

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

Ahorro de energía en sistemas de distribución de agua mediante la
detección de fugas

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA

PRESENTA:

JULIO CESAR HERRERA DIAZ

DIRECTORA: DIEGO SEURET JIMENEZ

CUERNAVACA, MORELOS

JUNIO DEL AÑO 2024

Resumen

En la presente tesis se abordará temas de mucha importancia, vitales para la vida en este planeta. Estaré hablando del preciado líquido el agua, recurso escaso y agotable. Mencionaré varios aspectos como: la necesidad de cuidarla, los lugares más desabastecidos de la misma y las principales causas por las cual escasea. Asimismo, de lo que nos dispone el futuro en caso de seguir malgastándola como lo hacemos actualmente.

Se enumerarán las causas primarias por la cual el agua se pierde antes de llegar al consumidor, las denominadas Fugas. Tendrá un espacio para clasificarla dependiendo el caudal que se desperdicia y las formas, equipamientos para detectarlas; y poder minimizar este daño ambiente.

Como es objetivo de esta tesis lo antes mencionado, a lo largo de los capítulos 2 y 3 se mencionará los experimentos, técnicas y herramienta matemática FFT utilizada para la detección de fugas de aguas, los softwares empleados para su realización. Además, que en el capítulo 4 se podrán identificar las conclusiones generadas a través de experiencias bibliográficas y experimentales. Demostrando que el método utilizado para la detección de fugas de agua fue el correcto, aun variando parámetros y condiciones tales como: material de la tubería, frecuencia de muestreo, número de muestras, diámetros de las fugas, tipos de flujos, condiciones externas y posicionamiento de los sensores.

Se esclarece que el método y los experimentos fue efectivo en todos los casos, aunque sin duda el experimento 1 (que se explicará en el capítulo 3) fue el de mejores resultados y de más fácil comprensión.

Abstract

In this thesis, I will address topics of great importance that are vital for life on this planet. We are talking about the precious liquid, water, which is essential for life on Earth. I will discuss various aspects such as the need to conserve it, the places most deprived of it, and the main causes of its scarcity. Additionally, I will explore what the future holds if we continue to waste it as we currently do.

I will enumerate the primary causes for water loss before reaching the consumer, commonly known as leaks. There will be a section to classify leaks depending on the volume wasted and the methods and equipment used to detect them, aiming to minimize environmental damage.

As the objective of this thesis is the aforementioned, throughout chapters 2 and 3, I will discuss the experiments, techniques, and mathematical tool FFT used for leak detection, along with the software employed for their implementation. Furthermore, in chapter 4, conclusions derived from both my bibliographic and experimental experiences will be identified. This will demonstrate that the method used for leak detection was appropriate, even when varying parameters and conditions such as pipe material, sampling frequency, sample number, leak diameters, flow types, external conditions, and sensor positioning.

I can assert that the method and experiments were successful in all cases. However, experiment 1 (explained in chapter 3) undoubtedly yielded the best results and was the most easily comprehensible.

Agradecimientos

A mis padres:

Ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico a ustedes este logro, amados padres, como una meta más conquistada. Gracias por ser quienes son y por creer en mí.

A mi tutor:

Dr. Diego Seuret. Sin usted y sus virtudes, su paciencia y constancia este trabajo no lo hubiese logrado. Sus consejos fueron siempre útiles. Usted formó parte importante de esta historia con sus aportes profesionales que lo caracterizan. Muchas gracias por sus múltiples palabras de aliento, cuando más las necesité; por estar allí cuando mis horas de trabajo se hacían confusas. Gracias por sus orientaciones.

A los docentes:

Sus palabras fueron sabias, sus conocimientos rigurosos y precisos. Gracias por su paciencia, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y tolerancia. Además, a Conacyt por su apoyo económico

A mis compañeros:

Mis amigos y compañeros de viaje hoy culminan esta maravillosa aventura y no puedo dejar de recordar cuantas horas de trabajo nos juntamos a lo largo de nuestra formación. Hoy no puedo dejar de agradecerles por su apoyo y constancia, por compartir horas de estudio a mi lado. Y más específicamente a Laura Carballo Sigler que me ayudó en la revisión de esta tesis y búsquedas bibliográfica con su excelente dominio del inglés. Gracias a todos.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS



Dedicatoria

Este trabajo de investigación va dedicado a mi familia, a mis asesores y a todas las personas que contribuyeron con mi formación docente.



Tabla de contenido

Contenido

Resumen	2
Abstract	3
Agradecimientos	4
Dedicatoria	5
Tabla de contenido.....	6
Lista de tabla.....	8
Lista de figuras	9
Glosario	13
1 Antecedentes.....	16
1.1 Pregunta de investigación	25
1.2 Objetivo.....	26
1.2.1 Objetivos específicos	26
1.3 Hipótesis.....	26
1.4 Justificación	27
2 Capítulo 2: Marco teórico	28
2.1 Método	28
2.2 ¿Qué es Vibración?	29
2.3 Chasis CompactDAQ.....	30
2.4 Módulo de Entrada de Sonido y Vibración de la Serie C (NI-9234)	32
2.5 Sensores acelerómetros modelo 603C01 marca IMI.....	33
2.5.1 Características del sensor 603C01 marca IMI.....	39
2.6 Martillo de Caída Libre (MCL)	40
2.7 Características físicas del MCL.....	40
2.8 Software propio.....	41
2.8.1 ¿Qué es LabView?	42
3.1- La transformada rápida de Fourier (FFT).....	44
3.2- Características y condiciones de los experimentos.....	46
3.3- Explicación detallada de los experimentos en tubería metálica	48



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



3.4-	Tabla explicativa de los experimentos	49
3.5-	Explicación detallada de los experimentos en tubería plástica	51
3.6-	Tabla explicativa de los experimentos	51
3.7-	Señales procesadas en MatLab	52
3.8-	¿Qué es MatLab?	52
3.9-	¿Qué es ANSYS?	54
4.1-	Experimentos	60
4.1.1-	Experimento 1	60
4.1.1.1-	¿Qué es suavizar una señal?.....	62
4.1.2-	Experimento 2	62
4.1.3-	Experimento 3	64
4.1.4-	Experimento 4	66
4.1.5-	Experimento 5	68
4.1.6-	Experimento 6	70
4.2-	Interpretación final.....	71
4.3-	Descomposición Empírica en Modos	72
4.4-	Funciones de Modo Intrínseco.	74
4.5-	Cálculos de las IMFs.....	75
4.4-	Figuras correspondientes a los experimentos con tuberías plásticas.....	78
4.5-	Conclusiones.....	83
	Bibliografía.....	85
	ANEXOS	89
	Anexo 1- Figuras correspondientes con el sensor 1	89
	ANEXO 2 EMD.....	99
	ANEXO 3	109
	ANEXO 3A	110
	ANEXO 3B	111
	ANEXO 3C	112
	ANEXO 3D	113



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Lista de tabla

- Tabla 3.4.1: 1er grupo de experimentos para tubería metálica.
- Tabla 3.4.2: 2do grupo de experimentos para tubería metálica.
- Tabla 3.4.3: 3er grupo de experimentos para tubería metálica.
- Tabla 3.4.4: 4to grupo de experimentos para tubería metálica.
- Tabla 3.4.5: 5to grupo de experimentos para tubería metálica.
- Tabla 3.4.6: 6to grupo de experimentos para tubería metálica.
- Tabla 3.6.1: 1er grupo de experimentos para tubería plástica.
- Tabla 3.6.2: 2do grupo de experimentos para tubería plástica.
- Tabla 3.6.3: 3er grupo de experimentos para tubería plástica.



Lista de figuras

- Figura 2.1 Equipamiento para la adquisición de datos por vibraciones.
- Figura 2.2: Esquema de un chasis CompactDAQ.
- Figura 2.3: Chasis NI cDAQ 9172.
- Figura 2.4: Módulo de Entrada de Sonido y Vibración de la Serie C (NI 9234).
- Figura 2.5: Principio de operación de un acelerómetro piezoeléctrico.
- Figura 2.6: Despiece de acelerómetro.
- Figura 2.7: Acelerómetro IMI.
- Figura 2.8: Martillo de caída libre.
- Figura 2.9: Software para la adquisición de señales.
- Figura 3.1: Representación visual de la FFT.
- Figura 3.2: Tubería metálica utilizada para el experimento.
- Figura 3.3: Tubería metálica utilizada para el experimento desde otra vista
- Figura 3.4: Tubería metálica modelada en ANSYS sin fuga de agua.
- Figura 3.5: Tubería metálica modelada en ANSYS con fuga de agua de diámetro 1 mm.
- Figura 3.6: Tubería metálica modelada en ANSYS con fuga de agua de diámetro 4 mm.
- Figura 3.7: Tubería metálica modelada en ANSYS con fuga de agua de diámetro 8 mm.
- Figura 4.1: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.2: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.3: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.4: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.



- Figura 4.5: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.3, pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.6: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.3, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.7: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.8: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.9: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.5 pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.10: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.5, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.11: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.6 pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.12: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.6, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.13: Muestra el diseño de la tubería con sus sensores.
- Figura 4.14: Muestra una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos.
- Gráfica 4.15: Muestra una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos, aplicándole la FFT.
-
- Figura 4.16: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.1, pero solo para el sensor 0.
-
- Figura 4.17: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.1, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.18: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.2, pero solo para el sensor 0.



- Figura 4.19: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.2, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura 4.20: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.3, pero solo para el sensor 0.
- Figura 4.21: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.3, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.
- Figura A1: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 1.
- Figura A2: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
- Figura A3: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 1.
- Figura A4: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
- Figura A5: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.3, pero solo para el sensor 1.
- Figura A6: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.3, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
- Figura A7: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 1.
- Figura A8: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
- Figura A9: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.5, pero solo para el sensor 1.
- Figura A10: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.5, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
- Figura A11: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.6, pero solo para el sensor 1.



- Figura A12: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.6, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
- Figura A13: Muestra la FFT de una señal sin fuga, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.
- Figura A14: Muestra la FFT de una señal con fuga de 1 mm de diámetro, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.
- Figura A15: Muestra la FFT de una señal con fuga de 4 mm de diámetro, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.
- Figura A16: Muestra la FFT de una señal con fuga de 8 mm de diámetro, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.
- Figura A17: Muestra las 8 descomposiciones de una señal sin fuga de agua en el dominio del tiempo.
- Figura A18: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 1 mm en el dominio del tiempo.
- Figura A19: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 4 mm en el dominio del tiempo.
- Figura A20: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 8 mm en el dominio del tiempo.

Glosario

SDA - Sistemas de Distribución de Agua

CONAGUA - Comisión Nacional del Agua

SMS - Servicios de mensajería corta

GSM - Sistema global para las comunicaciones móviles

Γ - Factor de fuga

DEPC - Densidad Espectral de Potencia Cruzada

NI - National Instruments Fm-Frecuencia de Muestreo

Hz- Hercio mm-milímetro m-metro

%-porcentaje

DAQ-Adquisición de datos PC-Computadora

dB-decibeles g-gravedad V-velocidad s-segundo

FFT-Transformada Rápida de Fourier

Corriente eléctrica perdida: La electricidad puede provocar oxidación en ciertas condiciones. La oxidación es un proceso químico en el cual un material pierde electrones. Cuando los electrones se transfieren de un material a otro, se produce una reacción electroquímica. En el caso de la electricidad, si hay presencia de agua o humedad en un ambiente donde hay corriente eléctrica, puede ocurrir un proceso de corrosión

La Serie "C" de CompactDAQ de National Instruments representa una gama de productos modulares de adquisición de datos compactos que incluyen chasis y módulos diseñados para aplicaciones diversas en el campo de la medición y control.



Frecuencia: La frecuencia, medida en hertzios (Hz), se refiere al número de ciclos (o repeticiones) de una onda que ocurren en un segundo. En otras palabras, indica cuántas veces una forma de onda completa un ciclo en un período de tiempo específico. Las unidades de frecuencia son hercios, que equivalen a un ciclo por segundo.

La frecuencia está relacionada con el tono de un sonido en el ámbito del sonido audible y con la velocidad de una señal en el ámbito de las ondas electromagnéticas, como las ondas de radio.

Frecuencia de Muestreo: La frecuencia de muestreo, medida también en hertzios (Hz), es la cantidad de veces por segundo que una señal analógica se mide o se "muestra" para convertirla en una señal digital. En otras palabras, es la velocidad a la que se toman muestras de una señal analógica continua para representarla en forma digital. La teoría de Nyquist-Shannon establece que para evitar el aliasing (distorsión en la señal digitalizada), la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima presente en la señal analógica. Esto se conoce como el teorema de Nyquist.

Frecuencia Natural: La frecuencia natural, también conocida como frecuencia propia o frecuencia resonante, se refiere a la frecuencia a la cual un sistema físico o mecánico oscila de forma natural cuando se le perturba y luego se le deja en libertad para vibrar sin ninguna fuerza externa aplicada.

Cada sistema físico tiene una frecuencia natural específica en la cual puede oscilar sin la influencia de fuerzas externas. Por ejemplo, un péndulo tiene una frecuencia natural de oscilación determinada por su longitud y la gravedad. En el contexto de la teoría de control, la frecuencia natural también se utiliza para describir la respuesta natural de un sistema dinámico lineal.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



En resumen, la frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda por segundo, mientras que la frecuencia de muestreo se refiere al número de veces por segundo que se toman muestras de una señal analógica para convertirla en una forma digital. La frecuencia de muestreo es esencial para garantizar una representación precisa y sin distorsiones de una señal analógica en el dominio digital.

1 Antecedentes Capítulo 1

En México, como en el mundo se vive la misma problemática de escasez de agua. Gran parte de este problema es debido al derroche de esta. Uno de los principales factores de desperdicio de agua ocurre en el transporte de la misma, por medio de tuberías y posteriormente en la infraestructura interna de los hogares y empresas. [1][2]

Con el crecimiento de la población mundial y el aumento en el consumo de agua por persona, la demanda de agua potable se está elevando enormemente. Esto ha originado serios problemas en cuanto al abastecimiento de agua, lo que se ha convertido en una gran preocupación en la actualidad. Ello constituye un dilema que cada día ocupa más la atención de científicos, técnicos, políticos, y en general de muchos de los habitantes del planeta, debido a que los suministros de agua potable son limitados y se encuentran bajo amenaza de contaminación. [1]

La escasez de este vital líquido obliga a repetir consecutivamente llamadas a la moderación de consumo por parte de la población a nivel mundial, debido que sin su colaboración los esfuerzos técnicos que llevan a cabo algunas organizaciones resultarían insuficientes. Solo muy poca agua es utilizada para el consumo humano, puesto que: el 97% es agua de mar, y solo el 3% restante es agua dulce encontrándose en ríos, lagos y mantos subterráneos. Además, el agua tal como se encuentra en la naturaleza, requiere ser tratada para el consumo humano, para eliminar las partículas y organismos que pueden ser dañinos para la salud, y finalmente debe ser distribuida a través de la red de agua hasta los hogares para que pueda ser utilizada sin riesgo alguno. [3][4]

Es preciso mencionar que además de su escasez y el derroche del líquido antes mencionado, muchos sistemas de abastecimiento de agua alrededor del mundo cuentan con un largo periodo de explotación y han sido objetos de un alto grado de corrosión y deterioro. Otros factores relacionados, es la calidad de la instalación inicial de los componentes del sistema de distribución.[5]

Las condiciones del agua constituyen un factor que puede acelerar el deterioro de las instalaciones, tales como: la temperatura, agresividad (calidad del agua), y presión excesiva.[6] Este deterioro puede ser causado además por condiciones externas, entre ellas se encuentra la corriente eléctrica perdida, el contacto con otras estructuras, tensión por vibraciones del tráfico, cargas heladas, y tierra congelada alrededor de las tuberías. [7]

Por lo anteriormente planteado es que se producen fugas en los sistemas de distribución de agua (SDA), provocando cuantiosas pérdidas. Se denomina fuga al flujo de agua que se pierde de la red de distribución de manera no controlada. A lo largo de este trabajo se hará alusión a fugas grandes como fugas que ocurren en redes principales de distribución. Análogamente mencionará el término de fugas pequeñas a las fugas que ocurren en ramales adyacentes o no principales de una red de distribución.

Estudios realizados por el Banco Mundial demostraron que anualmente más de 32 mil millones de metros cúbicos de agua se pierden debido a fugas en las redes de distribución en todo el mundo. En los Estados Unidos se reportan pérdidas del 20 % del agua bombeada producto a la ocurrencia de fugas. Países europeos como Portugal e Italia incurren en pérdidas de hasta un 36 % y en el Reino Unido de 20 % a 23 % del volumen de agua introducido en los sistemas de distribución. [8]

En las principales ciudades de México, Monterrey, Guadalajara y Ciudad de México, más del 40% del suministro de agua potable se pierde por fugas en la red de distribución. Estas ciudades son abastecidas por los acueductos de Linares y El Cuchillo, el acueducto de Chapala-Guadalajara, y el sistema Cutzamala respectivamente.[9]

De no ejercer una acción por parte de la población y las instituciones gubernamentales, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) prevé que el crecimiento de la población y de la actividad económica ocasionarán que, en sólo dos décadas, la disponibilidad del agua en México alcance niveles graves de escasez. [10]

En la actualidad a cada ciudadano mexicano le “corresponden” 4,416 metros cúbicos de agua potable al año para su consumo individual, derivado de la red de distribución. Se prevé que para el año 2030, esta cantidad disminuirá a 3,841 metros cúbicos por habitante.[11] Estados como Coahuila y Durango estarán muy por debajo de la media nacional, con una disponibilidad de 1,838 metros cúbicos por habitante. En algunas regiones, la disponibilidad bajará más, situándose en mil metros cúbicos por habitante, cifra considerada como condición grave de escasez [1].

Siendo más específico, CONAGUA plantea que, en el caso de Cuernavaca, Morelos, se registran diariamente entre 30 y 50 fugas en diversos puntos de la ciudad. Además, las colonias con mayores fugas de agua son: Centro, Carolina, Chipitlan y que alrededor del 47 % del agua potable que se genera en Cuernavaca se desperdicia en fugas. [1] [12]

Existen varios métodos para detectar fugas en un sistema de distribución. Estos métodos usualmente involucran el uso de equipo sónico de detección de fugas, el cual identifica el sonido del agua escapando de la tubería. Estos equipos pueden incluir dispositivos indicadores de precisión, los cuales mantienen contacto con las válvulas y tomas de agua, y audífonos de suelo que escuchan directamente del suelo. [13]

En adición, dispositivos correlativos pueden escuchar en dos puntos simultáneamente para indicar con precisión la localización de la fuga.

Dependiendo la zona donde se presente la fuga (visibles o subterráneas) estas se pueden clasificar o identificar por el sonido, el volumen, la humedad y la presión. Las principales categorías en que se clasifican son:[4]

- **Fugas invisibles o silenciosas**

Esta clase de fugas se puede presentar entre los muros o suelos y pueden pasar desapercibidas, en algunas ocasiones son difíciles de detectar con un equipo acústico por lo que es necesario utilizar equipo especializado, o revisar toda la tubería hasta que se encuentre la zona de filtración o zona con problema.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Si se presenta un aumento significativo en la factura de agua, y humedad en alguna parte del hogar o establecimiento, es posible que sea debido a una fuga desapercibida o silenciosa.

- **Fugas de alto volumen o ruidosas:**

Este tipo de fugas puede traer muchas complicaciones si no se reparan con brevedad y eficacia. De no ser reparadas a tiempo, se podrían tener acumulación de agua o inundaciones severas que afectan el mobiliario u objetos que estén en la zona del problema.

Se pueden reconocer porque emiten un gran sonido por la cantidad de agua que transportan y se pueden diagnosticar con un geófono o herramientas acústicas. [14]

- **Fugas de humedad visible:**

Existen fugas que son más fáciles de detectar por la presencia de humedad o manchas en la zona, generalmente en el techo o en las paredes. Algunas de estas manchas pueden presentar cambios en su coloración aparente. También se puede identificar por el cambio en las superficies, es decir, abultamientos, relieves o hendiduras que hacen que esa zona sea más frágil y fría.

