

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

RESIDENCIA PROFESIONAL

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

DETECCIÓN DE FUGAS EN DUCTOS UTILIZANDO LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

PRESENTA

DIANA ARLETH MUÑOZ MENÉNDEZ

ASESOR

DR. FRANCISCO RONAY LÓPEZ ESTRADA

TUXTLA GUTIÉRREZ CHIAPAS, 2016

Índice

1. Generalidades	6
1.1. Introducción	6
1.2. Información donde se desarrolló el proyecto	6
1.2.1. Historia del Instituto de Ingeniería de la UNAM	6
1.2.2. Misión	8
1.2.3. Valores	8
1.3. Antecedentes	9
1.4. Objetivo	10
2. Descripción de la planta piloto	10
2.1. Instrumentación	13
2.2. Sistema SCADA	17
2.3. Parche de monitoreo	19
3. Descripción del parche de monitoreo	20
4. Análisis de las señales de deformación	26
5. Análisis de las mediciones de presión	32
6. Análisis de las señales de deformación y presión	43
6.1. Correlación entre la señal de presión intermedia y la señal de deformación	47
6.2. Desfasamiento de las señales de presión	49
7. Validación del modelo matemático del parche de monitoreo	50
8. Conclusiones	54

Índice de figuras

1.	Diagrama del ducto	12
2.	Diagrama de representación de cargas aplicadas al ducto	13
3.	Sensor de flujo por principio de Coriolis	13
4.	Comportamiento de los flujos medidos ante un cambio súbito en la válvula V-2. (Fig. tomada de Cayetano (2015))	14
5.	Sensor de flujo Promag 10D	15
6.	Comportamiento del flujo de extracción en la válvula V-4. (Fig. tomada de Cayetano (2015))	16
7.	Sensor de presión Cerabar PMP71	17
8.	Comportamiento de la presión de entrada con fuga en la válvula V-4. (Fig. tomada de Cayetano (2015))	17
9.	Módulo de adquisición de datos BK9000 y Terminal KL3052	18
10.	Pantalla del sistema SCADA	19
11.	Ducto piloto que se encuentra en el II-UNAM	19
12.	Diagrama de representación de cargas aplicadas al ducto	20
13.	Parche de monitoreo y distribución de los sensores de fibra óptica	21
14.	Esquematación del arreglo de fibra óptica y sus correspondientes sensores	22
15.	Distribución de galgas extensiométricas	22
16.	Esfuerzos sobre la pared del tubo. a)Sección transversal y cargas que actúan sobre la pared, b)Elemento representativo de la pared del tubo y esfuerzos a los que se encuentra sometido	23
17.	Código del programa en Matlab para procesar los datos registrados de la longitud de onda	27
18.	Comportamiento de la señal de deformación sin fugas en el ducto en un punto de operación a $60[Hz]$	28
19.	Comportamiento de la señal de deformación provocando una fuga en el ducto en un punto de operación a $60[Hz]$	29
20.	Comportamiento de la señal de deformación al cierre de la válvula en un punto de operación a $60[Hz]$	29
21.	Comportamiento de la señal de la presión de extracción del paso 1 del experimento 5.1	33
22.	Comportamiento de la señal de la presión aguas arriba del paso 2 del experimento 5.1	34
23.	Comportamiento de la señal de la presión aguas abajo del paso 3 del experimento 5.1	35
24.	Comportamiento de la señal de la presión de extracción del paso 1 del experimento 5.2	37
25.	Comportamiento de la señal de la presión aguas arriba del paso 2 del experimento 5.2	38

26.	Comportamiento de la señal de la presión aguas abajo del paso 3 del experimento 5.2	39
27.	Comportamiento de la señal de la presión de extracción del paso 1 del experimento 5.3	41
28.	Comportamiento de la señal de la presión aguas arriba del paso 2 del experimento 5.3	41
29.	Comportamiento de la señal de la presión aguas abajo del paso 3 del experimento 5.3	42
30.	Comportamiento de la señal de deformación del experimento 6.1.1	44
31.	Comportamiento de la señal de la presión de entrada del experimento 6.1.2	45
32.	Comportamiento de la señal de la presión intermedia del experimento 6.1.2	46
33.	Comportamiento de la señal de la presión de salida del experimento 6.1.4	47
34.	Proceso de normalización de las señales	48
35.	Señales normalizadas	49
36.	Señales de presión del experimento 6.1	50
37.	Señal de la presión obtenida a partir de la validación del modelo matemático	54

Índice de cuadros

1.	Ubicación de las válvulas	11
2.	Especificaciones técnicas del sensor de flujo Promass 83F	14
3.	Especificaciones técnicas del sensor de flujo Promag 10D	15
4.	Especificaciones técnicas del sensor de presión Cerabar PMP71	16
5.	Tabla de resultados de los experimentos realizados para el análisis de la deformación	32
6.	Tabla de resultados del análisis de presión del experimento 5.1	36
7.	Tabla de resultados del análisis de presión del experimento 5.2	40
8.	Tabla de resultados del análisis de presión del experimento 5.3	43
9.	Tabla de resultados del análisis de deformación y presión del experimento 6.1	47

1. Generalidades

1.1. Introducción

Existen diferentes métodos para la detección de eventos anormales en ductos, algunos son On-line, como por ejemplo: el basado en el monitoreo de flujo y presión y otros métodos basados en un modelo del fluido en el ducto. Dentro de los métodos Off-line se encuentra el basado en la medición de la onda de presión, el que realiza pruebas de termografía infrarroja, los detectores de emisión acústica y el de fibra óptica. En el presente trabajo se propone la utilización de un parche de monitoreo con sensores embebidos (rejillas de Bragg, termopares y galgas extensiométricas) para estudiar los efectos de eventos anormales en las tuberías y medir la deformación que producen. En este trabajo se analizaron sólo las mediciones producidas por las rejillas de Bragg en fibra, las cuales tienen diversas aplicaciones (Cerecedo-Núñez and Iturbe-Castillo, 1998) como el diseño y desarrollo de productos para pruebas estructurales de tensión y fatiga, adquisición de datos de carga en carretera, monitoreo de infraestructuras, medición de fuerza, carga, deformación y par; y posee características únicas que permiten utilizarlas como sensores para aplicaciones complejas debido a que son inmunes a las interferencias electromagnéticas, además se pueden utilizar en condiciones de alto riesgo de explosión, son estables ante la influencia de la humedad (si se instalan con adhesivos de resina) y tienen una sensibilidad intrínseca a la temperatura. Con un tratamiento adecuado cada rejilla puede hacerse sensible a diferentes parámetros como: temperatura, deformación, presión, aceleración, desplazamiento, etc. Esto quiere decir que la respuesta de cada rejilla dependerá del tipo de excitación en la entrada, ya que la forma de inscribir la rejilla de Bragg en la fibra óptica es la misma. Por ejemplo si la fibra se estira o se comprime, la rejilla puede medir la deformación, y si a la fibra se le aplica calor sufre una variación en el índice de refracción del silicio, inducido por el efecto termoóptico que nos permite medir la temperatura.

1.2. Información donde se desarrolló el proyecto

1.2.1. Historia del Instituto de Ingeniería de la UNAM

El Instituto de Ingeniería tiene origen en diversas iniciativas de la Universidad, de los universitarios en la industria y de los gobiernos de la década de los 40 del siglo pasado. El primer intento de formación del Instituto de Ingeniería proviene de un acuerdo del Consejo Universitario en 1944, de “Crear un Instituto de Ingeniería, en la medida que los recursos lo permitan”. Los recursos eran escasos, por lo cual, la iniciativa se pospuso más de una década.

Los gobiernos de la posguerra, profundamente preocupados por la construcción de la infraestructura que el país requería: (presas, distritos de riego, túneles, puentes, carreteras, aeropuertos y diversas obras civiles), alentó la organización

de jóvenes mexicanos para hacer dichas construcciones. Algunos de ellos, universitarios de procedencia, vieron la necesidad de crear el Instituto de Ingeniería, A.C., cuyas escrituras datan de 1955. Entre los más importantes promotores de aquella organización, estuvieron los ingenieros Nabor Carrillo, Javier Barros Sierra, Bernardo Quintana y otros. Ellos pensaron que la mejor opción era integrar al Instituto de Ingeniería en la Facultad de Ingeniería, al tiempo que esta se instalaba en Ciudad Universitaria. En 1956 el Instituto de Ingeniería era ya una realidad universitaria.

La primera fuente de financiamiento del Instituto fue ICA, que lo nutrió de técnicos y ejecutivos y también de problemas en ingeniería que habría que resolver. El primer recinto del Instituto fueron los sótanos del entonces Instituto de Geología, instalaciones que ahora ocupa el Centro de Enseñanzas en Lenguas Extranjeras de la UNAM. La primera construcción donde se alojó, con motivo de sus ingresos externos al presupuesto universitario, fue la nave Raúl Sandoval Landázuri, donde desde entonces se alojan parte de nuestros laboratorios de ingeniería estructural e hidráulica.

ICA pagó todos los gastos del Instituto durante el primer año, el 75 % durante el año siguiente, la mitad del total al tercer año y la cuarta parte al cuarto año, con ánimo de transferir los costos de la investigación al que originaban los trabajos de investigación: el sector público. Desde 1960, la casi totalidad de los costos de las investigaciones del Instituto, entonces División de Investigaciones de la Facultad, eran pagados según la naturaleza de los problemas para estudiar por: la Secretaría de Obras Públicas, actualmente SCT; la Comisión Nacional de Irrigación, posteriormente Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; la Comisión Federal de Electricidad; y demás organizaciones gubernamentales solicitantes de tecnología de alta calidad para la infraestructura nacional.

Actualmente, todavía se atienden esas necesidades de ingeniería, y los organismos sucesores de aquellos son aún el principal recurso para las investigaciones. Otra parte muy importante proviene de las instituciones que financian la investigación científica, como la propia UNAM y el CONACYT, las organizaciones internacionales y fundaciones del apoyo a la ciencia. Una pequeña parte de organizaciones y empresas privadas, como ICA, que requieren tecnología del propio Instituto.

En la actualidad, aproximadamente la mitad de los miembros del Instituto provienen de disciplinas distintas de la ingeniería civil, y las cuatro o cinco áreas de prestigio que caracterizaron los albores del Instituto son ahora tres veces más numerosas, e incluyen una rica mezcla de las disciplinas e interdisciplinas de la ingeniería moderna. Los orígenes de los temas de estudio, los recursos para el financiamiento de nuestra operación, la preparación básica de nuestros estudiantes, los temas de tesis que aquí se dirigen y los artículos que se publican, representan una muestra muy variada de lo mejor de la ingeniería nacional, que honra la prestigiada tradición del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Los cuatro grandes grupos de investigación actuales comprenden a la ingeniería estructural, desde la sismología, geotecnia y dinámica de las estructuras hasta la elaboración de normas constructivas urbanas; la ingeniería hidráulica y ambiental, que incluye la dinámica de fluidos, la biorremediación y los procesos

biológicos del ambiente; de la ingeniería electromecánica, que también abarca la automatización, los sistemas e instrumentación; y la ingeniería de computación (hardware y software), con grupos emergentes en manejo de bases de datos, redes, inteligencia artificial y telecomunicaciones.

No obstante su alto grado de especialización, y las aportaciones novedosas que hace de manera creciente al conocimiento universal, el Instituto preserva su importante función de hacer ingeniería de calidad, original, útil y altamente competitiva. La versatilidad de la organización resulta en un alto grado de independencia de sus miembros, de modo que pueden atenderse requerimientos del exterior con gran agilidad y eficiencia. En el futuro, el Instituto prevé preservar su papel de árbitro nacional de la ingeniería y actor principal del desarrollo tecnológico. Al mismo tiempo, apoyará de manera más efectiva a la docencia y la formación de expertos, conjuntamente con la Facultad de Ingeniería, como siempre, y acrecentará su participación en programas universitarios de punta, así como la vinculación con la industria, el desarrollo de nuevas tecnologías y la colaboración con instituciones afines.

1.2.2. Misión

Contribuir al desarrollo del país y al bienestar de la sociedad a través de la investigación en ingeniería, la formación de recursos humanos y la vinculación con la sociedad.

1.2.3. Valores

Desde sus orígenes, el IIUNAM ha sido congruente con los ideales de sus fundadores, lo que ha resultado en el proyecto académico de investigación en ingeniería más importante de nuestro país. Esto se ha logrado en buena medida debido a que se han seguido los siguientes valores institucionales:

- Actitud crítica.
- Superación de normas y estándares vigentes.
- Uso creativo de la tecnología y las herramientas a su alcance.
- Generosidad en sus aportaciones al país.
- Espíritu universitario.
- Lealtad a las tareas de la UNAM.
- Unidad con las dependencias universitarias.
- Libertad de cátedra e investigación.
- Investigación dirigida a los grandes problemas nacionales.
- Compromiso con la ingeniería mexicana.

