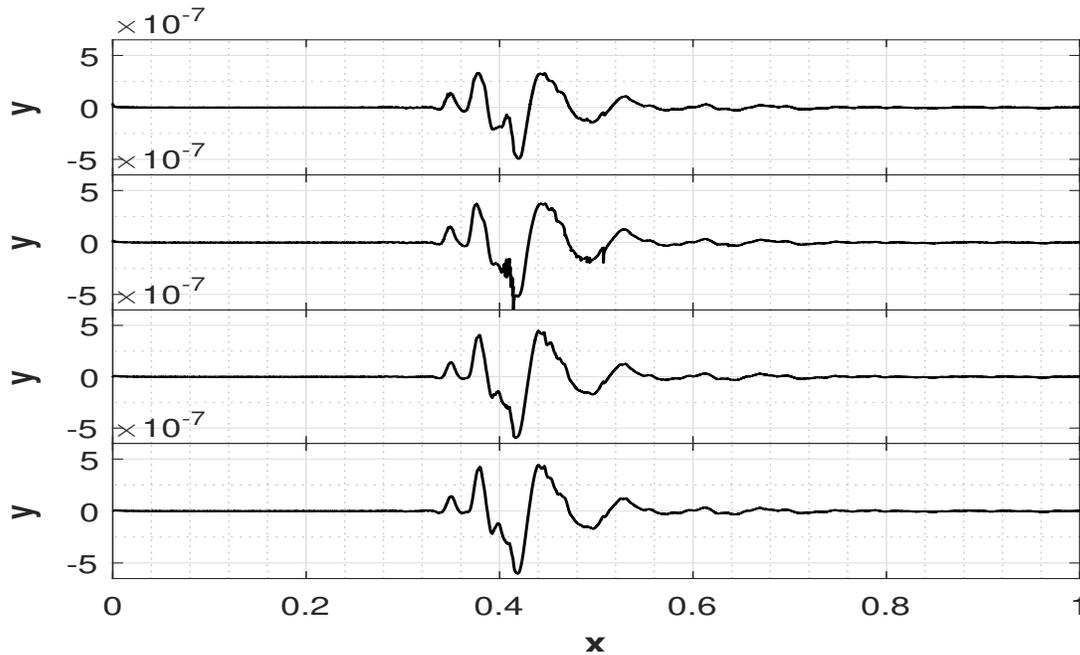


Figura 4.23: Deformaciones para tubo 2 medidas a  $100 \times 10^3$  Hz

Las figuras anteriores muestran las deformaciones para el tubo 2. Las deformaciones medi-

das a 500 Hz, Fig.[4.21], muestran un aumento en la amplitud de la parte inferior del tubo a la parte superior de 400 %. En la parte media del tubo el comportamiento de las señales es similar que en la parte superior. Las deformaciones en esta frecuencia, para este tubo, son las de mayor amplitud para los tres tubos. En la frecuencia de muestreo de  $30 \times 10^3$  Hz, a diferencia de las deformaciones en la frecuencia más baja, hay una disminución en la magnitud de la parte inferior de tubo a la parte superior del tubo. La disminución es del orden de 44 %, Fig.[4.22]. Con respecto a las deformaciones en la frecuencia más alta utilizada, la forma de la señal en la parte inferior del tubo es similar a la reportada en la frecuencia de  $30 \times 10^3$  Hz. El valor máximo de la deformación la frecuencia de  $100 \times 10^3$  Hz es aproximadamente 11 % mayor que el máximo de . A diferencia del tubo 1, las deformaciones en esta frecuencia, sí presentan cambios apreciables en la forma de la señal a lo largo del tubo, Fig.[4.23].

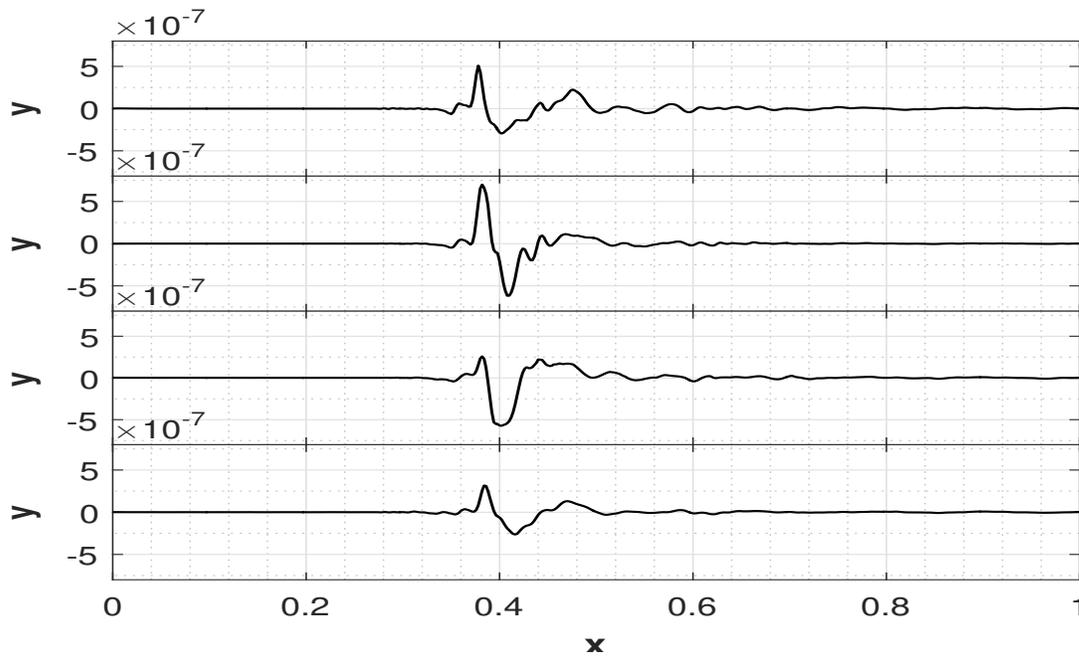


Figura 4.24: Deformaciones para tubo 3 medidas a 500 Hz

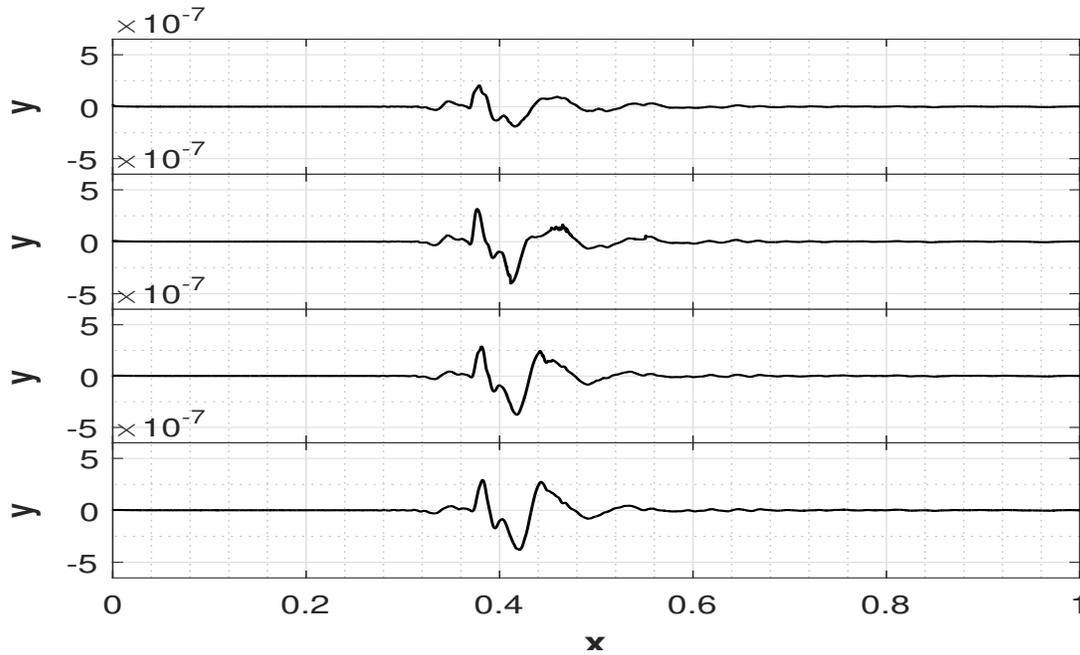


Figura 4.25: Deformaciones para tubo 3 medido a  $30 \times 10^3$  Hz

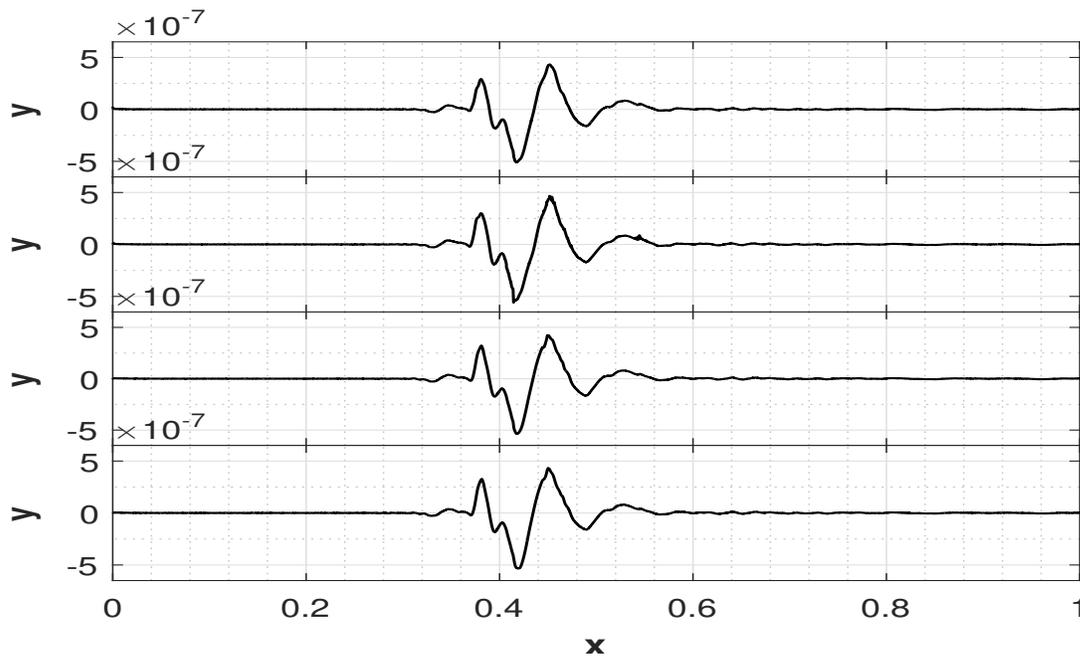


Figura 4.26: Deformaciones para tubo 3 medido a  $100 \times 10^3$  Hz

Las deformaciones para el tubo 3 se presentan en las figuras [4.24], [4.25] y [4.26]. En la

frecuencia de 50 Hz, las deformaciones presentan mayores cambios de amplitud y forma en la parte intermedia que en la parte superior del tubo con respecto a la parte inferior. El aumento en amplitud en la parte media es de 121 %, mientras que el aumento con la parte superior del tubo es de 60 %. El comportamiento de las deformaciones en la frecuencia de  $30 \times 10^3$  Hz es similar a el comportamiento de las deformaciones del tubo 2, es decir, se tuvo una disminución en la amplitud de la señal de la parte inferior a la superior del tubo, y el comportamiento de la parte media es similar al de la parte inferior. La disminución de la amplitud es del 42 %. En cuanto a las deformaciones en la frecuencia más alta las formas de onda tienen un comportamiento similar a lo largo del tubo. Resulta difícil apreciar cambios en las amplitudes y formas de onda a simple vista, de igual manera que en el tubo 1 en esta frecuencia.

En cuanto a las señales de presión, el comportamiento es muy similar para los tres tubos. En el caso de los tubos 1 y 3, se distingue perfectamente la distancia temporal entre las señales de cada uno de los transductores. En el caso de la señal para en el tubo 2, esta diferencia temporal no es apreciable a simple vista. En las señales de presión de manera general se observa una caída de presión al rededor de  $10 \times 10^3$  Pa para el valor máximo de la señal. Para mayor detalle ver apéndice C.

## 4.2. Análisis y Discusión

### 4.2.1. Características de las deformaciones

Para el análisis se utilizaron las señales medidas a  $100 \times 10^3$  Hz. Las figuras [4.27], [4.28] y [4.29], muestran la forma en la que se modifican las amplitudes y duraciones de los máximos locales para las curvas características del fenómeno de despresurización súbita. En las figuras se señalan los puntos utilizados como picos. Las líneas horizontales representan el ancho temporal ( $\Delta t$ ), y las líneas verticales representan la prominencia  $\beta$ .

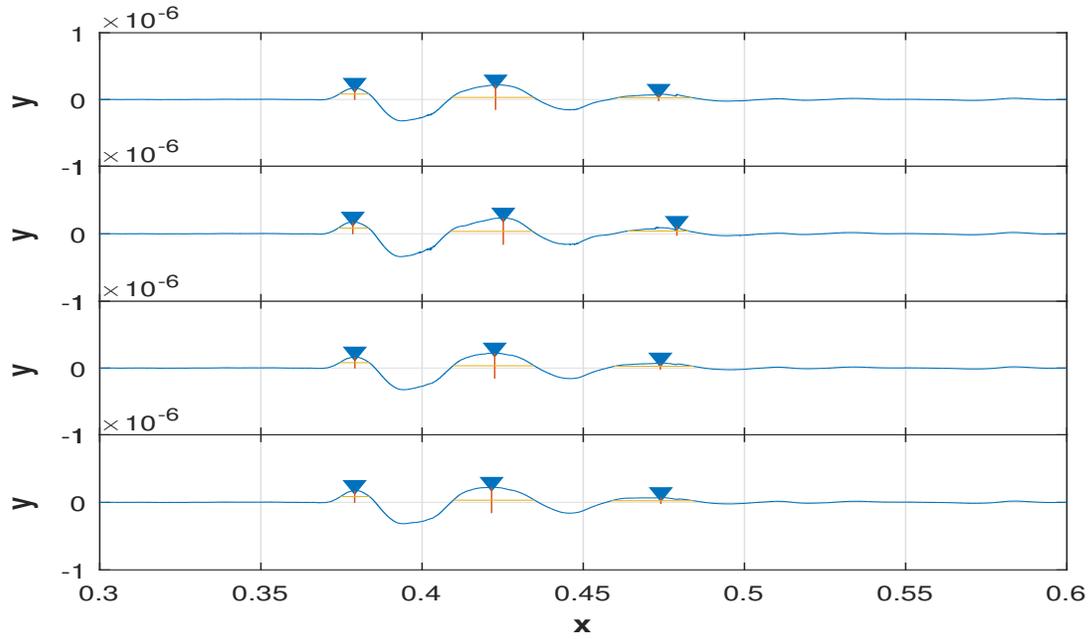


Figura 4.27: Picos localizados en deformaciones en tubo 1

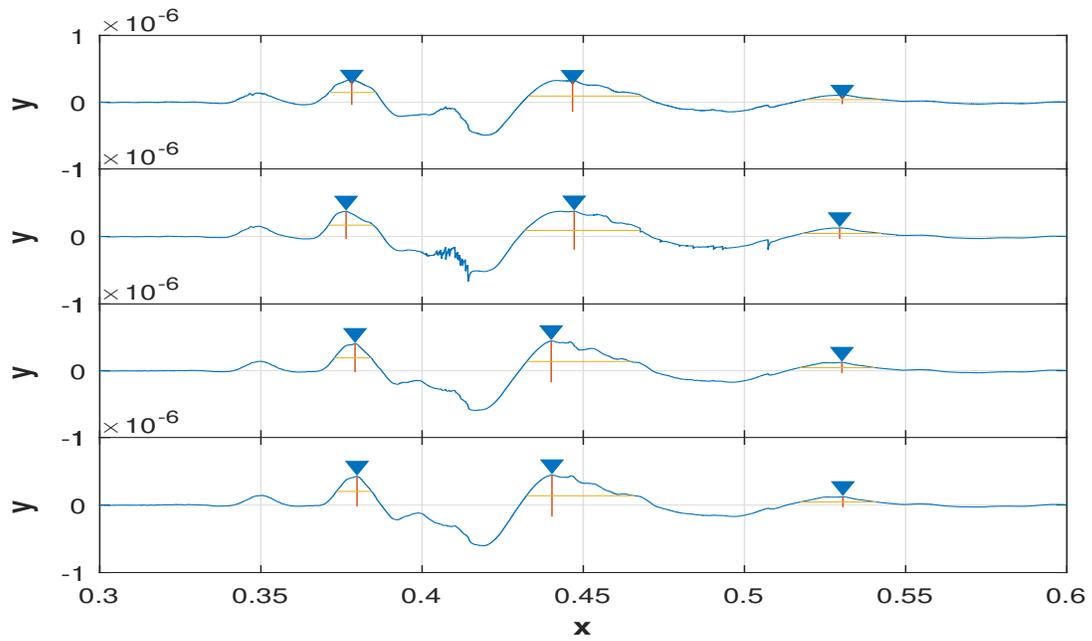
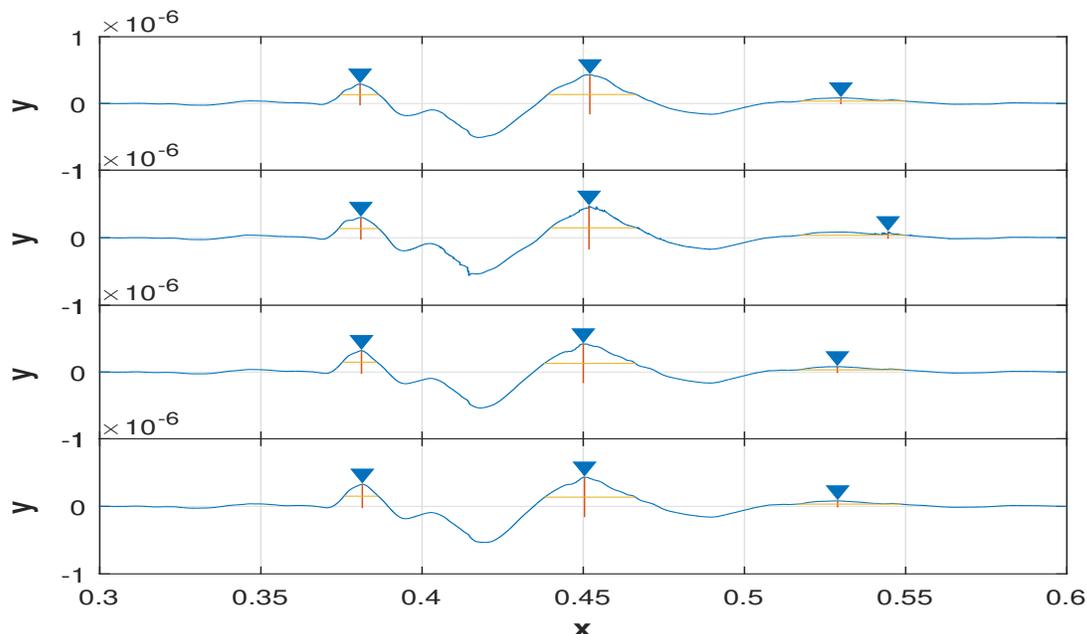