Las fugas grandes no necesariamente contribuyen a pérdidas de volúmenes de agua grandes, particularmente si el agua alcanza la superficie. Usualmente se localizan rápidamente, se aíslan y reparan.

Las fugas no detectadas, aun siendo las más pequeñas, pueden conducir a grandes cantidades de agua perdida considerando que estas fugas pueden existir por largos periodos de tiempo. [14]

Contrario a lo que se pudiera inferir, las fugas pequeñas son más fáciles de detectar debido a que son más ruidosas y fáciles de identificar utilizando hidrófonos.

Las fugas más difíciles de detectar y reparar son usualmente aquellas bajo corrientes cruzadas. [8]

La detección de pérdidas de fluidos por fugas de tuberías de distribución subterráneas representa un importante desafío para los científicos e ingenieros. La clave de la solución es triple: selección del equipo de detección, adaptación adecuada del procedimiento para cada operación de campo, y análisis de los datos.

Métodos biológicos: El personal experimentado o los perros entrenados pueden detectar y localizar fugas por medio de la vista, inspección, olor o sonido.

Métodos basados en hardware: Se utilizan diferentes dispositivos de hardware para ayudar en la detección y localización de fugas. Los dispositivos típicos utilizados incluyen sensores acústicos, detectores de gas, detectores de presión (Flujómetros) y termografía infrarroja.

Métodos basados en software: Se utilizan varios paquetes de software para detectar fugas en una tubería. La complejidad y confiabilidad de estos paquetes varían significativamente.

Ejemplos de estos métodos son detección de cambio de flujo/presión, balance de masa/volumen, el modelo dinámico basado análisis de sistemas y puntos de presión.[15]

ANTECEDENTES DE TECNOLOGÍAS Y MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS DE AGUA

En la presente investigación se describen diferentes técnicas y dispositivos que se han desarrollado para la detección de fugas de fluidos.[16]

I. GEÓFONO

Un geófono es un equipo de amplificación acústica diseñado para incrementar el ruido que generan las tuberías metálicas en situaciones de fuga, y de esta manera localizar la ubicación de la fuga. El principio de funcionamiento se basa en que los auriculares son colocados en el piso, siendo estos muy sensibles.

Estos auriculares captan el sonido de las vibraciones y son amplificados por el instrumento, para luego ser transmitidos al auricular del operador. El más leve goteo se puede escuchar, y es posible rastrearlo moviendo los auriculares de piso hasta encontrar el punto de máximo sonido.

II. CORRELADOR

El correlador es un instrumento que sirve para la localización de fugas en las tuberías de agua potable. El principio de funcionamiento se basa en la detección del ruido de la fuga de agua que está en un punto no conocido de la tubería. La señal es amplificada con dos sensores (micrófono piezoeléctrico e hidrófono), los cuales deben ser previamente montados en la tubería.

El correlador compara ambas señales y calcula la distancia de la fuga mediante el tiempo de retardo de las señales, la distancia del sensor, y la velocidad del sonido en la tubería.

Por la importancia que presenta para la humanidad la detección y localización de fugas, muchos científicos y conocedores del tema investigan métodos para detectar las mismas. [17][18]

Los equipos planteados anteriormente se basan en los métodos acústicos para detectar fugas. La efectividad de los métodos depende de muchos factores, dentro de los cuales se encuentran el diámetro y material de la tubería, tipo de suelo donde está enterrada la tubería, tamaño y tipo de fuga, presión del sistema de distribución de agua, caudal de la fuga, ruido interferente y la respuesta en frecuencia del equipamiento.[19]

Kadri y colaboradores reportan un trabajo dirigido a la evaluación empírica de señales acústicas para detectar fugas en tuberías plásticas. Estos investigadores utilizan el factor de fuga (Γ) como métrica para obtener información sobre la presencia o ausencia de fugas de fondo. Dicho Γ se calcula mediante la integral del espectro de frecuencias desde 0 Hz a 500 Hz. [20]



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Almeida y colaboradores realizan un estudio dirigido al efecto provocado por el sistema tubería-sensor sobre la detección de la fuga de fondo. En dicho trabajo estos investigadores obtienen un modelo matemático para predecir la frecuencia máxima del espectro de frecuencia, lo cual brinda la posibilidad de estimar la frecuencia de muestreo mínima que se debe emplear en dicho sistema. Además, definen empíricamente cual es la frecuencia de corte a partir de la cual no se va a emitir la fuga. [21]

Gao y colaboradores realizan el estudio de varios procedimientos para obtener un mejoramiento de la forma de la función correlación cruzada dirigido a la detección y localización de la fuga de fondo. Luego de realizar los estudios de los procedimientos, dichos investigadores plantean que, para poder obtener una mejor forma de la correlación cruzada, y por consiguiente lograr una mejor estimación del retardo de tiempo, se debe aplicar la transformada de la coherencia o la transformada de fase. [3][19]

Choi y colaboradores muestran un nuevo procedimiento para la detección de fuga en tuberías de agua. Dicho método posee sus bases en la técnica de correlación cruzada básica y el estimador de máxima verosimilitud. [22]

Martini y colaboradores proponen un método para la detección de fuga de agua mediante el análisis de la correlación cruzada generalizada de señales vibro-acústicas, además, utilizan como métrica estadística la curtosis. [23]

Dispositivo para detectar fugas de fluidos en tuberías a presión. La invención con número de Patente en trámite N° NC2016/0005547. Consiste en un dispositivo con integración de hardware y software, para la detección de fugas de agua y otros líquidos en tuberías a presión. El sistema usa una tecnología de interpretación de ondas de presión para identificar la presencia de fugas. Trabaja mediante una tarjeta para la adquisición y análisis de ondas de presión y un software que las analiza de forma automática para generar alertas y hacer la detección de fugas amigable para los potenciales usuarios del dispositivo.[1]



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Los siguientes autores son investigadores relevantes en la detección de fugas de agua utilizando análisis de vibraciones, además de otros métodos. [24]

En el 2008, el investigador Jin Yang Identificó las fugas de agua mediante puntos ciegos, utilizando análisis de vibraciones y/o acústica. El fácil cálculo de velocidad de propagación que ayuda a la identificación. Y su desventaja es que requiere aplicación de muchos métodos complejos estudiados con anterioridad.[25]

En los 1975, Y. Santo, propone la utilización de identificación de canal de puntos ciegos. Tiene como ventaja que el método propuesto se usa mucho en trabajos posteriores y su desventaja es que no se llega hasta la detección de las fugas.[26]

En 1992 Ranko S. Pudar y James A. Liggett, detecta las fugas de agua mediante la solución del problema inverso usando mediciones de presión o flujo.

Cuya ventaja es lograr expresar las fugas en términos de presión y su desventaja es necesario suponer el tamaño aproximado de los orificios de fugas.[27]

2009 el investigador Jhon Mashford, Localización de fugas utilizando una máquina de soporte vectorial. Su ventaja es aprovechar técnicas conocidas de reconocimientos de patrones y su desventaja es que solo se consigue una eficiencia de 32 a 57 % en la experimentación. [28]

En 2001 Didia Covas y Helena Ramos. Detección de fugas basado en análisis inverso de transitorios. Aprovecha la información de determinados instantes de interés. Únicamente se muestra el funcionamiento ante una fuga determinada.[29]

2006 Jose Ragot, Didier Maquin. Análisis difuso de residuos basado en el modelo del proceso. Utiliza la distancia euclidiana entre las firmas de fallas y los residuos para localizar una fuga supuesta. Se necesita de umbrales negativos y positivos que dificultan el aislamiento.[30]

2010 Ramon Perez, Vicenc Puig. Detección mediante binarización de matrices de residuos y sensibilidades y localización óptima de sensores de medición. Se introduce el uso de sensibilidades de nodos a los cambios de presión. Al igual que en otros casos es complicada la elección del tamaño de umbral correcto.[31]



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



En 2010 J. Gertler, J Romera, V. Puig y Quevedo. Localización de fugas mediante análisis de componentes principales. Se aprovecha un diseño de residuos estructurales y logra detectar 2 fugas simultaneas. Tiene limitación de dimensiones por el uso de PCA por lo que no es adecuada para redes de tamaños grandes.[32]

Este trabajo estará basado en la detección de fuga de agua, utilizando una tarjeta de adquisición de datos que tiene implementado un software que realiza su análisis gracias a la transformada de Fourier (FFT). Esta tarjeta pertenece a compañía de National Instruments y el software por se utiliza para su programación es LabView. Existen varios puntos diferenciadores entre dicha tesis y el resto de los trabajos plasmados anteriormente:

- Las tuberías empleadas en los experimentos tienen una longitud de 1 metro para ambos materiales. O sea, no se genera una mini red de distribución, eso me permite no utilizar accesorios hidráulicos.
- Los diámetros de mis tuberías son de 3.5 pulgadas, que en los casos anteriores todos rondan 1 pulgada.
- No se utiliza ninguna herramienta estadística durante la tesis. Solo realizo la FFT y veo su comportamiento, para su posterior comparación. Generando una mayor comprensión al usuario.
- Se utiliza en este trabajo 4 software de impacto mundial (MatLab, LabView, Ansys, Autodesk Inventor)
- Se realiza los experimentos con dos tuberías de diferente material (Metal y Plástico).
- Los diámetros de fugas varían de 1 a 8 mm. En cambio, casi todos los trabajos anteriores solo tienen un solo diámetro de fugas.

Cuando se produce una fuga, se generará ruido a medida que el fluido se escape de la tubería, la onda del ruido se propaga con una velocidad determinada por las propiedades físicas del fluido en la tubería. Los detectores acústicos detectan estas ondas y, en consecuencia, las fugas. Debido a la limitación del rango de detección, normalmente es necesario instalar muchos sensores a lo largo de la línea.



Estos sensores detectan señales acústicas en la tubería y discriminan los sonidos de fuga de otros sonidos generados por cambios operativos normales.[33]

1.1 Pregunta de investigación

¿Como detectar fugas de agua con una tarjeta de adquisición de datos para reducir el consumo energético en la distribución de agua?

1.2 Objetivo

Diseñar un sistema de detección de fallas mediante vibraciones, apoyándose en un software propio basado en la transformada FFT y LabVIEW.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Revisión bibliográfica:
 - 1.1. Identificar los métodos utilizados en la literatura para la detección de fugas de agua.
 - 1.2. Aprender a trabajar con el equipo (tarjeta de adquisición de datos) y relacionarlo con la detección de fugas.
2. Desarrollar un software para la detección de fallas basado en herramientas matemáticas.
3. Diseñar experimentos que permitan evaluar la efectividad del software desarrollado.
4. Evaluar el desempeño del sistema y software desarrollados con flujo y sin él.

1.3 Hipótesis

Si se diseña un sistema que detecta vibraciones y un software propio basado en la FFT, es posible hacer reducir el consumo de energía en un sistema de distribución de agua, como consecuencia de la detección de fugas.

1.4 Justificación

Seguridad:

La detección confiable de fallas en las redes de distribución de agua es crucial para la operación segura del sistema de bombeo.

Detectar fallas en las redes evitaría:

- Contaminación de las aguas subterráneas, provocando enfermedades.
- Derroche de energía eléctrica y de agua, afectando al medio ambiente.

Industria:

Las fallas en la red de distribución de agua son una preocupación y una responsabilidad de las empresas que brindan el servicio de abastecimiento de agua. Garantizar una operación confiable del sistema es un prerrequisito, que incluye el rendimiento del sistema en su totalidad.

Prevención:

Detectar eventos previos a la falla con instrumentos fiables, mediante el reconocimiento de patrones, será de gran ayuda debido que al tener controlada las fallas evitaremos las fugas de agua prolongadas y por consecuente minimizaremos el consumo energético por bombeo.

2 Capítulo 2: Marco teórico

En este capítulo se abordará sobre las herramientas y recursos utilizados para la realización del trabajo en el laboratorio. Veremos el equipamiento a utilizar y los softwares que se ocuparan para interacción de los datos.[34][35][36]

Además, abordaremos sobre las herramientas matemáticas utilizada para el procesamiento de datos o de señales.

2.1 Método

El equipo que se empleó es una tarjeta para la adquisición de datos (señales), que está compuestas por un chasis (elemento o estructura que tiene como objetivo fundamental sostener diferentes componentes y la conexión de cableado para su buen funcionamiento). Otra parte de la tarjeta son los módulos de entrada de sonidos y vibraciones que su función principal es medir las señales correspondientes, proveniente

de un sensor o sensores que se encuentran conectados al mismo. Como componente final se encuentra los sensores, que pueden ser entre 1 a 4 sensores por módulos y tienen como objetivo la adquisición de la señal para su posterior procesamiento. Además, todo este dispositivo (DAQ) tiene un conjunto de cables involucrado que les sirve para la transferencia de datos a la PC y para conectar su fuente de alimentación.

Como dato muy importante cabe resaltar que todo este equipo le corresponde a la compañía National Instruments (NI transforma la manera en cómo los ingenieros e investigadores diseñan, generan prototipos e implementan sistemas para aplicaciones embebidas, de medidas y de automatización) y el software a utilizar por excelencia es LabView (es un software que proporciona un entorno de desarrollo Figura para el diseño de aplicaciones de Ingeniería de adquisición de datos, análisis de medidas y presentación de datos gracias a un lenguaje de programación sin la complejidad de



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



otras herramientas de desarrollo).

Las especificaciones técnicas de todas las partes mencionadas anteriormente se mostrarán a medida que avancen en el capítulo y se explicará con más profundidad.

2.2 ¿Qué es Vibración?

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

El movimiento vibratorio de un cuerpo entero se puede describir completamente como una combinación de movimientos individuales de 6 tipos diferentes. Esos son traslaciones en las tres direcciones ortogonales x , y , z , y rotaciones alrededor de los ejes x , y , z . Cualquier movimiento complejo que el cuerpo pueda presentar se puede descomponer en una combinación de esos seis movimientos. Es a lo que se expresa que posee seis grados de libertad. Por ejemplo, una estructura sometida a fuertes vientos ocasionados por una tormenta posee varios grados de libertad. También puede rodar en el sentido de la longitud (rodar), girar alrededor del eje vertical, (colear) y girar alrededor del eje babor-tribor (arfar) Supongamos que a un objeto se le impide el movimiento en cualquiera dirección excepto una. Por ejemplo, un péndulo de un reloj solamente se puede mover en un plano. Por eso, se le dice que es un sistema con un grado único de libertad. Otro ejemplo de un sistema con un grado único de libertad es un elevador que se mueve hacia arriba y hacia abajo en el pozo del elevador.

La vibración de un objeto es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen a dentro del objeto. [37] [38]

Fotografía que muestra de forma panorámica el equipamiento que se utilizará para la adquisición de datos mediante vibraciones Figura 2.1 y se describe a continuación.



Figura 2.1 Estación experimental para la adquisición de datos.

2.3 Chasis CompactDAQ

Chasis CompactDAQ USB, 8 Ranuras—El cDAQ - 9172 proporciona conectividad USB para sistemas de medidas de sensores pequeños y portátiles. El chasis cuenta con la funcionalidad plug-and-play de USB para conectar medidas eléctricas y de sensores. También ayuda a controlar la temporización, la sincronización y la transferencia de datos entre módulos de E/S de la Serie C y un servidor externo. Puede usar este chasis con una combinación de módulos de E/S de la Serie C para poder realizar diversas medidas de E/S analógica, E/S digital y contador/temporizador. El cDAQ-9172 también tiene cuatro contadores y temporizadores de uso general de 32 bits. Con varios motores de temporización, permite la sincronización precisa de los módulos para aplicaciones que requieren medidas simultáneas o secuenciales. También ofrece opciones de temporización para controlar el intervalo de muestreo. Puede ejecutar cuatro operaciones simultáneamente y temporizadas por hardware con tres velocidades independientes para entrada analógica.[39]

Esquema que muestra las partes de un chasis CompactDAQ Figura 2.2 y se describe a continuación.

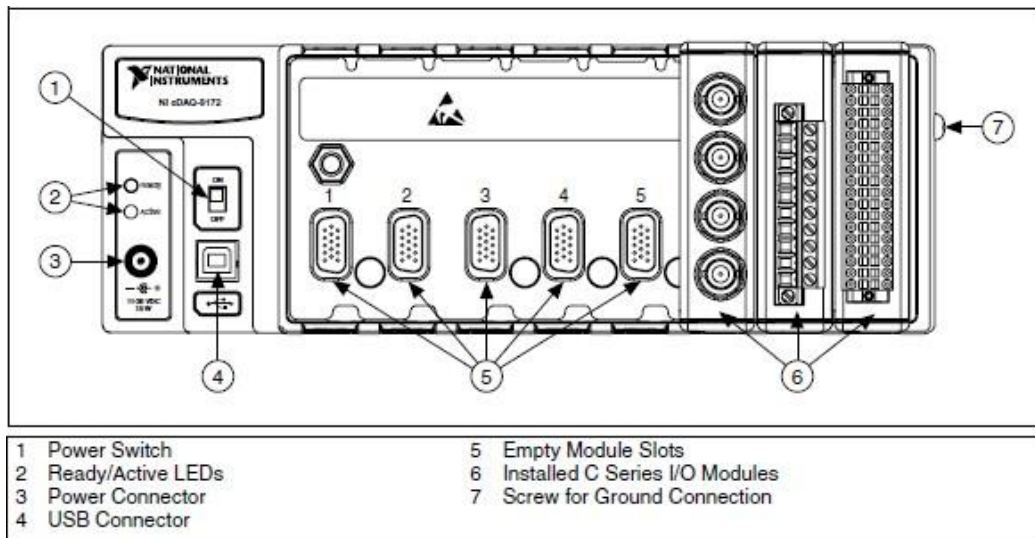


Figura 2.2: Esquema de un chasis CompactDAQ.[39]

Fotografía de un chasis NI cDAQ 9172 Figura 2.3 y se muestra a continuación.



Figura 2.3: Chasis NI cDAQ 9172. [40]

2.4 Módulo de Entrada de Sonido y Vibración de la Serie C (NI-9234)

Módulo de Entrada de Sonido y Vibración de la Serie Cuenta con 4 Canales, 51.2 knta S/s/canal, ± 5 V—El NI-9234 puede medir señales desde sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE) y no IEPE como acelerómetros, tacómetros y sensores de proximidad. El NI-9234 también es compatible con sensores TEDS inteligentes. El NI-9234 proporciona un amplio rango dinámico e incorpora acoplamiento de AC/DC y acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software.

El canal de entrada mide las señales simultáneamente. Cada canal también tiene filtros anti-aliasing integrados que ajustan automáticamente su velocidad de muestreo.

Cuando es usado con software de NI, este módulo ofrece funcionalidad de procesamiento para monitoreo de condición como análisis de frecuencia y rastreo de orden.

Fotografía de Módulo de Entrada de Sonido y Vibración de la Serie C (NI 9234) Figura 2.4 y se muestra a continuación.



Figura 2.4: Módulo de Entrada de Sonido y Vibración de la Serie C (NI 9234).

2.5 Sensores acelerómetros modelo 603C01 marca IMI.

Para realizar la medición de las vibraciones a las que se encuentran expuestas las tuberías, son necesarios sensores capaces de detectar dichas señales.

Los transductores empleados en un análisis de vibraciones convierten la energía mecánica en energía eléctrica, lo que significa que producen una señal eléctrica la cual está en función de la vibración. [41] [42]

A continuación, se mencionan diferentes tipos de transductores usados para la medición de vibraciones:

- Acelerómetros piezoresistivos
- Acelerómetros capacitivos
- **Acelerómetros piezoeléctricos**
- Acelerómetros de efecto Hall
- Acelerómetros magnetoresistivos
- Acelerómetros de transferencia de calor
- Vibrómetros Láser Doppler
- Transductores de piezovelocidad (PVT)
- Transformadores Diferenciales de Variable Lineal (LVDT)
- Transductores de corriente Eddy.