- Corresponsabilidad en el crecimiento y fortalecimiento del Instituto.
- Liderazgo institucional.
- Honestidad en la búsqueda del conocimiento.
- Calidad y rigor en sus trabajos de investigación.
- Compromiso con la formación de nuevas generaciones.
- Respeto a la diversidad y a la competencia.
- Valoración de los méritos de su personal.
- Compañerismo entre empleados, académicos e investigadores.

1.3. Antecedentes

Se han desarrollado múltiples dispositivos para medición de cargas en ductos, la mayor parte de ellos externos, no integrados al tubo y solo para medición de cargas en las cercanías de los soportes. El dispositivo mencionado en Won and Jeon (2013) mide las cargas que actúan en el soporte de una tubería, no solamente en la abrazadera y en la varilla de suspensión, también mide la carga de un elemento estructural (como una viga) tipo soporte de tubería, esto para evitar que el soporte de la tubería se deforme debido al exceso de carga y pueda colapsar o destruir la tubería. En Ren et al. (2014) se presenta el diseño de un sensor de deformación circunferencial basado en rejillas de Bragg, este sensor se encarga de estimar la reducción o la corrosión en las paredes de las tuberías que transportan hidrocarburos o gases peligrosos, basándose en las medidas de las deformaciones circunferenciales. Aunque solamente lo hace en la sección en la que el aro se encuentra instalado tiene la ventaja de que lo hace circunferencialmente. Al igual que en la referencia anterior, en Hou et al. (2014) se presenta también un sensor del mismo tipo (sensor de deformación circunferencial basado en rejillas de Bragg), pero a diferencia del anterior, éste usa un clasificador basado en máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados para procesar los datos y detectar automáticamente una fuga, en caso de que exista; la técnica usada en el monitoreo de la deformación es la detección de las señales de la onda de presión negativa, la cual es causada por una fuga, ya que puede ofrecer un monitoreo no destructivo con alta sensibilidad y sin interferencias electromagnéticas. En algunos casos se han diseñado dispositivos que ocupan un volumen considerable, y en algunos de ellos se han empleado para realizar pruebas de medición de las fuerzas en tres dimensiones (en dirección vertical, axial y lateral) y los desplazamientos que interactúan con los ductos que se encuentran en el lecho marino (Hill et al., 2008). En la literatura consultada también se habla sobre experimentos a nivel de laboratorio con otras técnicas de medición por fibra óptica como lo es el efecto de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (Ravet et al., 2006; Niklès et al., 2005). Otros dispositivos se han desarrollado como celdas de carga que emplean sensores fibra óptica como los transductores principales, tal es el caso del desarrollado por (Hernández,

2013). Sin embargo, de las referencias disponibles, no se ha encontrado un dispositivo para medición de cargas sobre la tubería que se encuentre integrado a ella y que ocupe poco espacio. Por lo que se desarrolló un parche de monitoreo (una envolvente sensible) integrado a la tubería que permite medir las cargas a las que se encuentra sometida, las cuales incluyen presión, carga axial y momentos flectores. Como se mencionó en Hou et al. (2014), existe un dispositivo parecido al parche de monitoreo que se ha desarrollado en conjunto con el Instituto Politécnico Nacional y ha sido instalado en el ducto piloto del Instituto de Ingeniería que también detecta fugas, sólo que a diferencia del otro, el nuestro tiene un arreglo con sensores embebidos que se adapta a la geometría del ducto, esto hace que nos proporcione más información útil para poder trabajar con ella.

1.4. Objetivo

Caracterizar eventos anormales en ductos utilizando un parche de monitoreo

2. Descripción de la planta piloto

Con objeto de poder validar experimentalmente las investigaciones que se llevan a cabo en el Instituto de Ingeniería sobre diagnóstico de fallas en ductos, se consideró conveniente construir un ducto piloto con características reales y con posibilidad de analizar diferentes escenarios de fugas. En este capítulo se presentan las características y el tipo de instrumentación con los que cuenta el ducto piloto.

El ducto piloto que se encuentra bajo resguardo del Laboratorio de Hidrodinámica del Instituto de Ingeniería de la UNAM consta de los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento con capacidad de $10[m^3]$.
- Bomba hidráulica impulsada por un motor de $7.5 [H.P]$.
- Tubería de hierro galvanizado de $0.1016 [m]$ de diámetro y longitud de $175.68 [m]$ reales en una configuración de serpentín vertical.
- Tomas para simular fugas (6), cinco de ellas con un diámetro de $0.0254 [m]$ y una de $0.01905 [m]$.
- Dos servoválvulas
- Sensores de flujo y presión en los extremos del ducto y un sensor de flujo ubicado en la cuarta válvula de fuga (V-4).
- Seis puntos de medición de presión intermedios.
- Módulo de adquisición de datos Beckhoff BK 9000 con conexión ethernet.

- Inversor Mitsubishi para el control del motor que impulsa a la bomba hidráulica.
- Computadora portátil con software Labview de National Instruments instalado.
- Parche de monitoreo con sensores embebidos (rejillas de Bragg, termopares y galgas extensiométricas).

En la Fig. 1 se muestra el diagrama esquemático del ducto y en la Fig. 2 una imagen de la instalación. Se tiene a la entrada y a la salida del serpentín dos carretes con instrumentos de medición (presión y flujo). Estos dos puntos constituyen el inicio y fin del ducto que se monitorea. También se tienen 6 puntos intermedios donde se pueden emular fugas o tomas clandestinas, las localizaciones se muestran en la Tabla 1. Estos puntos de extracción están constituidos también por carretes y, soldados a ellos, tubos de $0.0254[m]$ de diámetro y válvulas de esfera para regular el flujo de la fuga, dos de estas válvulas son sustituidas por servoválvulas, que pueden ser actuadas desde el SCADA, para sincronizar el tiempo de extracción y magnitud de la misma.

Válvula	Tipo de válvula	Posición [m]
V-1	Servoválvula	15.3
V-2	Servoválvula	47.5
V-3	Válvula de esfera	72
V-4	Válvula de esfera	103.9
V-5	Válvula de esfera	128.3
V-6	Válvula de esfera	160.3

Cuadro 1: Ubicación de las válvulas

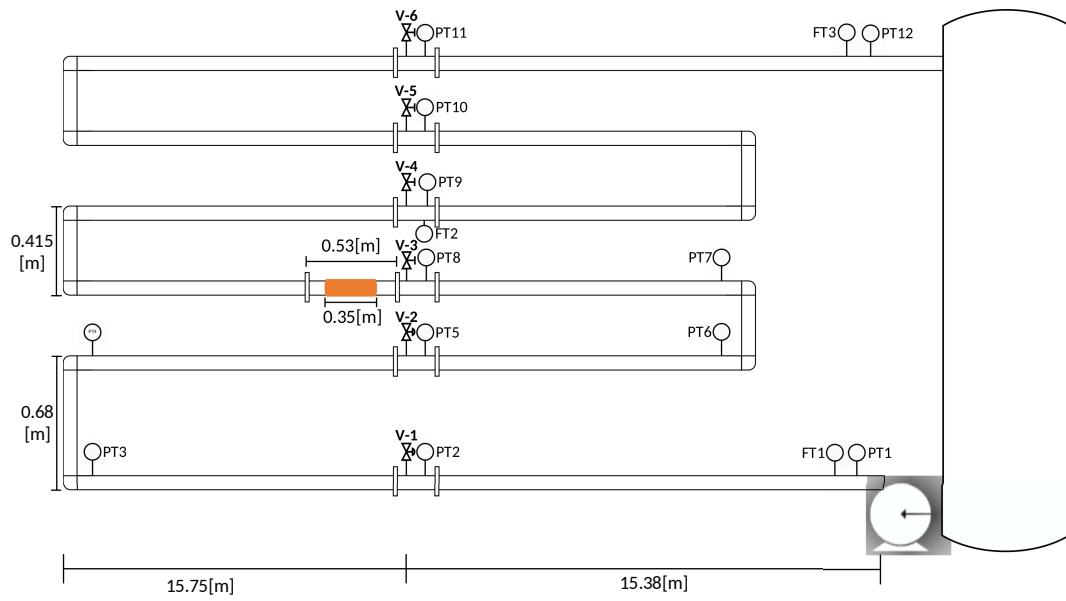


Figura 1: Diagrama del ducto



Figura 2: Diagrama de representación de cargas aplicadas al ducto

2.1. Instrumentación

Dada la importancia que tienen los sensores en el diagnóstico de las fallas, es relevante tener en cuenta la velocidad de respuesta así como la sensibilidad de los instrumentos de medición disponibles, ya que esto permitirá detectar fallas con la mayor rapidez posible. Los sensores de flujo ubicados en los extremos del ducto basan su funcionamiento en el principio de las fuerzas de Coriolis. Se trata de un sensor de flujo Promass 83F de la compañía Endress+Hauser mostrado en la Fig. 3. Sus especificaciones son mostradas en la Tabla 2.



Figura 3: Sensor de flujo por principio de Coriolis

Características	Valores
Principio de medición	Principio de Coriolis
Variable medida	Flujo másico Densidad de flujo Temperatura de fluido
Rango	0-180,000 [Kg/h]
Rango de flujo operable	1,000 : 1
Corriente de salida	4-20[mA], Resolución: 0.5 [μ A]
Frecuencia de salida	2-10,000[Hz] Ancho de pulso máx. 2[s]
Pulso de salida	Configurable (0.05-2,000[ms])
Máx. error medido	Flujo másico \pm 0.05 % de la lectura Densidad \pm 0.01[g/cc] Temperatura \pm 0,5°C \pm 0,005 * T°C
Estabilidad de punto cero	9[Kg/h]
Repetibilidad	Flujo másico \pm 0.025 % de la lectura Densidad \pm 0.00025[g/cc] Temperatura \pm 0,25°C \pm 0,0025 * T°C

Cuadro 2: Especificaciones técnicas del sensor de flujo Promass 83F

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento de los flujos medidos cuando a los 1047[s] la servoválvula (V-2) se abre al 100 % de su capacidad. La línea vertical indica el momento en que se abre la válvula. El tiempo de asentamiento es estimado mediante la diferencia entre el tiempo que le toma al sensor llegar al estado estacionario después de la fuga y el tiempo en el que se abre la válvula obteniendo un tiempo de 4[s]. Por tanto, los eventos anormales pueden ser detectados a partir de este periodo de tiempo

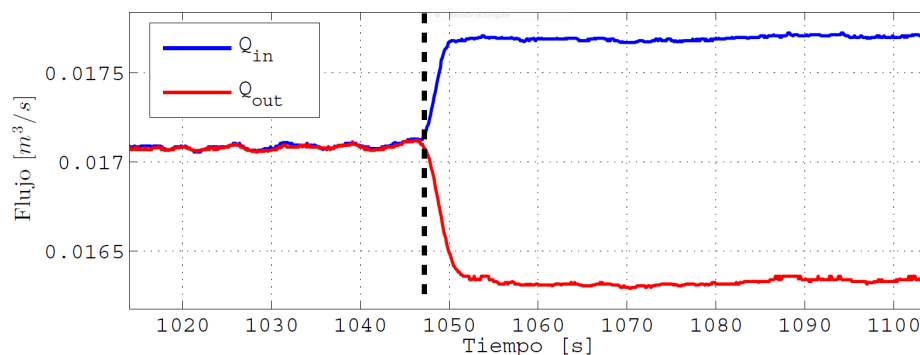


Figura 4: Comportamiento de los flujos medidos ante un cambio súbito en la válvula V-2. (Fig. tomada de Cayetano (2015))

Por otra parte, la medición de flujo en el punto de extracción (V-4) se lleva a cabo mediante el sensor Promag 10D de tipo electromagnético (Fig. 5), y sus especificaciones se muestran en la Tabla 3.



Figura 5: Sensor de flujo Promag 10D

Características	Valores
Principio de medición	Electromagnético
Variable medida	Flujo
Rango	0-600 [m^3/h]
Error de medición	$\pm 0.5\%$

Cuadro 3: Especificaciones técnicas del sensor de flujo Promag 10D

En la Fig. 6 se muestra el comportamiento del flujo cuando la cuarta válvula (V-4) se abre repentinamente a los 1,028[s] de inicial el experimento. La apertura es del 100%. La línea vertical indica el momento en que se abrió la válvula. El tiempo de asentamiento es de 7 segundos.

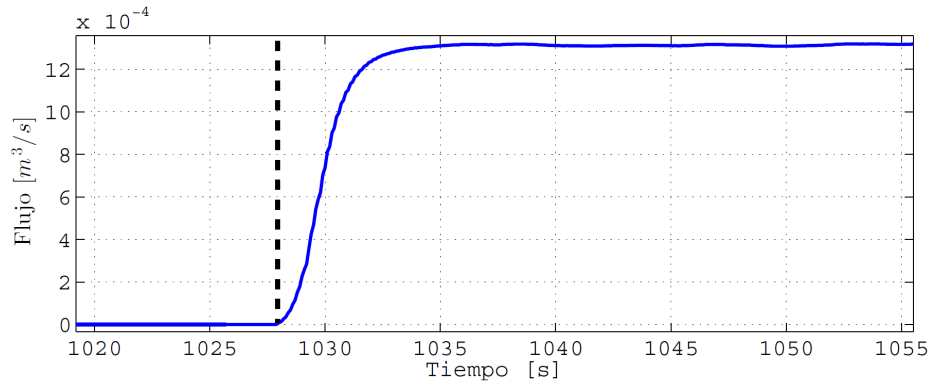


Figura 6: Comportamiento del flujo de extracción en la válvula V-4. (Fig. tomada de Cayetano (2015))

Finalmente, la medición de presión en los extremos se lleva a cabo mediante los sensores de presión Cerabar PMP71 de la compañía Endress+Hauser mostrado en la Fig. 7; las especificaciones de éste sensor se muestran en la Tabla 4.