Figura 4.28: Picos localizados en deformaciones en tubo 2

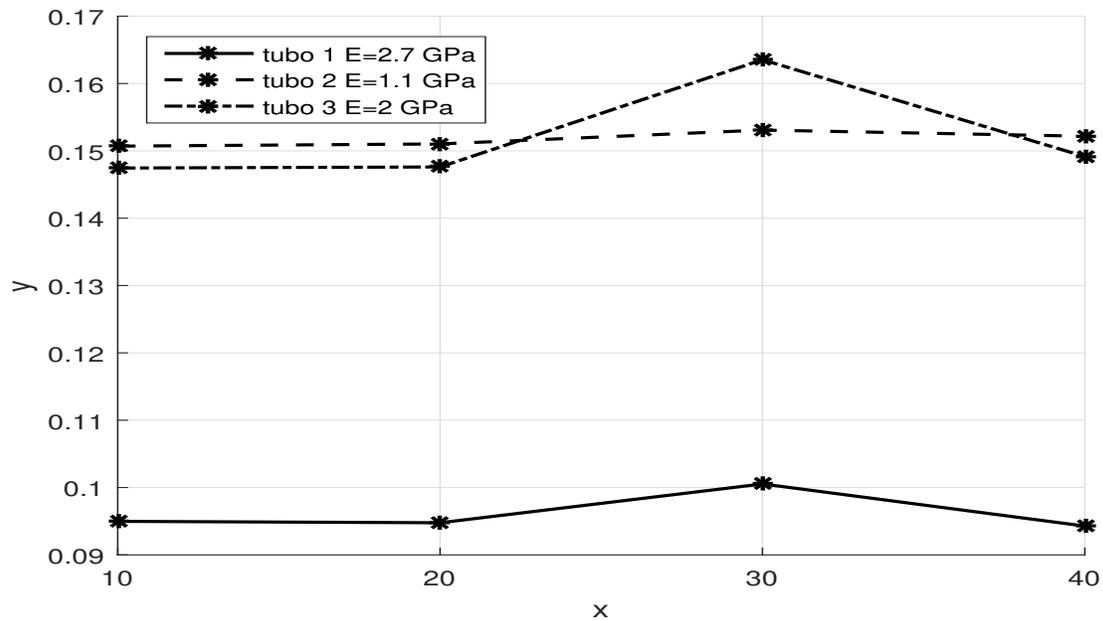


**Figura 4.29:** Picos localizados en deformaciones en tubo 3

En el caso del tubo con el módulo de Young más elevado (tubo 1) la duración de la señal es la más corta. En el caso del tubo con el módulo de Young más bajo (tubo 2) se observa claramente como lo máximos tiene una mayor separación temporal. Esto indica un retraso en la llegada de los efectos de la interacción; en otras palabras, los componentes de onda que deforman los tubos se propagan con velocidades más bajas que en el caso del tubo 1. En el caso del tubo con módulo de Young intermedio (tubo 3) la separación de los máximos resultan muy similares a las separaciones en el tubo 2. Esto resulta contraintuitivo, ya que la diferencia entre los módulos de Young entre los tubos 2 y 3 es 29 % mayor que la diferencia entre los tubos 1 y 3.

En la gráfica de la Fig.[4.30] se comparan las duraciones de onda medidas en la posición de cada sensor. Es interesante notar que las duraciones del tubo 3 son muy cercanas a las del tubo 2. Incluso se observa que en la posición  $x=30$  cm la duración es mayor. Este comportamiento se puede deber a las diferencias geométricas entre tubos, más que a las propiedades del material en los tres tubos<sup>4</sup>. La amplitud temporal de estos picos es característico de la respuesta de cada tubo.

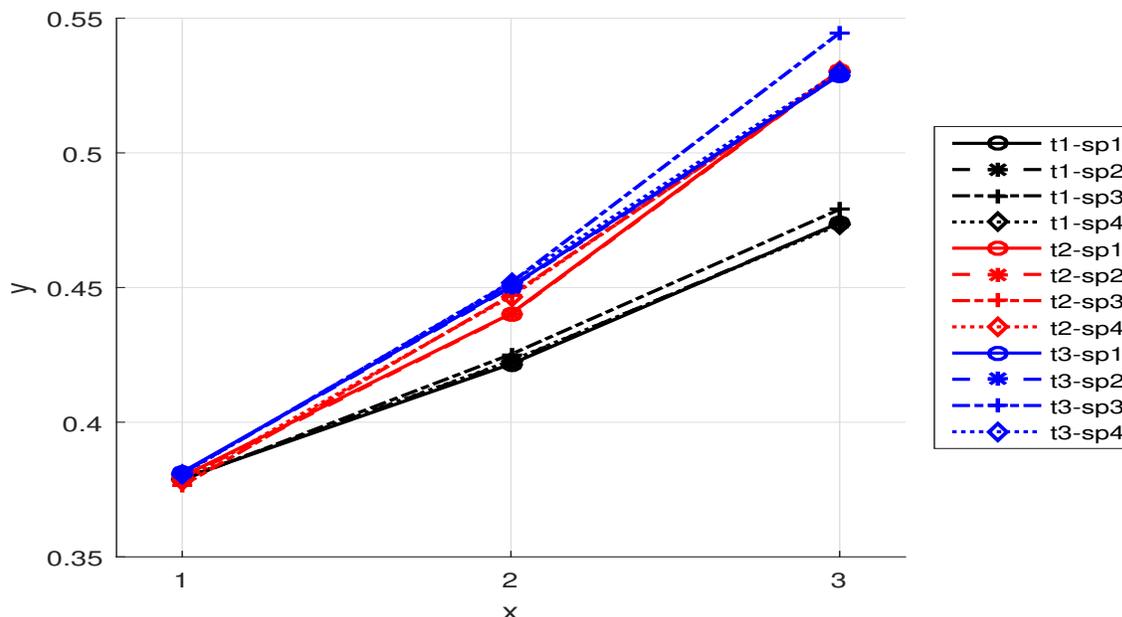
<sup>4</sup>La duración que se muestra es la diferencia entre la posición en el tiempo del pico 3 menos el pico 1. Lo picos se enumeran en el orden en que aparecen en el eje temporal.



**Figura 4.30:** Duraciones de onda detectadas en cada sensor para los tres tubos.  $\lambda$  representa la duración y  $x$  la posición de los sensores.

En la gráfica siguiente, Fig.[4.31], se muestran los momentos en que se produce cada pico. En esta gráfica se puede observar claramente como en el tubo con mayor módulo de Young se registran tiempos más cortos para la llegada de los efectos. Nuevamente se observa la cercanía en los tiempos de llegada de los efectos entre los tubos 2 y 3 y el papel que juega la geometría y las propiedades del material al hacer comparaciones con el tubo 1.

En la tabla[4.2], se puede observar que el tiempo de llegada del primer pico para los tres tubos, ronda al rededor de los 0.38 s. Los picos más relevantes en la diferencia temporal de las señales son el 2 y 3.

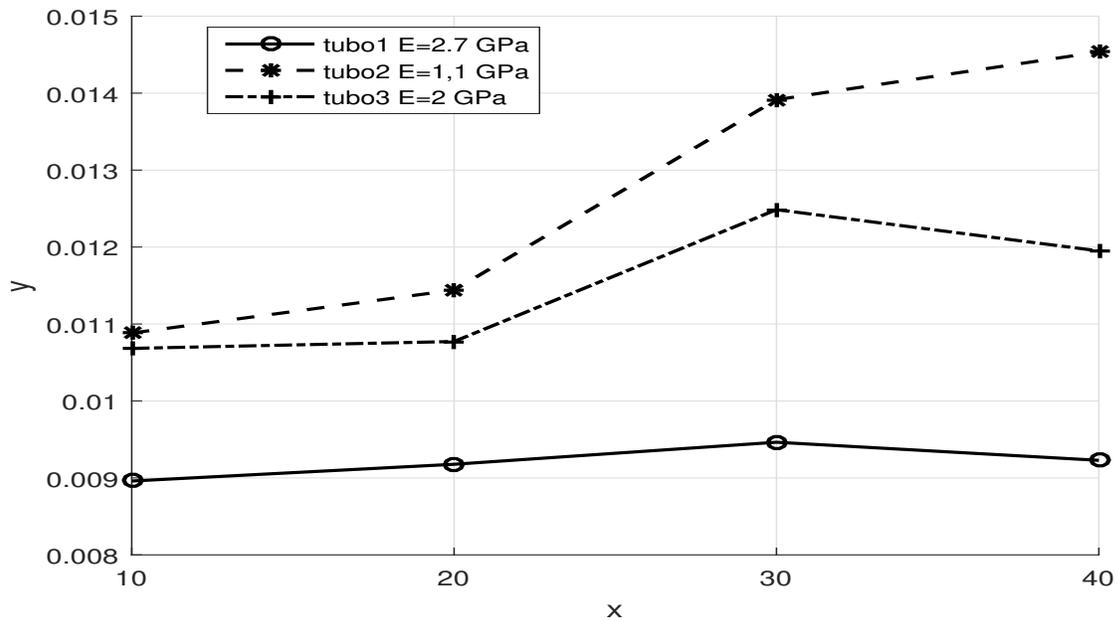


**Figura 4.31:** Ubicación en el tiempo de los picos registrado en cada sensor para los 3 tubos.  $\tau$  representa la posición temporal de los picos,  $\eta$  el número de pico y SP sensor piezoeléctrico.

**Tabla 4.2:** Posiciones temporales de picos por sensor, (SP es sensor piezoeléctrico).

	Tiempos de arribo s								
	Tubo 1			Tubo 2			Tubo 3		
	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 1	Pico 2	Pico 3	Pico 1	Pico 2	Pico 3
SP 1	0.37908	0.42157	0.47406	0.37982	0.44029	0.53052	0.38146	0.45039	0.52891
SP 2	0.37914	0.42252	0.47391	0.37920	0.44006	0.53023	0.38120	0.45001	0.52881
SP 3	0.37850	0.42519	4.79030	0.37643	0.44718	0.52952	0.38100	0.45178	0.54453
SP 4	0.37909	0.42280	0.47337	0.37818	0.44668	0.53035	0.38076	0.45204	0.52991

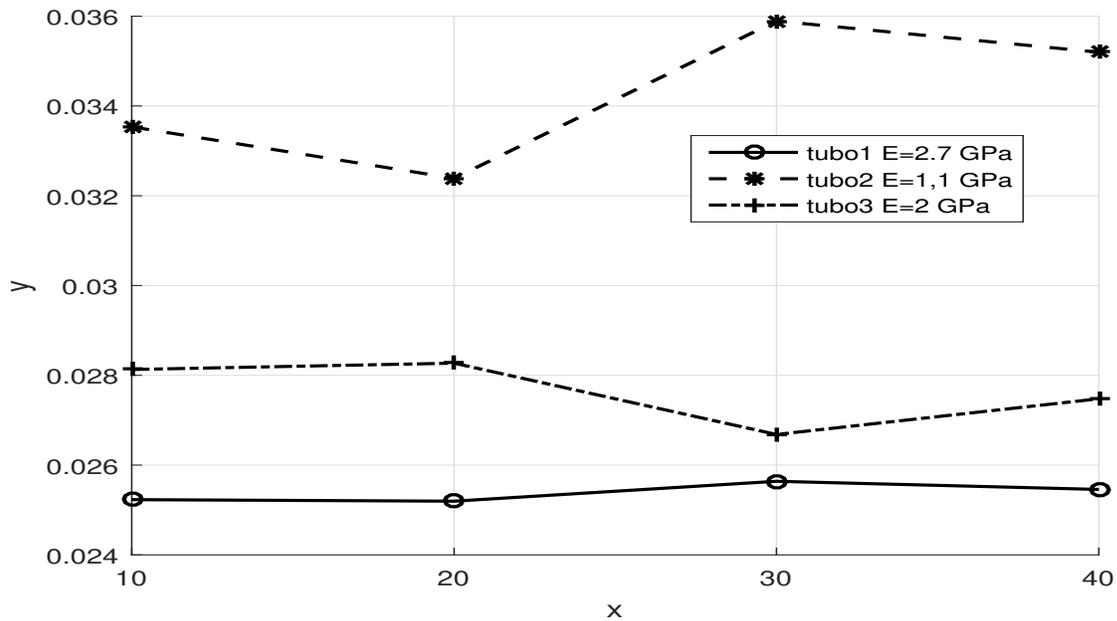
Si se observa la Ec.[4.3] mientras más pequeño sea el módulo de elasticidad para un mismo esfuerzo( $\sigma$ ), la deformación es mayor. Las gráficas de las de las figuras[4.32], [4.33] y [4.34], muestran una evolución del ancho temporal de las señales de los tres tubos.



**Figura 4.32:** Anchos temporales de pico No. 1 localizado en la posición de cada sensor para los 3 tubos.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y x la posición de los sensores

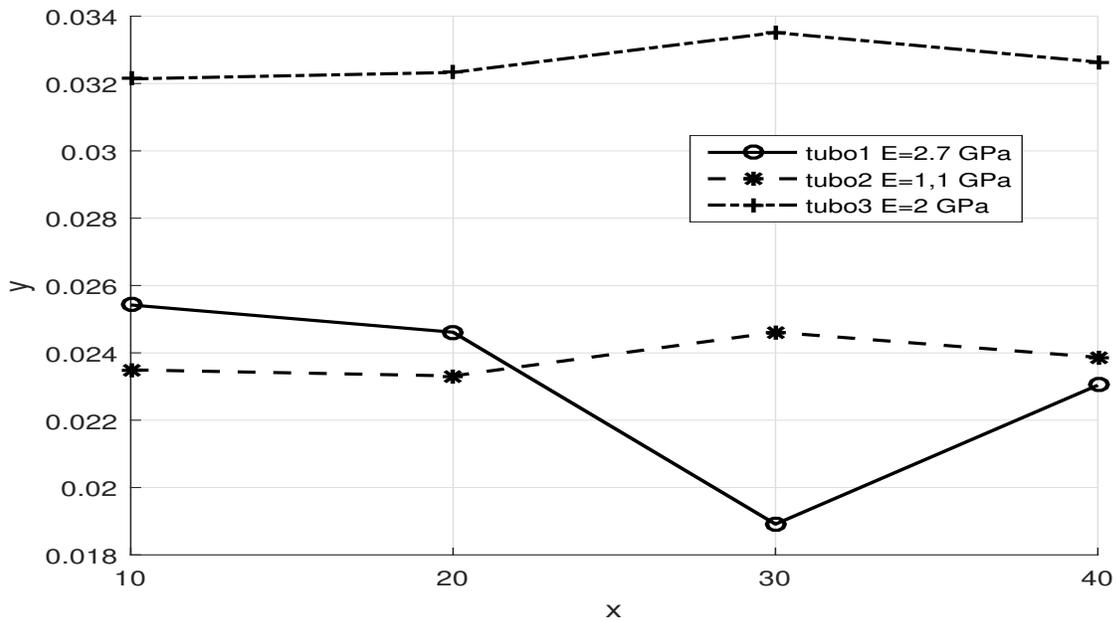
Esta gráfica establece con toda claridad el efecto del papel que juegan los módulos elásticos en el proceso. Como cabía esperar, la duración del primer pico es congruente con el hecho de que  $E_2 < E_3 < E_1$ <sup>5</sup>. Las únicas excepciones en el aumento de las duraciones de los picos, son en la posición  $x=40$  cm. Es indica un amortiguamiento más rápido en esa posición.