Para el sistema que se desarrolló se emplearon acelerómetros piezoeléctricos modelo 603C01 marca IMI, puesto que el laboratorio contaba con ellos.

Los acelerómetros son dispositivos que convierten la aceleración de un sistema o mecanismo, sometido a vibración o aceleración, en una señal eléctrica analógica proporcional. [41][42]

Los acelerómetros piezoeléctricos aprovechan los fenómenos piezoeléctricos de algunos materiales cristalinos, para generar una señal eléctrica proporcional a la aceleración de la vibración a la que son sometidos.

El efecto piezoeléctrico fue descubierto por Jaques y Pierre Curie en 1880, empleando cristales de cuarzo, y consiste en la aparición de una cierta carga eléctrica cuando el cristal es sometido a algún tipo de deformación bajo la acción de un esfuerzo.

Dado que la fuerza aplicada sobre el cristal piezoeléctrico es proporcional a la carga eléctrica generada por él, puede ser utilizado como sensor para medir esfuerzos, o cualquier magnitud física que pueda ser convertida en fuerza.

El principio de operación de los acelerómetros piezoeléctricos se ilustra en la Figura 2.5 y se describe a continuación.

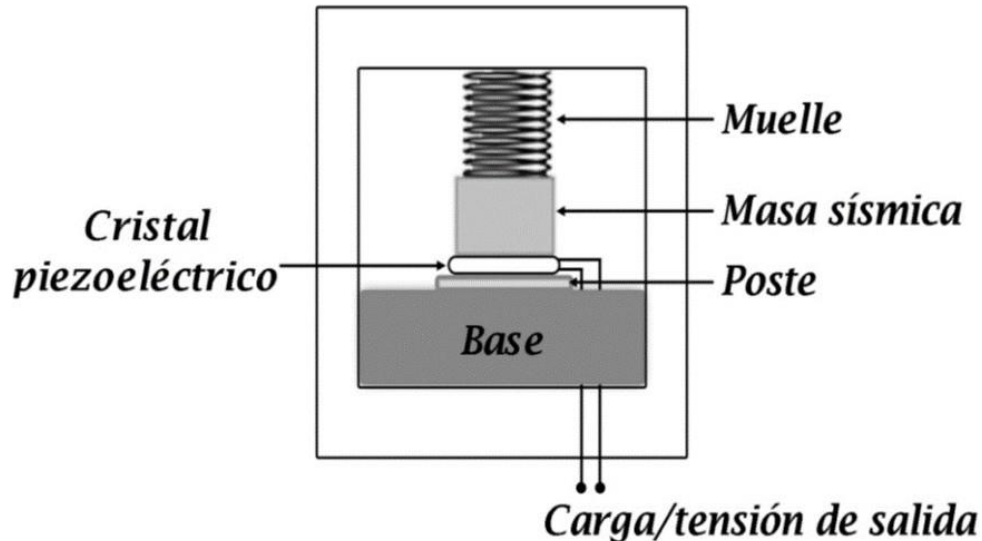


Figura 2.5: Principio de operación de un acelerómetro piezoeléctrico.

El elemento activo del acelerómetro es un cristal piezoeléctrico pegado a una masa conocida. Un lado del cristal está conectado a un poste rígido en la base del acelerómetro, y por el otro lado se encuentra adjunto un material llamado masa sísmica.

Cuando el acelerómetro se encuentra sometido a vibración, se genera una fuerza que actúa directamente sobre el elemento piezoeléctrico. Esta fuerza es igual al producto de la aceleración por la masa sísmica. [41] [42]

$$F = ma \quad (2.1)$$

Debido al efecto piezoeléctrico, se genera una salida de carga, Q , proporcional a la fuerza aplicada.

$$Q \propto ma \quad (2.2)$$

Puesto que la masa sísmica es constante, la señal de salida de carga es proporcional a la aceleración de la masa.

$$Q \propto a \quad (2.3)$$

Sobre un amplio rango de frecuencias, tanto la base del sensor como la masa sísmica presentan la misma magnitud de aceleración, de esta forma el sensor mide la aceleración del objeto bajo experimento.

En general los acelerómetros pueden ser pasivos o activos. Los acelerómetros pasivos envían la carga generada por el elemento sensor, y debido a que dicha señal es muy pequeña, estos acelerómetros requieren de un amplificador para incrementar la señal.

Los acelerómetros activos incluyen circuitos internos para convertir la carga del acelerómetro a una señal de voltaje, pero requieren de una fuente constante de corriente para alimentar el circuito.

Los acelerómetros piezoeléctricos pueden también clasificarse en acelerómetros de alta impedancia y acelerómetros de baja impedancia.

En los acelerómetros de alta impedancia, la salida de carga del cristal tiene una impedancia de salida muy alta, por lo que debe ser convertida a baja impedancia con un convertidor de impedancia, o un amplificador de carga, antes de ser conectado a un sistema de adquisición de datos. Generalmente, la sensibilidad de los acelerómetros de alta impedancia es especificada en unidades de pC/g.

Por otra parte, en un acelerómetro de baja impedancia deben emplearse sistemas microelectrónicos, ubicados dentro de la carcasa del sensor, para detectar la carga generada por el cristal piezoeléctrico. De esta manera, la transformación de alto a bajo es hecha en el punto de medición y solo se transmiten señales de baja impedancia desde el sensor. Generalmente, la sensibilidad de los acelerómetros de baja impedancia está especificada en mV/g. [41] [42]

Aunque el principio de operación es el mismo para todo acelerómetro piezoeléctrico, la configuración interna varía dependiendo de la manera en cómo la fuerza inercial de la masa sísmica actúa sobre el material piezoeléctrico. Las tres configuraciones más comunes son: compresión (compression), corte (shear) y doblamiento (bending).[43]

La Figura 2.6 muestra las secciones de un acelerómetro en el cual se detallan sus componentes.

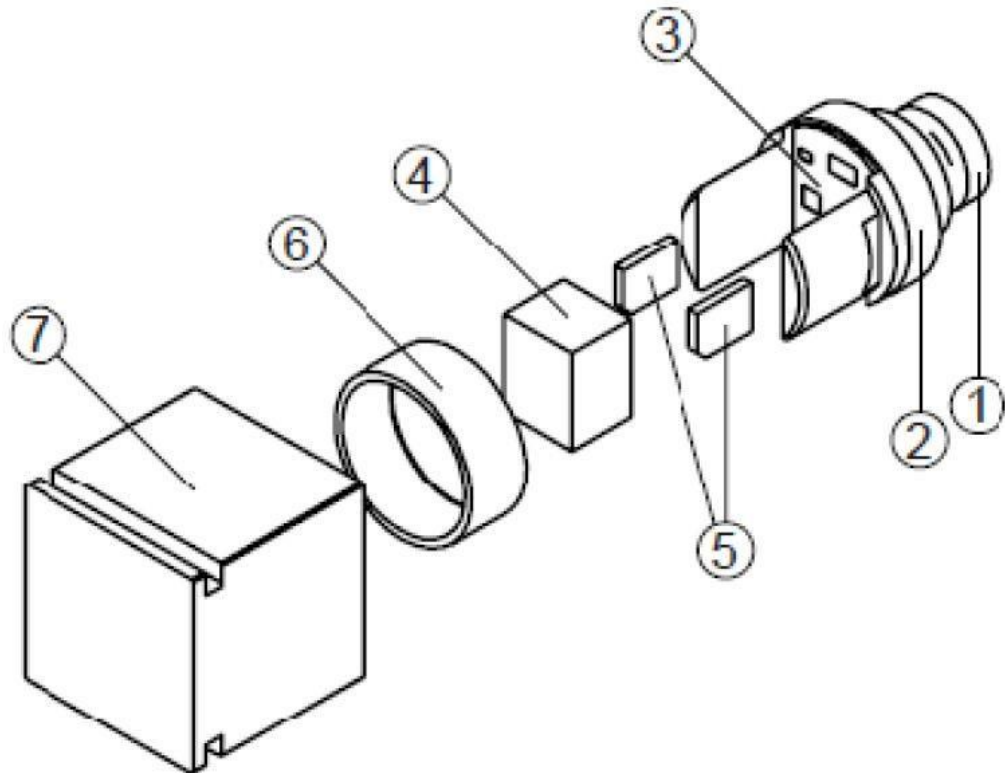


Figura 2.6: Despiece de acelerómetro.

El acelerómetro cuenta con un conector 10 – 32UNF (1) integrado en la pieza superior (2), la cual también contiene al preamplificador (3). Una sujeción cilíndrica ranurada posee la masa sísmica central (4), flanqueada por dos discos cerámicos piezoeléctricos (5).

Este ensamblaje está sujeto rígidamente por un anillo (6). Todos los componentes se encuentran unidos sin necesidad de agentes adherentes; esto proporciona extrema confiabilidad al acelerómetro. El ensamblaje está herméticamente soldado a un contenedor de titanio (7).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



El contenedor tiene una ranura que permite el uso de sujetadores, para que el acelerómetro pueda ser colocado y retirado fácilmente sobre los objetos de prueba.

Además, presenta una flecha grabada en una de las caras en la dirección que representa un desplazamiento en sentido positivo.[40]

2.5.1 Características del sensor 603C01 marca IMI

- Sensibilidad: $(\pm 10\%)100 \text{ mV/g}$ ($10,2 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$)
- Rango de frecuencia: $(\pm 3\text{dB})$ 30 a 600000 cpm (0,5 a 10000 Hz)
- Elemento de detección: Cerámica
- Rango de medición: $\pm 50 \text{ g}$ ($\pm 490 \text{ m/s}^2$)
- Peso: 1,8 oz (51 g). [41] [42]

Muestra el sensor marca IMI, que es el utilizado en nuestro laboratorio en la Figura 2.7.



Figura 2.7: Acelerómetro IMI.

2.6 Martillo de Caída Libre (MCL)

Además de los componentes antes plasmados, se necesitó crear un dispositivo para obtener un impacto constante para tomar la señal y que la señal inicial causada por el impacto sea la misma o la más parecida en cada experimento.

El dispositivo se le denominó Martillo de Caída Libre (MCL), y este compuesto por una estructura de tres puntos de apoyo similar a un trípode y en su centro un tubo cobre donde su función principal es servir de guía para el deslizamiento del proyectil. Este tubo de cobre puede variar su longitud ya que presenta un mecanismo de ajuste. El proyectil no es más que una masa que impacta contra el tubo de prueba y siempre se estrella con la misma velocidad, ya que en cada acción experimental ella presenta el mismo peso y es liberada en la misma altura.

2.7 Características físicas del MCL

Toda la estructura esta pintada de color negro y tiene bien identificado su nombre. Además, es ligera y desarmable, ideal para su transportación en caso necesario.

Estructura de hierro con altura de 90 cm. Que permite hacer experimentos a tuberías de hasta 4 pulgadas de diámetros.

Tubo de cobre de 77 cm longitud y de 1 cm diámetro.

Proyectil de hierro de diámetro 0.9 cm, altura 2.5 y peso 15.48 g



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Figura 2.8: Martillo de caída libre.

Software propio

Para este primer método, fue necesario desarrollar un programa específico para la adquisición de la señal y su posterior procesamiento. El software base utilizado fue LabView, debido a su compatibilidad con el chasis CompactDAQ y otros componentes del sistema.

En este programa tienes la posibilidad de modificar datos de entrada como la velocidad de muestreo y el número de muestra. Además, se tiene un apartado donde se puede colocar la URL o dirección que quisiera el usuario para guardar los datos adquiridos por el software. Presenta también un botón de STOP para detener el programa, para su posterior reanudación.

En la pantalla principal se puede notar 3 pestañas las cuales tienen funciones diferentes. La primera opción se denomina Señal completa pues su objetivo principal es poder configurar datos para poder adquirir la señal correspondiente y muestra un Figura con los datos adquiridos en los ejes Z y X.

Para el caso de las 2 pestañas restantes, se denomina Señal puerto 0 (Z) y Señal puerto 1 (X) respectivamente y su objetivo es separar la señal adquirida en sus puertos equivalentes. Además, muestra en una segunda gráfica con el espectro de frecuencia equivalente. Esta información se mostrará a continuación en la figura 2.9.

2.8.1 ¿Qué es LabView?

El software LabVIEW es ideal para cualquier sistema de adquisición y control, es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, resolver problemas, productividad acelerada y constante innovación.

Con un lenguaje de programación visual Figura. Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Figura.

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, y su origen provenía del control de instrumentos, aunque hoy en día se ha expandido ampliamente, no sólo al control de todo tipo de electrónica (Instrumentación electrónica) sino también a su programación embebida, comunicaciones, matemáticas, etc. Un lema tradicional de LabVIEW es: "La potencia está en el Software", que con la aparición de los sistemas multinúcleo se ha hecho aún más potente. Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a profesionales de cualquier otro campo. LabVIEW consigue combinarse con todo tipo de software y hardware, tanto del propio fabricante -tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, instrumentos y otro Hardware- como de otros fabricantes [44].

Muestra la pantalla principal del software para la adquisición de las señales Figura 2.9.

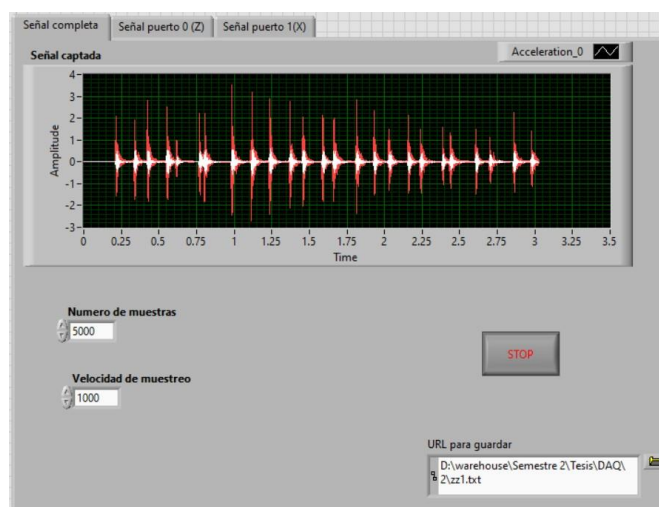


Figura 2.9: Software para la adquisición de señales.

CAPITULO 3: DESARROLLO TEORICO / EXPERIMENTAL.

En el presente capítulo abordará sobre los experimentos que se han realizado a la largo de mi periodo de maestría. Se adquirieron señales bajo diferentes condiciones y circunstancias para poder determinar las posibles diferencias entre tuberías con fuga y sin fuga. En un principio se utilizó una tubería metálica (hierro fundido) que se le realizó una cierta cantidad de pruebas (180 experimentos), que fueron variando a lo largo de estos meses (o sea no se tomaron los datos en una única ocasión). Debo aclarar que todos los experimentos no están plasmados de forma directa en la tesis, pues algunos se realizaron como método de descarte y así poder ganar experiencia. Además, se realizaron experimentos en tuberías plásticas o sea (CPVC) con el objetivo si el método principal se podía replicar con diferentes materiales.[45]

Todas las señales adquiridas estaban en el dominio del tiempo, cuya información era un poco escasa para poder arrojar algún resultado aparente. Por lo que fue necesario utilizar una herramienta matemática que convierte del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (Transformada rápida de Fourier o sea FFT). Además, toda la bibliografía sugería que esta herramienta era más practica para el trabajo.

3.1- La transformada rápida de Fourier (FFT).

Toda señal periódica puede ser representada por la suma de series de Fourier. Con un análisis adecuado es posible obtener una representación de Fourier para señales de duración finita. Esta representación es la que se conoce como la Transformada de Fourier Discreta (TFD). La TFD se puede representar como:[46]

$$X[K] = \sum_{N=0}^{N-1} x[n] * W^{\frac{Kn}{N}} \quad (3.1)$$

La transformada rápida de Fourier, conocida por la abreviatura FFT (del inglés Fast Fourier Transform) es un algoritmo eficiente que permite calcular la transformada de Fourier discreta (DFT) y su inversa.

La FFT es de gran importancia en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital en general a la resolución de ecuaciones en derivadas parciales o los algoritmos de multiplicación rápida de grandes enteros. Cuando se habla del tratamiento digital de señales, el algoritmo FFT impone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante ya que la señal muestreada y que se va a transformar debe consistir en un número de muestras igual a una potencia de dos. La mayoría de los analizadores de FFT permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras.

El rango de frecuencias cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.[38][47]

En términos matemáticos esta transformada es un operador (F) que aplicado a una función temporal $g(t)$ la convierte en otra función de la frecuencia $G(f)$ que nos aporta la misma información que la primera:

$$G(f) = F[g(t)] \quad (3.2)$$

Recíprocamente, existe también el operador anti transformado (F^{-1}) que aplicado a una función frecuencial $G(f)$ permite recomponer su función temporal original $g(t)$:

$$F^{-1}[G(f)] = g(t) \quad (3.3)$$

Podemos interpretar esta transformada como un camino para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, como si se tratase de dos mundos distintos, pero capaces de aportarnos la información desde otra perspectiva. Vistos desde el dominio frecuencial, ciertos fenómenos se explican más fácilmente y tienen un tratamiento matemático más ágil. El camino de regreso al dominio temporal siempre está garantizado por el operador antitransformada.[47]

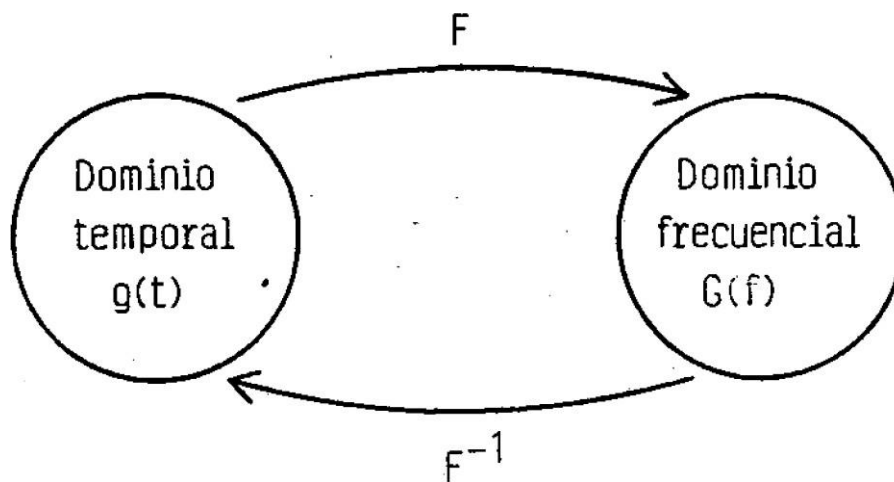


Figura 3.1: Representación visual de la FFT.

3.2- Características y condiciones de los experimentos

Como se menciona los experimentos se realizaron en una tubería metálica y plásticas de 1000 mm de longitud, 87 mm de diámetro exterior y con espesor de 3 mm. Ambos extremos de la tubería están selladas por una tapa plástica de (CPVC), lo cual se utilizó silicona para fijar las partes y no existiera fuga de agua. Por un extremo de la tubería se conecta una manguera de 12.5 mm de diámetro la cual va a suministrar agua de manera constante. El tubo estará apoyado en dos bases de manera para evitar el contacto directo con la meseta de hormigón y así evitar la mayor cantidad de vibraciones no deseadas.

Muestra la tubería con las características mencionada Figura 3.1.



Figura 3.2: Tubería metálica utilizada para el experimento.

Muestra la tubería de la Figura 10 pero desde otro ángulo para poder apreciar con más detalle la conexión de la manguera de agua Figura 3.2.



Figura 3.3: Tubería metálica utilizada para el experimento desde otra vista

3.3- Explicación detallada de los experimentos en tubería metálica.