Características	Valores
Principio de medición	Hidrostático
Variable medida	Presión
Rango	100[mbar] a 700 [bar]
Resistencia de vacío	10[mbar]
Corriente de salida	4-20[mA]
Precisión	0.05 %
Límite de sobrepresión	1,050[bar]

Cuadro 4: Especificaciones técnicas del sensor de presión Cerabar PMP71



Figura 7: Sensor de presión Cerabar PMP71

En la Fig. 8 se muestra el comportamiento de la presión de entrada cuando la cuarta válvula (V-4) es abierta repentinamente a los 1,028[s] de inicial la prueba. La apertura es del 100 %. La línea vertical indica el momento en que se abre la válvula. El tiempo de asentamiento es de aproximadamente 13 segundos.

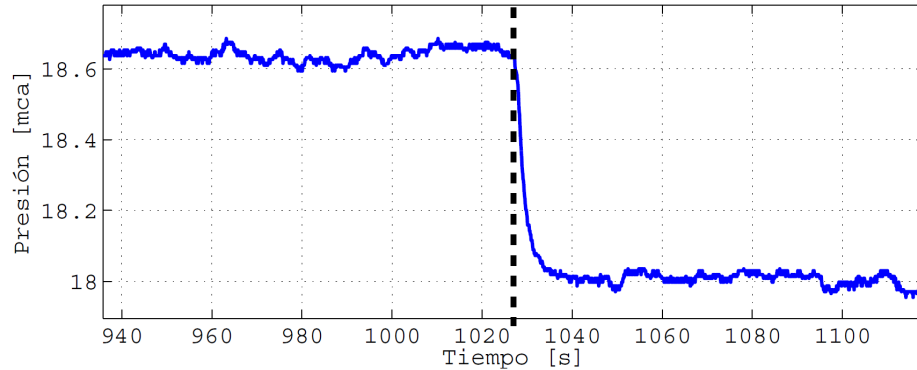


Figura 8: Comportamiento de la presión de entrada con fuga en la válvula V-4. (Fig. tomada de Cayetano (2015))

2.2. Sistema SCADA

El sistema SCADA se encuentra conformado principalmente por el módulo de adquisición de datos Beckhoff BK9000 (Fig. 9) que es un sistema de entrada/salida, el cual, mediante un protocolo *Modbus*, establece comunicación con la PC. Los módulos de adquisición usan un sistema de 4 alambres-terminales (parte central de la Fig. 9), con ello todos los sensores de uso común y actuado-

res con diferentes tipos de señales pueden ser conectados directamente; de esta manera no se requiere de circuitos auxiliares entre los dispositivos de campo y el módulo de adquisición.

El sistema de Terminal de Bus ofrece diferentes opciones de conexión para una adaptación óptima con la aplicación respectiva. Las Terminales de Bus KL3052 incluyen la electrónica y medios de conexión en un sólo módulo permitiendo señales con niveles de $4\text{-}20[mA]$ tanto para módulos de entrada como de salida de datos. Las señales de corriente son transformadas por el módulo BK9000 a palabras binarias de 16 bits signados que son recibidas por la PC y mediante el software de Labview debidamente configurado se realiza el monitoreo de las variables de interés (Fig. 10) que en este caso son flujos y presiones en los extremos del ducto. En Carrera (2010) se detalla la configuración de la comunicación entre la PC y los módulos de adquisición de datos.

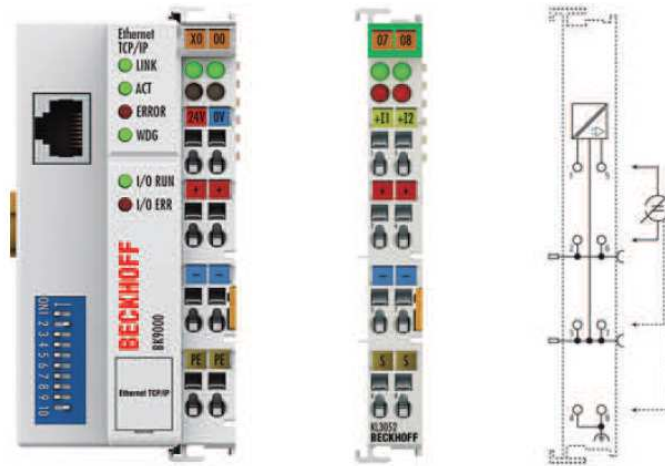


Figura 9: Módulo de adquisición de datos BK9000 y Terminal KL3052



Figura 10: Pantalla del sistema SCADA

2.3. Parche de monitoreo

El parche de monitoreo se instaló en el ducto hidráulico piloto que se encuentra en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, es la envolvente color naranja que se muestra en la Fig. 11 y tiene como propósito medir las deformaciones que producen eventos externos e internos en el ducto para una futura aplicación en el diagnóstico de fallas.



Figura 11: Ducto piloto que se encuentra en el II-UNAM

Este sistema tiene la capacidad de medir deformaciones causadas por eventos en el ducto como aperturas y cierres de válvulas, impactos, cambios de punto de operación, incrementos de presión y también pueden medir las cargas aplicadas como: carga axial (F_x), momentos flectores (M_y y M_z) y presión interna (P).

En la Fig. 12 se muestra el diagrama donde se representa cada carga aplicada al ducto.

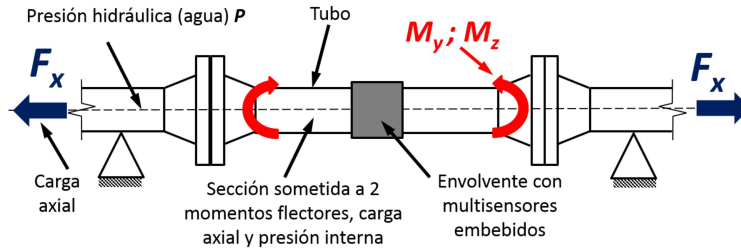


Figura 12: Diagrama de representación de cargas aplicadas al ducto

El parche de monitoreo con rejillas de Bragg, termopares y galgas extensiométricas tiene un arreglo de tres rejillas axiales (R_{x1} , R_{x2} y R_{x3}) y tres rejillas circunferenciales (R_{c1} , R_{c2} y R_{c3}) para las rejillas de Bragg, y un arreglo parecido para las galgas extensiométricas para estudiar los efectos de las fugas en las tuberías

3. Descripción del parche de monitoreo

El concepto que se desarrolló es un parche de monitoreo fabricado en material compuesto, en el cuál se embebieron sensores de fibra óptica del tipo rejilla de Bragg (RDB), debido a su baja perturbación en el material huésped, cabe recordar que el diámetro de una fibra óptica en la cual se tenga inscrita una rejilla de Bragg es del orden de los $250\mu m$, además de que la información útil es una señal luminosa en forma de longitud de onda y no en intensidad, lo que representa una ventaja sobre todo para transmisión de datos en distancias muy grandes. Este parche de monitoreo tiene un arreglo de 6 sensores RDB, 3 colocados equidistantes sobre la circunferencia del tubo en dirección axial, y 3 RDB también colocados de manera equidistante sobre la circunferencia pero alineados en dirección circunferencial. Entre los sensores axiales y los sensores circunferenciales existe la misma distancia. Este arreglo permite sensibilidad a la carga axial F_{xF} , sensibilidad a la presión interna P y sensibilidad a los momentos flectores M_y y M_z . Un esquema del arreglo se presenta en la Fig. 13

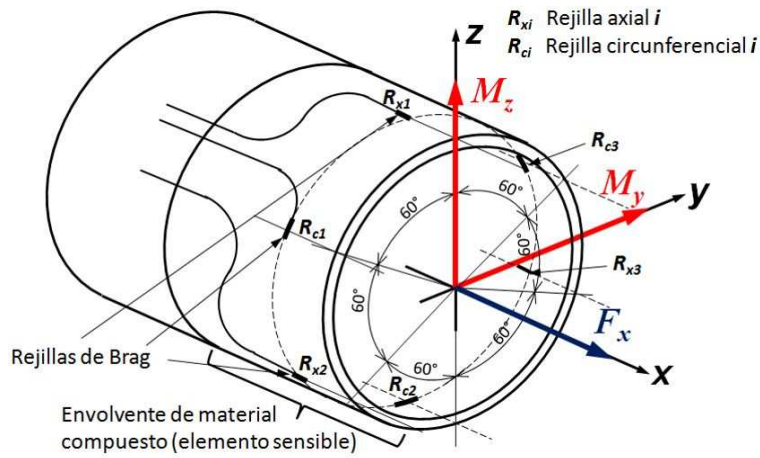


Figura 13: Parche de monitoreo y distribución de los sensores de fibra óptica

El arreglo de los sensores de fibra óptica se presenta esquematizado en la Fig. 14, en donde se puede observar tanto el posicionamiento de los sensores, como el guiado de las fibras ópticas que los contienen. Para ello se consideró que este arreglo se instalara sobre una tela de fibra de vidrio que es el refuerzo del material compuesto que forma la envoltura sensible. La tela de fibra de vidrio con sus sensores se enrolló sobre el tubo al tiempo que se impregnó de resina, y posteriormente sobre este material se colocaron los insumos necesarios para llevar a cabo el modelo en bolsa de vacío. Para ello se realizó un curado a temperatura ambiente, o también se puede realizar el ciclo de polimerización exponiendo la envoltura sensible a radiación infrarroja, durante un tiempo establecido.

Diámetro externo del tubo 114.5mm, p es un tercio de la circunferencia

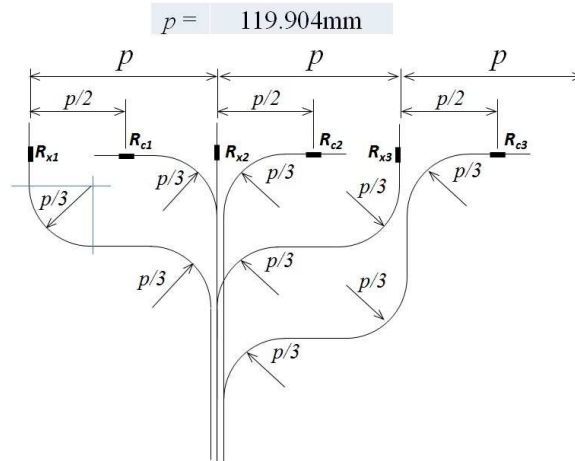


Figura 14: Esquemización del arreglo de fibra óptica y sus correspondientes sensores

Para el caso de las galgas extensiométricas la colocación es semejante, a diferencia que se emplearon rosetas de 3 galgas, y se instalaron tres rosetas equidistantes sobre la circunferencia sobre la misma línea radial que para el caso de las rejillas en dirección axial, esto permite comparar resultados y ajustar los errores de medición. El arreglo de las galgas se presenta en la Fig. 15.

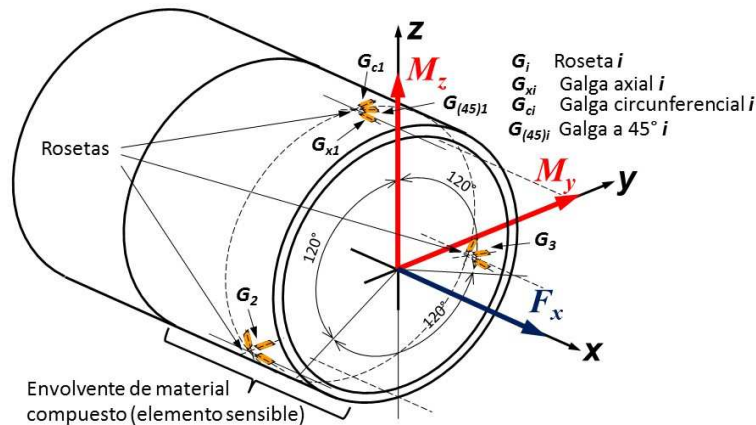


Figura 15: Distribución de galgas extensiométricas

En cualquier punto de coordenadas (x, y, z) , representado por el vector \mathbf{P} el elemento representativo de la pared del tubo que se encuentra sometido a dos esfuerzos, uno axial σ_x y otro circunferencial σ_y , ambos dependientes de la

posición, tal como se esquematiza en la Fig. 16.