<sup>5</sup> $E_1$  es el módulo de Young de tubo 1.  $E_2$  es el módulo de Young del tubo 2.  $E_3$  es el módulo de Young del tubo 3.



**Figura 4.33:** Anchos temporales de pico No. 2 localizado en la posición de cada sensor para los 3 tubos.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y x la posición de los sensores

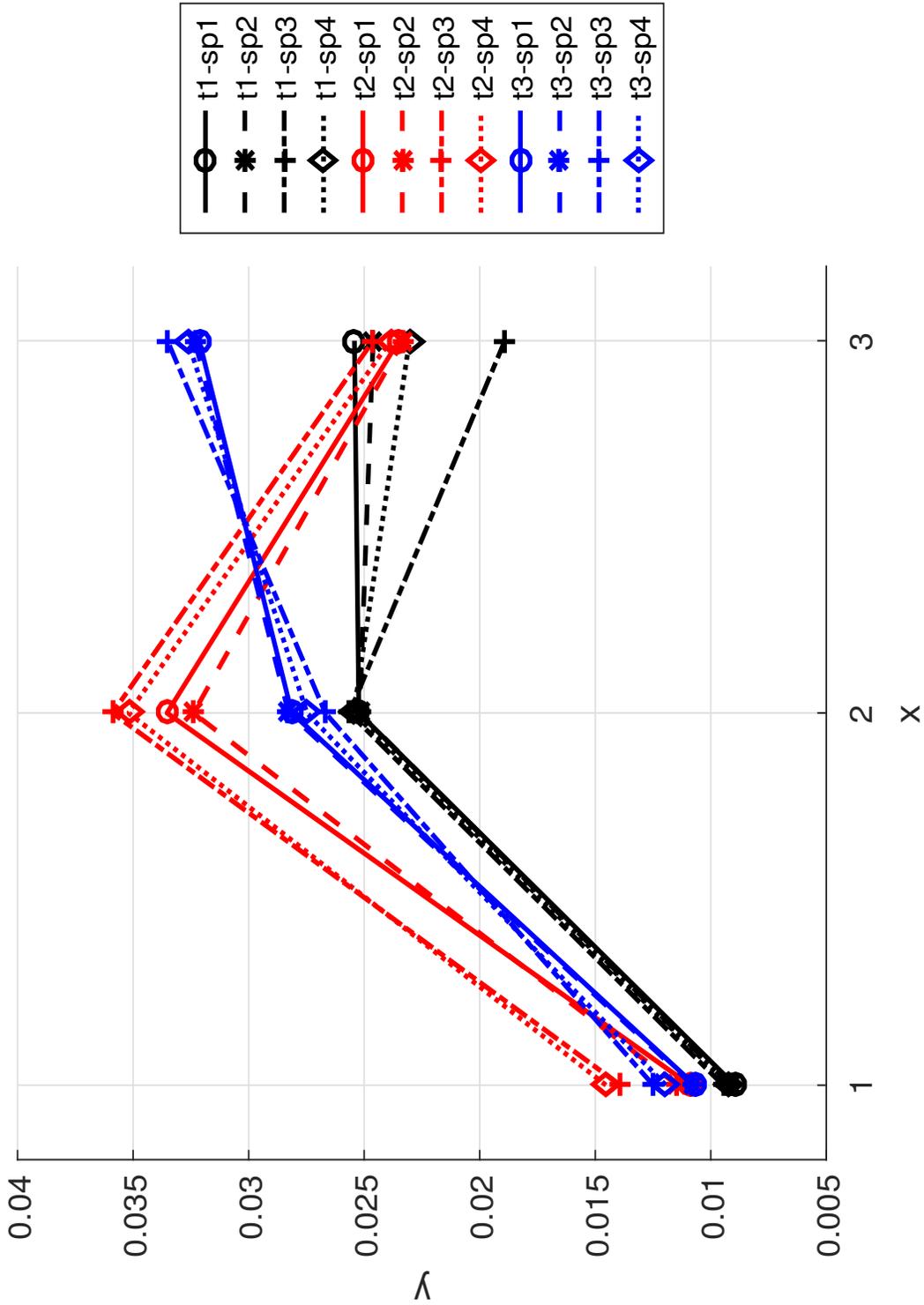
En la Fig.[4.33], se muestra en general un comportamiento que difiere del comportamiento del primer pico, es decir, las duraciones no van en aumento a lo largo del tubo. Esto significa que en cada posición se tuvo un amortiguamiento diferente para este pico. En cuanto a los valores sigue siendo evidente el efecto al cambio en el módulo elástico. Cabe mencionar, que el pico No. 2 es el valor máximo de las deformaciones en todas las señales.



**Figura 4.34:** Anchos temporales de pico No. 3 localizado en la posición de cada sensor para los 3 tubos.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y  $x$  la posición de los sensores

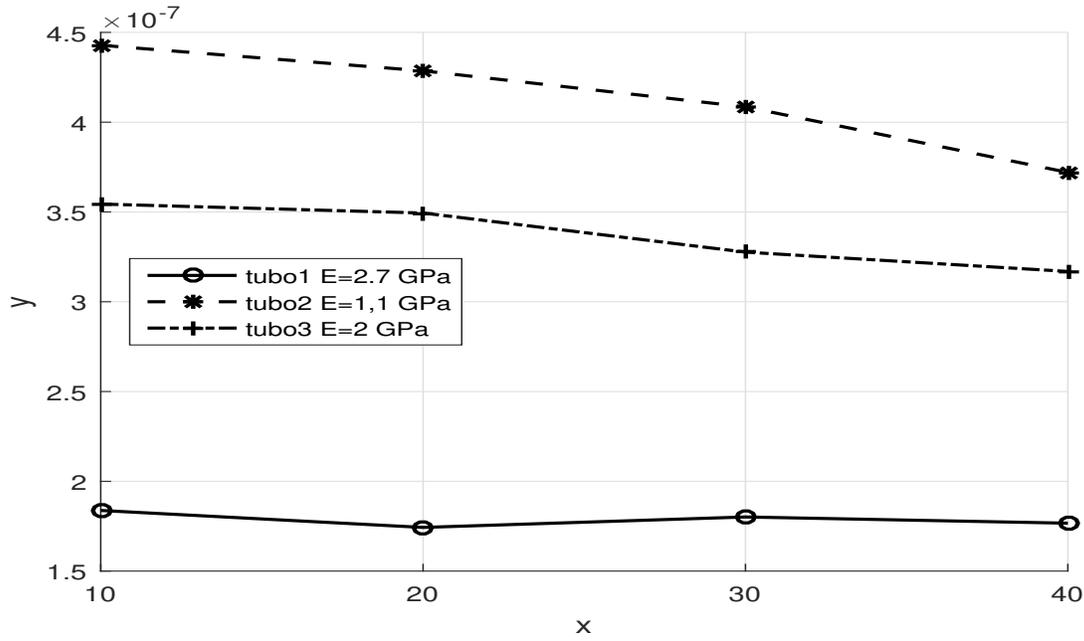
Cuando se analiza el último pico que se presenta, se observa un efecto contraintuitivo. Esto es, la duración del pico es menor en el tubo con rigidez más baja (tubo 2). No obstante, en la posición  $x=30$  cm, se ve claramente que la duración correspondiente para el tubo más rígido es la más baja. Este comportamiento aún no ha sido explicado, pero posiblemente se deba a la atenuación de las ondas que se propagan, así como a los factores geométricos que inducen una interacción más compleja entre las ondas.

El comportamiento general de los anchos temporales de los tres picos se presentan en la Fig.[4.35]. Se observa un comportamiento no esperado para las duraciones de los picos en el tubo con módulo de Young intermedio (tubo3). Esto es, las duraciones de los picos aumentan al igual que su arribo. En cuanto a los tubos 1 y 2, se tiene un aumento en las duraciones del pico No. 1 al No. 2 en ambos tubos. No obstante, en el tubo con módulo de Young más bajo (tubo 2), hay una disminución considerable para la duración del pico No.3 respecto al pico No.2. En cuanto al tubo más rígido (tubo 1), la disminución en la duración del pico No.3 respecto al pico No.2 es pequeña, excepto en SP3.



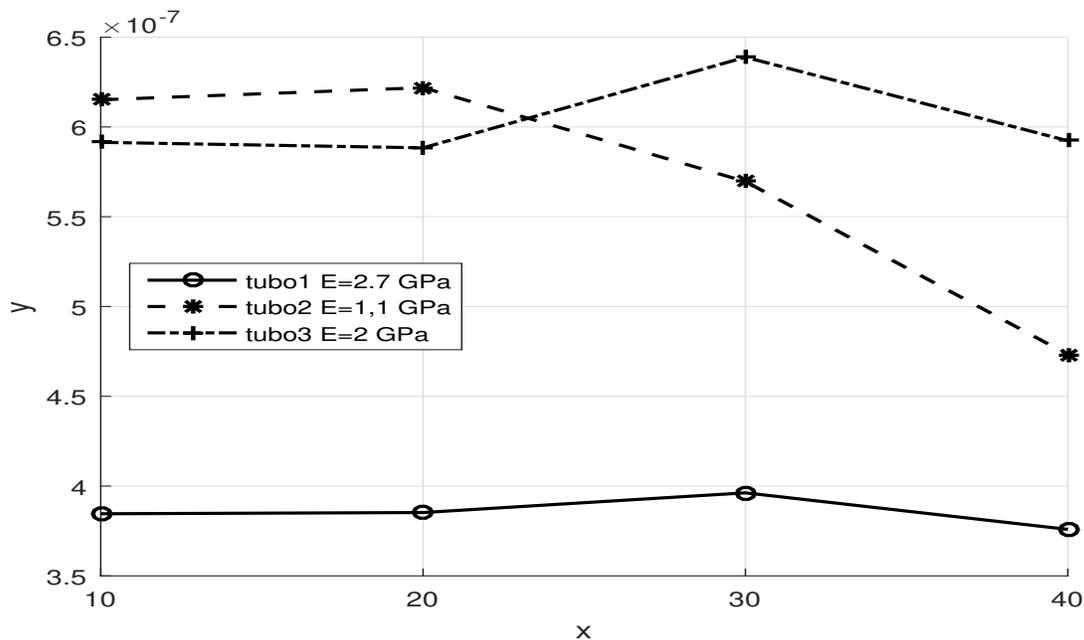
**Figura 4.35:** Anchos de picos detectados en cada sensor para los 3 tubos.  $\circ$  representa los anchos detectados por el sensor 1,  $*$  representa anchos detectados en el sensor 2,  $+$  representa los anchos detectados en el sensor 3 y  $\diamond$  representa los anchos detectados en el sensor 4.  $\Delta t$  representa el ancho temporal y  $\eta$  el número de pico

La prominencia de un pico (un máximo), se define como la distancia vertical que la señal desciende a cada lado del pico antes de volver a subir o, alcanzar un punto final[4]. En las figuras siguientes, se muestra el comportamiento de las prominencias de los picos para cada una de las señales.



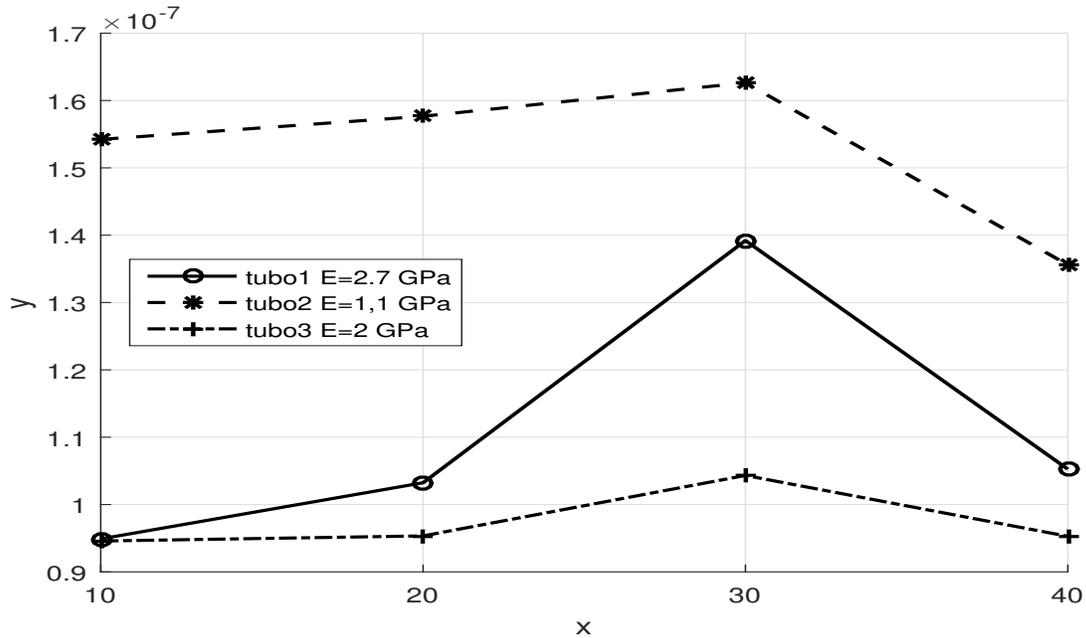
**Figura 4.36:** Prominencia de pico No. 1 para las posiciones de los 4 sensores en los 3 tubos.  $\beta$  representa la prominencia del pico y  $x$  la posición de los sensores.

La Fig.[4.36], muestra la evolución de las prominencias del pico No. 1 a lo largo de los tubos. Es apreciable que para el caso de los tubos 2 y 3, hay una atenuación de la prominencia desde  $x=10$  hasta  $x=40$ . Para el tubo con menor módulo, las prominencias son mayores. En contraste, las prominencias del tubo más rígido son menores. Sin embargo, para el tubo 1 en  $x=30$  cm, se observa un aumento en la prominencia lo cual no es un comportamiento esperado.



**Figura 4.37:** Prominencia de pico No. 2 para las posiciones de los 4 sensores en los 3 tubos.  $\beta$  representa la prominencia del pico y  $x$  la posición de los sensores.

Las prominencias del pico No. 2 se muestran en la Fig.[4.37]. Se observa un comportamiento no esperado, ya que en las posiciones  $X=30$  cm y  $x=40$  cm, las prominencias del tubo con módulo intermedio son mayores que las prominencias del tubo con menor módulo. A pesar de ello, las prominencias del tubo 2 tienen una atenuación a lo largo del tubo. En el caso del tubo con mayor módulo, las prominencias están por debajo de los otros dos tubos, lo que es intuitivo. Sin embargo, los valores de las prominencias del tubo 1 aumentan en la parte media del tubo, indicando que en esas posiciones la señal no se ha atenuado.



**Figura 4.38:** Prominencia de pico No. 3 para las posiciones de los 4 sensores en los 3 tubos.  $\beta$  representa la prominencia del pico y  $x$  la posición de los sensores.

Al analizar las prominencias del último de los picos, Fig.[4.38], el comportamiento es totalmente contrario a lo esperado. Se observa un aumento en la prominencia en las señales de los tres tubos de  $x=10$  cm a  $x=30$  cm. Además, las prominencias en el tubo con mayor módulo, son más grandes que las prominencias del tubo con módulo intermedio. En general para los tres tubos en  $x=40$  cm, la prominencia se atenúa.

La amplitud, a diferencia de la prominencia, se considera a partir del eje horizontal 0. En la Fig.[4.39] se presentan las amplitudes de los tres picos. De manera general, se observa que para el tubo con mayor módulo de Young (tubo 1), hay una variación máxima alrededor del 200 % para las amplitudes de los tres picos. Para el caso del tubo con módulo de Young más bajo (tubo 2), la variación máxima en las amplitudes es alrededor de 260 %. Para el caso del tubo con módulo de Young intermedio (tubo 3), la variación máxima de las amplitudes es alrededor de 480 %. Si bien, las variaciones en las amplitudes resultan contraintuitivas, en general las amplitudes se comportan de acuerdo al hecho de que  $E_2 < E_3 < E_1$ . Es decir, las mayores amplitudes corresponden al tubo 2 y las menores al tubo 1.