Para realizar los experimentos se tuvieron en cuenta que las condiciones como la posición de los sensores, la posición de la fuga, que la masa que impacta a la tubería y el flujo de agua siempre fueran los mismos. Las únicas condiciones que fueron variables fueron el diámetro de la fuga (0,1,4,6,8), la frecuencia de muestreo se varió en 500Hz, 1000Hz y 5000 Hz y variamos impactando o no la tubería y haciendo fluir agua o no.

3.4- Tabla explicativa de los experimentos.

Tabla 3.4.1: 1er grupo de experimentos.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	500 Hz	Fluye agua	No
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	500 Hz		
3	La tubería tiene una fuga de 4 mm	500 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 6 mm	500 Hz		
5	La tubería tiene una fugade 8 mm	500 Hz		

Tabla 3.4.2: 2do grupo de experimentos.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	500 Hz	Fluye agua	Si
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	500 Hz		
3	La tubería tiene una fugade 4 mm	500 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 6 mm	500 Hz		
5	La tubería tiene una fuga de 8 mm	500 Hz		



Tabla 3.4.3: 3er grupo de experimentos.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	500 Hz	No fluye agua	No
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	500 Hz		
3	La tubería tiene una fugade 4 mm	500 Hz		
4	La tubería tiene una fuga de 6 mm	500 Hz		
5	La tubería tiene una fugade 8 mm	500 Hz		

Tabla 3.4.4: 4to grupo de experimentos.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	500 Hz	No fluye agua	Si
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	500 Hz		
3	La tubería tiene una fugade 4 mm	500 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 6 mm	500 Hz		
5	La tubería tiene una fugade 8 mm	500 Hz		

Tabla 3.4.5: 5to grupo de experimentos.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	1000 Hz	Fluye agua	No
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	1000 Hz		
3	La tubería tiene una fuga de 4 mm	1000 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 6 mm	1000 Hz		
5	La tubería tiene una fugade 8 mm	1000 Hz		



Tabla 3.4.6: 6to grupo de experimentos.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	5000 Hz	Fluye agua	No
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	5000 Hz		
3	La tubería tiene una fugade 4 mm	5000 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 6 mm	5000 Hz		
5	La tubería tiene una fuga de 8 mm	5000 Hz		

3.5- Explicación detallada de los experimentos en tubería plástica.

Para realizar los experimentos se tuvieron en cuenta que las condiciones como la posición de los sensores, la posición de la fuga, que la masa que impacta a la tubería y el flujo de agua siempre fueran los mismos. Las únicas condiciones que fueron variables fueron el diámetro de la fuga (0,1,4,8), la frecuencia de muestreo se varió en 500 Hz,1000 Hz y 5000 Hz y variamos impactando o no la tubería y haciendo fluir agua o no.

3.6- Tabla explicativa de los experimentos.

Tabla 3.6.1: 1er grupo de experimentos para tubería plástica.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	500 Hz	Fluye agua	No
2	La tubería tiene una fuga de 1 mm	500 Hz		
3	La tubería tiene una fuga de 4 mm	500 Hz		
4	La tubería tiene una fuga de 8 mm	500 Hz		



Tabla 3.6.2: 2do grupo de experimentos para tubería plástica.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	1000 Hz	Fluye agua	No
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	1000 Hz		
3	La tubería tiene una fugade 4 mm	1000 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 8 mm	1000 Hz		

Tabla 3.6.3: 3er grupo de experimentos para tubería plástica.

Número de experimentos	Experimentos	Frecuencia de muestreo	Flujo	Impacto
1	No tiene fuga la tubería	5000 Hz	Fluye agua	No
2	La tubería tiene una fugade 1 mm	5000 Hz		
3	La tubería tiene una fuga de 4 mm	5000 Hz		
4	La tubería tiene una fugade 8 mm	5000 Hz		

3.7- Señales procesadas en MatLab

Una vez que realizaron los experimentos o sea se adquirieron los datos y se procesaron en MatLab, se arrojaron un conjunto de gráficas con peculiaridades distintivas en dependencia a cada grupo de experimentos.

3.8- ¿Qué es MatLab?

MATLAB (MATrix LABoratory) es un programa orientado al cálculo con matrices, al que se reducen muchos de los algoritmos que resuelven problemas de Matemática Aplicada e Ingeniería.

MATLAB ofrece un entorno interactivo sencillo mediante una ventana en la que podemos introducir comandos en modo texto y en la que aparecen los resultados.

Los Figuras se muestran en ventanas independientes. Cada ventana dispone de una barra de menús que controla su funcionalidad. Aprenderemos a asignar, borrar, guardar y recuperar variables, utilizar las funciones incorporadas y, más adelante, a definir funciones nuevas. MATLAB opera directamente con números complejos y con números reales como caso particular.

Lo que distingue a MATLAB de otros sistemas de cálculo es su facilidad para trabajar con vectores y matrices. Las operaciones ordinarias, suma, producto, potencia, operan por defecto sobre matrices, sin más restricción que la compatibilidad de tamaños en cada caso.

Entes matemáticos como los polinomios son tratados por MATLAB como vectores, gracias al hecho de que se suman y multiplican por escalares de la misma forma que éstos. La multiplicación y división entera de polinomios se afectan mediante órdenes específicas, así como la evaluación o derivación de un polinomio. Una de las características más destacables de MATLAB es su capacidad Figuras. Explicaremos algunos comandos Figuras para representación de funciones de una o dos variables en distintos sistemas de coordenadas.[48]

Además de utilizar los softwares antes mencionados, emplee un programa denominado ANSYS que me ayudo de manera significativa el comportamiento de la velocidad dentro de la tubería. Pude ver las diferencias de los vectores de velocidad con la variación de los diámetros de las fugas. Determiné que tipos de flujos, gracias al Número de Reynolds y pude sacar conclusiones, ratificar otras. En páginas posteriores veremos algunas imágenes que muestran lo antes planteados. Ellas tienen un código de colores para su mayor comprensión, aportando información muy importante.

3.9- ¿Qué es ANSYS?

ANSYS, Inc. Fue fundada en 1970 (Swanson Analysis Systems, Inc.) utilizando aproximadamente 1700 empleados. La mayoría con experiencia en elemento finito y dinámica de fluido computacional.

ANSYS desarrolla, comercializa y presta soporte a la ingeniería a través de software de simulación para predecir cómo funcionará y reaccionará determinado producto bajo un entorno real. ANSYS continuamente desarrolla tecnología enfocada en la simulación y a través del tiempo ha adquirido otro software para ofrecer un paquete de aplicaciones que pueden ser unificadas para los problemas más complejos. Además, presta soporte a la industria.

ANSYS, Inc. es un software de simulación ingenieril. Está desarrollado para funcionar bajo la teoría de elemento finito para estructuras y volúmenes finitos para fluidos.[49]

El método empleado para determinar el número de Reynolds

$$Re = v \cdot D / V_{cin} \quad (3.4)$$

Re: Número de Reynolds (adimensional)

v: Velocidad del fluido

D: Diámetro interior de la tubería

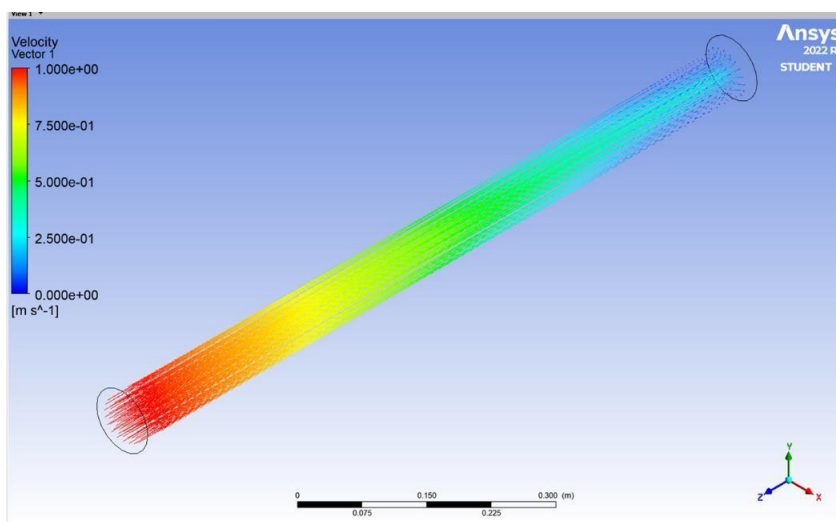
V_{cin}: Viscosidad cinemática

El número de Reynolds es un número adimensional utilizado para determinar si un fluido fluye con un flujo laminar o turbulento.

Flujo Laminar: se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas. Si introdujésemos un colorante en la tubería, observaríamos que sigue una línea paralela a las paredes de la tubería. Sucede cuando el número de Reynolds es inferior a 2100 en una tubería circular.

Flujo Turbulento: El movimiento del fluido es desordenado. El colorante se mezclaría. Tiene lugar para números de Reynolds superiores a 4000.

Zona de transición: Para números de Reynolds desde 2100 a 4000, nos encontramos en una zona de transición entre los dos tipos de flujo. (50)





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Figura 3.4: Tubería metálica modelada en ANSYS sin fuga de agua.

En la figura 3.4 se puede observar una modelación en ANSYS, donde el fluido solo entra a la tubería de izquierda a derecha. Esta tubería no presenta ninguna fuga de agua y se puede notar que los vectores de velocidad son más intensos en cuanto al color (rojo) en la entrada de la tubería.

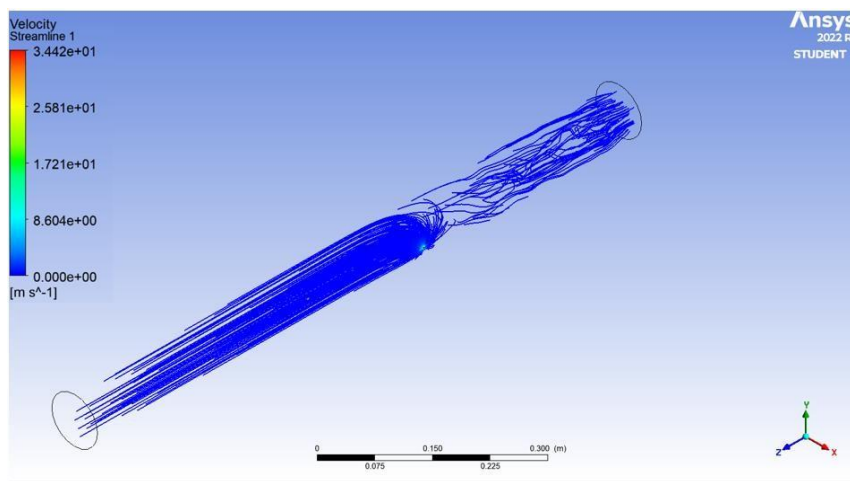


Figura 3.5: Tubería metálica modelada en ANSYS con fuga de agua de diámetro 1 mm.

Número de Reynolds 57053- Turbulento

Velocidad experimental 50.93 m/s

En esta figura 3.5 se mantiene la entrada de agua de izquierda a derecha, pero se le agrega una fuga de 1 mm en el centro de la tubería, mostrando una turbulencia solo en la salida del flujo. Para este caso los vectores de velocidad se intensifican a causa de que la fuga es muy pequeña e intenta cumplir con la ley de conservación de la masa.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

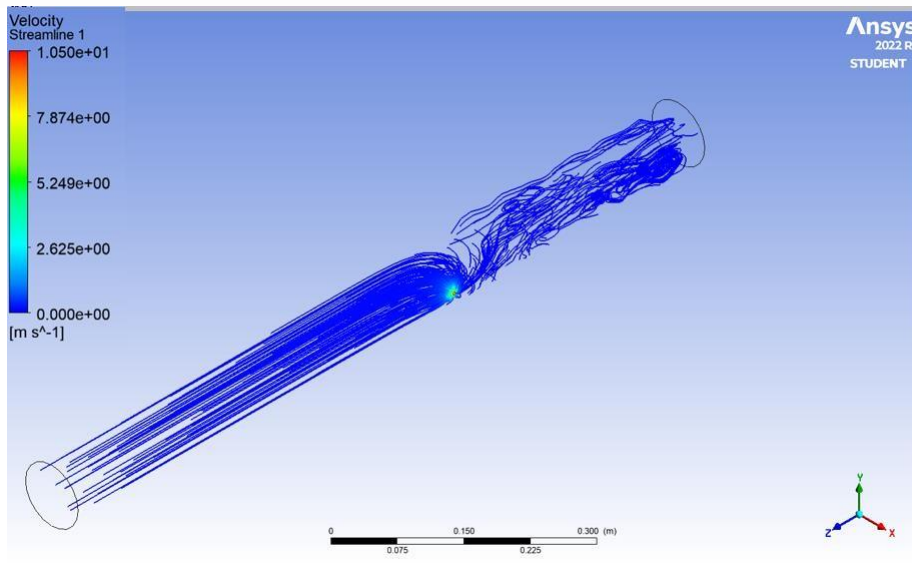


Figura 3.6: Tubería metálica modelada en ANSYS con fuga de agua de diámetro 4 mm. Número de Reynolds 39224 - Turbulento

Velocidad experimental 8.75 m/s

En esta figura 3.6 se mantiene la entrada de agua de izquierda a derecha, pero se le agrega una fuga de 4 mm en el centro de la tubería, mostrando una turbulencia solo en la salida del flujo. Para este caso los vectores de velocidad se intensifican a causa de que la fuga es pequeña, aunque estos vectores no son tan intensos como en el caso anterior. Además, se intenta cumplir con la ley de conservación de la masa.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

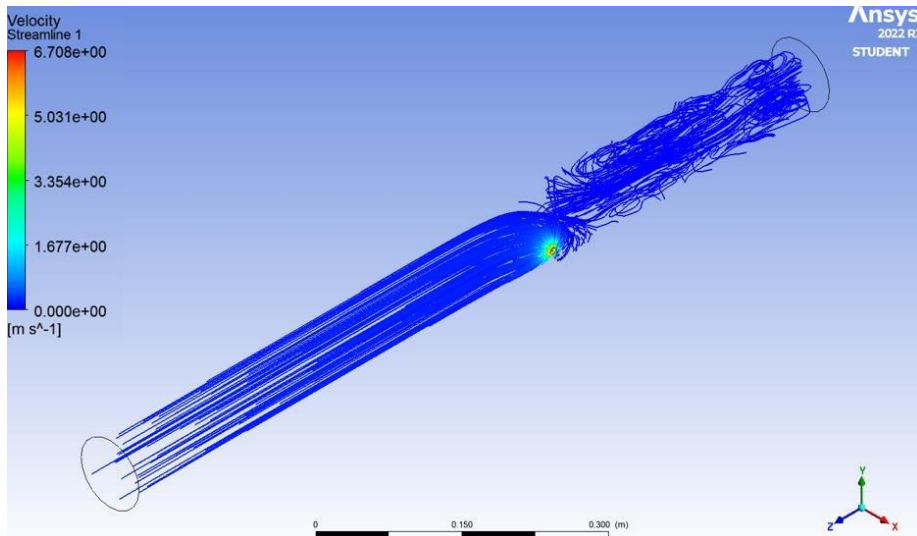


Figura 3.7: Tubería metálica modelada en ANSYS con fuga de agua de diámetro 8 mm. Número de Reynolds 37441 - Turbulento

Velocidad experimental 4.18 m/s

Para este caso, correspondiente a la figura 3.7, presentan las mismas condiciones a los casos anteriores, solo con variación del diámetro de la fuga de 8 mm. También muestra una turbulencia en la salida del flujo, pero con menor intensidad que los ejemplos pasados por el aumento de la fuga.

CAPITULO 4: Experimentos, resultados y conclusiones.

En este capítulo como muestra su nombre, se mostrará abordará los resultados de los experimentos y las conclusiones para cada uno de ellos. Debo comentar que los experimentos se realizaron de manera controlada con condiciones similares entre sí, para ver si existía la condición de repetibilidad.

Estos experimentos se realizaron con dos sensores iguales (acelerómetros) pero en diferentes posiciones (ver figura 4.0 para identificar la posición de los sensores). Estos sensores se denominan 0 y 1, donde el sensor 0 se encuentra más alejado de la entrada de agua y el sensor 1 está a 20 cm de la entrada del flujo. Se debe comentar que ambos están a la misma distancia de la fuga.

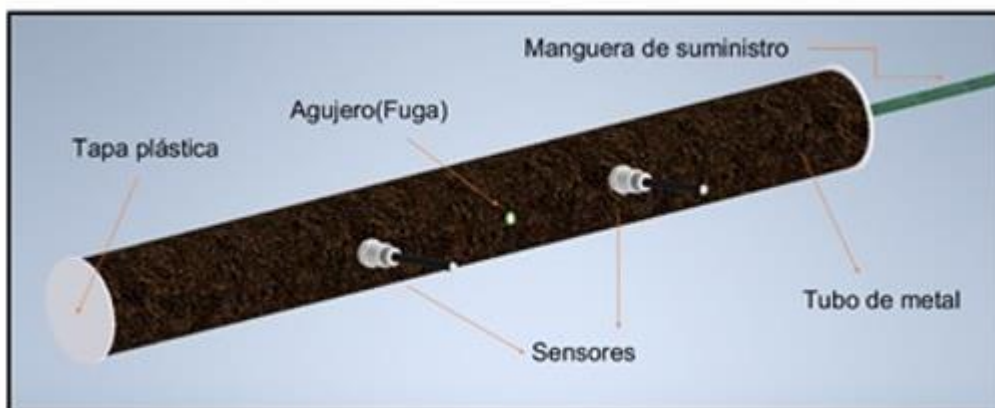


Figura 4.0: Muestra la ubicación de los sensores.



4.1- Experimentos

4.1.1- Experimento 1

Los Figuras que se presentan a continuación están relacionados con la tabla 3.4.1

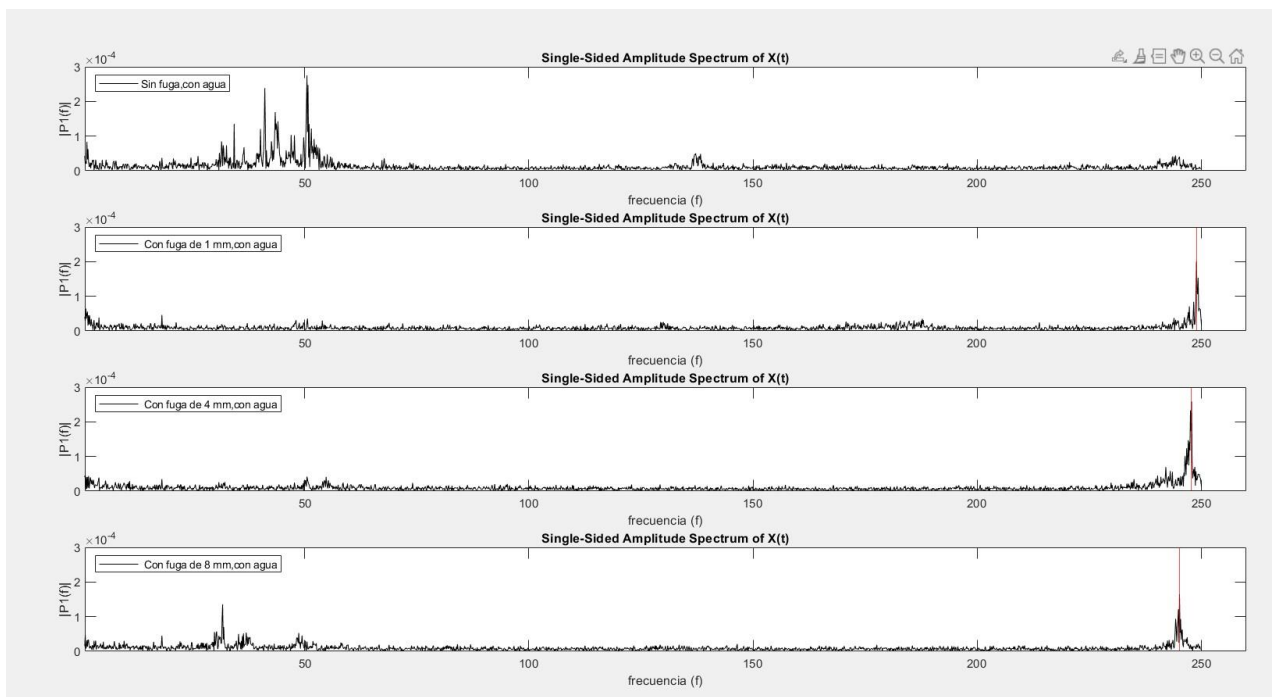


Figura 4.1: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 0.