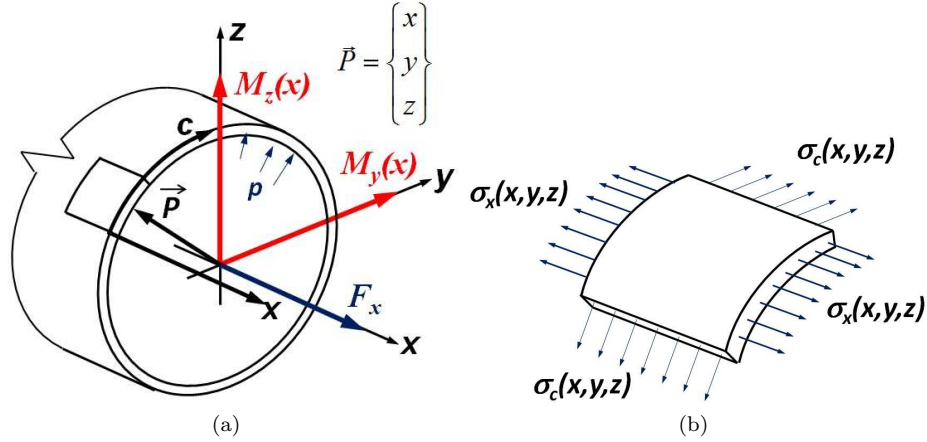


Figura 16: Esfuerzos sobre la pared del tubo. a)Sección transversal y cargas que actúan sobre la pared, b)Elemento representativo de la pared del tubo y esfuerzos a los que se encuentra sometido

El esfuerzo axial se encuentra compuesto, por la superposición de varios efectos el primero de ellos es el esfuerzo σ_{xF} provocado por la carga axial aplicada sobre el tubo F_{xF} , la segunda es el esfuerzo provocado por la presión interna σ_{xP} , y el tercer efecto es producido por los momentos flectores σ_{xM} . Estos efectos están expresados en la Ec. 1

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xF} &= \frac{F_{xF}}{A} = \frac{F_{xF}}{\pi d e} \\
 \sigma_{xP} &= \frac{Pd}{4e} \\
 \sigma_{xM} &= \frac{1}{I} [M_y z - M_z y] \\
 \sigma_{cP} &= \frac{Pd}{2e}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Agrupando estos efectos en ambas direcciones tanto axial como circunferencial se tiene la Ec. 2.

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{F_{xF}}{A} + \frac{Pd}{4e} + \frac{1}{I} M_y z + \frac{1}{I} M_z y \\
 \sigma_c &= \frac{Pd}{4e}
 \end{aligned} \tag{2}$$

La ecuación constitutiva de la pared del tubo considerando la cubierta sensible de material compuesto es la Ec. 3, considerando que la matriz de flexibilidad ya considera tanto el tubo metálico como el parche de monitoreo, además de que está escrita para una secuencia de apilado simétrica.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_c \\ \gamma_{xc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{S}_{11} & \overline{S}_{12} & 0 \\ \overline{S}_{21} & \overline{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_c \\ \tau_{xc} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Se considera que no se espera tener momentos de torsión sobre el tubo, por lo que, sustituyendo la Ec. 1 en la Ec. 2 y éstas a su vez en la ecuación constitutiva que es la Ec. 3, se tiene el siguiente sistema de ecuaciones que se presenta en la Ec. 4.

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\overline{S}_{11}}{\pi de} F_{xF} + \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S}_{11}}{2} + \overline{S}_{12} \right) P + \frac{\overline{S}_{11}z}{I} M_y + \frac{\overline{S}_{11}y}{I} M_z \\ \varepsilon_c &= \frac{\overline{S}_{21}}{\pi de} F_{xF} + \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S}_{21}}{2} + \overline{S}_{22} \right) P + \frac{\overline{S}_{21}z}{I} M_y + \frac{\overline{S}_{21}y}{I} M_z \end{aligned} \quad (4)$$

Como se dispone de la información proporcionada por las tres rejillas axiales y las tres rejillas circunferenciales, además de las rosetas de galgas extensiométricas, este sistema se puede completar, con la información de las tres rejillas axiales (o galgas axiales) y cualquiera de las rejillas circunferenciales (o galgas circunferenciales). Para ello se dispone de la posición de cada una de las rejillas, es decir, se dispone de los vectores de posición de todas las rejillas (o galgas), tal como se presenta en la Ec. 5.

$$\vec{P}_{Rxi} = \begin{Bmatrix} x_{xi} \\ y_{xi} \\ z_{xi} \end{Bmatrix} \quad \vec{P}_{Rci} = \begin{Bmatrix} x_{ci} \\ y_{ci} \\ z_{ci} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Conociendo estas posiciones, el sistema de ecuaciones presentado en la Ec. 5 se transforma en el sistema de ecuaciones mostrado en la Ec. 6.

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{x1} &= \frac{\overline{S_{11}}}{\pi de} F_{xF} + \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{11}}}{2} + \overline{S_{12}} \right) P + \frac{\overline{S_{11}z_{x1}}}{I} M_y + \frac{\overline{S_{11}y_{x1}}}{I} M_z \\
\varepsilon_{x2} &= \frac{\overline{S_{11}}}{\pi de} F_{xF} + \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{11}}}{2} + \overline{S_{12}} \right) P + \frac{\overline{S_{11}z_{x2}}}{I} M_y + \frac{\overline{S_{11}y_{x2}}}{I} M_z \\
\varepsilon_{x3} &= \frac{\overline{S_{11}}}{\pi de} F_{xF} + \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{11}}}{2} + \overline{S_{12}} \right) P + \frac{\overline{S_{11}z_{x3}}}{I} M_y + \frac{\overline{S_{11}y_{x3}}}{I} M_z \\
\varepsilon_{ci} &= \frac{\overline{S_{21}}}{\pi de} F_{xF} + \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{21}}}{2} + \overline{S_{22}} \right) P + \frac{\overline{S_{21}z_{ci}}}{I} M_y + \frac{\overline{S_{21}y_{ci}}}{I} M_z
\end{aligned} \tag{6}$$

El sistema de ecuaciones de la Ec. 6 se puede representar de manera matricial, para facilidad de manejo y cálculo, por lo que se tranforma en la Ec. 6.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x1} \\ \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{x3} \\ \varepsilon_{ci} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\overline{S_{11}}}{\pi de} & \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{11}}}{2} + \overline{S_{12}} \right) & \frac{\overline{S_{11}z_{x1}}}{I} & \frac{\overline{S_{11}y_{x1}}}{I} \\ \frac{\overline{S_{11}}}{\pi de} & \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{11}}}{2} + \overline{S_{12}} \right) & \frac{\overline{S_{11}z_{x2}}}{I} & \frac{\overline{S_{11}y_{x2}}}{I} \\ \frac{\overline{S_{11}}}{\pi de} & \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{11}}}{2} + \overline{S_{12}} \right) & \frac{\overline{S_{11}z_{x3}}}{I} & \frac{\overline{S_{11}y_{x3}}}{I} \\ \frac{\overline{S_{21}}}{\pi de} & \frac{d}{2e} \left(\frac{\overline{S_{21}}}{2} + \overline{S_{22}} \right) & \frac{\overline{S_{21}z_{ci}}}{I} & \frac{\overline{S_{21}y_{ci}}}{I} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{xF} \\ P \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \tag{7}$$

La matriz que se forma es una matriz de flexibilidad que relaciona la respuesta de la deformación medida por las rejillas (o las galgas) con las cargas aplicadas al tubo (carga axial, presión y momentos flectores). Esta matriz de flexibilidad se fe designa $[f]$. Por lo que la nueva representación es la Ec. 8.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{x1} \\ \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{x3} \\ \varepsilon_{ci} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{xF} \\ P \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} \tag{8}$$

Si la matriz $[f]$ se invierte, entonces las cargas aplicadas al tubo quedan en función de las lecturas de deformación proporcionadas por las rejillas. La inversa de la matriz $[f]$ es la matriz de rigidez $[K]$, tal como se presenta en la Ec. 35.

$$\begin{Bmatrix} F_{xF} \\ P \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x1} \\ \varepsilon_{x2} \\ \varepsilon_{x3} \\ \varepsilon_{ci} \end{Bmatrix} \tag{9}$$

Para obtener las propiedades globales del tubo con la envolvente, se aplica una regla de mezclas tal como se presenta en la Ec. 10, en donde m indica que

es relativo al metal, y c que pertenece a la envolvente en material compuesto. Finalmente la matriz $[Q]$ se invierte y da lugar a la matriz $[S]$ global (Ec. 11), cuyos elementos se emplean en la matriz $[f]$.

$$[\overline{Q}] = \frac{e_c}{e_t} [Q]_c + \frac{e_m}{e_t} [Q]_m \quad (10)$$

$$[S] = [\overline{Q}]^{-1} \quad (11)$$

4. Análisis de las señales de deformación

En esta sección se presentan los resultados de una serie de experimentos que se llevaron a cabo para analizar el comportamiento de las señales cuando se abre y se cierra una válvula, lo que emula una toma clandestina. Para todos los experimentos se utilizó la válvula ubicada a 72 [m] del ducto para emular la extracción, la rejilla circunferencial R_{c2} para obtener los datos, y un tiempo de muestreo de 1[ms].

Experimento 4.1: En el primer experimento la bomba se encuentra en un punto de operación a 60[Hz].

- Paso 1: Se registró el comportamiento del ducto sin extracciones durante 10[s].
- Paso 2: Se registró el comportamiento del ducto provocando una extracción, abriendo la válvula ubicada a 72[m].
- Paso 3: Se registró el comportamiento del ducto cuando se cierra la válvula ubicada a 72[m].

Utilizando el programa en Matlab mostrado en la Fig. 17 se procesaron los datos que se registraron en cada paso del Experimento 4.1.

```
DataManipulation.m* x +
1 - y=Deformacion;
2 - %y=detrend(y,'constant');
3 - L=length(y);
4 - t=linspace(1,L/1000,L);
5
6
7 - n=30; % average every n values
8 - a=y; % arbitrary data
9 - Y=arrayfun(@(i) mean(a(i:i+n-1)),1:n:length(a)-n+1)'; % the averaged vector
10 - a=t;
11 - T=arrayfun(@(i) mean(a(i:i+n-1)),1:n:length(a)-n+1)'; % the averaged vector
12
13 - figure()
14 - hold on;
15 - plot(T,Y,'b')
16 - grid on
17 - xlabel(' [s] ');
18
19 - f=3.165;
20 - Lt=169.43;
21 - b=4*Lt*f;
22 - % 1.- Una frecuencia amortiguada de 19.883 rad/s (3.165 Hz), un coeficiente
23 - % de amortiguamiento de 0.08,
24 - % 2.- Una amplitud inicial de 0.0054nm (5.4 pm) y una frecuencia natural
25 - % aproximada de 19.947 rad/s (3.175).
26
```

Figura 17: Código del programa en Matlab para procesar los datos registrados de la longitud de onda

La tarea de este programa es promediar los valores registrados cada 30 muestras. El promedio de las 30 muestras se guarda como una muestra en la localidad de un vector. En resumen, realiza un filtrado de promedio móvil.

La gráfica de los datos procesados registrados en el paso 1 del experimento 4.1 se muestra en la Fig. 18

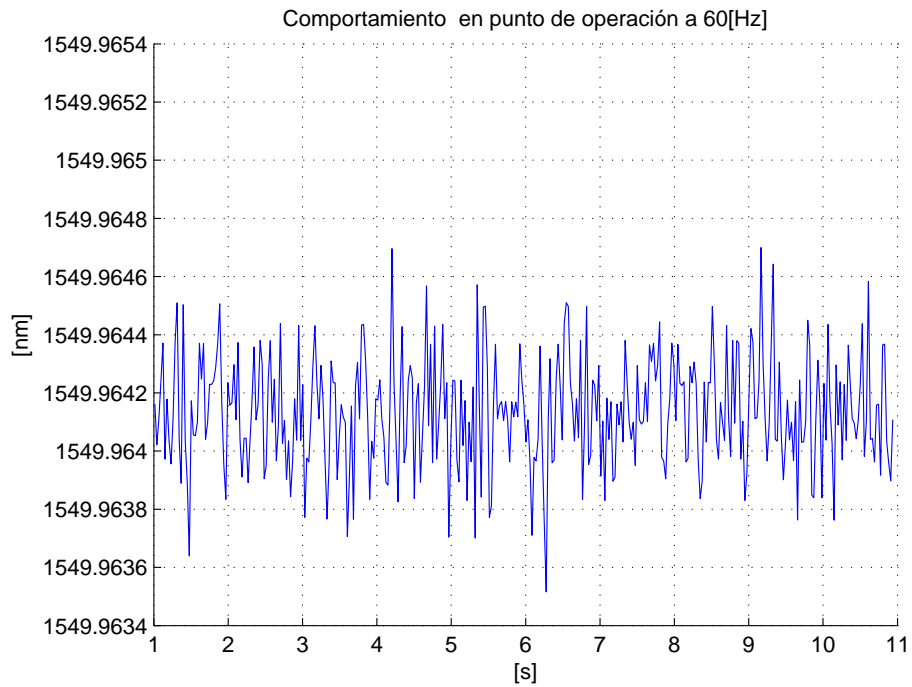


Figura 18: Comportamiento de la señal de deformación sin fugas en el ducto en un punto de operación a 60[Hz]

La gráfica de los datos procesados registrados en el paso 2 del experimento 4.1 se muestra en la Fig. 19.