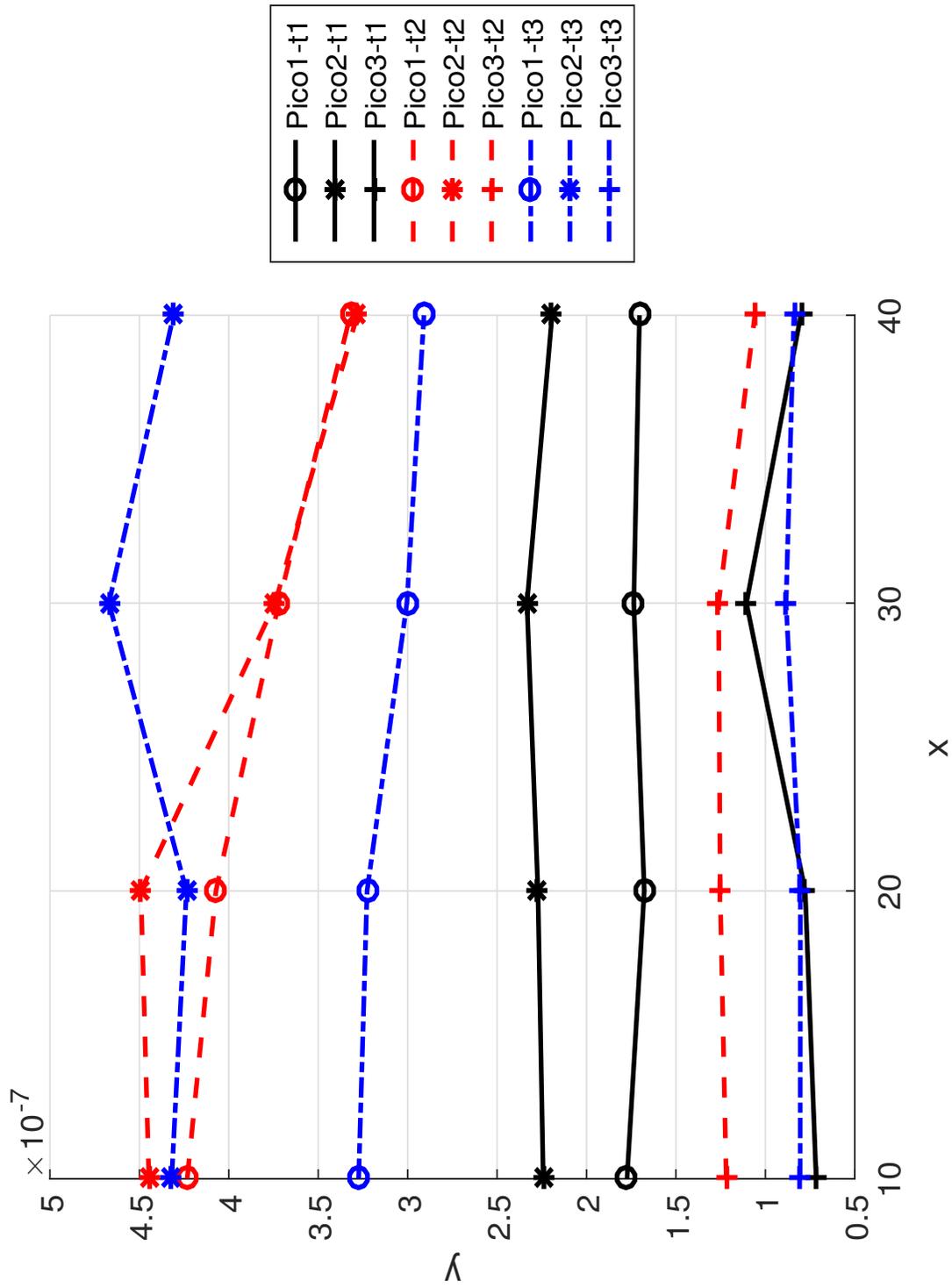
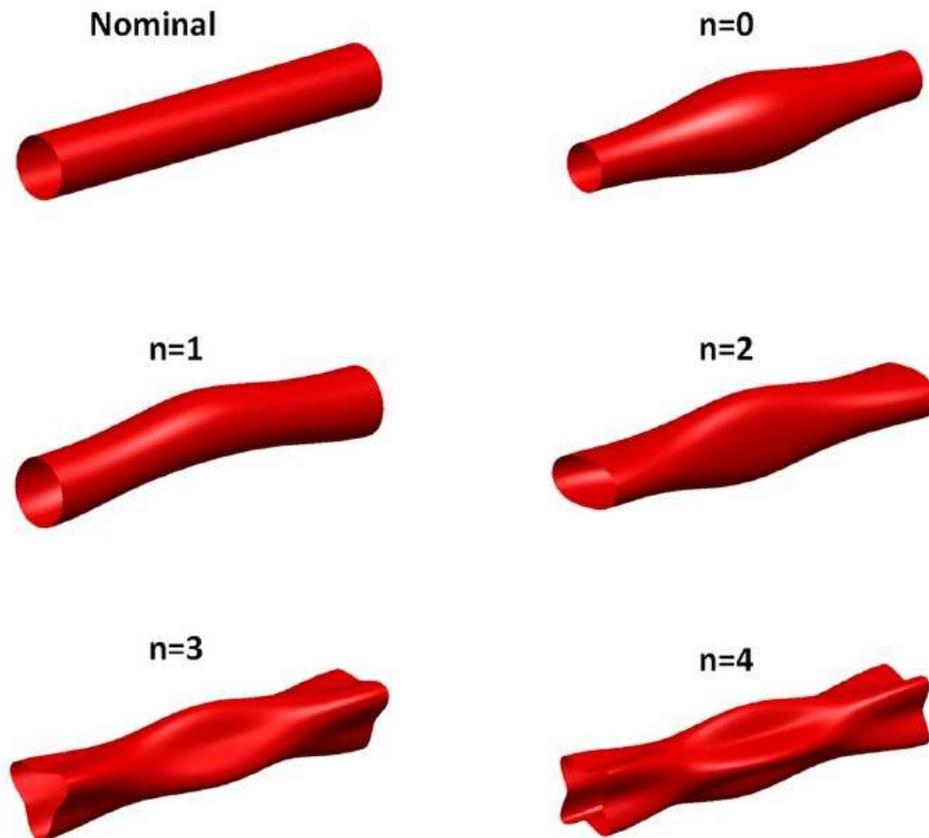


Figura 4-39: Amplitudes de picos detectados en cada sensor para los tres tubos.  $\epsilon$  representa la amplitud y  $x$  la posición de los sensores.

Por el tipo de fenómeno que genera la IFE que se estudió, se esperaba tener modos de vibración<sup>6</sup>  $n=0$  y  $n=1$  que se muestran en la Fig.[4.40], esto debido a que son modos de baja frecuencia y se relacionan con amplitudes grandes [10]. Por la posición de los sensores, se esperaba observar causalidad, es decir, un amortiguamiento y desfase de las señales, que fuesen medibles. Esto con el objetivo de poder estimar una velocidad a la que se movía el flujo.

En las frecuencias de 500 Hz y  $30 \times 10^3$  Hz, para el caso del tubo más rígido (tubo 1), resultó complicado identificar un tipo de onda para realizar comparaciones. En cambio, para los tubos con módulo de Young bajo y medio (tubos 2 y 3) se identificaron señales comprables en la parte inferior y media del tubo. Las señales obtenidas a  $100 \times 10^3$  Hz muestran una señal característica con máximos identificables en todos los casos.



**Figura 4.40:** Modos de vibración en un conducto circular[10]

<sup>6</sup>Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibra un sistema mecánico [33].

Los modos principales de vibración están por debajo de 50 Hz para los tres tubos, aunque se visualizan modos de amplitudes mucho menores entre 50 y 100 Hz. El pico de mayor amplitud se presenta cerca de los 20 Hz, seguido de uno o dos picos entre 30 y 40 Hz. La diferencia principal en los modos de vibración, está en la magnitud de los mismos. Cumpliendo con el hecho de que si se disminuye el modulo de Young, la amplitud y duración de la onda aumenta. Se puede asumir que el hecho de cambiar el material, también cambia la velocidad a la que viajan esas ondas en el material. Es una de las razones por las que se puede inferir que en materiales con módulo de Young más bajo, las señales son más lentas y su duración es mayor, por lo que en las frecuencia de muestreo altas se puede observar información adicional.

Observando las gráficas de las figuras[4.39], [4.38], [4.37], [4.34], [4.33] y [4.30], en los puntos correspondientes a las señales en la posición  $x=30$  cm, están por fuera del patrón que siguen los demás sensores. Con falta de experimentos que permitan descartar la falla del sensor o de la conexión correspondiente con la tarjeta de adquisición, lo que se interpreta es que en esa posición, las ondas tienen un comportamiento peculiar.

# Capítulo 5

## CONCLUSIONES

### 5.1. Resumen

Se realizó una serie de experimentos, de acuerdo con el programa experimental propuesto. El conjunto de datos obtenidos se procesó, y se estudió desde el punto de vista estadístico. La evaluación de las dispersiones y de los factores de correlación permitieron establecer la confiabilidad de las mediciones. Más aún, se determinaron los comportamientos promedio de las vibraciones inducidas. Se diseñaron los circuitos de control de la válvula y de sincronización de todas las señales. Es importante señalar que los datos obtenidos indicaron que la tarjeta de adquisición de datos no captura adecuadamente las señales producidas por ondas rápidas.

Las señales de deformación obtenidas solo corresponden a la repuesta de la estructura al paso del flujo. Por otro lado, las señales de presión contienen información adicional de las condiciones del flujo al inicio y al final de la sección de pruebas. El análisis de las señales reveló la ausencia de causalidad en la señal, independientemente de la frecuencia de muestreo. Esto conduce a plantear la necesidad de utilizar un sistema de adquisición de datos más sofisticado, y con capacidad suficiente para tales pruebas.

Se observó que el fenómeno de interacción flujo-estructura está caracterizado por tener una firma espectral de baja frecuencia. Las componentes de onda que se propagan a través de la pared del tubo efectivamente están caracterizadas por ocurrir en bandas de frecuencia más elevadas.

Se confirmó la hipótesis planteada inicialmente respecto a que los cambios de las propiedades del material producen cambios medibles y significativos en las señales de deformación correspondientes. Se observa que con el aumento del módulo de Young tanto las amplitudes como la duración de la onda, disminuyen. Las deformaciones más grandes se registraron en el tubo con el módulo de Young más bajo (tubo 2). De forma general, para los tubos con modulo intermedio y alto (tubos 3 y 1), se observó que la disminución en las amplitudes y duraciones de la señal no son proporcionales al aumento del módulo de Young.

## 5.2. Contribuciones

El análisis de las señales de deformación permitió conocer detalles de la IFE que se genera de una despresurización súbita en una sección de tubo orientado de forma vertical, y los efectos que se producen al hacer un cambio en el material de las secciones de tubo. Los análisis de los espectros de amplitud de Fourier, muestran que la información relevante para las señales obtenidas están por debajo de 100 Hz. Esto coincide con estudios de IFE en los que se reportan espectros con información relevante en bajas frecuencias [32][1][20].

Las frecuencias de vibración medidase en el laboratorio coinciden con las reportadas para los modos de vibración estudiados por David H. Chambers [10] para los modos de frecuencia más bajos. Experimentalmente se produjo información importante para entender las diferencia entre la frecuencia de una señal y la velocidad a la que se mueve la onda que se observa en un fenómeno de despresurización súbita.

Se establece la interesante posibilidad de implementar un método de medición indirecta en campo, que permita estudiar el estado de flujo en el interior de un conducto. Por ejemplo, en el caso de una pozo en sistemas de producción petrolera. Otros casos de interés industrial también permitirían hacer implementaciones similares.

## 5.3. Recomendaciones y trabajo futuro

Las recomendaciones sobre el trabajo presentado, en primer lugar, son recomendaciones para el diseño experimental ya que se puede mejorar las condiciones del fenómeno de estudio. Se recomienda:

- Reemplazar el sistema de válvula por algún otro mecanismo que permita un despresurización con menor obstaculización del flujo.
- Diseñar y aplicar un subsistema de recolección de fluido. Que no genere una intervención mayor en el sistema principal, dado que la solución empleada pudo generar efectos en la sección de estudio.
- Reducir al mínimo el número de uniones y conexiones del sistema, esto con el propósito de adquirir información que contenga menor cantidad de ruido.
- Colocar manómetros con resoluciones muchos más pequeñas.
- Utilizar un instrumento de mayor exactitud para medición del volumen del bloque de agua.
- Colocar un número mayor de sensores piezoeléctricos a lo largo de la sección del tubo.

Se recomienda cambiar el sistema de adquisición de datos, con el objetivo de aumentar la frecuencia de muestreo. De la misma forma, el cambio en el tipo de conexión entre sensores y sistema de adquisición, podría reducir en gran medida el ruido en las señales.

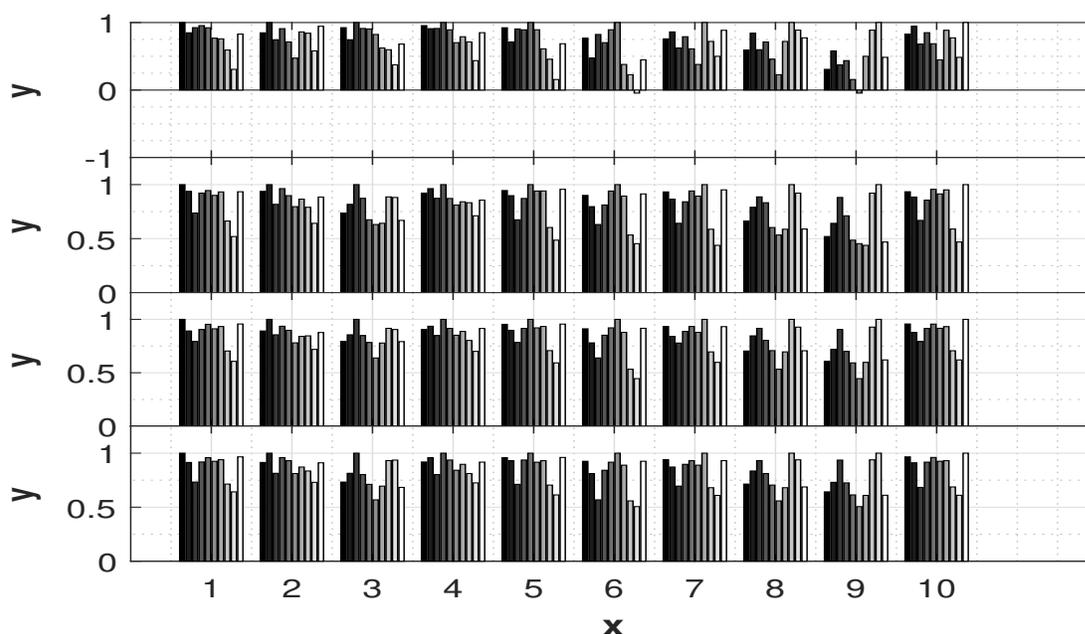
Se recomienda omitir el uso de materiales compuestos, a menos que se conozcan sus propiedades mecánicas. Desde el punto de vista geométrico, es recomendable utilizar tubos que tengan un grosor de pared uniforme y, que sea el mismo para todas las secciones de prueba a utilizar.

En el trabajo futuro se realizarán comparaciones de las señales de deformación obtenidas experimentalmente, con un modelo analítico obtenido mediante las ecuaciones de Navier-Stokes y Navier-Cauchy. Se realizaran simulaciones numéricas del fenómeno de estudio, en el que se espera observar los modos de vibración de la IFE debido a la despresurización súbita, sin tomar en cuenta los demás acoplamientos existentes en el sistema experimental.