Se puede apreciar en la gráfica 4.1 que está compuesta por 4 subgráficas, donde la primera no tiene fugas y las tres restantes si tienen fugas.

Donde se puede ver con en el primer caso se crea un conjunto de líneas espectrales de frecuencia entorno a los 43.4 Hz o sea baja frecuencia y a medidas que existe las fugas y aumenta su diámetro esa frecuencia se desplaza a los 246 Hz o sea para las altas frecuencias.

Además, se puede apreciar que existe una disminución de la frecuencia a medida que aumenta el diámetro de la fuga (La línea roja en los Figuras con fuga demuestra lo planteado anteriormente, aunque su desplazamiento es muy leve).

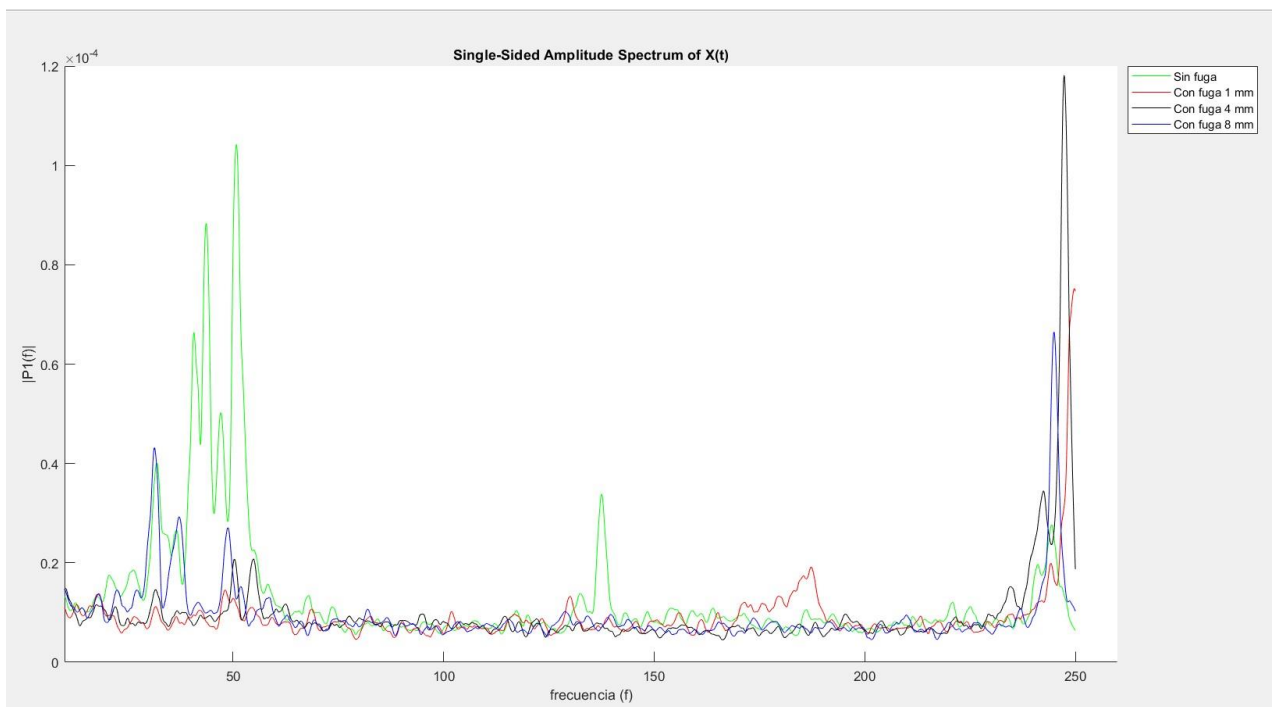


Figura 4.2: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Esta gráfica es muy parecida a la gráfica 4.1 pues la gran diferencia es que se agruparon todas las subgráficas y se señalaron con un color. Además, se le aplicó un comando en MatLab para suavizar las señales. El objetivo de este comando (smooth) es para que se pueda apreciar mejor y elimina el ruido. Con este comando se distingue la trayectoria de cada señal y no aglomera una encima de la otra impidiendo definir los valores de frecuencias y amplitudes.

4.1.1.1- ¿Qué es suavizar una señal?

Suavizado de la señal es una técnica de serie de tiempo más utilizadas para eliminar el ruido de los datos subyacentes para ayudar a revelar las características importantes. El filtro medio es uno de los métodos de suavizado más simples.

El suavizado nos permite descubrir patrones importantes en nuestros datos mientras omitimos elementos que no son importantes (por ejemplo, ruido).

Utilizamos el filtrado para realizar este suavizado. El objetivo del suavizado es producir cambios lentos en el valor para que resulte más sencillo ver tendencias en nuestros datos.

4.1.2- Experimento 2

Los Figuras que se presentan a continuación están relacionados con la tabla 3.4.2.

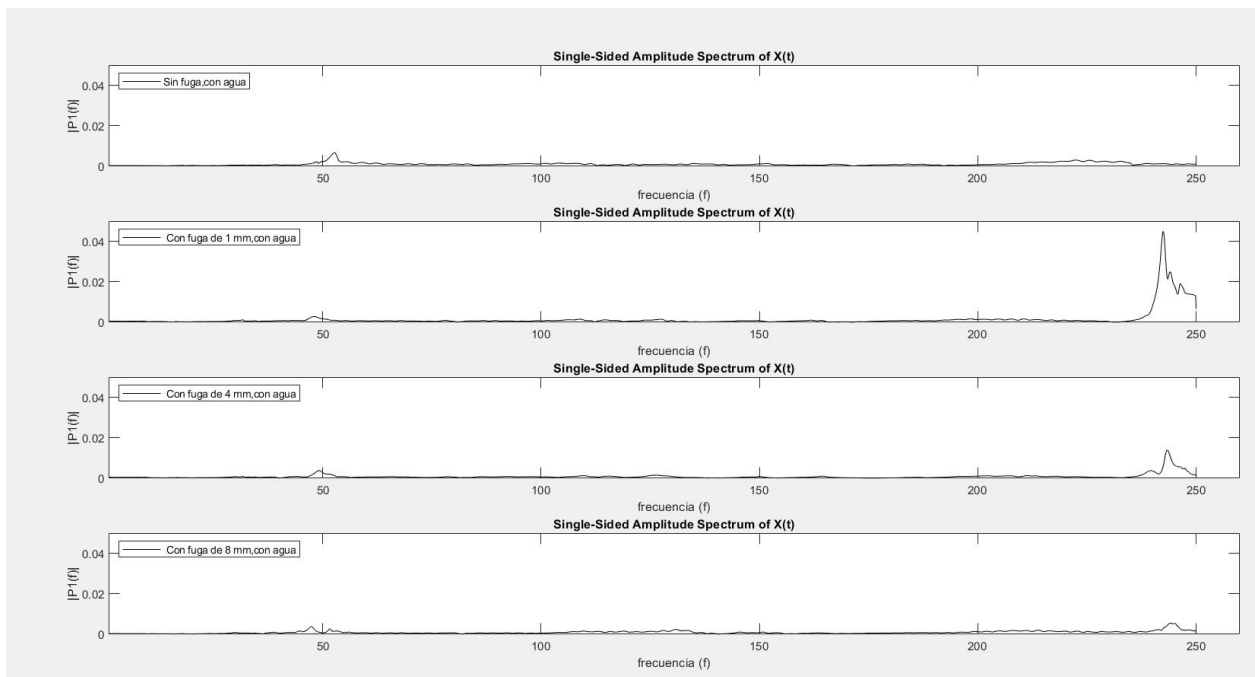


Figura 4.3: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 0.

Este caso es similar al caso de la gráfica 4.1, pero con la diferencia que a estos experimentos se le realizó un impacto con el MCL. El primer subFigura no tiene fuga de agua provocada, a diferencia del resto que si tienen salideros.

Se puede apreciar un único espectro de frecuencia cercano a 50 Hz para el primer caso y 245 Hz para el resto de los casos. Se puede considerar de manera gráfica las diferencias cuando existe o no existe fugas de agua.

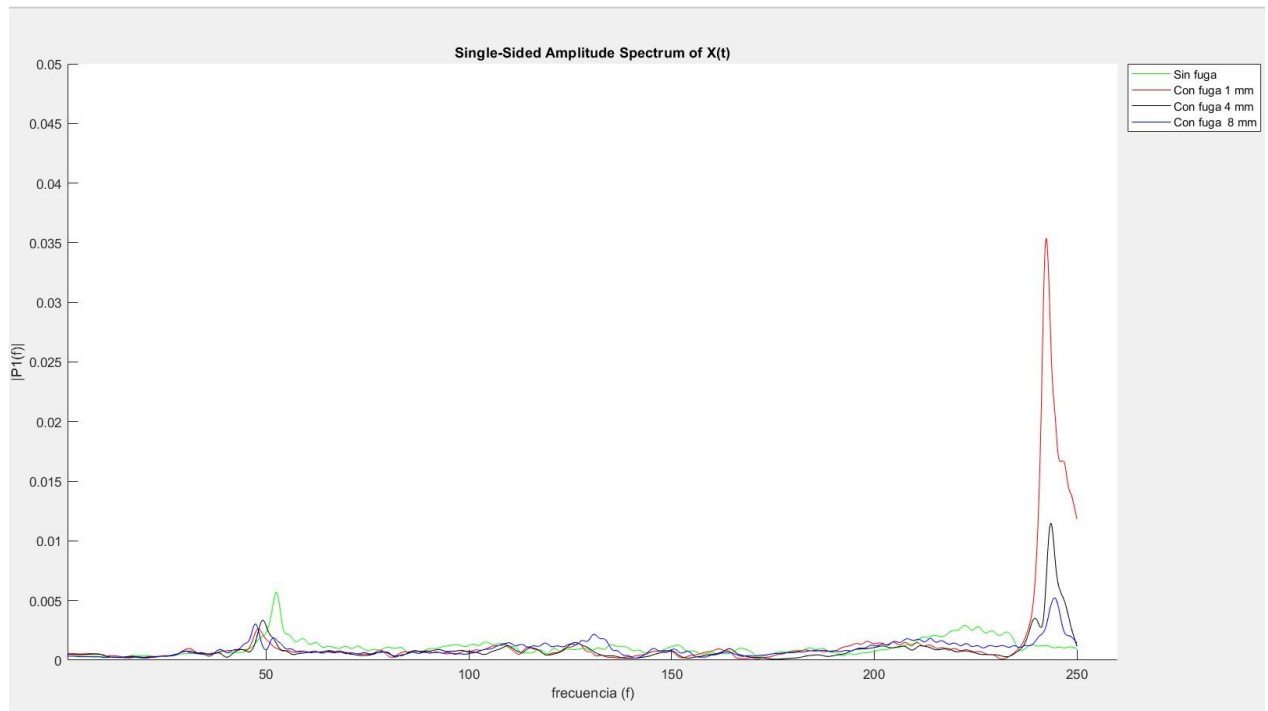


Figura 4.4: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Para apreciar con mayor facilidad, la diferencia de cuando carecemos o no de fugas; agrupe los 4 Figuras en uno.

Además, para un apoyo visual se le aplicó un comando para suavizar líneas y eliminar ruidos. Resaltando con mayor facilidad las discrepancias de cada Figura.



4.1.3- Experimento 3

En el caso del experimento 3, se tomaron los datos de la tabla 3.4.3, que conocemos que no hay flujo de agua y no se le realiza un impacto a la tubería.

Los Figuras que se presentan a continuación están relacionados con la tabla 3.4.3

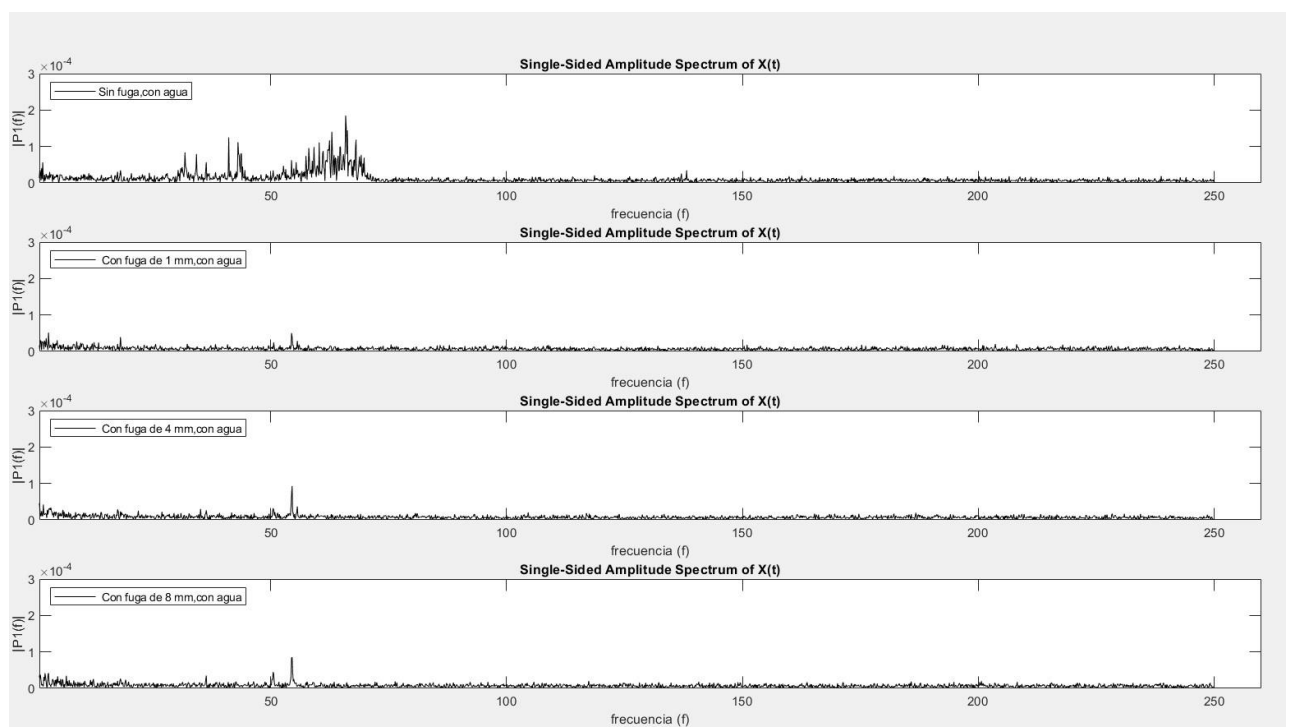


Figura 4.5: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.3, pero solo para el sensor 0.

Este caso tiene algunas peculiaridades como: la primera subFiguras es muy similar a la primera subFiguras del experimento 1 (grafico 3.4.1), pero con la pequeña diferencia que existe menos líneas espectrales de frecuencias alrededor de los 50 Hz y los espectros tienen menos valor de amplitudes. Esto es para en caso de no fuga.

Para el resto de los casos o sea cuando si hay fuga, desaparecen los espectros de frecuencias de 245 Hz y aparecen de forma leve en 50 Hz.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Esta teoría demuestra dos cosas: que la frecuencia natural de la tubería ronda los 50 Hz y que es muy complejo determinar las fugas sin hacer fluir algún flujo por la tubería (agua).

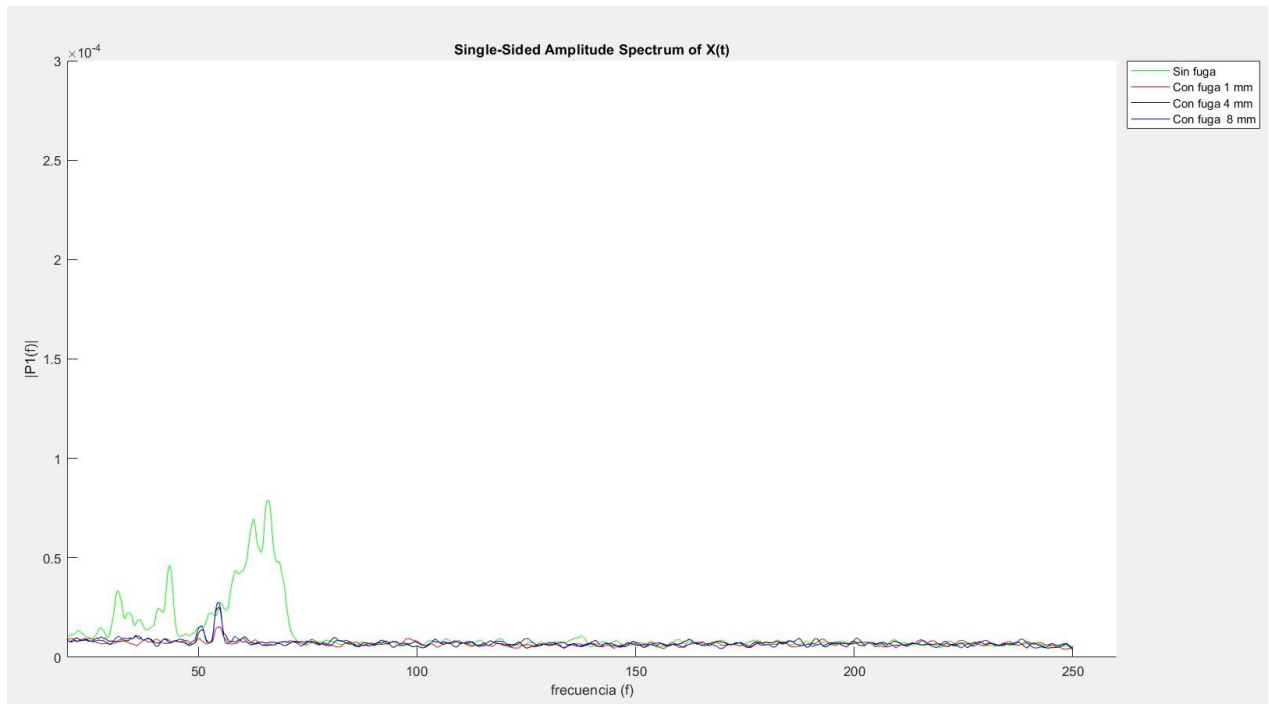


Figura 4.6: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.3, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

En el Figura 4.6 se muestra lo mencionado con anterioridad, con la diferencia que todos los subFiguras tienen un suavizado y están colocado en la misma gráfica para poder apreciar mejor las trayectorias de cada una de las subgráficas.

4.1.4- Experimento 4

Los siguientes Figuras presentan datos de la tabla 3.4.4. Que como se indica, en este experimento no fluye agua y si se impactó la tubería.