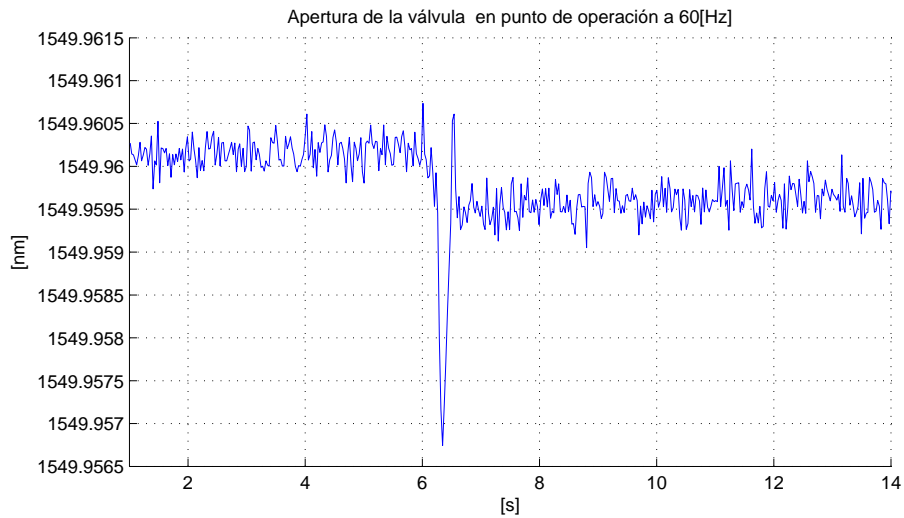


Figura 19: Comportamiento de la señal de deformación provocando una fuga en el ducto en un punto de operación a 60[Hz]

La gráfica de los datos procesados registrados en el paso 3 del experimento 4.1 se muestra en la Fig. 20.

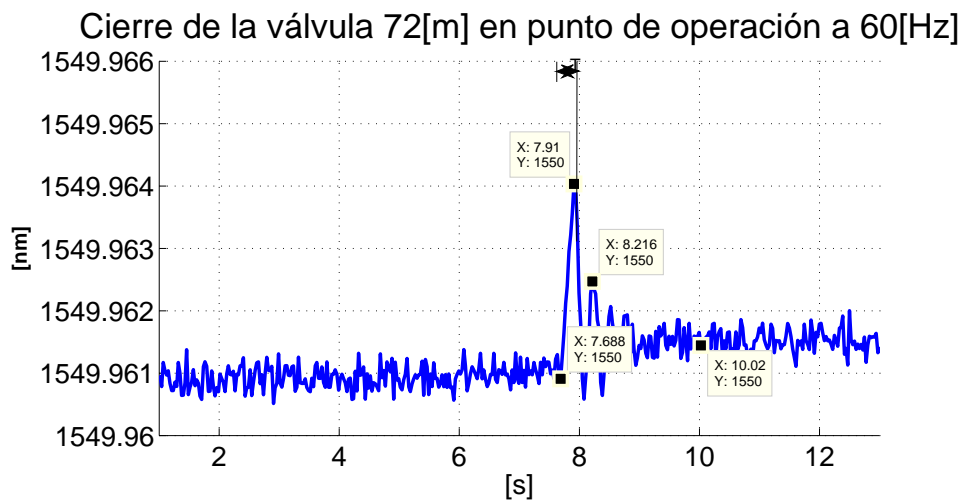


Figura 20: Comportamiento de la señal de deformación al cierre de la válvula en un punto de operación a 60[Hz]

Para el análisis nos resulta más útil la gráfica de la Fig. 20 debido a que podemos obtener más información de ella. Ya que cuando la válvula se cierra hay más fluido, por lo tanto existe menos amortiguamiento y por ende se presentan más transitorios en el comportamiento de la señal, en cambio, cuando la válvula se abre hay menos fluido y por lo tanto más amortiguamiento.

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 20 se puede calcular la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ .

- 1.- Se calcula primero la frecuencia amortiguada (ω_d) con la Ec. 12

$$\omega_d = \frac{2 * \pi}{T} \quad (12)$$

Donde T es el tiempo que transcurre desde que el sistema alcanza el pico máximo de la curva de respuesta hasta que alcanza el segundo pico.

Por lo tanto:

$$\omega_d = \frac{2 * \pi}{(8,216 - 7,91)} = 20,5333[\text{rad/s}]$$

- 2.- Tomando en cuenta el tiempo de establecimiento (t_s) es el tiempo que transcurre desde que empieza la curva de respuesta hasta que alcanza su estado estacionario.

$$t_s = 9,44 - 7,688 = 1,7520[\text{s}]$$

Este tiempo de establecimiento, es el tiempo en que la respuesta se mantiene dentro de un rango de error preestablecido, generalmente para sistemas de primer y segundo orden, la respuesta se mantiene dentro del 2% después de 4 constantes de tiempo:

$$t_s = 4T = \frac{4}{\zeta\omega_n} \quad (13)$$

- 3.- Para facilitar el análisis se realiza un cambio de variable a la Ec. 13.

$$t_s = \frac{4}{\sigma} \quad (14)$$

Donde σ se denomina atenuación.

Despejamos a σ

$$\sigma = \frac{4}{t_s} \quad (15)$$

$$\sigma = \frac{4}{1,7520} = 2,2831$$

4.- Ahora con todos estos datos podemos calcular la frecuencia natural ω_n ya que

$$\omega_n = \sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2} \quad (16)$$

$$\omega_n = \sqrt{(1,7520)^2 + (20,5333)^2} = 20,6598[\text{rad/s}]$$

5.- Entonces de la Ec. 17

$$\zeta \omega_n = \sigma \quad (17)$$

Despejamos a ζ

$$\zeta = \frac{\sigma}{\omega_n} \quad (18)$$

$$\zeta = \frac{2,2831}{20,6598} = 0,1105$$

Experimento 4.2: En este experimento la bomba se encuentra en un punto de operación a $59[\text{Hz}]$.

- Paso 1: Se registró el comportamiento del ducto sin fugas durante $10[\text{s}]$.
- Paso 2: Se registró el comportamiento del ducto provocando una fuga, abriendo la válvula ubicada a $72[\text{m}]$.
- Paso 3: Se registró el comportamiento del ducto cuando se cierra la válvula ubicada a $72[\text{m}]$.

Experimento 4.3: La bomba se encuentra en un punto de operación a $58[\text{Hz}]$.

- Paso 1: Se registró el comportamiento del ducto sin fugas durante $10[\text{s}]$.

- Paso 2: Se registró el comportamiento del ducto provocando una fuga, abriendo la válvula ubicada a $72[m]$.
- Paso 3: Se registró el comportamiento del ducto cuando se cierra la válvula ubicada a $72[m]$.

Experimento 4.4: En el último experimento la bomba se encuentra en un punto de operación a $57[Hz]$.

- Paso 1: Se registró el comportamiento del ducto sin fugas durante $10[s]$.
- Paso 2: Se registró el comportamiento del ducto provocando una fuga, abriendo la válvula ubicada a $72[m]$.
- Paso 3: Se registró el comportamiento del ducto cuando se cierra la válvula ubicada a $72[m]$.

Para los pasos 3 de los Experimentos 4.2, 4.3 y 4.4 se realizó el mismo procedimiento realizado en el paso 3 del Experimento 4.1. En la Tabla. 5 se muestran los resultados obtenidos en cada experimento.

Punto de Operación[Hz]	$\omega_d[rad/s]$	$\omega_n[rad/s]$	ζ	$f[Hz]$	$T[s]$
60	20.5333	20.6598	0.1105	3.2680	0.3060
59	20.8743	21.0121	0.1143	3.0211	0.3310
58	21.0845	21.1897	0.0995	3.3557	0.2980
57	23.2711	23.3552	0.0848	3.7037	0.2700

Cuadro 5: Tabla de resultados de los experimentos realizados para el análisis de la deformación

5. Análisis de las mediciones de presión

Se realizaron 3 experimentos para medir la presión y analizar las señales obtenidas de dichas mediciones. En cada experimento se midió la presión intermedia, la presión aguas arriba y la presión aguas abajo.

Experimento 5.1:

- Paso 1: En este paso se midió la presión de extracción provocando una serie de fugas en la válvula 4 que está ubicada a los $103.9[m]$ del ducto. En la Fig. 21 se puede observar el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 5 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente $10[s]$

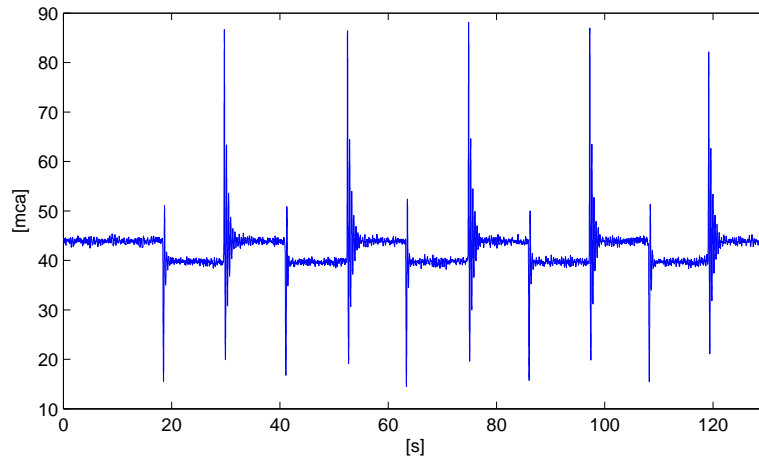


Figura 21: Comportamiento de la señal de la presión de extracción del paso 1 del experimento 5.1

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 21 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

- Paso 2: En este experimento se midió la presión aguas arriba, es decir, la presión que existe en la bomba.
En la Fig. 22 se observa el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 5 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s]

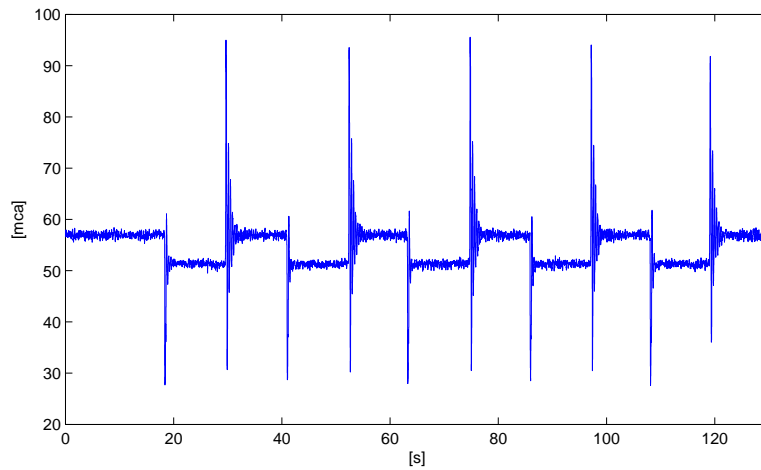


Figura 22: Comportamiento de la señal de la presión aguas arriba del paso 2 del experimento 5.1

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 22 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

- Paso 3: En este experimento se midió la presión aguas abajo, es decir, la presión que existe en la salida. En la Fig. 23 se observa el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 5 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s]

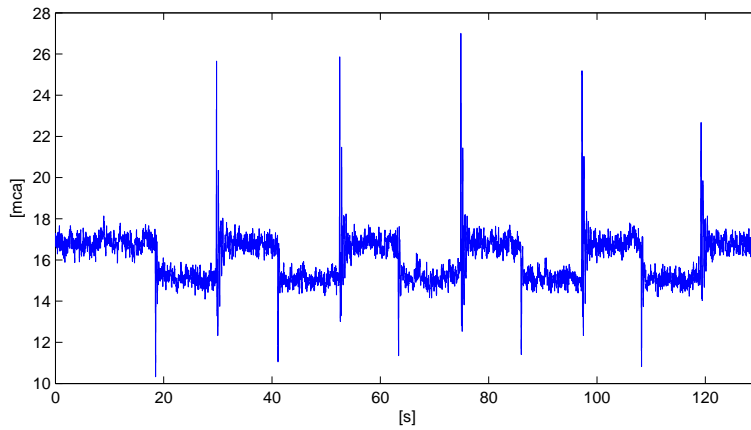


Figura 23: Comportamiento de la señal de la presión aguas abajo del paso 3 del experimento 5.1

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 23 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

En la Tabla. 6 se muestran los resultados obtenidos en cada paso del Experimento 5.1.