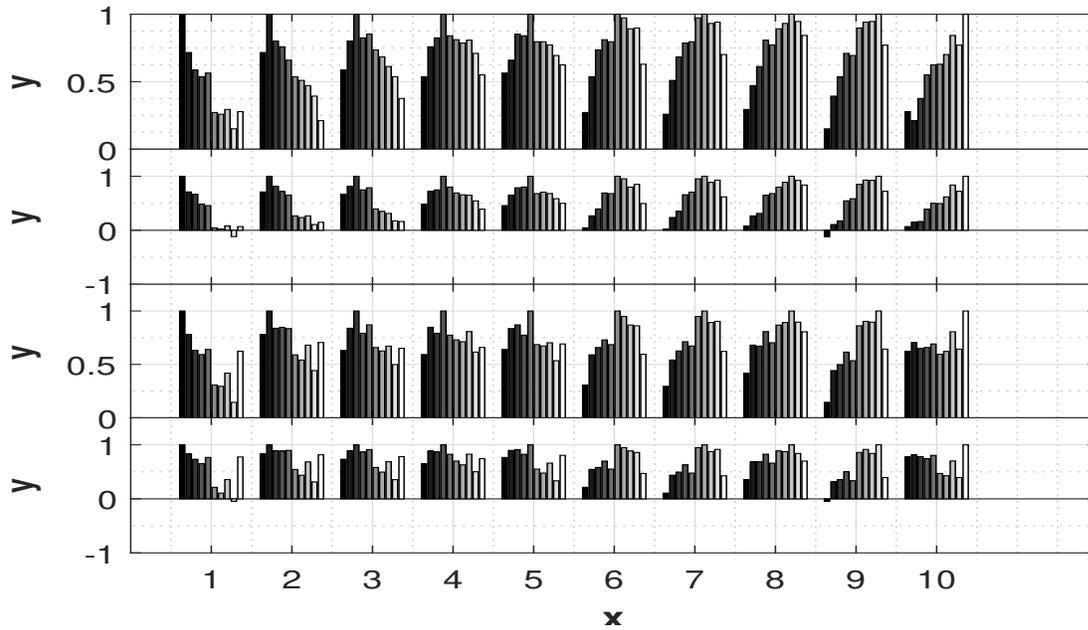
# Apéndice A

## Coeficientes de Correlación de Pruebas Experimentales

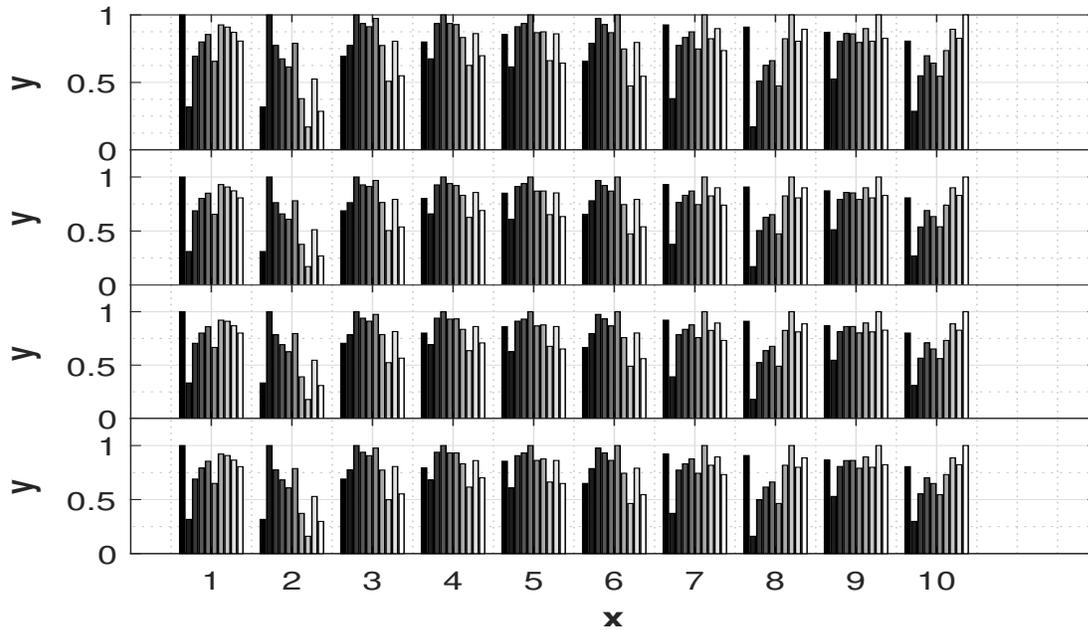
Se presentan gráficamente los coeficientes de correlación de todas las señales. En cada una de las pruebas se presentan 10 coeficientes de correlación. Esto es por la comparación entre cada una de la repeticiones en la frecuencia y tubo correspondiente, y con la prueba en si.



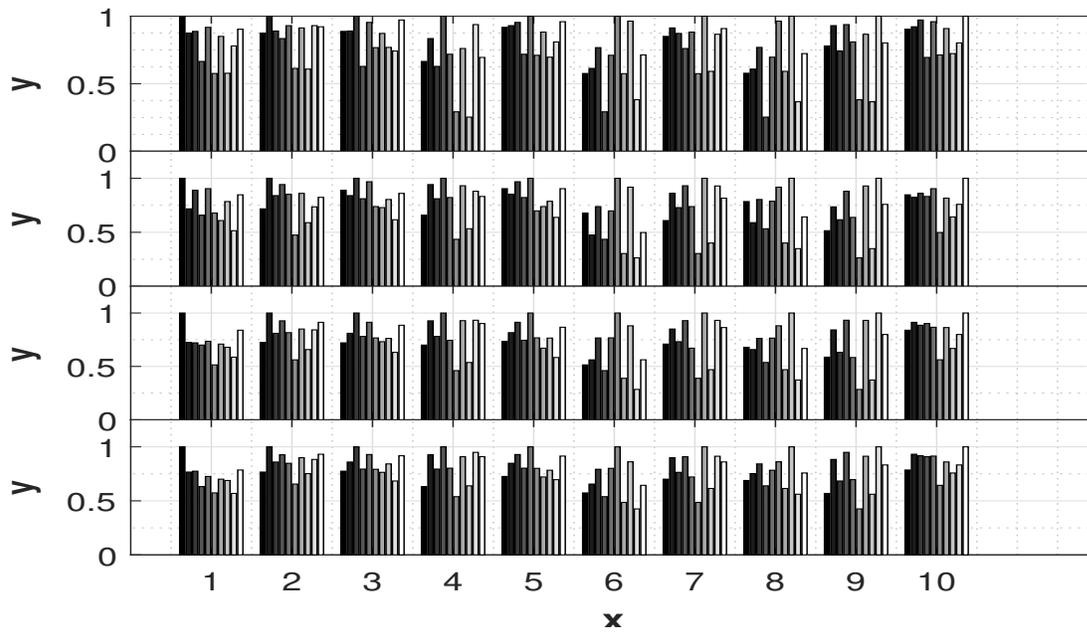
**Figura A.1:** Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 1 para los 4 sensores piezoeléctricos a 500 Hz.



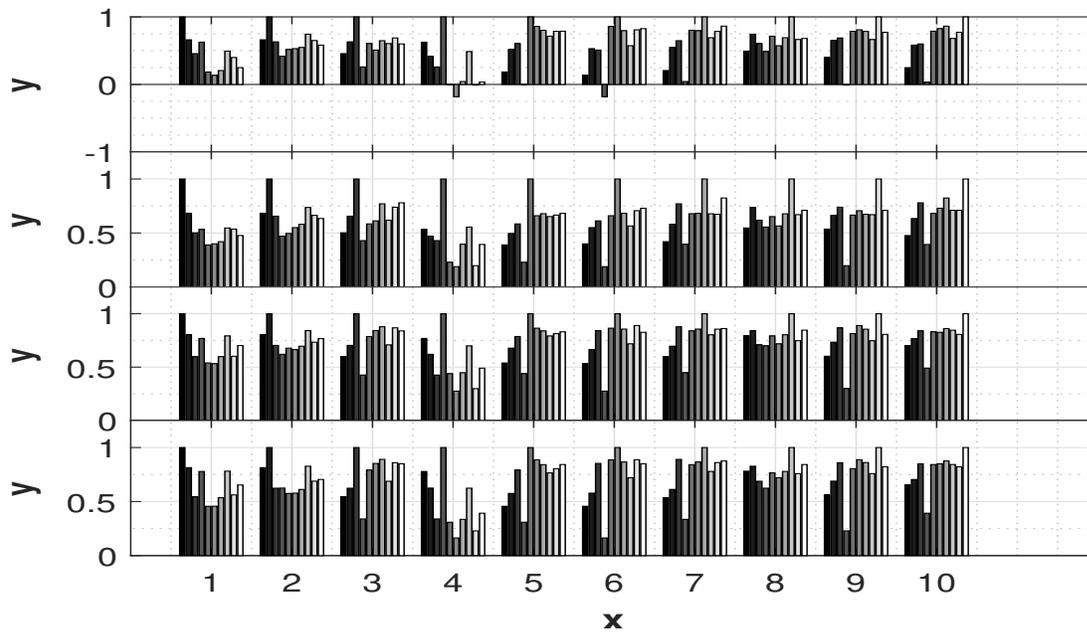
**Figura A.2:** Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 1 para los 4 sensores piezoeléctricos a  $30 \times 10^3$  Hz.



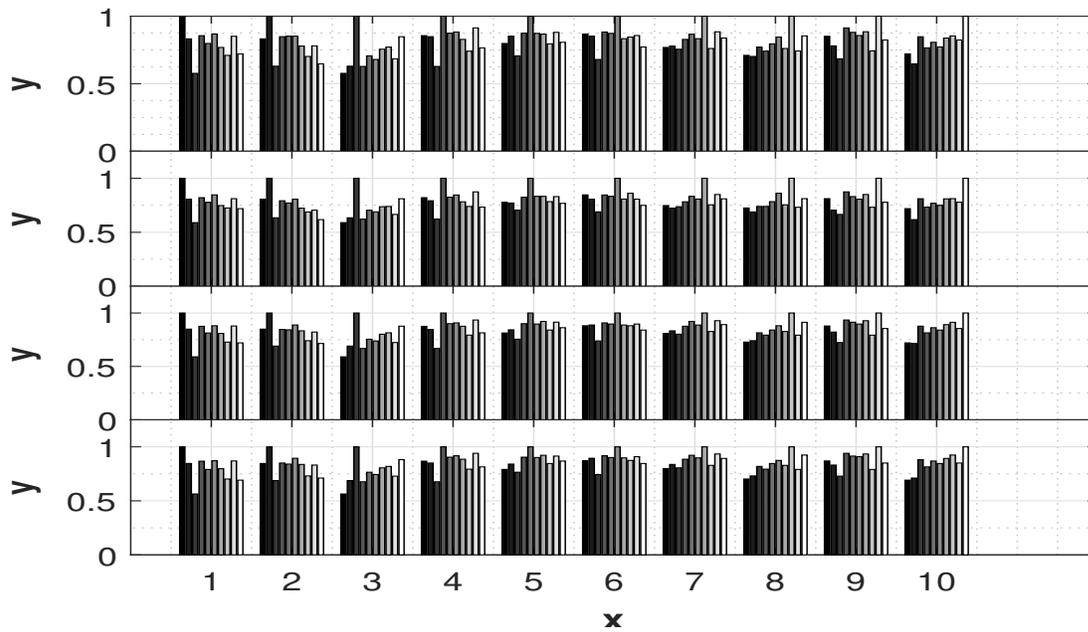
**Figura A.3:** Coeficientes de correlación en las pruebas de tubo No. 1 para los 4 sensores piezoeléctricos a  $100 \times 10^3$  Hz.



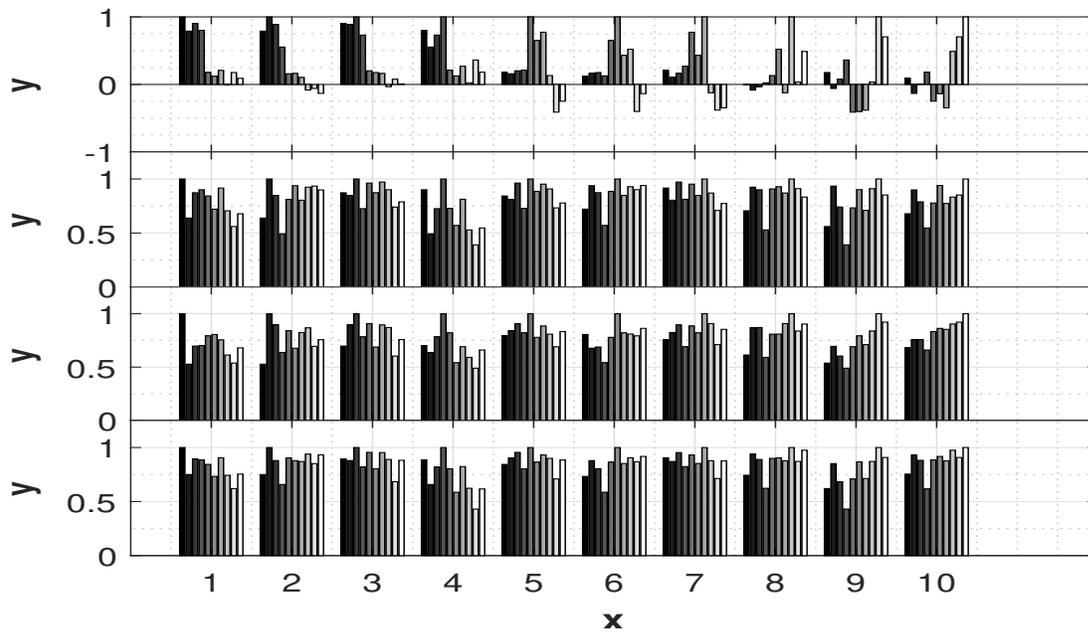
**Figura A.4:** Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 2 para los 4 sensores piezoeléctricos a 500 Hz.



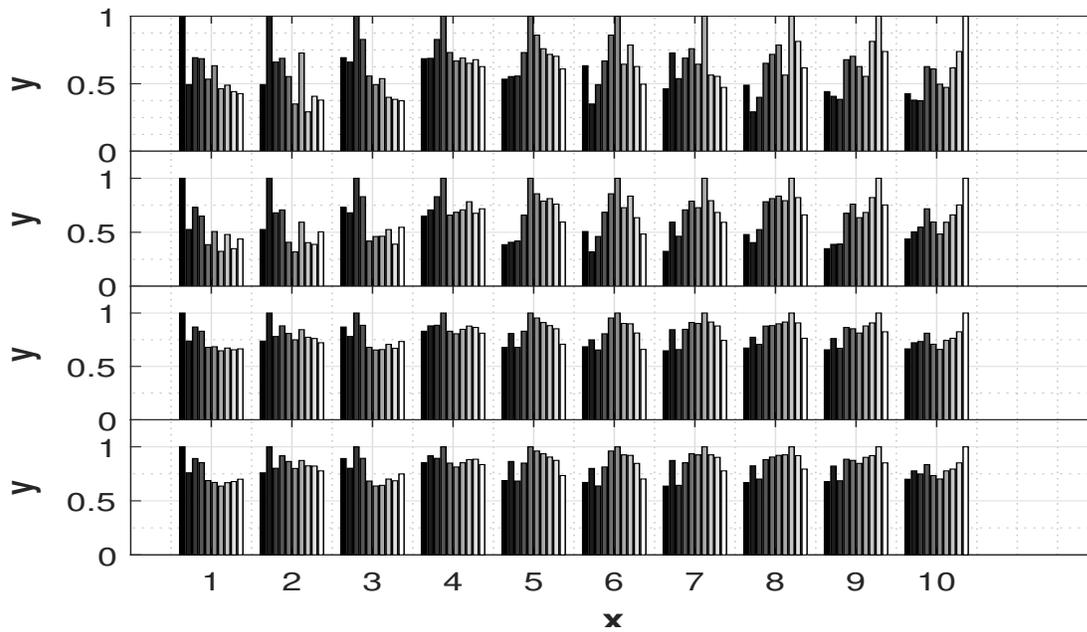
**Figura A.5:** Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 2 para los 4 sensores piezoeléctricos a  $30 \times 10^3$  Hz.



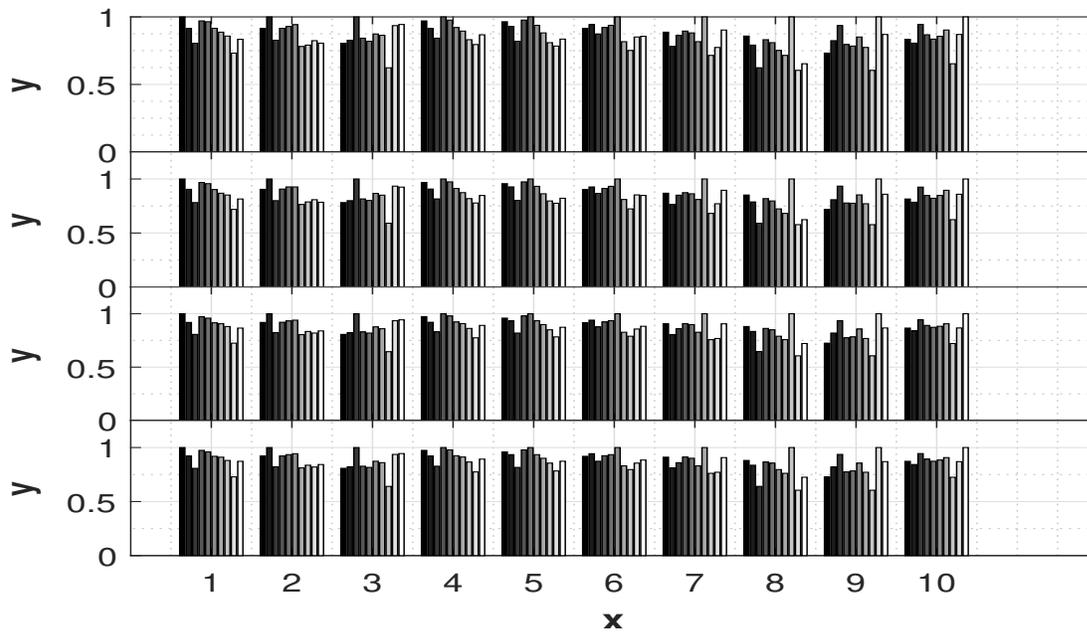
**Figura A.6:** Coeficientes de correlación en las pruebas de tubo No. 2 para los 4 sensores piezoeléctricos a  $100 \times 10^3$  Hz.



**Figura A.7:** Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 3 para los 4 sensores piezoeléctricos a 500 Hz.



**Figura A.8:** Coeficientes de correlación en las pruebas del tubo No. 3 para los 4 sensores piezoeléctricos a  $30 \times 10^3$  Hz.