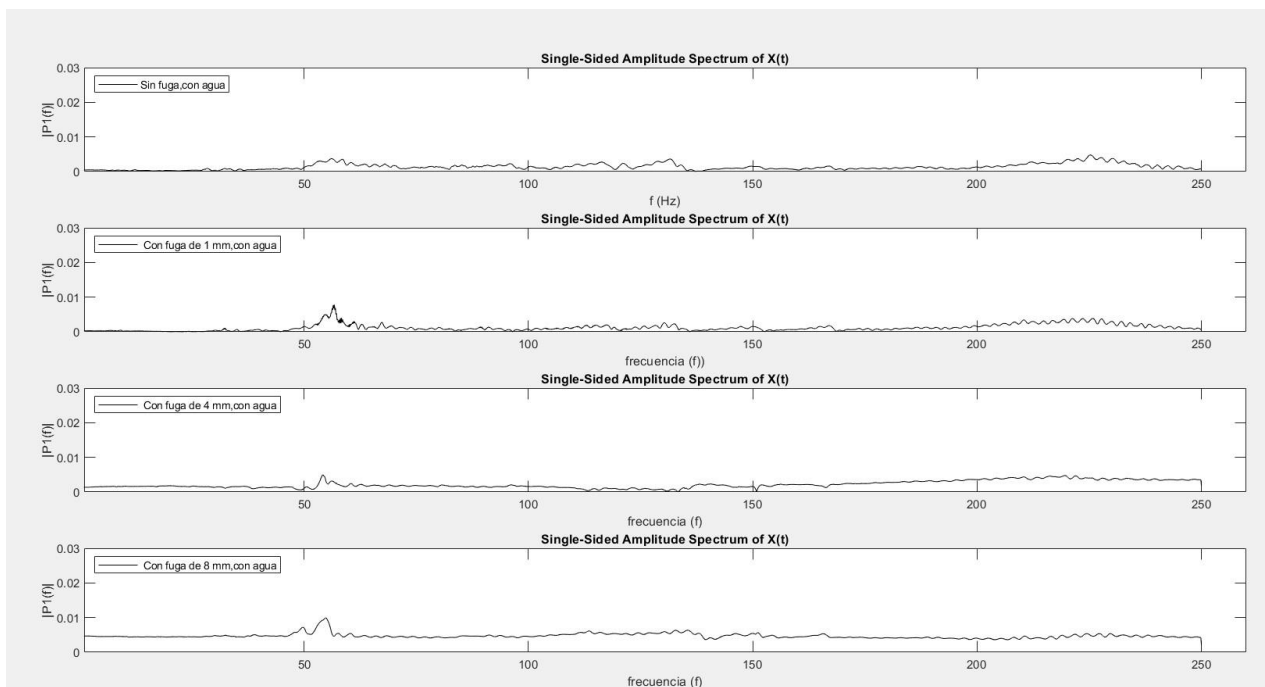


Figura 4.7: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 0.

La interpretación del Figura 4.7 necesita más análisis, pues no tiene un patrón definido de la ausencia de fuga o la ocurrencia de estas. Aparentemente lo único evidente son las líneas espectrales de frecuencia en aproximadamente 50 Hz, debido a la frecuencia natural de la tubería o al impacto e incluso a ambos.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

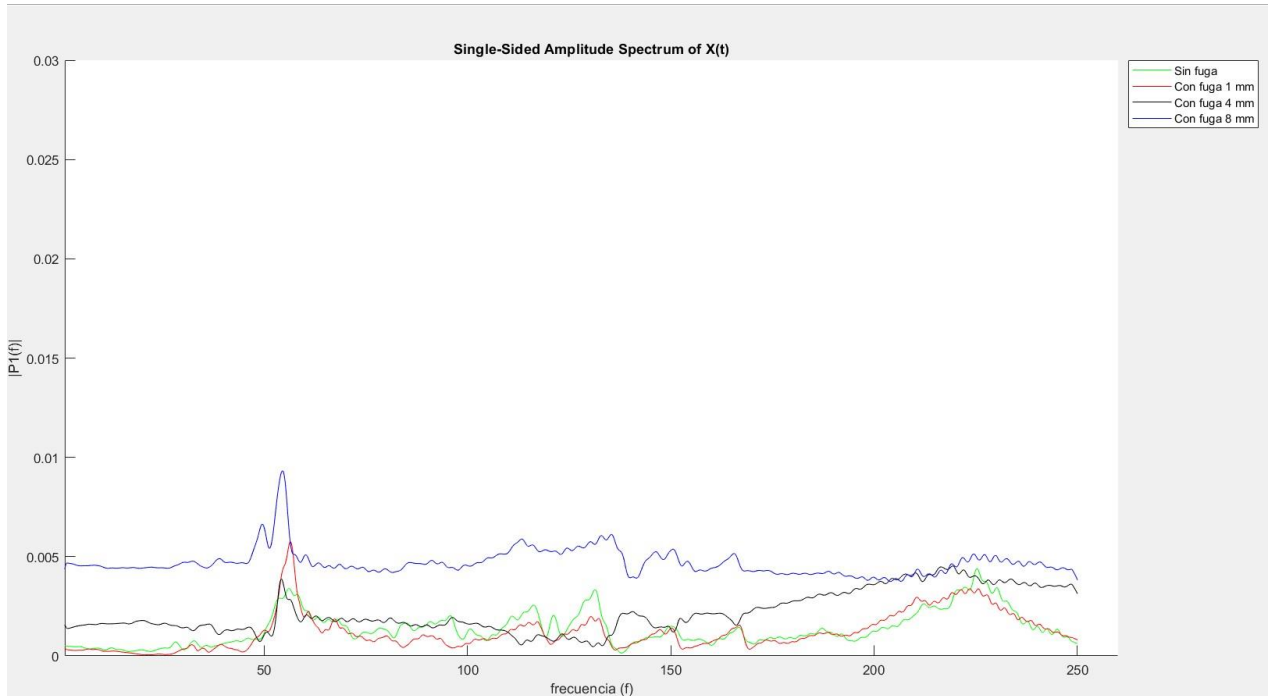


Figura 4.8: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Para este Figura 4.8 se muestran las señales suavizadas para poder distinguir las trayectorias de cada una. Arrojando una interpretación que solo existe picos en los 50 Hz de frecuencia aproximadamente y con mucha variación las sus amplitudes.



4.1.5- Experimento 5

Los Figuras que se presentan a continuación están relacionados con la tabla 3.4.5.

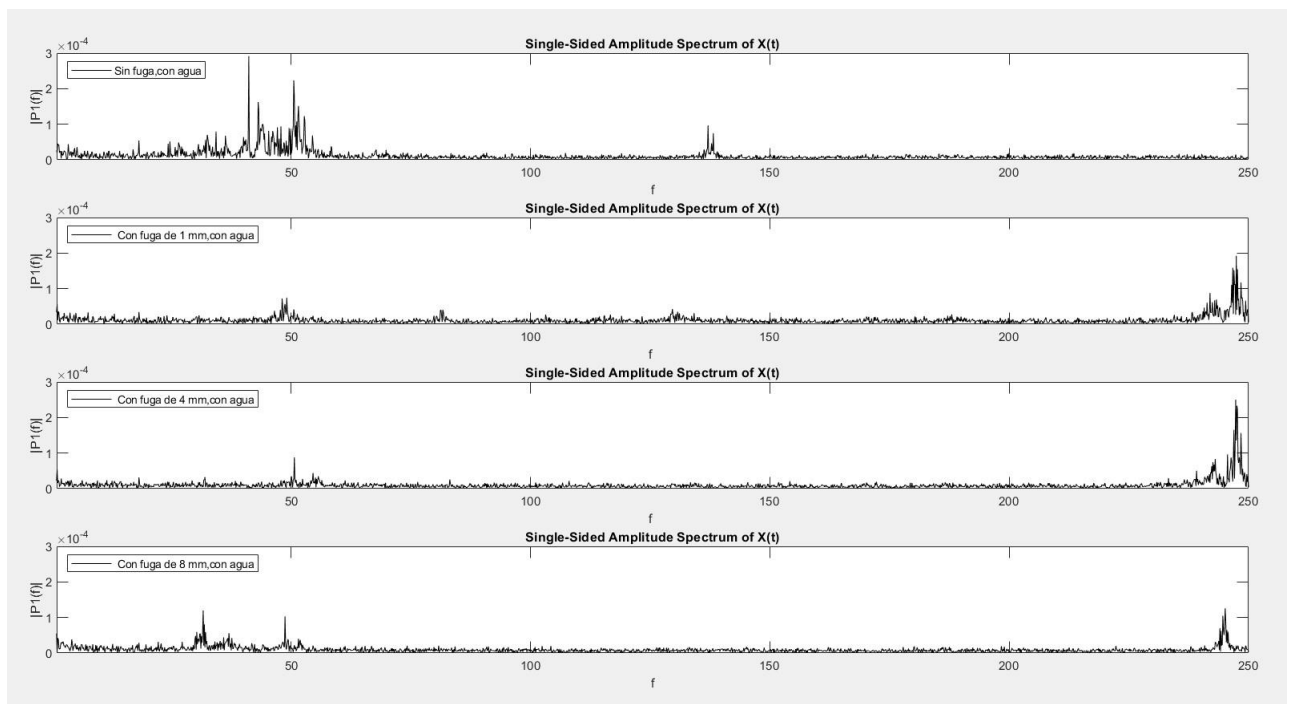


Figura 4.9: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.5 pero solo para el sensor 0.

Se puede apreciar en la gráfica 4.9 que está compuesta por 4 subgráficas, donde la primera no tiene fugas y las tres restantes si tienen fuga. Donde se puede ver con en el primer caso se crea un conjunto de espectros entorno a la frecuencia de 50 Hz y a medidas que existe la fuga e incluso aumenta su diámetro esa frecuencia se desplaza a los 245 Hz.

Además, se puede apreciar que existe una disminución de la frecuencia a medida que aumenta el diámetro de la fuga.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

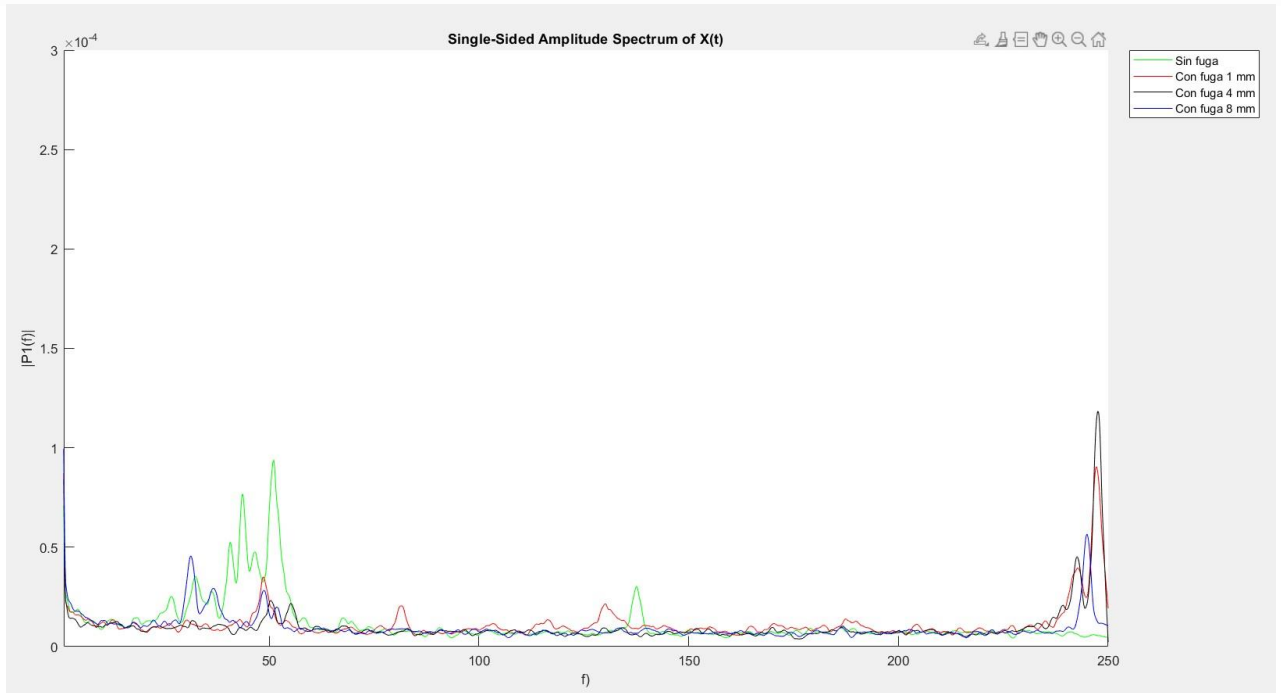


Figura 4.10: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.5, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Esta gráfica es muy parecida a la gráfica 4.10, pues la gran diferencia es que se agruparon todas las subgráficas y se señalaron con un color. Además, se le aplicó un comando en MatLab para suavizar las señales. El objetivo de este comando (smooth) es para que se pueda apreciar mejor y elimina el ruido. Con este comando se distingue la trayectoria de cada señal y no se aglomera una encima de la otra impidiendo definir los valores de frecuencias y amplitudes.

4.1.6- Experimento 6

Los Figuras que se presentan a continuación están relacionados con la tabla 3.4.6.

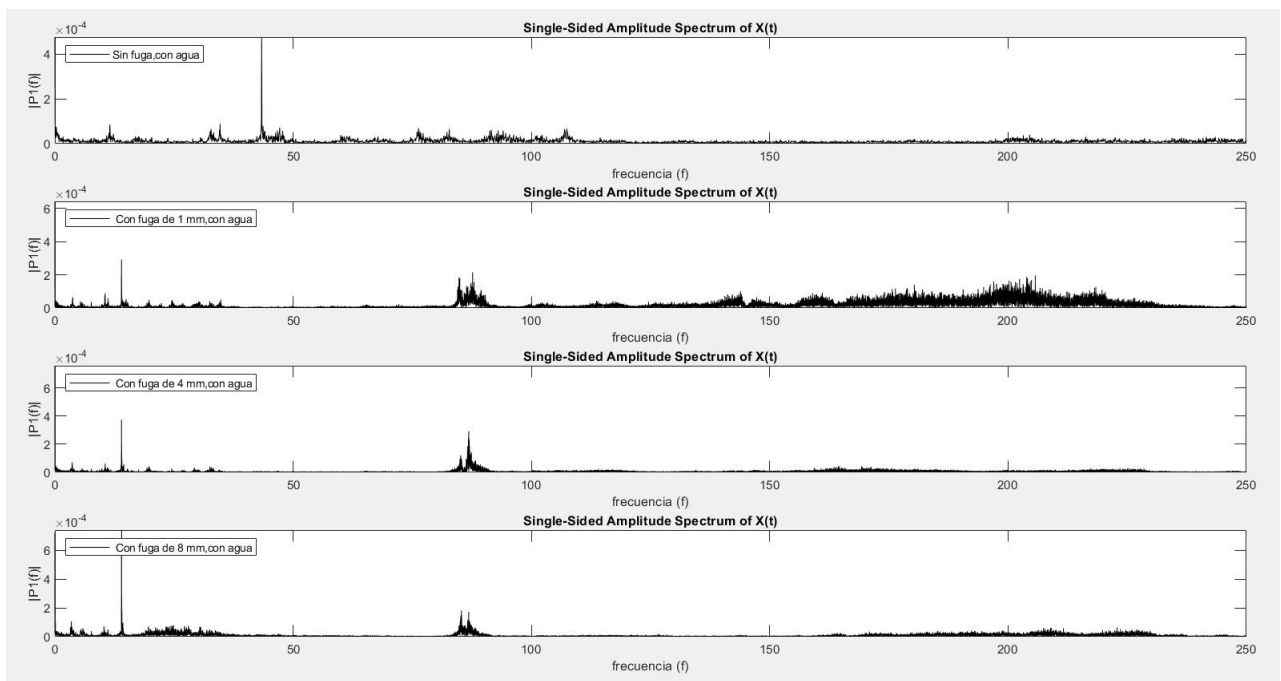


Figura 4.11: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.6 pero solo para el sensor 0.

Se puede apreciar en la gráfica 4.11 que está compuesta por 4 subgráficas, donde la primera no tiene fugas y las tres restantes si tienen fuga. Donde se puede ver con en el primer caso se crea un conjunto de espectros entorno a la frecuencia de 50 Hz y a medidas que existe la fuga e incluso aumenta su diámetro esa frecuencia se desplaza a los 20 Hz y 80 Hz. Esto quiere decir que al aumentar la frecuencia de 500 Hz a 5000Hz se puede apreciar más información, pero para no afectar la eficiencia computacional y demostrando que con 500 Hz y 1000 Hz se puede detectar las fugas no se tendrá en vigor estos resultados.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

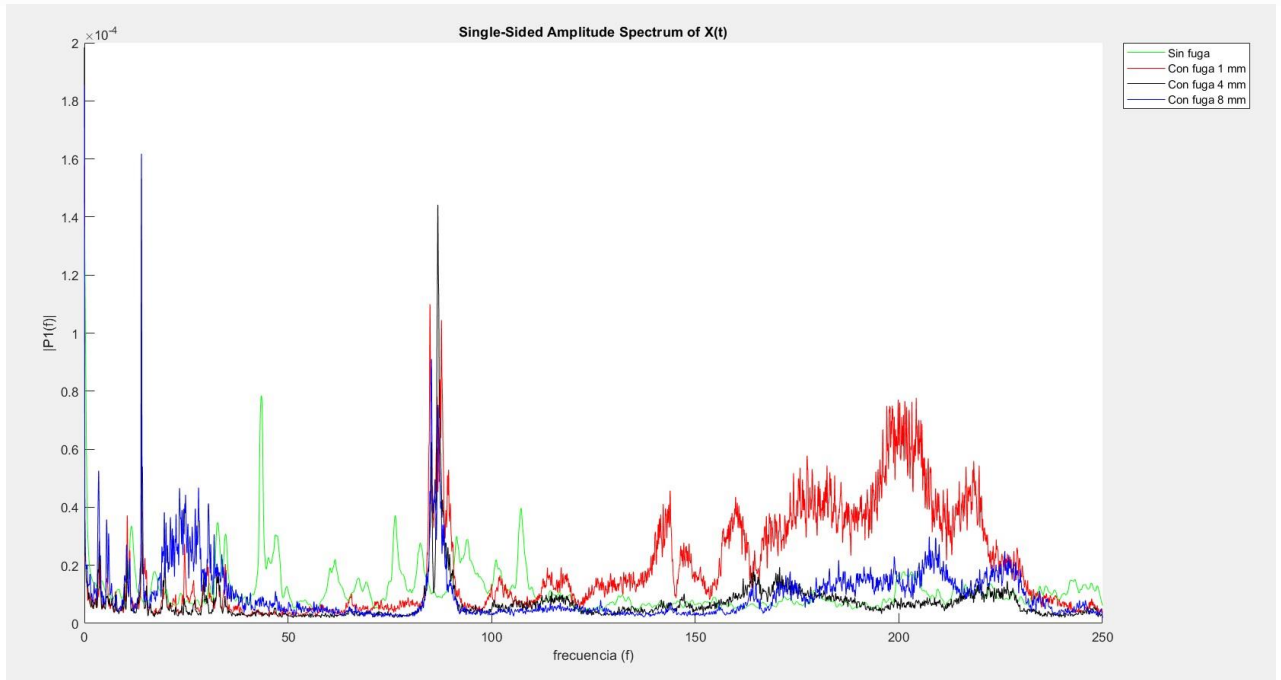


Figura 4.12: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.6, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Esta gráfica es muy parecida a la gráfica 4.12, pues la gran diferencia es que se agruparon todas las subgráficas y se señalaron con un color. Además, se le aplicó un comando en MatLab para suavizar las señales. El objetivo de este comando (smooth) es para que se pueda apreciar mejor y elimina el ruido. Con este comando se distingue la trayectoria de cada señal y no se aglomera una encima de la otra impidiendo definir los valores de frecuencias y amplitudes.

4.2- Interpretación final.

Todos los experimentos mostrados hasta el momento son correspondientes al sensor 0. Donde este sensor 0 está ubicado en el lado izquierdo de la fuga con respecto al operario, o sea esta más alejado de la entrada de agua. Esta información se puede apreciar en el diseño de la tubería Figura 4.3.