Experimento 5.1					
	$\omega_d[rad/s]$	$\omega_n[rad/s]$	ζ	$f[Hz]$	$T[s]$
Paso 1					
1er cierre	14.9599	15.0680	0.1195	2.3809	0.4200
2do cierre	14.9599	15.0730	0.1222	2.3809	0.4200
3er cierre	16.5346	16.6197	0.1011	2.6315	0.3800
4to cierre	15.7079	15.8334	0.1256	2.5000	0.4000
5to cierre	15.7080	15.7831	0.0975	2.5000	0.4000
Paso 2					
1er cierre	14.9600	15.0433	0.1051	2.3810	0.4200
2do cierre	14.9600	15.0401	0.1031	2.3810	0.4200
3er cierre	16.5347	16.6145	0.0979	2.6316	0.3800
4to cierre	16.9816	17.0681	0.1006	2.7027	0.3700
5to cierre	15.7080	15.7831	0.0975	2.5000	0.4000
Paso 3					
1er cierre	16.5347	16.6259	0.1046	2.6316	0.3800
2do cierre	19.6350	19.7896	0.1248	3.1250	0.3200
3er cierre	19.6350	19.7631	0.1137	3.1250	0.3200
4to cierre	17.4533	17.5675	0.1138	2.7778	0.3600
5to cierre	15.7080	15.8644	0.1401	2.5000	0.4000

Cuadro 6: Tabla de resultados del análisis de presión del experimento 5.1

Experimento 5.2:

- Paso 1: En este experimento se midió la presión de extracción provocando una serie de fugas en la válvula 4 que está ubicada a los 103.9[m] del ducto.

En la Fig. 24 se puede observar el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 6 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s] entre apertura y cierre.

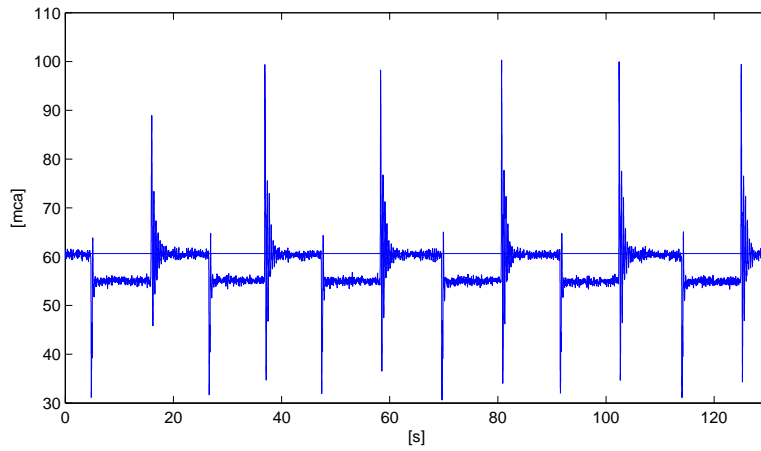


Figura 24: Comportamiento de la señal de la presión de extracción del paso 1 del experimento 5.2

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 24 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

- Paso 2: En este experimento se midió la presión aguas arriba, es decir, la presión que existe en la bomba.
En la Fig. 25 se observa el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 6 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s]

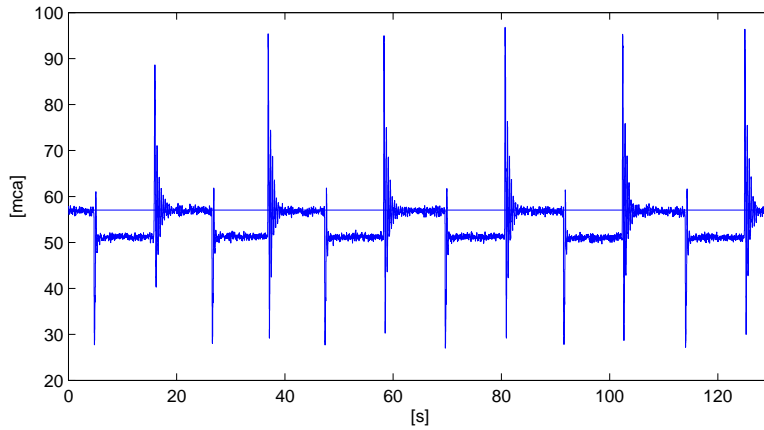


Figura 25: Comportamiento de la señal de la presión aguas arriba del paso 2 del experimento 5.2

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 25 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

- Paso 3: En este experimento se midió la presión aguas abajo, es decir, la presión que existe en la salida. En la Fig. 26 se observa el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 6 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s]

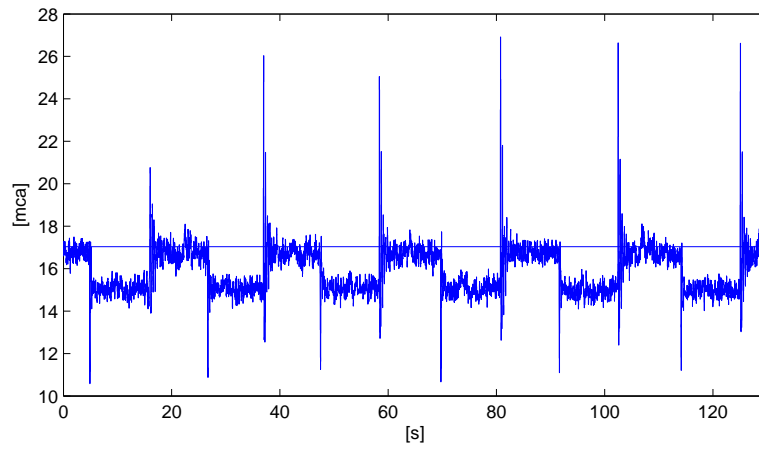


Figura 26: Comportamiento de la señal de la presión aguas abajo del paso 3 del experimento 5.2

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 26 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

En la Tabla. 7 se muestran los resultados obtenidos en cada paso del Experimento 5.2.

Experimento 5.2					
	$\omega_d[\text{rad/s}]$	$\omega_n[\text{rad/s}]$	ζ	$f[\text{Hz}]$	$T[\text{s}]$
Paso 1					
1er cierre	15.7080	15.7570	0.0788	2.5000	0.4000
2do cierre	14.2800	14.3738	0.1141	2.2727	0.4400
3er cierre	13.9626	14.0192	0.0897	2.2222	0.4500
4to cierre	13.6591	13.7482	0.1137	2.1739	0.4600
5to cierre	12.5664	12.6678	0.1263	2.0000	0.5000
6to cierre	15.7080	15.7831	0.0975	2.5000	0.4000
Paso 2					
1er cierre	16.1107	16.1960	0.1025	2.5641	0.3900
2do cierre	13.6591	13.7876	0.1362	2.1739	0.4600
3er cierre	14.6121	14.7068	0.1133	2.3256	0.4300
4to cierre	14.2800	14.3837	0.1199	2.2727	0.4400
5to cierre	12.5664	12.6861	0.1371	2.0000	0.5000
6to cierre	12.5664	12.6764	0.1315	2.0000	0.5000
Paso 3					
1er cierre	14.9600	15.2638	0.1985	2.3810	0.4200
2do cierre	18.4800	18.6819	0.1467	2.9412	0.3400
3er cierre	16.9816	17.1158	0.1250	2.7027	0.3700
4to cierre	16.5347	16.7203	0.1486	2.6316	0.3800
5to cierre	15.7080	15.8644	0.1401	2.5000	0.4000
6to cierre	20.9440	21.1130	0.1263	3.3333	0.3000

Cuadro 7: Tabla de resultados del análisis de presión del experimento 5.2

Experimento 5.3:

- Paso 1: En este experimento se midió la presión de extracción provocando una serie de fugas en la válvula 4 que está ubicada a los 103.9[m] del ducto.

En la Fig. 27 se puede observar el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 6 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s] entre apertura y cierre.

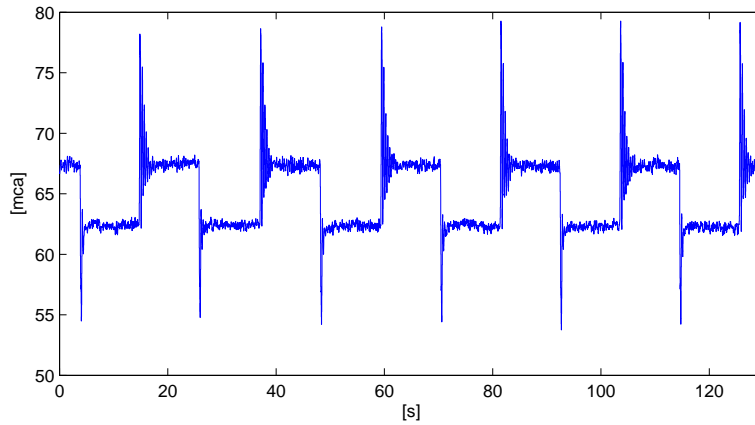


Figura 27: Comportamiento de la señal de la presión de extracción del paso 1 del experimento 5.3

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 27 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

- Paso 2: En este experimento se midió la presión aguas arriba, es decir, la presión que existe en la bomba.
 En la Fig. 28 se observa el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 6 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s]

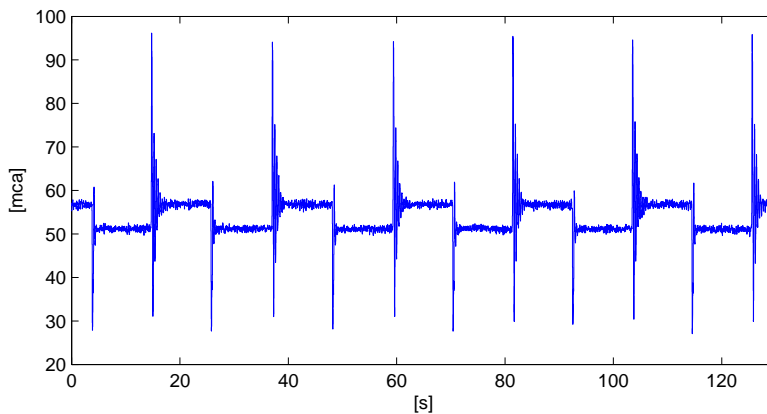


Figura 28: Comportamiento de la señal de la presión aguas arriba del paso 2 del experimento 5.3

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 28 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

- Paso 3: En este experimento se midió la presión aguas abajo, es decir, la presión que existe en la salida.
En la Fig. 29 se observa el comportamiento de la presión al abrir y cerrar la válvula 6 veces consecutivas con un intervalo de aproximadamente 10[s]

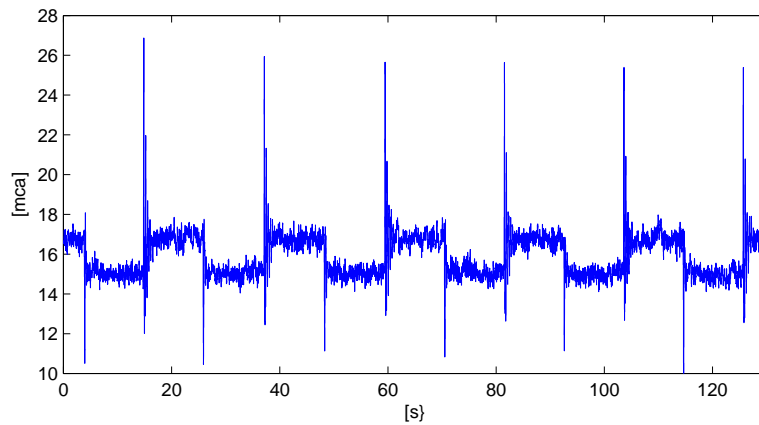


Figura 29: Comportamiento de la señal de la presión aguas abajo del paso 3 del experimento 5.3

A partir de la gráfica de respuesta transitoria que se muestra en la Fig. 29 se puede calcular la frecuencia amortiguada ω_d , la frecuencia natural ω_n y el factor de amortiguamiento ζ . Este cálculo se realizará para cada vez que fue cerrada la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

En la Tabla. 8 se muestran los resultados obtenidos en cada experimento.

Experimento 5.3					
	$\omega_d[\text{rad/s}]$	$\omega_n[\text{rad/s}]$	ζ	$f[\text{Hz}]$	$T[\text{s}]$
Paso 1					
1er cierre	13.9626	14.0895	0.1339	2.2222	0.4500
2do cierre	13.6591	13.7647	0.1237	2.1739	0.4600
3er cierre	13.6591	13.7864	0.1356	2.1739	0.4600
4to cierre	14.2800	14.4053	0.1316	2.2727	0.4400
5to cierre	12.5664	12.6764	0.1315	2.0000	0.5000
6to cierre	12.5664	12.7245	0.1572	2.0000	0.5000
Paso 2					
1er cierre	13.6591	13.7913	0.1381	2.1739	0.4600
2do cierre	14.2800	14.3745	0.1145	2.2727	0.4400
3er cierre	15.7080	15.7710	0.0893	2.5000	0.4000
4to cierre	14.6121	14.7060	0.1129	2.3256	0.4300
5to cierre	12.5664	12.6418	0.1091	2.0000	0.5000
6to cierre	15.7080	15.7961	0.1055	2.5000	0.4000
Paso 3					
1er cierre	16.9816	17.1602	0.1439	2.7027	0.3700
2do cierre	18.4800	18.6033	0.1150	2.9412	0.3400
3er cierre	17.4533	17.5108	0.0810	2.7778	0.3600
4to cierre	16.5347	16.6993	0.1401	2.6316	0.3800
5to cierre	15.7080	15.8484	0.1328	2.5000	0.4000
6to cierre	20.9440	21.0495	0.1000	3.3333	0.3000

Cuadro 8: Tabla de resultados del análisis de presión del experimento 5.3

6. Análisis de las señales de deformación y presión

Se realizó un experimento donde se midió la presión y la deformación simultáneamente.