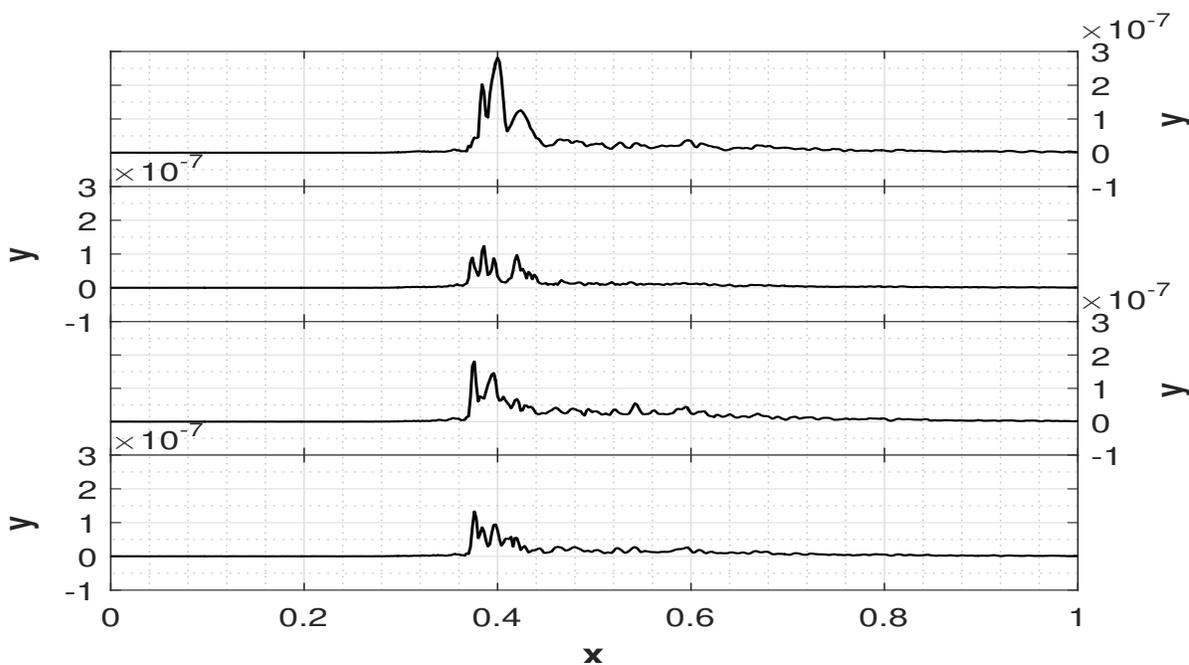


**Figura A.9:** Coeficientes de correlación en las pruebas de tubo No. 3 para los 4 sensores piezoeléctricos a  $100 \times 10^3$  Hz.

# Apéndice B

## Dispersiones estadísticas

Se presentan las dispersiones estadísticas de las señales de deformación. Se grafican las señales en cada uno de los sensores para el tubo y frecuencia correspondiente.



**Figura B.1:** Desviaciones estándar en pruebas de tubo 1 a 500 Hz.

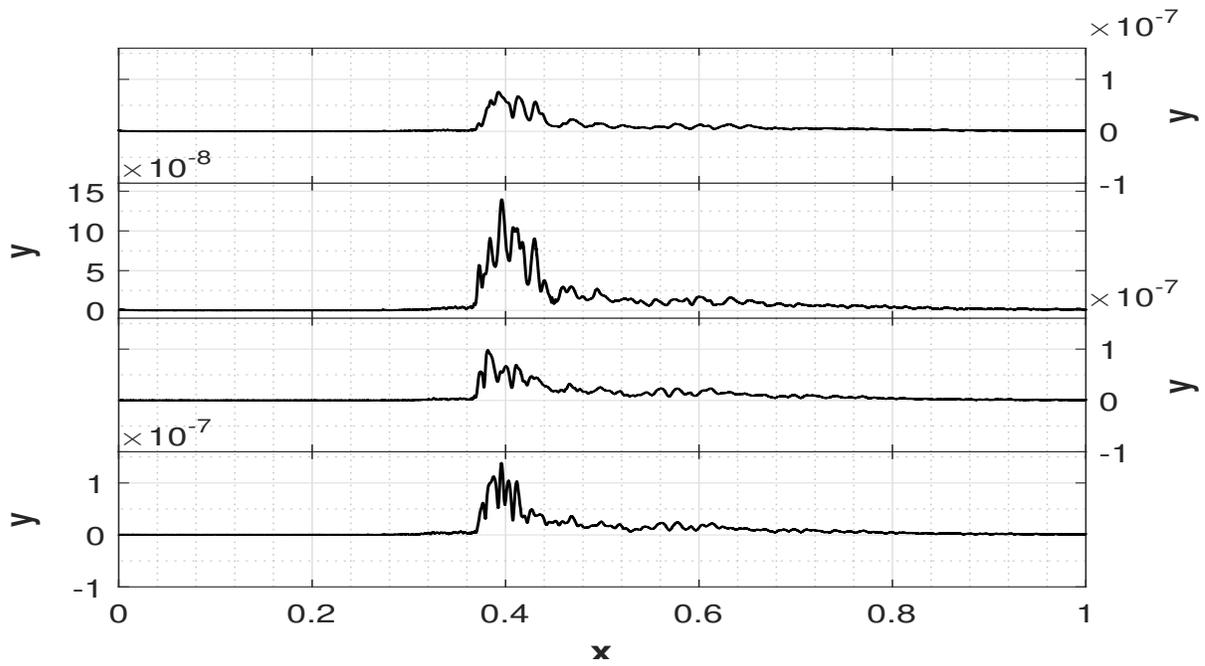


Figura B.2: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 1 a  $30 \times 10^3$  Hz.

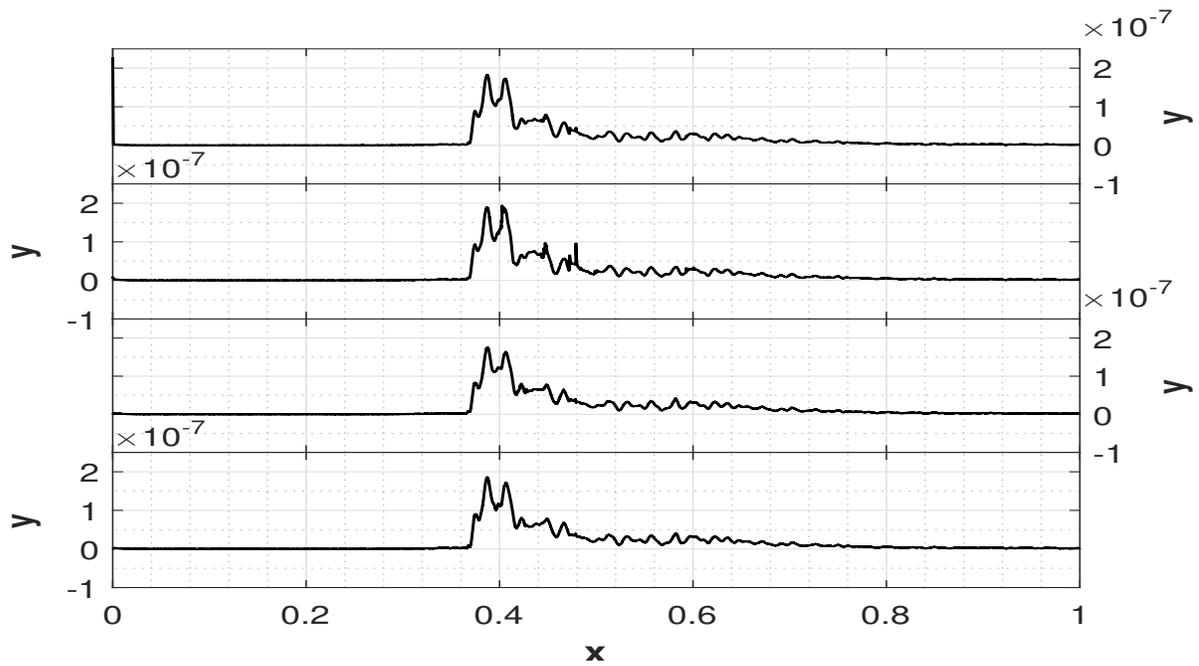


Figura B.3: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 1 a  $100 \times 10^3$  Hz.

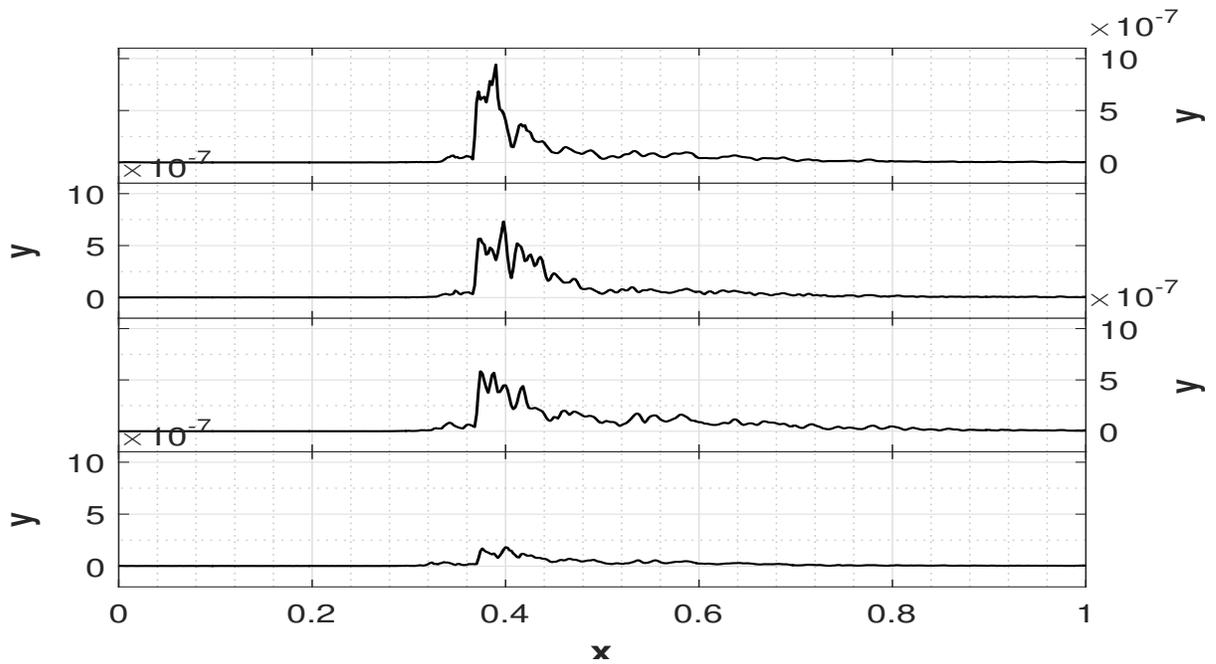


Figura B.4: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 2 a 500 Hz.

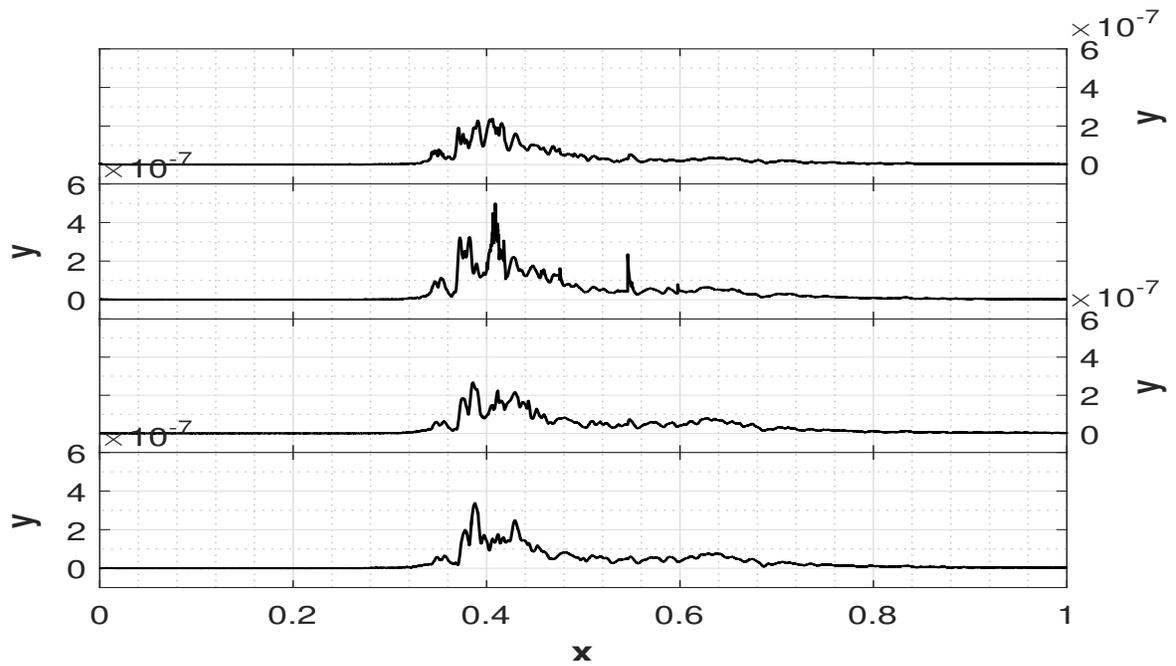


Figura B.5: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 2 a  $30 \times 10^3$  Hz.

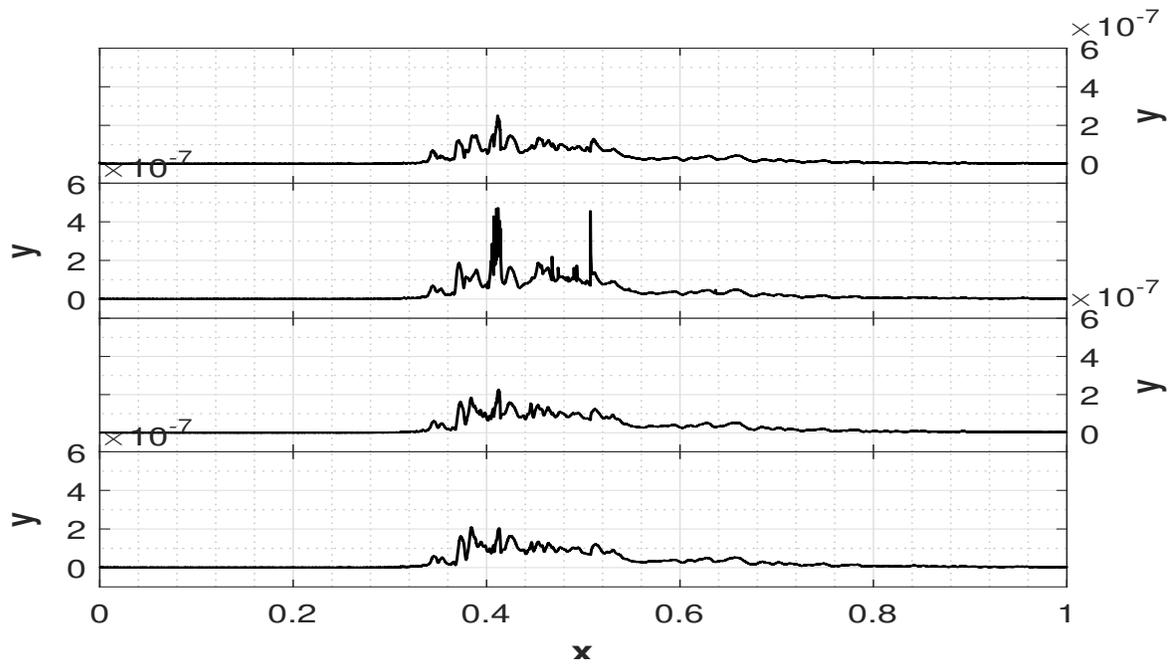


Figura B.6: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 2 a  $100 \times 10^3$  Hz.

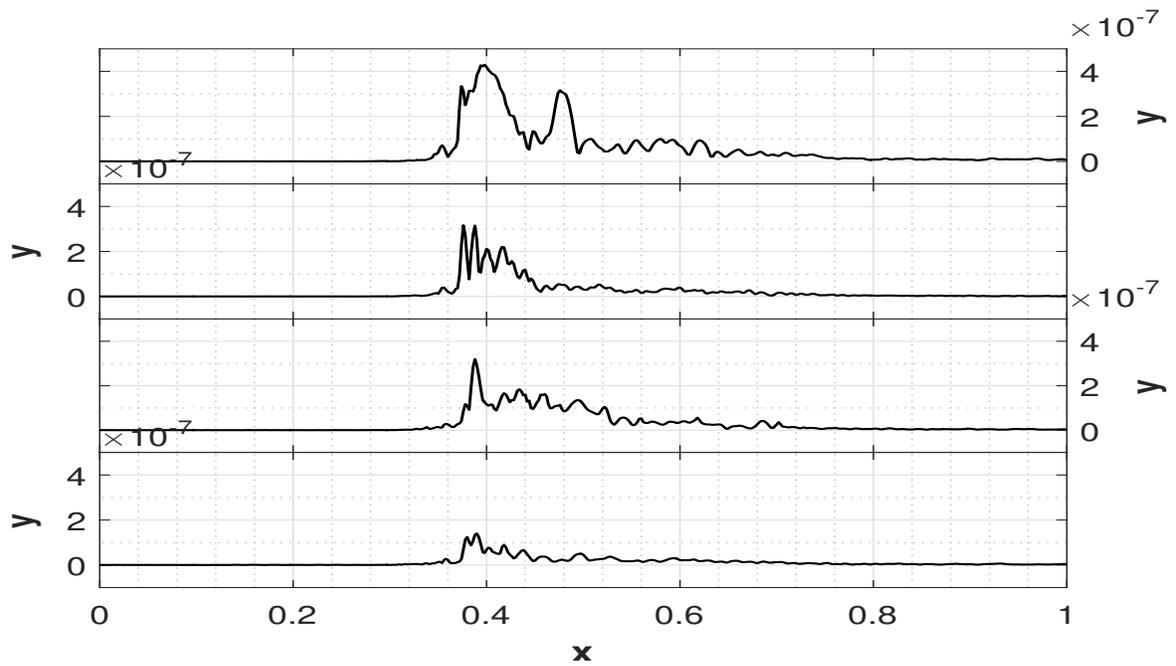


Figura B.7: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 3 a 500 Hz.