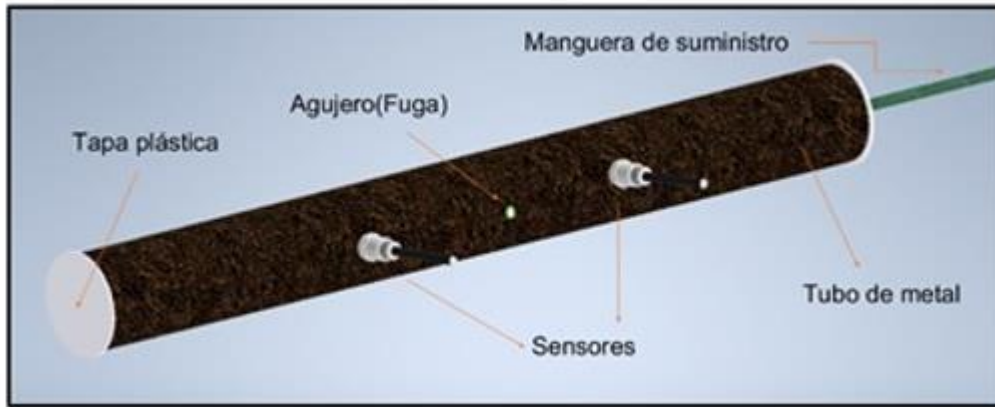


Figura 4.13: Muestra el diseño de la tubería con sus sensores.

Para el caso del sensor 1 que se encuentra ubicado en la zona derecha de la fuga con respecto al operario, o sea la más cercana a la entrada de agua. Esta información se puede apreciar en el diseño de la tubería Figura 4.13. Se aprecia que las gráficas tienen el mismo comportamiento que las del sensor 0. Además, se trabajaron bajo las mismas condiciones. Las Figuras correspondientes al sensor 1 se mostrarán en los anexos con el objetivo de publicarlos, pero no dilatar el contenido de esta tesis. Las explicaciones coinciden con los del sensor 0.

4.3- Descomposición Empírica en Modos.

En este epígrafe muestra un método diferente al cual estoy trabajando. Se realizó por una sugerencia de mi tutor de tesis, para generar un método adicional de comprobación de los resultados. Esta técnica solo genera robustes a los resultados obtenidos, pues se pudo comprender a través de otra dinámica los experimentos realizados durante este período.

El objetivo principal de la Descomposición Empírica en Modos (EMD, por sus siglas en inglés: Empirical Mode Decomposition) es analizar y descomponer señales no lineales y no estacionarias en componentes llamadas "modos intrínsecos" o "IMFs" (Intrinsic Mode Functions).

Esta técnica fue desarrollada para abordar la dificultad de analizar señales complejas que no cumplen con las condiciones de estacionariedad y linealidad, que son requerimientos comunes para muchos métodos de análisis de señales.

Los objetivos específicos de la EMD son:

Descomposición adaptativa: La EMD realiza una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos que representan diferentes componentes frecuenciales y de escala temporal presentes en la señal.

Análisis de no linealidades y no estacionariedades: La EMD es especialmente útil para analizar señales que exhiben cambios en su comportamiento a lo largo del tiempo y no pueden ser fácilmente representadas como la suma de componentes sinusoidales estacionarios.

Identificación de estructuras locales: Los modos intrínsecos capturan características locales de la señal, permitiendo el análisis detallado de eventos o patrones específicos en diferentes escalas temporales.

Adaptabilidad a la forma de la señal: La EMD se adapta automáticamente a la forma de la señal y no requiere asunciones a priori sobre la forma de las funciones a descomponer.

Esta técnica se ha utilizado en diversas áreas, como el análisis de señales biomédicas, el procesamiento de imágenes, la geofísica, entre otros campos donde las señales no lineales y no estacionarias son comunes.

4.4- Funciones de Modo Intrínseco.

Las Funciones de Modo Intrínseco (IMFs, por sus siglas en inglés, Intrinsic Mode Functions) que se obtienen mediante la Descomposición Empírica en Modos (EMD) se utilizan para varios propósitos en el análisis de señales. Aquí hay algunas aplicaciones comunes de las IMFs:

Análisis de Componentes Frecuenciales: Cada IMF representa una componente



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



frecuencial en la señal original. Esto permite analizar la señal en términos de diferentes frecuencias presentes en ella. Las IMFs suelen tener características bien definidas en términos de frecuencia y tiempo.

Identificación de Patrones Locales: Las IMFs pueden capturar patrones locales en la señal, lo que facilita la identificación de eventos específicos o cambios en el comportamiento de la señal a lo largo del tiempo.

Análisis de Escala Temporal: Cada IMF representa una escala temporal específica, lo que permite analizar la señal en función de diferentes escalas temporales. Esto es útil para identificar características en diferentes niveles de detalle.

Filtrado Adaptativo: Las IMFs se pueden utilizar como filtros adaptativos para extraer componentes específicas de la señal. Al seleccionar ciertas IMFs, se puede obtener una representación filtrada de la señal original.

Compresión de Señales: En algunos casos, las IMFs pueden utilizarse para representar la señal original de manera más eficiente, lo que facilita el almacenamiento y la transmisión de datos.

Procesamiento de Señales Biomédicas: En el campo de la biomedicina, la EMD se ha utilizado para analizar señales como el electrocardiograma (ECG) y el electromiograma (EMG), donde las características no lineales y no estacionarias son comunes.

Es importante señalar que la EMD y las IMFs son herramientas poderosas, pero su aplicación específica dependerá del tipo de señal y del objetivo del análisis.

4.5- Cálculos de las IMFs.

El cálculo de las Funciones de Modo Intrínseco (IMFs) mediante la Descomposición Empírica en Modos (EMD) es un proceso iterativo que implica la identificación de máximos y mínimos locales en la señal original. A continuación, se proporciona una descripción general del proceso matemático para obtener una IMF:

Identificación de Máximos y Mínimos:

Encuentra todos los máximos y mínimos locales en la señal original. Estos puntos se utilizan para construir las "envolventes" superior e inferior de la señal.

Interpolación de Envoladuras:

Interpola las envolventes superior e inferior para obtener dos funciones suaves.

Promedio de Envoladuras:

Calcula la media entre las envolventes superior e inferior para obtener la llamada "envolvente media".

Extracción de Detalle:

Resta la envolvente media de la señal original para obtener un "detalle". Este detalle se considera una primera aproximación al primer modo intrínseco.

Verificación de Criterios de IMF:

Verifica si el detalle satisface ciertos criterios que lo hacen considerar una IMF. Estos criterios incluyen el número de ceros y polos, y la simetría con respecto a cero.

Iteración:

Si el detalle no satisface los criterios, repite el proceso utilizando el detalle actual como la nueva señal original. Se repite este proceso hasta que se obtiene una IMF.

Este proceso se repite para cada IMF. En cada iteración, se obtiene una IMF que representa una componente específica de la señal original en términos de frecuencia y escala temporal. El proceso continúa hasta que se extraen todas las IMFs, y la suma de estas IMFs y un residuo representa la señal original.

Es importante destacar que el cálculo preciso de las IMFs implica detalles matemáticos y algoritmos específicos. La EMD puede ser implementada mediante algoritmos que automatizan estos pasos para hacer el proceso eficiente y práctico en el análisis de señales.

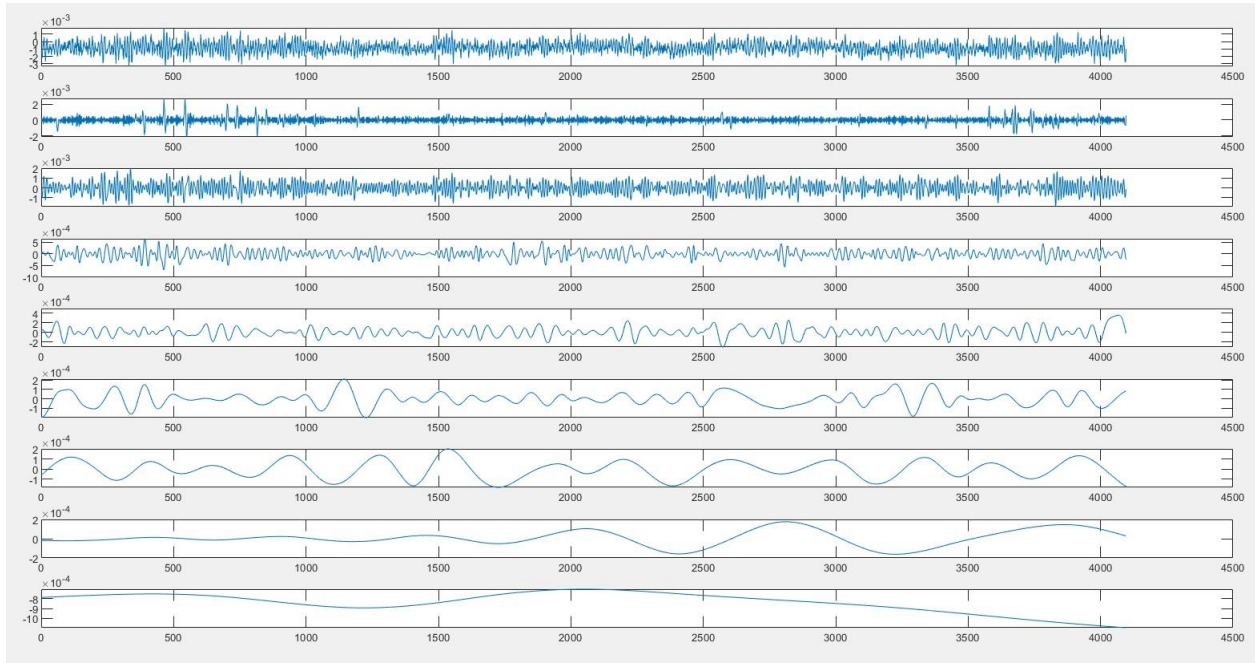
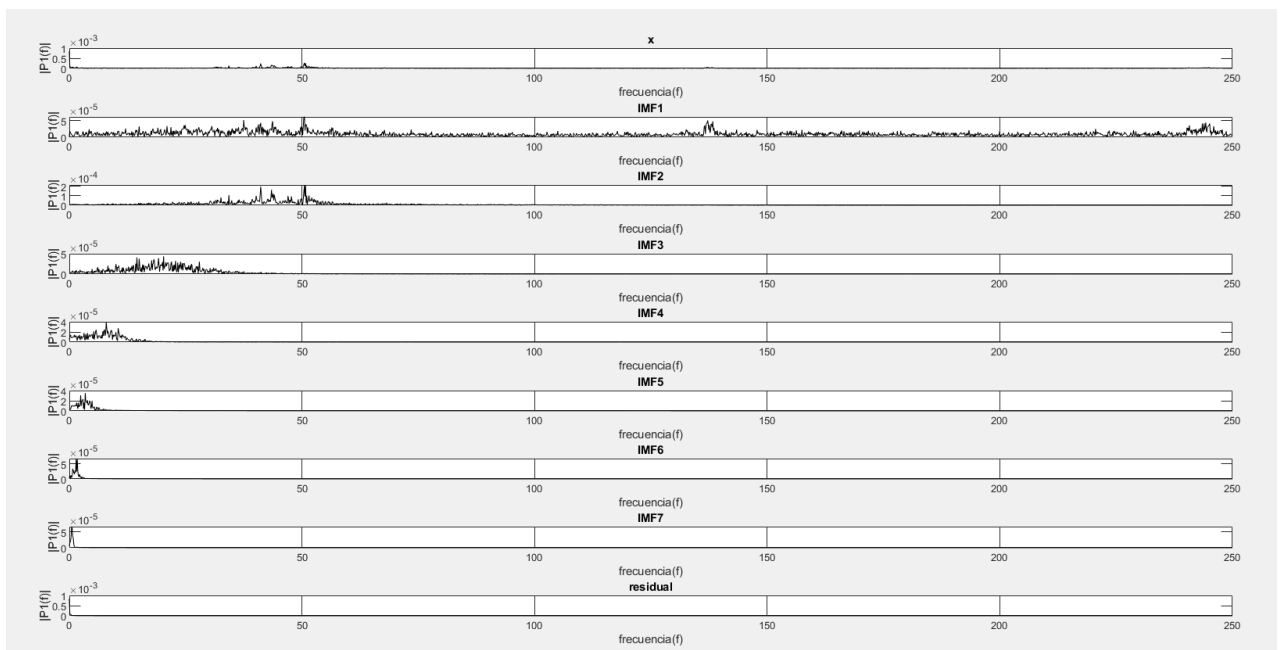


Figura 4.14: Muestra una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos. Esta gráfica 4.14 muestra la señal correspondiente al experimento número 1, que se le ha aplicado el método de EMD. La gráfica muestra hasta 7 descomposiciones que posteriormente se le aplicara a cada una de ella la FFT indistintamente. Así se podrá apreciar cuál de las señales resultantes nos he más útil para nuestro trabajo.



Gráfica 4.15: Muestra una descomposición adaptativa de la señal en modos



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



intrínsecos, aplicándole la FFT.

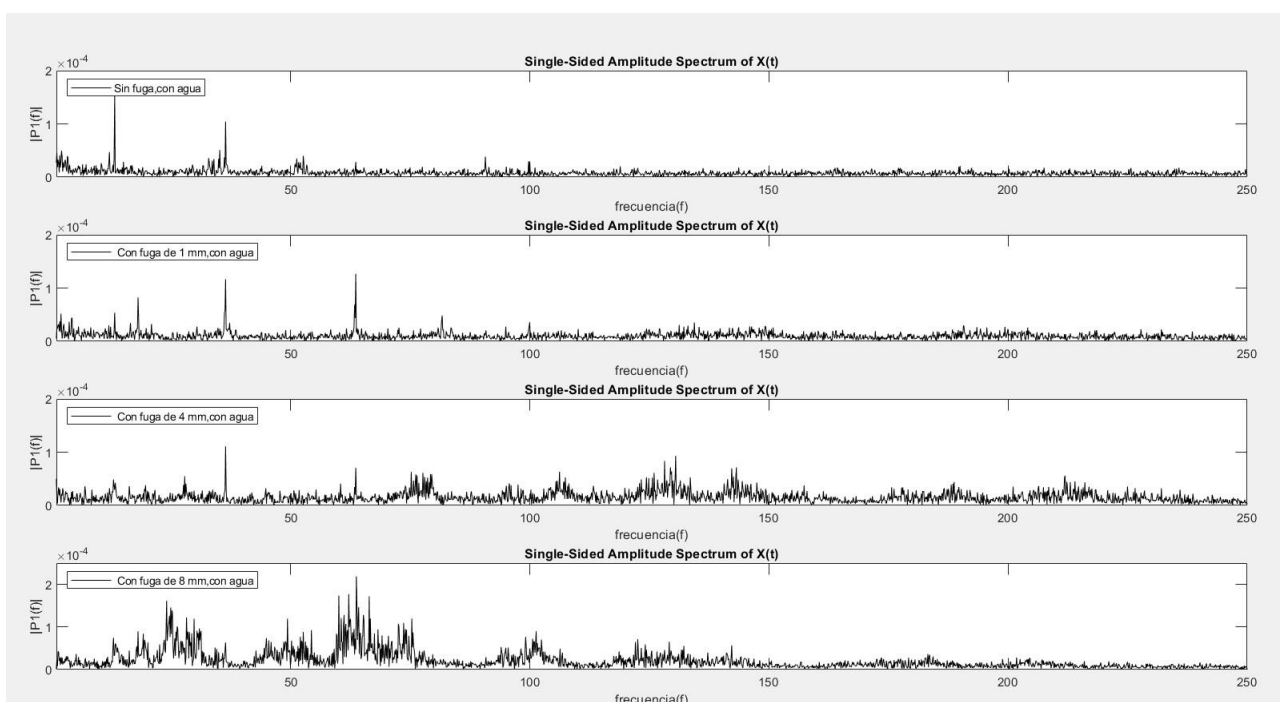
En la gráfica 4.15 se muestra FFT de cada subseñal correspondiente a la gráfica 4.14 anterior. Se debe recordar que esta señal se adquirió del experimento que no presenta fugas.

Se procesaron todos los casos del experimento 1 (o sea sin fuga y con variación de fugas). Demostrando que solo aplicando la FFT a la IMF1 se podía obtener resultados similares a los adquiridos anteriormente.

Todos los Figuras se muestran en los anexos con su debida explicación, con la finalidad de no extender y confundir a los futuros lectores.

4.4- Figuras correspondientes a los experimentos con tuberías plásticas.

Los Figuras que se presenta a continuación son experimentos con tuberías plásticas, presentan las mis más condiciones que los experimentos anteriores o sea con tuberías metálicas. Los resultados tuvieron un comportamiento diferente, aunque se puede notar las diferencias entre cuando existe fugas y cuando no las hay.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Figura 4.16: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.1, pero solo para el sensor 0.

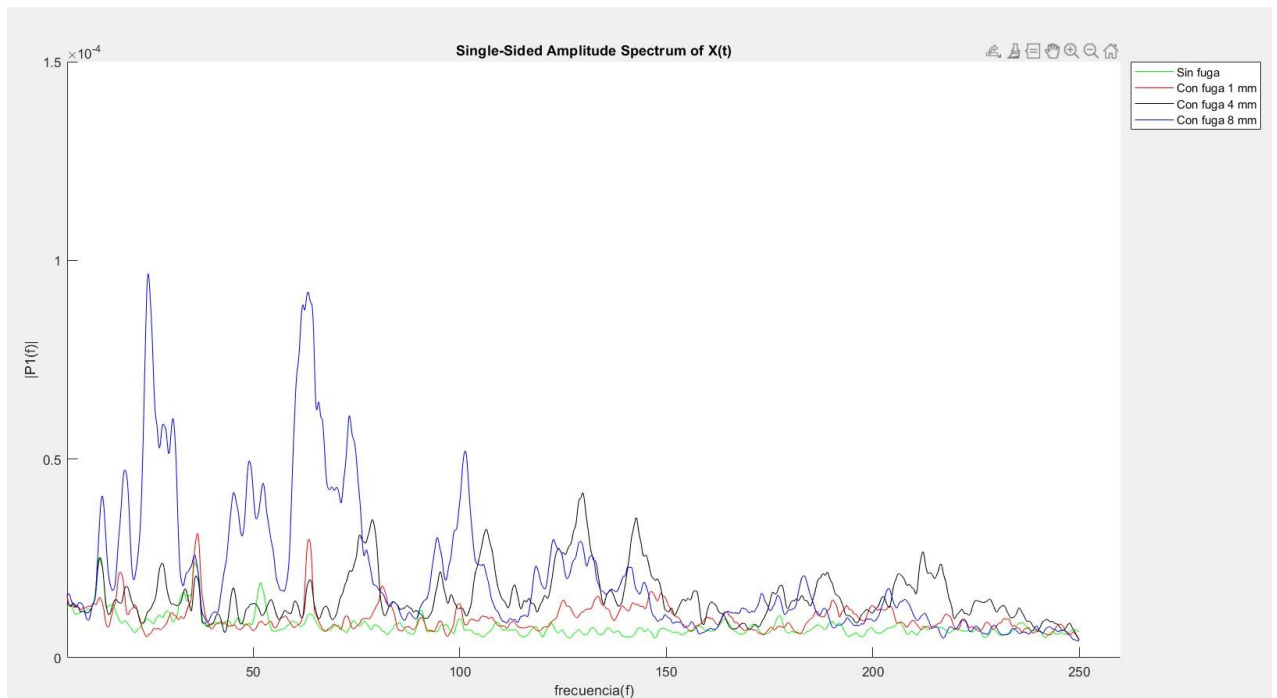


Figura 4.17: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.1, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Estos Figuras 4.16 y 4.17 muestran que el primer subgrafico o sea de color verde no presenta fugas, y sus componentes de frecuencias más predominantes están ubicada a baja frecuencia o sea antes de 50 Hz. Sin embargo, el resto de los subgraficos o sea de colores rojo, negro y azul van aumentando las cantidades de espectros de frecuencias de manera significativas, aunque la mayoría de ellos siguen en bajas frecuencias. Este caso tiene una frecuencia de muestreo de 500 Hz.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

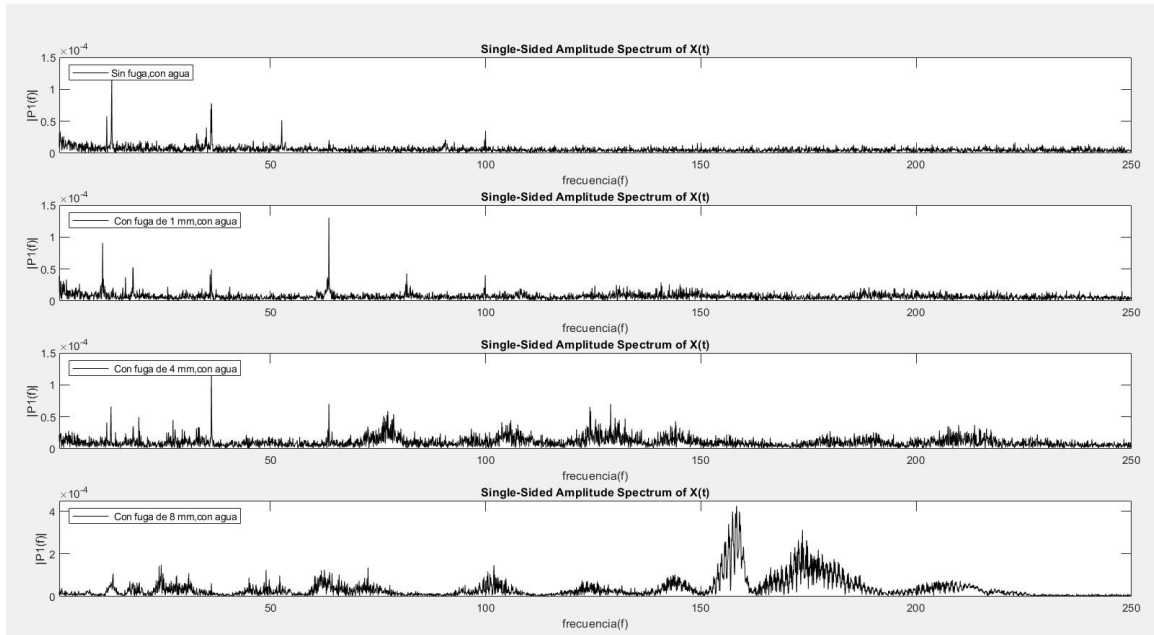


Figura 4.18: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.2, pero solo para el sensor 0.