Experimento 6.1

En este experimento se midió al mismo tiempo la presión del agua y la deformación del ducto al provocar una fuga abriendo la válvula manual ubicada a los 72[m] y volviéndola a cerrar. Se empezó tomando la lectura del interrogador de fibras ópticas (para obtener las mediciones de las deformaciones) y el PLC (para obtener las mediciones de presión) al mismo tiempo, a los 15[s] se provocó una fuga abriendo la válvula ubicada a los 72[m], en el segundo número 30 se cerró la válvula y a los 45[s] se terminó el experimento.

Experimento 6.1.1 Análisis de la deformación

En la Fig. 30 se observa la gráfica obtenida de las mediciones de deformación

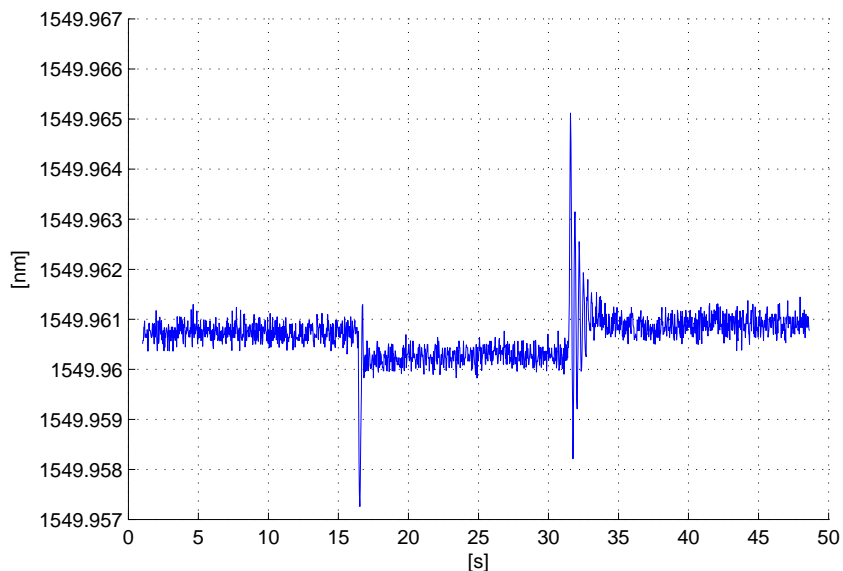


Figura 30: Comportamiento de la señal de deformación del experimento 6.1.1

A partir de la gráfica de la Fig. 30 se calculará la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento de la respuesta transitoria que se presentó al cierre de la válvula utilizando el procedimiento del paso 3 del experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 18.

Calcularemos también la velocidad de onda b para dos casos.

- Caso 1: Si el cabezal de presión aguas arriba y aguas abajo del ducto (H_{in}, H_{out}) son considerados como condiciones de frontera, entonces $H_1 = H_{in}$, $H_{n_s+1} = H_{out}$. La frecuencia natural del ducto bajo esta configuración está dada en Chaudry (1979) y expresada como:

$$\omega_n = \frac{\pi b}{L} \quad (19)$$

Donde L : Longitud del ducto.

De la Ec. 19 despejamos la velocidad de onda b

$$b = \frac{\omega_n L}{\pi} \quad (20)$$

Resolviendo la Ec. 20 tenemos que la velocidad de onda es:

$$b = \frac{(19,1015)(169,43)}{\pi} = 1,030,1676$$

- Caso 2: Si el cabezal de presión aguas arriba y el flujo aguas abajo del ducto (H_{in}, Q_{out}) son las condiciones de frontera, entonces $H_1 = H_{in}$ y $Q_{n_s+1} = Q_{out}$. La frecuencia natural del ducto para el límite de esta configuración está dada para este caso en Zecchin (2010) y se expresa como:

$$\omega_n = \frac{\pi b}{2L} \quad (21)$$

De la Ec. 21 despejamos la velocidad de onda b

$$b = \frac{\omega_n 2L}{\pi} \quad (22)$$

Resolviendo la Ec. 22 tenemos que la velocidad de onda es:

$$b = \frac{(21,1379)(2)(169,43)}{\pi} = 2,279,9864$$

Experimento 6.1.2 Análisis de la presión de entrada

En la Fig. 31 se observa la gráfica obtenida de las mediciones de la presión de entrada

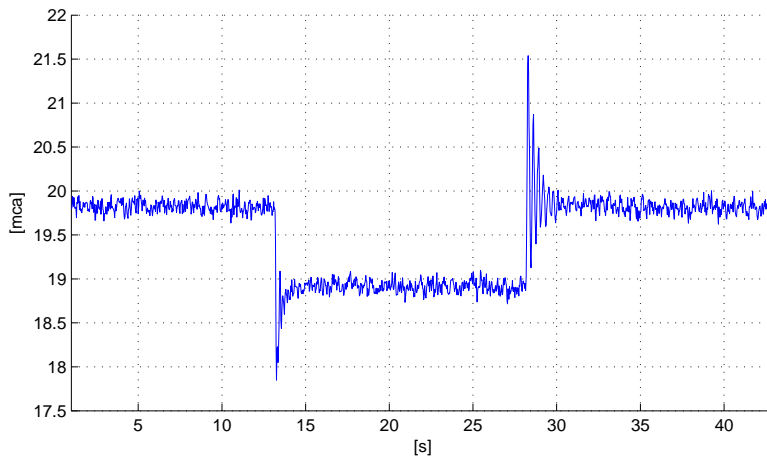


Figura 31: Comportamiento de la señal de la presión de entrada del experimento 6.1.2

A partir de la gráfica de la Fig. 31 se calculará la frecuencia natural, el factor de amortiguamiento de la respuesta transitoria que se presentó al cierre de la válvula y la velocidad de onda para dos casos utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 22.

Experimento 6.1.3 Análisis de la presión de intermedia

En la Fig. 32 se observa la gráfica obtenida de las mediciones de la presión intermedia, donde el sensor de presión se conectó a los 72[m] del ducto.

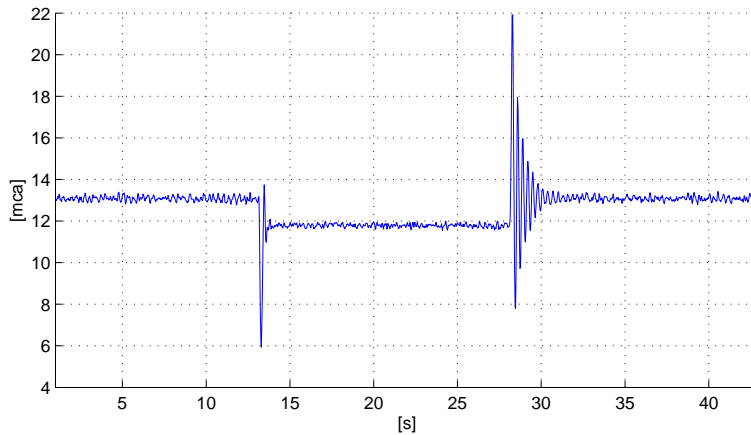


Figura 32: Comportamiento de la señal de la presión intermedia del experimento 6.1.2

A partir de la gráfica de la Fig. 32 se calculará la frecuencia natural, el factor de amortiguamiento de la respuesta transitoria que se presentó al cierre de la válvula y la velocidad de onda para dos casos utilizando el procedimiento del paso 3 del experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 22.

Experimento 6.1.4 Análisis de la presión de salida

En la Fig. ?? se observa la gráfica obtenida de las mediciones de la presión de salida

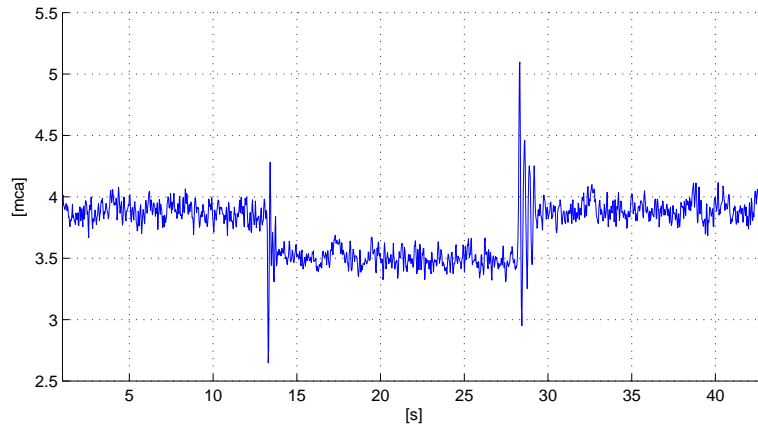


Figura 33: Comportamiento de la señal de la presión de salida del experimento 6.1.4

A partir de la gráfica de la Fig. 33 se calculará la frecuencia natural, el factor de amortiguamiento de la respuesta transitoria que se presentó al cierre de la válvula y la velocidad de onda para dos casos utilizando el procedimiento del paso 3 del Experimento 4.1, para ello haremos uso de la Ec. 12 a la Ec. 22.

En la Tabla. 9 se muestran los resultados obtenidos en cada experimento que forma parte del experimento 6.1.

Experimento 6.1							
	ω_d [rad/s]	ω_n [rad/s]	ζ	f [Hz]	T [s]	$b(H_{in}, H_{out})$	$b(H_{in}, Q_{out})$
Deformación							
Cierre	19.040	19.1015	0.0802	3.0303	0.33	1,030.1676	2,060.3353
Presión							
Cierre en la P_{in}	19.040	19.1315	0.0977	3.0303	0.33	1,031.7855	2063.5711
Cierre en la P_{int}	20.944	21.0173	0.0835	3.3333	0.30	1,133.4891	2,266.9782
Cierre en la P_{out}	20.944	21.1379	0.1352	3.3333	0.30	1,139.9932	2,279.9864

Cuadro 9: Tabla de resultados del análisis de deformación y presión del experimento 6.1

6.1. Correlación entre la señal de presión intermedia y la señal de deformación

Primeramente se normalizaron las señales con el fin de obtener vectores de datos del mismo tamaño y así posteriormente facilitar la correlación entre ambas señales. Para ello se calculó el factor de ganancia de amplificación (K) que

existe entre la señal de presión intermedia y la señal de deformación, también se calculó el offset de ambas señales. Luego se multiplicó el factor de ganancia por el vector de datos de la señal de deformación y al resultado de esta multiplicación se le sumó el offset. En la Fig. 34 se muestra el diagrama del proceso de normalización.

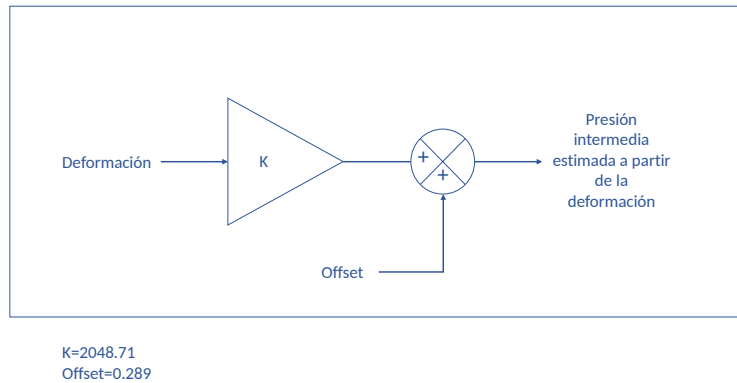


Figura 34: Proceso de normalización de las señales

Y en la Fig. 35 se muestran las señales normalizadas. Estas son las señales que utilizaremos para hacer la gráfica de correlación entre la señal de deformación y la señal de presión intermedia.

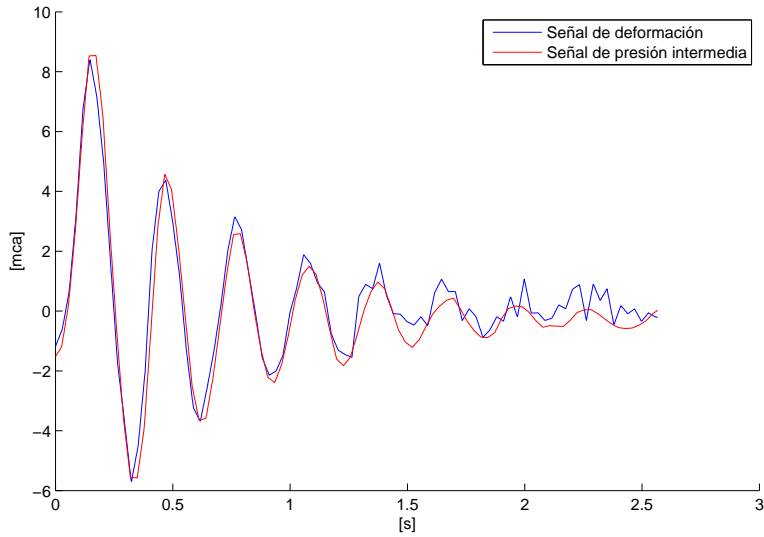


Figura 35: Señales normalizadas

6.2. Desfasamiento de las señales de presión

A partir del desfase de las señales de presión se puede estimar la posición de la fuga, en el Experimento 6.1 se midió la presión y la deformación simultáneamente, de las señales obtenidas en este experimento utilizaremos solamente las señales de presión. En la Fig. 36 se muestran graficadas las señales de la presión de entrada, la presión intermedia y la presión de salida.