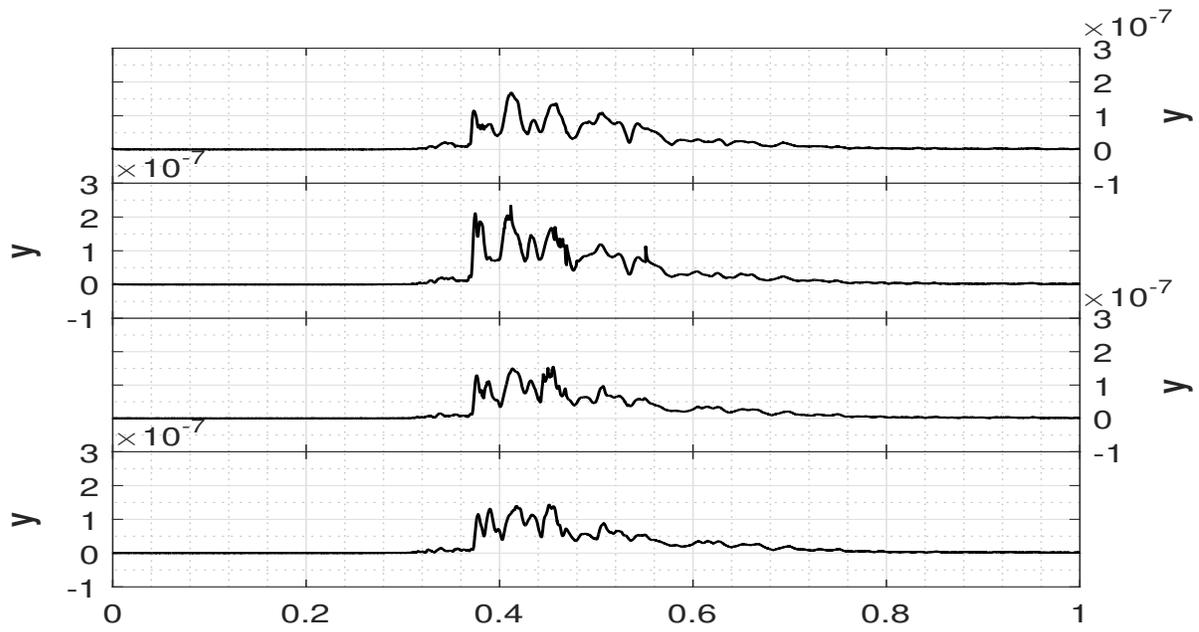


Figura B.8: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 3 a  $30 \times 10^3$  Hz.

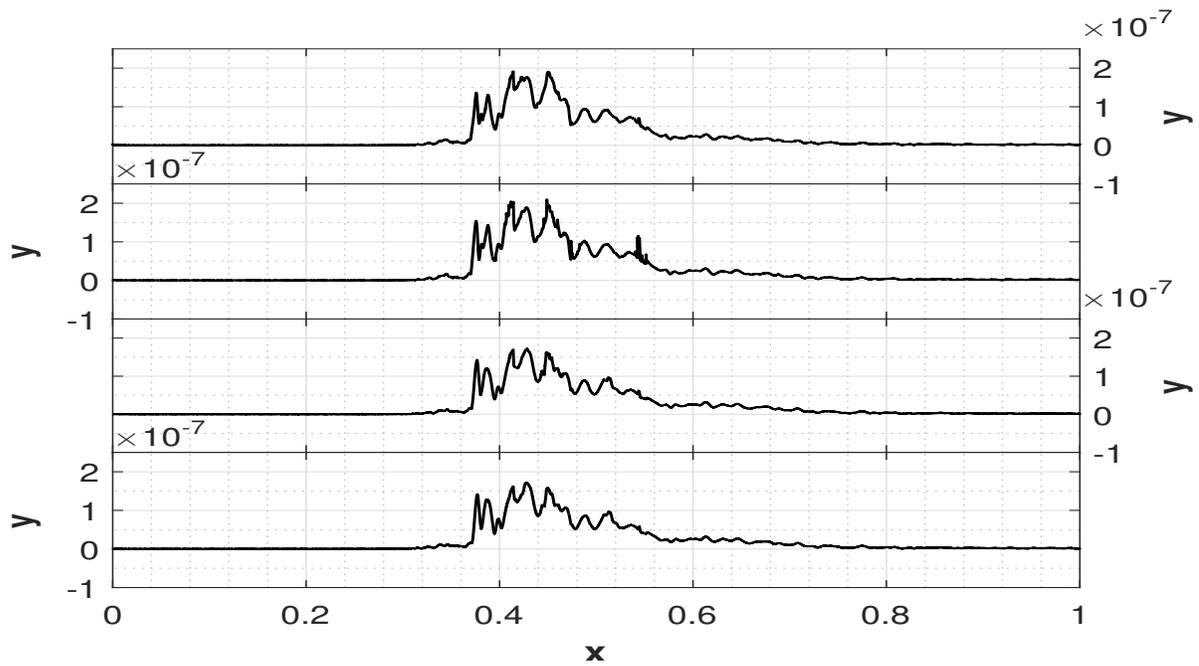


Figura B.9: Desviaciones estándar en pruebas de tubo 3 a  $100 \times 10^3$  Hz.

# Apéndice C

## Señales de Presión

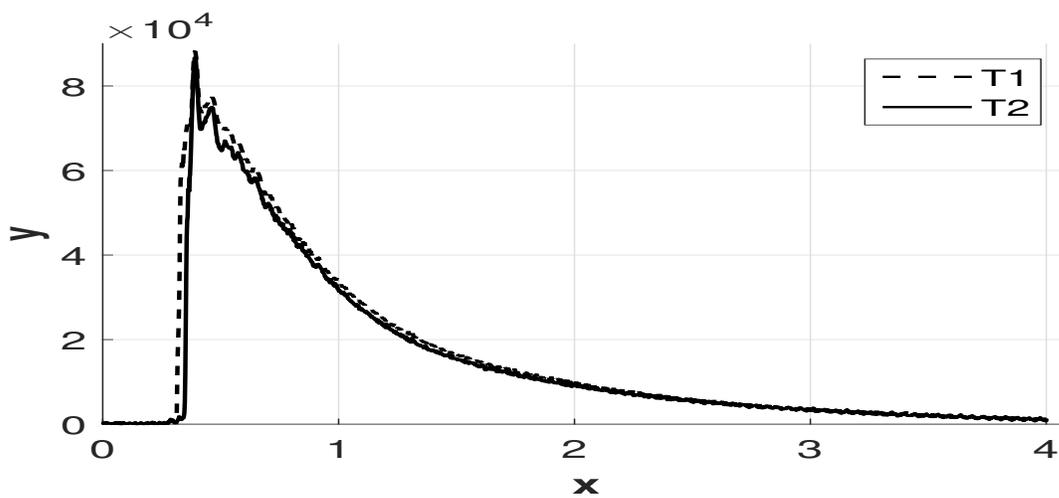


Figura C.1: Señales de presión de los transductores 1 y 2 para tubo 1.

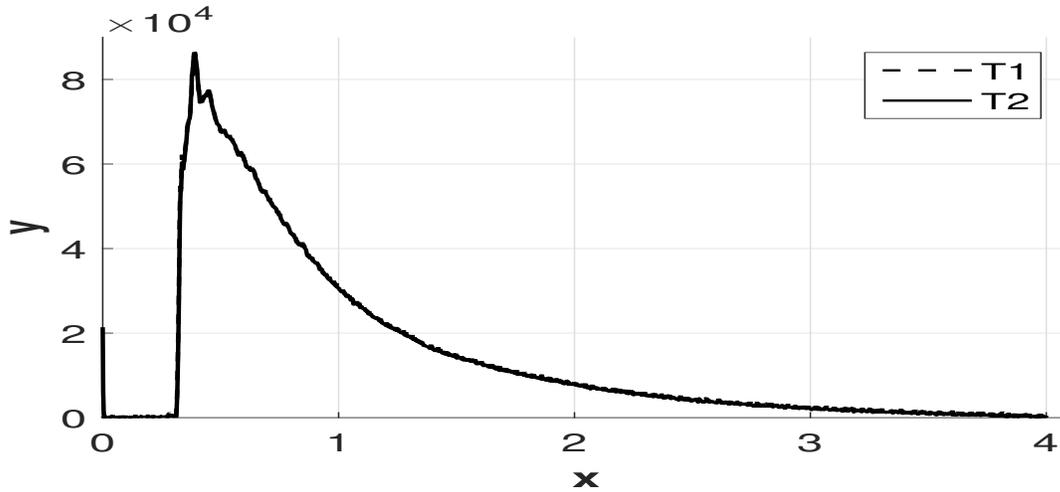


Figura C.2: Señales de presión de los transductores 1 y 2 para tubo 2.

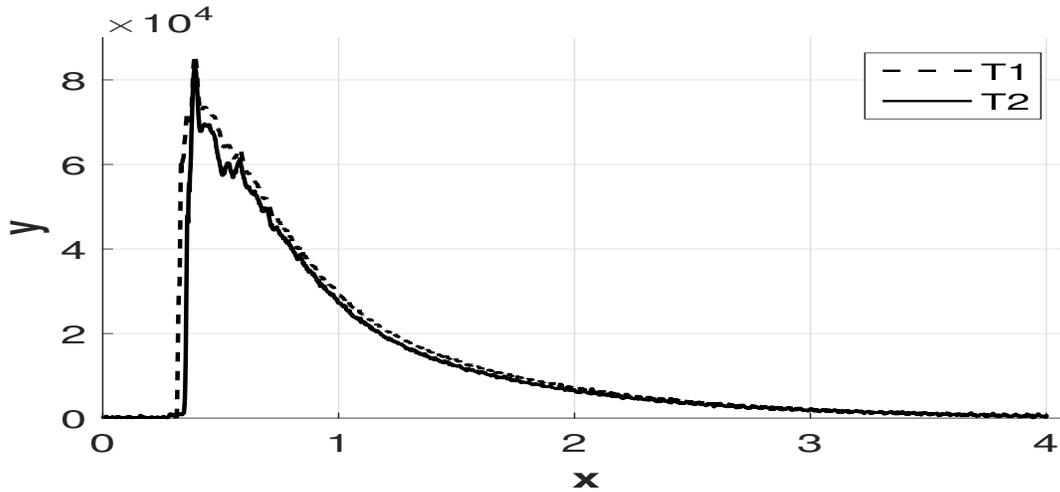


Figura C.3: Señales de presión de los transductores 1 y 2 para tubo 3.

Se observa en las pendientes de las señales de presión una diferencia de tiempo, con la que se pudo estimar una velocidad de la onda de presión que coincidió para el tubo 1 y tubo 3. En el caso del tubo 2, se infiere un error dado que las señales de ambos transductores están encimadas. Se observa que en las señales de presión existe un zona donde la distancia entre pendientes de ambos transductores se estrecha, lo cual se puede interpretar como una aceleración de flujo. La atenuación en la caída de presión, se relaciona con la salida del flujo, esto es la salida de todo el aire comprimido aguas arriba de la válvula en el momento  $t_0$ .

De manera complementaria, en la tabla[C.1] se muestran las pérdidas de presión medidas

en los transductores de presión.

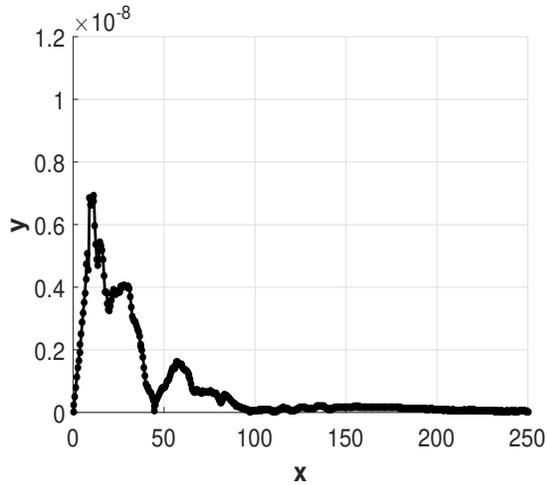
**Tabla C.1:** Perdidas de presión.

	Perdidas de presión [bar]	
	Transductor No. 1	Transductor No. 2
tubo 1	0.117	0.133
tubo 2	0.136	0.14
tubo 3	0.14	0.166

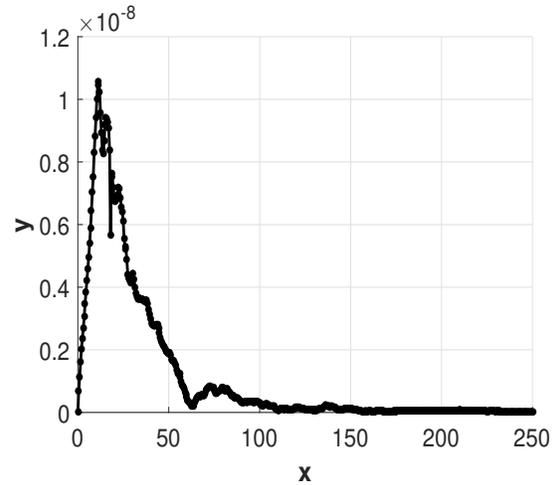
# Apéndice D

## Espectros

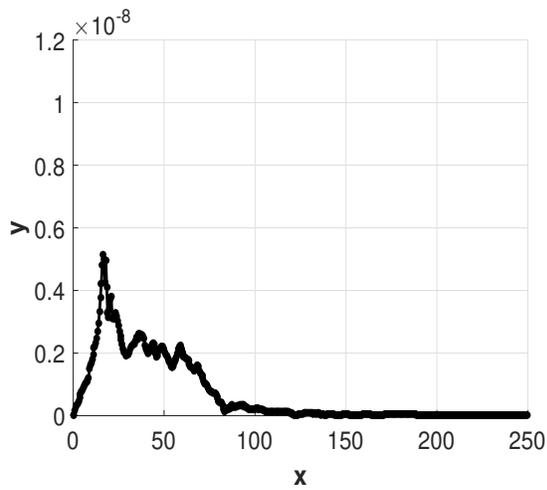
Para un análisis de señales se obtuvo la transformada de Fourier de cada una de las señales con el fin de comprar sus espectros de frecuencia. En las Figuras[D.1][D.2][D.3] se muestran los espectros de amplitud de las señales medidas por los sensores 1 y 4 en cada una de las frecuencias de muestreo utilizadas y para los tres tubos.



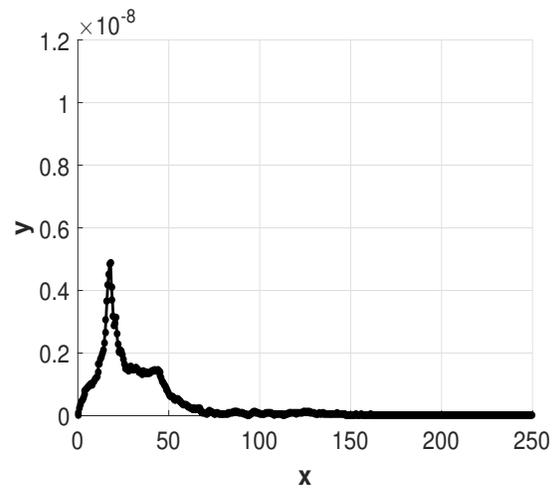
(a) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 1 a 500 Hz



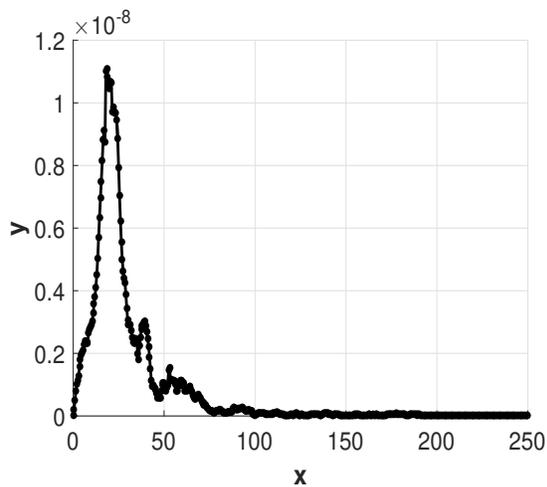
(b) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 1 a 500 Hz



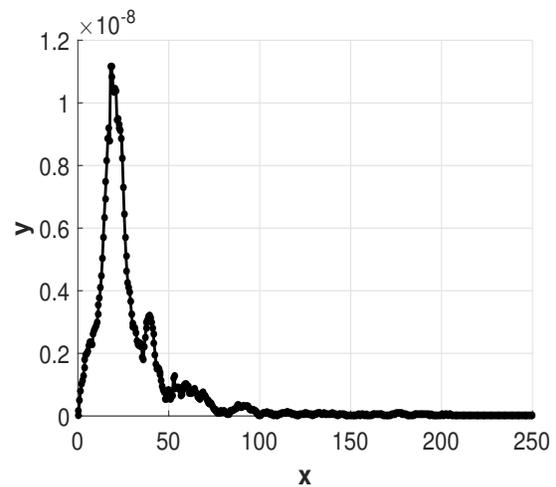
(c) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 1 a 30 kHz



(d) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 1 a 30 kHz

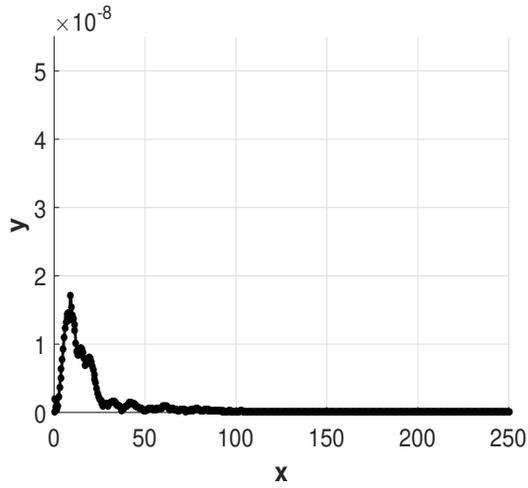


(e) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 1 a 100 kHz

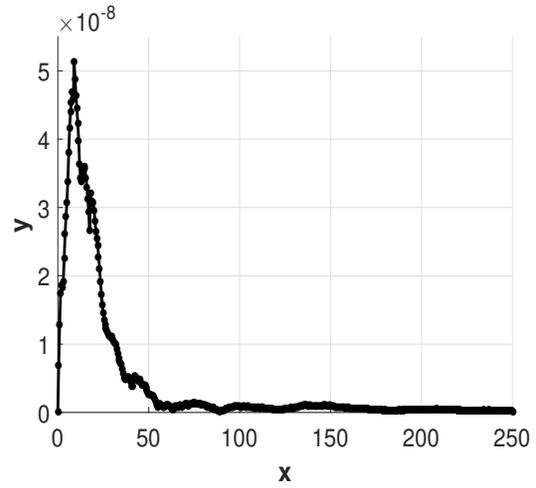


(f) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 1 a 100 kHz

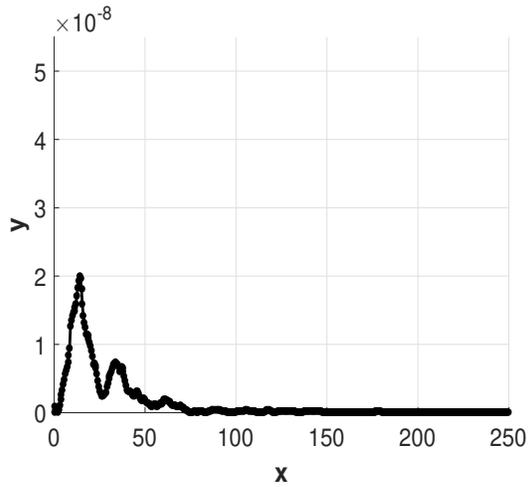
Figura D.1: Espectros de Frecuencias en tubo 1.



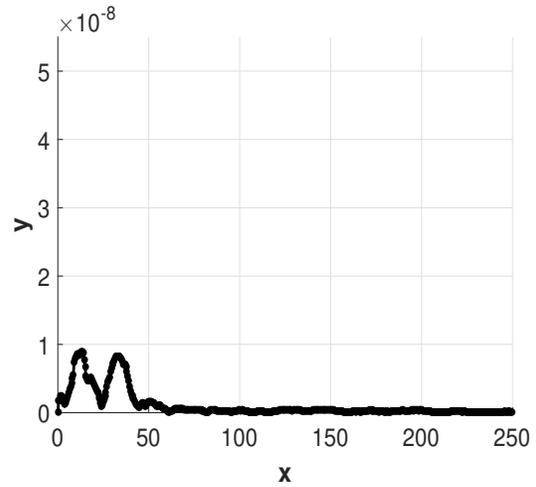
(a) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 2 a 500 Hz



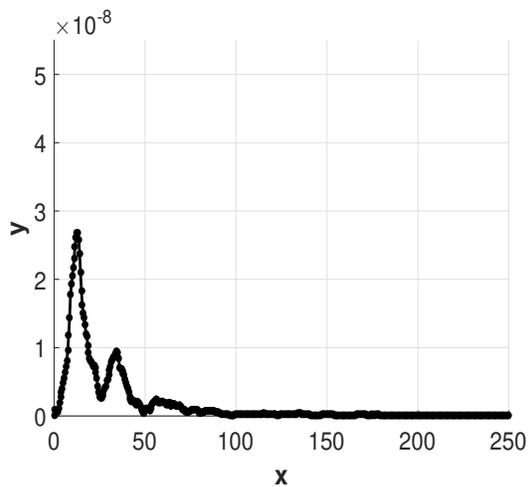
(b) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 2 a 500 Hz



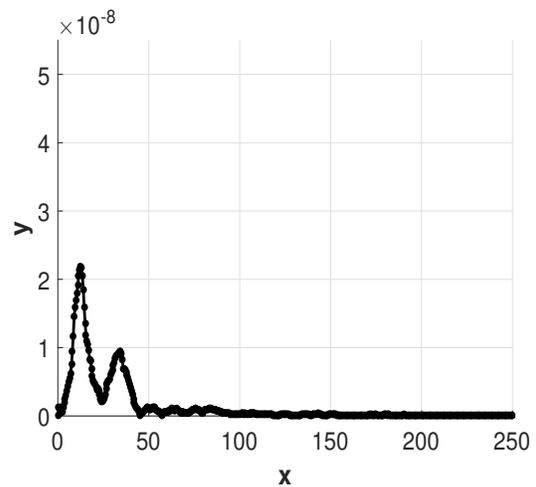
(c) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 2 a 30 kHz



(d) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 2 a 30 kHz

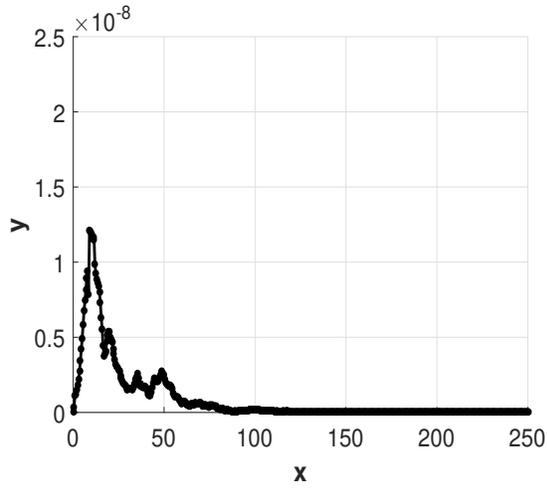


(e) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 2 a 100 kHz

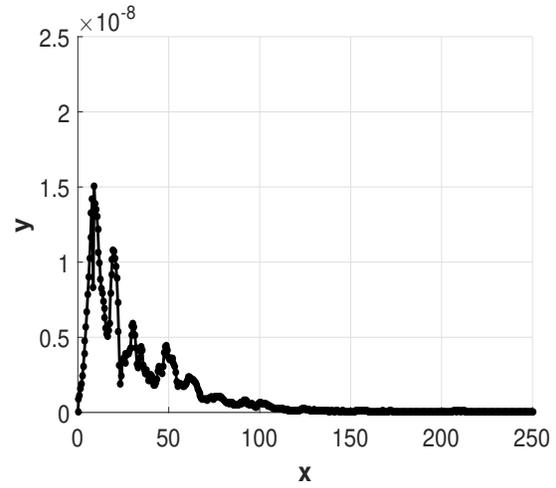


(f) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 2 a 100 kHz

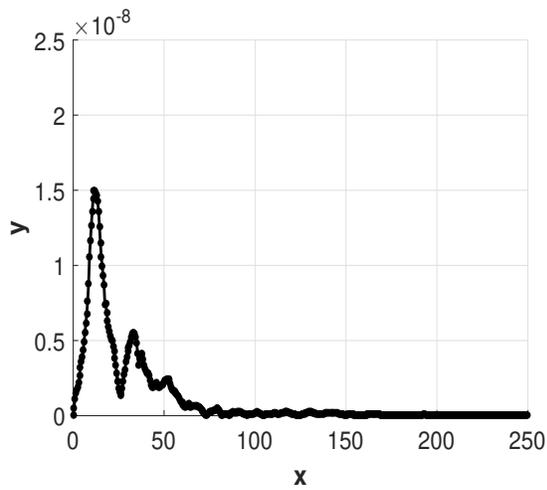
**Figura D.2:** Espectros de Frecuencias en tubo 2.



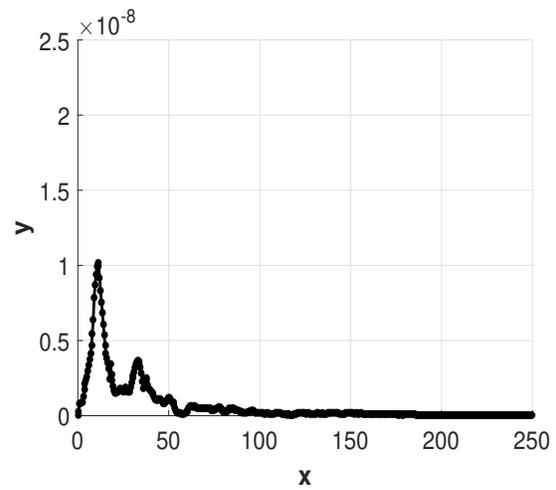
(a) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 3 a 500 Hz



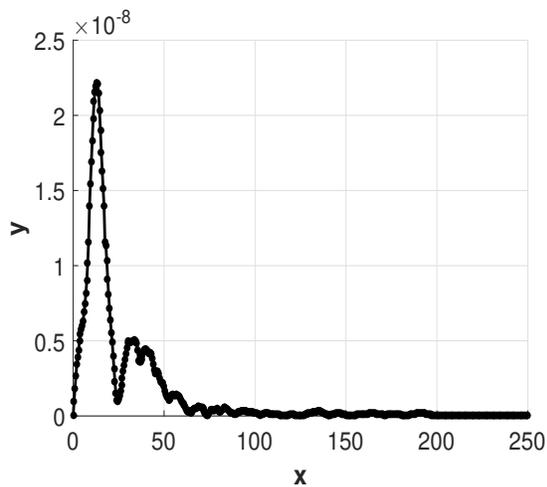
(b) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 3 a 500 Hz



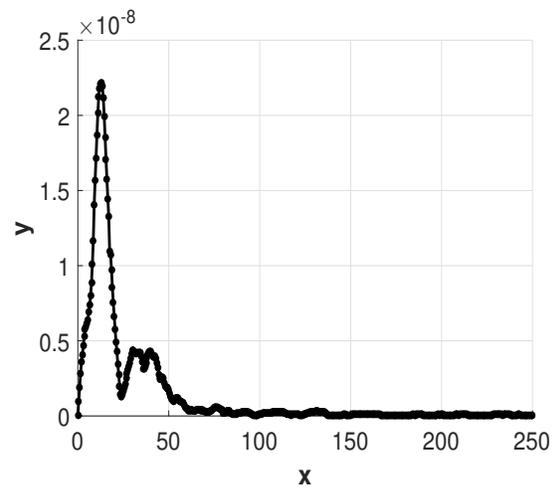
(c) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 3 a 30 kHz



(d) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 3 a 30 kHz



(e) Espectro de frecuencias de sensor 1 en tubo 3 a 100 kHz



(f) Espectro de frecuencias de sensor 4 en tubo 3 a 100 kHz

**Figura D.3:** Espectros de Frecuencias en tubo 3.

# Bibliografía

- [1] J. L. A. Czerwinski. Parametric vibrations of flexible hoses excited by a pulsating fluid flow, part ii: Experimental research. *Journal of Fluids and Structures*, 55:174–190, 2015.
- [2] J.-M. V.-B. A. Korobkin, E. I. Părău. The mathematical challenges and modelling of hydroelastcity. *Phil. Trans R. Soc. A.*, 369:2803–2812, 2011.
- [3] R. H. M. Antonio. *Mecánica del Medio Continuo*. 2016.
- [4] V. Autores. Find Local Máxima. url <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/findpeaks.html>, 2007.
- [5] V. Autores. Ficha Técnica Cristal Reforzado. url <http://tecnicman.es/ficha/mangueras-industriales/mangueras-de-pvc/cristal-reforzado/>, 2014.
- [6] L. J. H. B. M. Maajel, F. A. Saleh. Fluid structure interaction investigations in liquid filled tube systems: recent literature review. *Journal of Materials*, pages 69–74, 2015.
- [7] M. A. M. Barreral. Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Movimiento Científico*, pages 98–104, 2014.
- [8] G. C. Canavos. *Probabilidad y Estadística Aplicaciones y metodos*. McGraw Hill, 1988.
- [9] D. Cao. Finite element analysis of fluid-structure interactions in piping systems, 2015.
- [10] D. Chambersi. Acustically driven vibrations in cylindrical structures. *Lawrence Livermore National Laboratory*, 2013.
- [11] A. S. T. D. C. Wiggert. Fluid transients and fluid structure interaction in flexible liquid filled piping. *Applied Mechanics Reviews*, 54(5):455–481, 2001.
- [12] Danfoss. *Manual de usuario de válvulas solenoides*, 11 2015.

- [13] F. de S. Sánchez Lindoro. Aplicación de sensores activos y pasivos en la circulación superficial de mesoescala en la parte sur del golfo de México. url <http://tesis.bnct.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/19390/sanchezl1.pdf?sequence=1isAllowed=y>, 2011.
- [14] D. R. E. Naudascher. Flow Induced Vibrations: An Engineering Guide. *Journal of Fluid Mechanics*, 282:406–406, 1994.
- [15] Y. P. G.H. Koo. Vibration reduction by using periodic supports in a piping system. *Journal of Sound and Vibration*, 210:53–68, 1998.
- [16] D. L. Hannah. Fluid structure analysis of microparticle transport in defromable pulmonary alveoli. *Lehigh University*, 2006.
- [17] R. C. Hibbeler. *Mecánica de Materiales*. Pearson, 2011.
- [18] D. G. M. Jhon G. Proakis. *Digital Signal Processing*. Prentice-Hall international, 1996.
- [19] S. Y. K. R. P. S. A. A. Khan. Experimental evaluation of a vibration-based leak detectin technique fro water pipelines. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14:46–55, 2018.
- [20] G. D. L. F. G. V. A. Lay-Ekuakille. Vibrational signal processing for characterization of fluid in pipes. *Measurment*, 2017.
- [21] Maurca. *Precios al publico Best 101 Mangueras PVC*, 2016. Rev 1.
- [22] Measurment Specialities. *Piezo Film Sensors Technical Manual*, 4 1999. Rev B.
- [23] National Instruments. *User Guide NI-USB-621xOEM*, 10 2007.
- [24] M. P. Païdoussis. *Fluid-Structure Interacctions Slender Structure and Axial Flow*. Mc Gill University, 2014.
- [25] S. B. C. G. J. C. N. R. Ooi X. Luo. Fluid structure intercation simulation of the human cystic duct. *Summer Bioengineering Conference*, pages 811–812, 2003.
- [26] S. L. M. Ronald E. Walpole, Rayond H. Myers. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Pearson, 2012.
- [27] G. L. S. Li, B. W. Karney. FSI research in pipe line systems-A review of literature. *Journal of Fluids and Structures*, 57:277–297, 2015.

- [28] H. S. S.M. Murigendrappa, S.K. Maiti. Experimental an tehorical study on crack detection in pipes filled with fluid. *Journal of Sound and Vibration*, 270:1013–1032, 2004.
- [29] Spears Manufacturing Company. *Special Pipe Spears PVC Clear*, 2015. Rev 1.
- [30] TE connctivity. *LDT1-028K PIEZO SENSOR*, 9 2015. Rev 1.
- [31] A. S. Tijsseling. Fluid structure interaction in liquid filled pipe systems: a review. *Journal of Fluid and Structures*, 10:109–146, 1996.
- [32] H. O. C. W. W. A. G. Wei. Detecting leaks in plastic pipes. *American Water Works Association Journal*, 92, 2000.
- [33] G. White. *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima DLII, 2010.