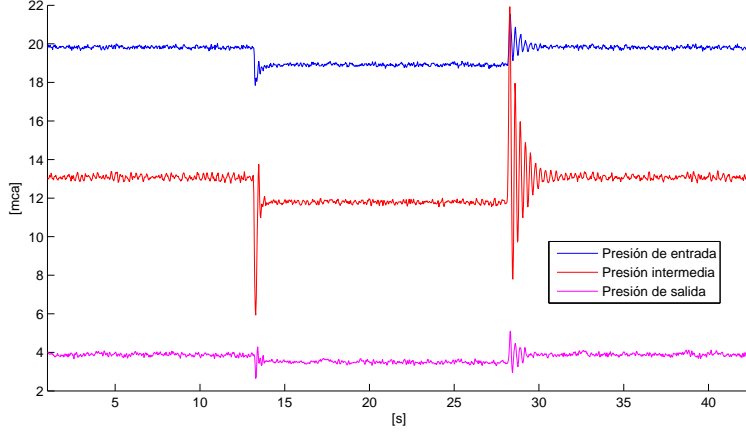


Figura 36: Señales de presión del experimento 6.1

7. Validación del modelo matemático del parche de monitoreo

Como se mencionó en el Capítulo 3.2, el parche de monitoreo permite calcular las cargas aplicadas al tubo (la carga axial, la presión y los momentos flectores) al relacionarlas con las respuestas de deformación medidas por las rejillas de Bragg, es por ello que dedicaremos esta sección a la validación del modelo matemático propuesto anteriormente.

Haciendo uso de la Ec. 1 a la Ec. 7, la Ec. 10 y la Ec. 11 se realizó la caracterización de la matriz de flexibilidad que se necesita para resolver la Ec. 8 y la matriz de rigidez que se necesita para resolver la Ec. 35. Esta caracterización se hizo 6 veces para cada matriz ya que existen 6 combinaciones de rejillas diferentes para el cálculo de las cargas (ya sea que se usen 3 rejillas axiales y una circunferencial o 3 rejillas circunferenciales y una axial), aunque cabe mencionar que la matriz que nos será útil para éste cálculo es la matriz de rigidez. A continuación se muestran las combinaciones de las rejillas y sus respectivas matrices de flexibilidad y rigidez:

Combinación 1 Para esta combinación se necesita la información registrada por las tres rejillas axiales (R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}) y la rejilla circunferencial 1 (R_{c1}).

Matriz [f_1]

$$\begin{bmatrix} 3,02108e-09 & 1,14716e-05 & -5,75484e-11 & 9,96768e-11 \\ 3,02108e-09 & 1,14716e-05 & 1,15097e-10 & 7,05054e-27 \\ 3,02108e-09 & 1,14716e-05 & -5,75484e-11 & -9,96768e-11 \\ -9,03901e-10 & 4,85823e-05 & -1,72184e-11 & -2,98231e-11 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Matriz $[K_1]$

$$\begin{bmatrix} 95774381,43 & 95774381,43 & 117616441,7 & -73002044,65 \\ 3834,79959 & 3834,79959 & -1917,399795 & 19225,39863 \\ -2896110550 & 5792221101 & -2896110550 & 0 \\ 5016210618 & -5,63291E - 07 & -5016210618 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Combinación 2 Para esta combinación se necesita la información registrada por las tres rejillas axiales (R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}) y la rejilla circular 2 (R_{c2}).

Matriz $[f_2]$

$$\begin{bmatrix} 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & -5,75484e - 11 & 9,96768e - 11 \\ 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & 1,15097e - 10 & 7,05054e - 27 \\ 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & -5,75484e - 11 & -9,96768e - 11 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & -1,72184e - 11 & 2,98231e - 11 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Matriz $[K_2]$

$$\begin{bmatrix} 117616441,7 & 95774381,43 & 95774381,43 & -73002044,65 \\ -1917,399795 & 3834,79959 & 3834,79959 & 19225,39863 \\ -2896110550 & 5792221101 & -2896110550 & 0 \\ 5016210618 & -5,63291E - 07 & -5016210618 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Combinación 3 Para esta combinación se necesita la información registrada por las tres rejillas axiales (R_{x1}, R_{x2}, R_{x3}) y la rejilla circular 2 (R_{c3}).

Matriz $[f_3]$

$$\begin{bmatrix} 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & -5,75484e - 11 & 9,96768e - 11 \\ 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & 1,15097e - 10 & 7,05054e - 27 \\ 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & -5,75484e - 11 & -9,96768e - 11 \\ -9,0390e - 10 & 4,85823e - 05 & 3,44368e - 11 & 6,32852e - 27 \end{bmatrix} \quad (27)$$

Matriz $[K_3]$

$$\begin{bmatrix} 95774381,43 & 117616441,7 & 95774381,43 & -73002044,65 \\ 3834,79959 & -1917,399795 & 3834,79959 & 19225,39863 \\ -2896110550 & 5792221101 & -2896110550 & 0 \\ 5016210618 & -5,63291E - 07 & -5016210618 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Combinación 4 Para esta combinación se necesita la información registrada por las tres rejillas circunferenciales (R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}) y la rejilla axial 1 (R_{x1}).

Matriz [f_4]

$$\begin{bmatrix} 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & -5,75484e - 11 & 9,96768e - 11 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & -1,72184e - 11 & -2,98231e - 11 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & -1,72184e - 11 & 2,98231e - 11 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & 3,44368e - 11 & 6,32852e - 27 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Matriz [K_4]

$$\begin{bmatrix} 309165204,6 & 320103761,8 & -713209568,3 & 320103761,8 \\ 5752,199385 & 12816,93242 & -6408,466211 & 12816,93242 \\ 0 & -9679580991 & -9679580991 & 19359161981 \\ 0 & -16765526072 & 16765526072 & 0 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Combinación 5 Para esta combinación se necesita la información registrada por las tres rejillas circunferenciales (R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}) y la rejilla axial 2 (R_{x2}).

Matriz [f_5]

$$\begin{bmatrix} 3,02108e - 09 & 1,14716e - 05 & 1,15097e - 10 & 7,05054e - 27 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & -1,72184e - 11 & -2,98231e - 11 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & -1,72184e - 11 & 2,98231e - 11 \\ -9,03901e - 10 & 4,85823e - 05 & 3,44368e - 11 & 6,32852e - 27 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Matriz [K_5]

$$\begin{bmatrix} 309165204,6 & 320103761,8 & 320103761,8 & -713209568,3 \\ 5752,199385 & 12816,93242 & 12816,93242 & -6408,466211 \\ 0 & -9679580991 & -9679580991 & 19359161981 \\ 0 & -16765526072 & 16765526072 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Combinación 6 Para esta combinación se necesita la información registrada por las tres rejillas circunferenciales (R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}) y la rejilla axial 3 (R_{x3}).

Matriz [f_6]

$$\begin{bmatrix} 3,02108e-09 & 1,14716e-05 & -5,75484e-11 & -9,96768e-11 \\ -9,03901e-10 & 4,85823e-05 & -1,72184e-11 & -2,98231e-11 \\ -9,03901e-10 & 4,85823e-05 & -1,72184e-11 & 2,98231e-11 \\ -9,03901e-10 & 4,85823e-05 & 3,44368e-11 & 6,32852e-27 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Matriz [K_6]

$$\begin{bmatrix} 309165204,6 & -713209568,3 & 320103761,8 & 320103761,8 \\ 5752,199385 & -6408,466211 & 12816,93242 & 12816,93242 \\ 0 & -9679580991 & -9679580991 & 19359161981 \\ 0 & -16765526072 & 16765526072 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Se realizó un último experimento utilizando las rejillas de la combinación 5 y resolviendo la Ec. 35 se hizo la multiplicación de la matriz de rigidez [K_5] por los datos registrados con las tres rejillas circunferenciales (R_{c1}, R_{c2}, R_{c3}) y la rejilla axial 2 (R_{x2}).

$$\begin{Bmatrix} F_{xF} \\ P \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{c1} \\ \varepsilon_{c2} \\ \varepsilon_{c3} \\ \varepsilon_{x2} \end{Bmatrix} \quad (35)$$

En nuestro caso la información que queremos analizar es la presión, por eso despreciaremos las otras cargas calculadas y mostraremos únicamente la gráfica de la presión.

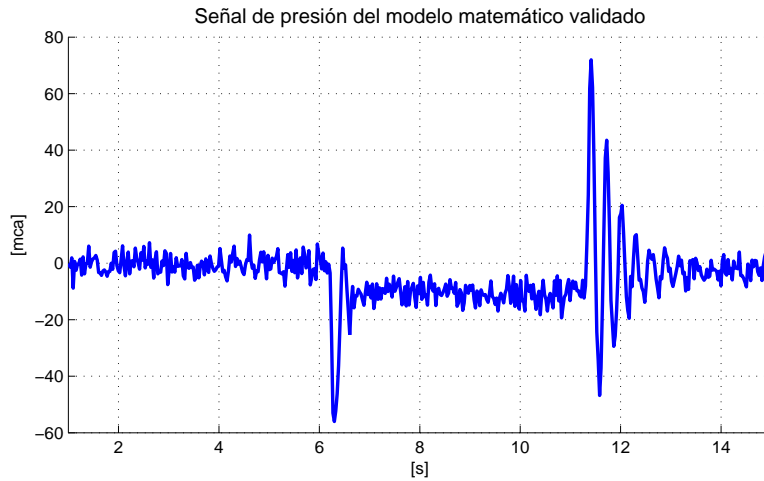


Figura 37: Señal de la presión obtenida a partir de la validación del modelo matemático

8. Conclusiones

Cuando se trabaja en el estudio de cualquier fenómeno físico o un sistema cualquiera, se necesita un modelo matemático que pueda representar a dicho sistema. Para poder caracterizar los eventos anormales en un ducto, se necesita el modelo matemático de una tubería y también los parámetros para dicho modelo. En el presente trabajo se calculó la velocidad de onda (b) y la frecuencia natural (ω_n), que son parámetros indispensables para el modelo matemático de una tubería, dicho cálculo se obtuvo a partir de pruebas experimentales que se realizaron con el parche de monitoreo. Además de calcular los parámetros mencionados anteriormente se hizo la correlación entre las señales de deformación y las señales de presión obtenidas en un experimento realizado simultáneamente con el parche de monitoreo y los sensores de presión comerciales que se encuentran instalados en el ducto hidráulico piloto para calcular la presión y validar una parte del modelo matemático del parche de monitoreo. Como trabajo a futuro se pretende calcular la carga axial y los momentos flectores para validar la segunda parte del modelo matemático del parche de monitoreo como sensor de presión, ya que la medición de la presión juega un papel de suma importancia en la estimación de fallas o eventos anormales en los ductos.

Referencias

Carrera, R. (2010). Prototipo para detección de fugas en tuberías: manual de uso. Technical report, Instituto de Ingeniería-UNAM.

- Cayetano, R. (2015). Identificación de parámetros de fricción en ductos con tomas laterales. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cerecedo-Núñez, H. and Iturbe-Castillo, M. (1998). Rejillas de bragg en núcleo de fibra óptica de vidrio. *Revista Mexicana de Física*, 44(2):198–204.
- Hernández, H.; Sauce, V. G. J. G. M. O. Y. . J. H. (2013). Dispositivo para medición de cargas y deformaciones en materiales compuestos.
- Hill, A. J., Jacob, H., et al. (2008). In-situ measurement of pipe-soil interaction in deep water. In *Offshore Technology Conference*. Offshore Technology Conference.
- Hou, Q., Jiao, W., Ren, L., Cao, H., and Song, G. (2014). Experimental study of leakage detection of natural gas pipeline using fbg based strain sensor and least square support vector machine. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32:144–151.
- Niklès, M., Briffod, F., Burke, R., and Lyons, G. (2005). Greatly extended distance pipeline monitoring using fibre optics. In *ASME 2005 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, pages 539–546. American Society of Mechanical Engineers.
- Ravet, F., Zou, L., Bao, X., Chen, L., Huang, R. F., and Khoo, H. A. (2006). Detection of buckling in steel pipeline and column by the distributed brillouin sensor. *Optical Fiber Technology*, 12(4):305–311.
- Ren, L., Jia, Z.-g., Li, H.-n., and Song, G. (2014). Design and experimental study on fbg hoop-strain sensor in pipeline monitoring. *Optical fiber technology*, 20(1):15–23.
- Won, Y. H. and Jeon, C. B. (2013). Load measurement apparatus acting on pipe support. US Patent 8,495,920.