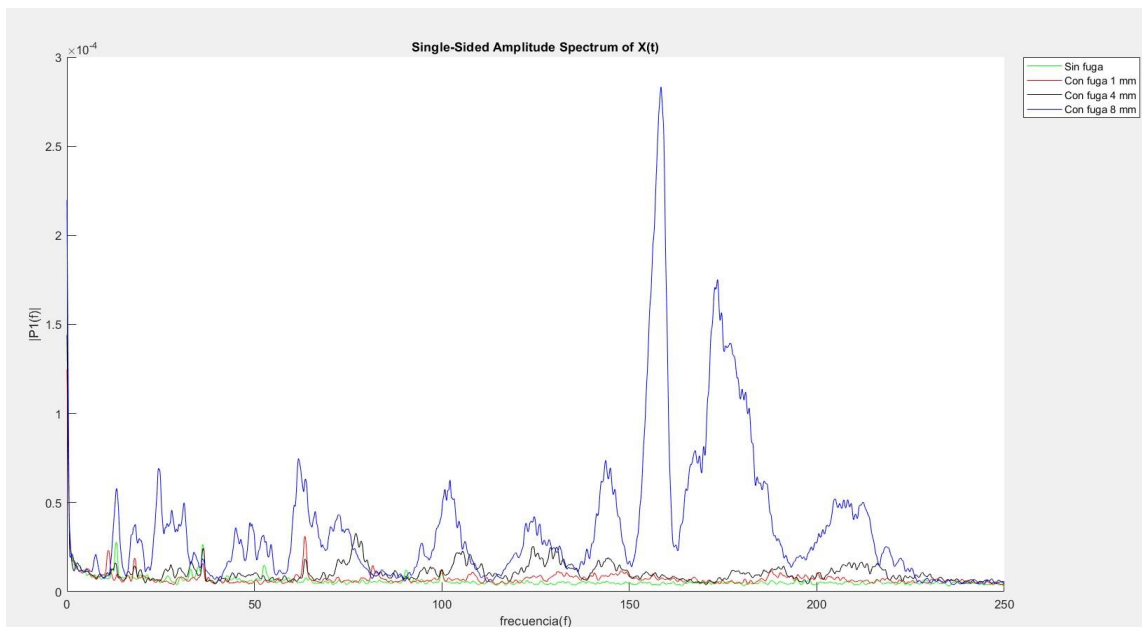


Figura 4.19: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.2, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

estas Figuras 4.18 y 4.19 muestran que el primer subgrafico o sea de color verde no



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



presenta fugas, y sus componentes de frecuencias más predominantes están ubicada a baja frecuencia o sea antes de 50 Hz. Sin embargo, el resto de los subgraficos o sea de colores rojo, negros y azul van aumentando las cantidades de espectros de frecuencias de manera significativas, aunque la mayoría de ellos siguen en bajas frecuencias. Este caso tiene una frecuencia de muestreo de 1000 Hz. Los resultados son similares al caso anterior.

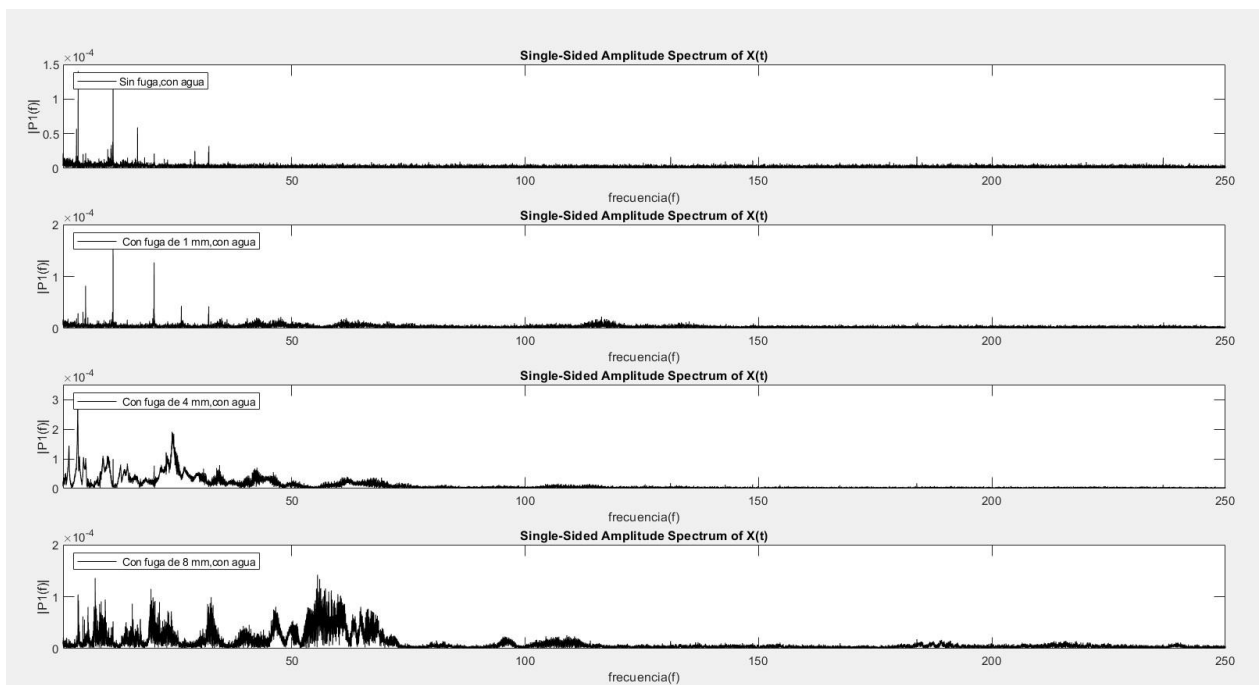


Figura 4.20: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.3, pero solo para el sensor 0.

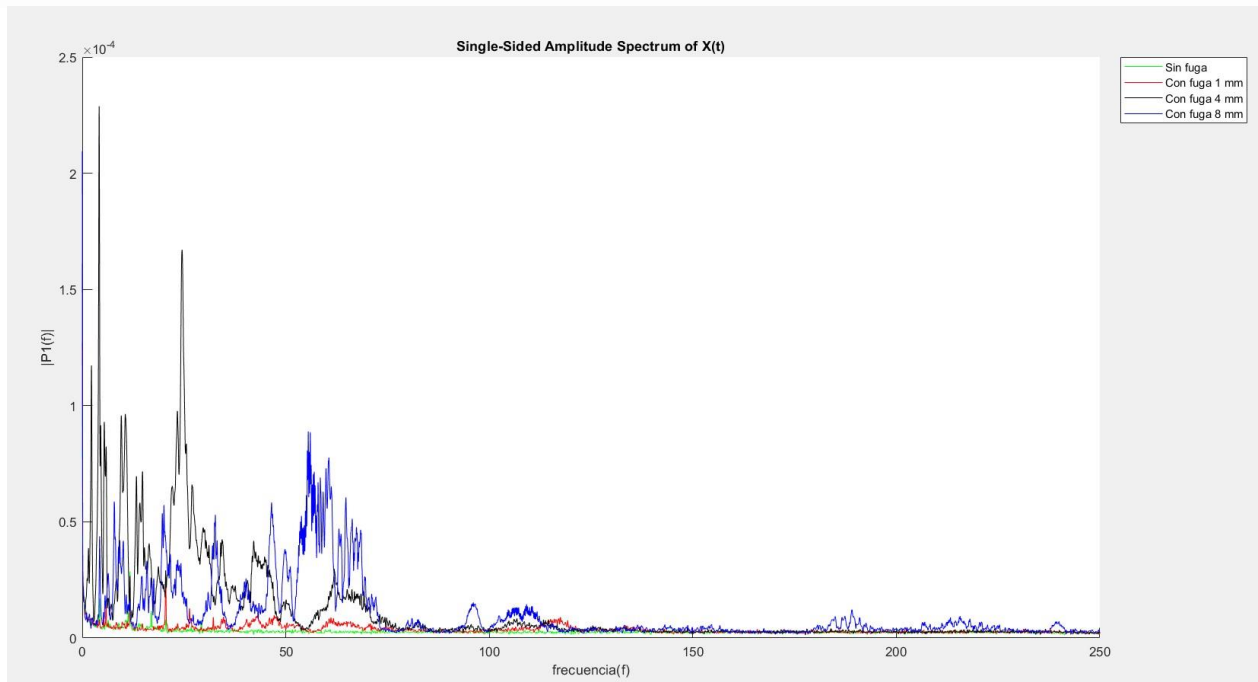


Figura 4.21: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.6.3, pero solo para el sensor 0, Figura complementario.

Estos Figuras 4.20 y 4.21 muestran que el primer subgrafico o sea de color verde no presenta fugas, y sus componentes de frecuencias más predominantes están ubicada a baja frecuencia o sea antes de 50 Hz. Sin embargo, el resto de los subgraficos o sea de colores rojo, negros y azul van aumentando las cantidades de espectros de frecuencias de manera significativas, aunque la mayoría de ellos siguen en bajas frecuencias. Este caso tiene una frecuencia de muestreo de 5000 Hz. Los resultados son similares a los casos anteriores.

Debo comentar que existe diferencias notables entre los experimentos de tuberías metálicas y plásticas. Aunque se puede determinar en ambos casos si existen fugas de agua o no. Pero es más evidente en las tuberías metálicas. [51] [52]



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



4.5- Conclusiones.

La herramienta de la FFT demuestra ser apropiada para la detección de fugas, ya que se notan corrimientos de líneas espectrales cuando hay fuga y cuando no las hay. También se notan espectros de composición espectral distinta cuando se realiza la FFT sobre espectros de fugas de distintos diámetros, presencia de flujo y de impacto en la tubería.

Al analizar las gráficas correspondientes al sensor 0 se puede apreciar:

Que existen diferencias notables cuando hay fugas de cuando no las hay. Estas diferencias se pueden apreciar en los espectros de frecuencias. En caso de no existir fugas las frecuencias predominantes son bajas y cuando hay fugas las frecuencias tienden a ser mayores. Esta conclusión solo es cuando la frecuencia de muestreo es de 500 Hz y existe un flujo de agua en la tubería. Tubería metálica.

Sucedo un evento similar cuando la frecuencia de muestreo es de 1000 Hz y fluye agua en la línea. Además, que la tubería es de metal.

El flujo de agua es importante para detectar fugas, pues se aprecia mejor las diferencias entre los casos. Cuando no fluye agua por la línea el comportamiento de los espectros de frecuencias se comporta de manera inestable, siendo difícil determinar si hay fuga o no.

Para el caso con flujo de agua con impacto o sin él, los casos de no fugas siempre tienen espectros de frecuencia en el orden de los 50 Hz (baja frecuencia) y con fuga alrededor de 245 Hz (alta frecuencia).

Las tuberías ya sea con impacto o sin él presenta el mismo comportamiento, tengan el mismo flujo, material y dimensiones.

Los experimentos que se realizaron con frecuencia de muestreo de 500 Hz y 1000 Hz respectivamente, tuvieron resultados similares. Se puede apreciar en ambos casos resultados satisfactorio. Pero cuando se aumenta la frecuencia de muestreo a 5000 Hz los resultados difieren un poco entre los casos anteriores.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Esto se puede explicar que al aumentar la frecuencia de muestreo existe una mayor información de los datos a analizar. Por lo que se sugiere no aumentar esta frecuencia de muestreo para no afectar la eficiencia computacional.

Al analizar los resultados correspondientes con el sensor 1 se puede apreciar que son parecidos a los del sensor 0, lo que significa que no importa la posición del sensor respecto a la fuga, si no la distancia que se encuentre de ella.

En estos casos los sensores estuvieron como máximo a 20 cm de distancia de la fuga.

Los experimentos realizados para la tubería plástica arrojaron resultados diferentes en comparación con la tubería metálica. Estos experimentos en tubería plástica se realizaron con flujo y con frecuencia de muestreo de 500 ,1000 y 5000 Hz respectivamente.

Para las tres frecuencias de muestreo, en caso de no fuga los espectros de frecuencias tiende a ser bajas.

Para las tres frecuencias de muestreo, en caso de con fuga los espectros de frecuencias tienden a ser bajas, pero tiende a existir una mayor cantidad de espectros definidos.

Los datos que se procesaron con EMD arrojaron resultados similares a los anteriores con la FFT. Solo se necesitó una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición o sea IMF1, para obtener un resultado favorable para la detección de fugas.

Se realizaron un conjunto de experimentos a lo largo del estudio, modificando el material de las tuberías, el tipo de flujo, la frecuencia de muestreo, los diámetros de las fugas, y se analizaron con impacto y sin él. Se debe mencionar que el experimento con mejor resultado fue con el numero 1 o sea tubería de metal, de 500 Hz de Fm y con flujo de agua.

Vale comentar que los valores de frecuencias que aparecen en las gráficas y no



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



presentan unidad de medida, es solo a que se debe a la frecuencia de natural o sea la derivada de la FFT y el resto de los valores que si están en Hz pertenece a las FM o frecuencia en sí. Estos conceptos están explicados con más detalle al inicio de la tesis.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Bibliografía

- [1] A. Ciicap, S. Tonatiuh, and O. Ortiz, "Dr. Said Robles Casolco," 2019.
- [2] I. E. Karadirek, "URBAN WATER LOSSES MANAGEMENT IN TURKEY: THE LEGISLATION and CHALLENGES," *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. Appl. Sci. Eng.*, vol. 17, no. 3, Oct. 2016, doi: 10.18038/btda.67184.
- [3] Y. Gao, M. J. Brennan, Y. Liu, F. C. L. Almeida, and P. F. Joseph, "Improving the shape of the cross-correlation function for leak detection in a plastic water distribution pipe using acoustic signals," *Appl. Acoust.*, vol. 127, pp. 24–33, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.05.033.
- [4] C. Rodriguez, I. Mamani, and A. H. Cognetta, "SMARTWATER para la detección de fugas de agua," pp. 1051–1060, 2019.
- [5] O. Hunaidi, A. Wang, M. Bracken, T. Gambino, and C. Fricke, "Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe networks," *Int. Water Demand Manag. Conf.*, pp. 1–14, 2004, [Online]. Available: <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs%5Cnhttp://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc47062/nrcc47062.pdf>
- [6] M. A Y, O. A.O., S. E.G., and A. G.O, "Design of a Pipeline Leakage Detection System," *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.*, vol. 4, no. 5, pp. 103–110, 2017, doi: 10.22161/ijaers.4.5.17.
- [7] G.-M. A. Luis, S. A. Rodríguez Marco, and O. Franco Christopher de Jesús, "Diseño de un Interfaz para la detección de fugas de agua 1 A design of a water-leakage detection interface." [Online]. Available: <http://www.revista.unam.mx/vol.11/num2/art23/int23.htm>
- [8] "PUBLISHED BY THE NATIONAL ENVIRONMENTAL SERVICES CENTER."
- [9] OBUM, "Indicadores de consumo de agua," vol. 01, no. 777, pp. 1–5, 2015, [Online]. Available: <http://obum.zmcuernavaca.morelos.gob.mx/pdf/2-Indicadores-extensivos/8-consumo-de-agua.pdf>
- [10] "Morelos Rinde Cuentas: Sapac, al borde del colapso." <https://www.morelosrindecuentas.org.mx/sapac/> (accessed Apr. 06, 2022).
- [11] Ú. Oswald Spring, "Aquatic systems and water security in the Metropolitan Valley of Mexico City," *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 3, no. 6, pp. 497–505, 2011, doi: 10.1016/j.cosust.2011.11.002.
- [12] "La Jornada - Falta de agua en Cuernavaca, por adeudo del Sapac: CFE." <https://www.jornada.com.mx/notas/2021/08/15/estados/falta-de-agua-en-cuernavaca-por-adeudo-del-sapac-cfe/> (accessed Apr. 06, 2022).
- [13] L. Velazquez, N. Munguia, and M. Ojeda, "Optimizing water use in the University of Sonora, Mexico," *J. Clean. Prod.*, vol. 46, pp. 83–88, 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.09.005.
- [14] "▷ Fugas de Agua - Doctor Fugas." <https://www.doctorfugas.cl/fugas-de-agua/> (accessed May 17, 2022).
- [15] S. Eyuboglu, H. Mahdi, and H. Al-shukri, "Detection of water leaks using ground penetrating radar," *Proc. Third Int. Conf. Appl. Geophys.*, no. April 2003.



- [16] N. C. Turner, "Hardware and software techniques for pipeline integrity and leak detection monitoring," pp. 139–148, 1991, doi: 10.2523/23044-ms.
- [17] "8- Detección y localización de fuga de fondo en tuberías plásticas de agua bajo un ambiente ruidoso".
- [18] "Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos Estimation and Location of Leaks in a Pipe Water Network," vol. XII, pp. 235–242, 2011.
- [19] L. Ariel Delgado Hernández and D. Jorge Ramírez Beltrán Ing Eduardo Trutié Carrero, "Diseño de una herramienta para la detección y localización de fugas de fondo en tuberías."
- [20] A. Kadri, E. Yaacoub, and M. Mushtaha, "Empirical evaluation of acoustical signals for leakage detection in underground plastic pipes," *Proc. Mediterr. Electrotech. Conf. - MELECON*, no. April, pp. 54–58, 2014, doi: 10.1109/MELCON.2014.6820506.
- [21] F. Almeida, M. Brennan, P. Joseph, S. Whitfield, S. Dray, and A. Paschoalini, "On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: An experimental investigation," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, no. 3, pp. 5595–5610, 2014, doi: 10.3390/s140305595.
- [22] J. Choi, J. Shin, C. Song, S. Han, and D. Il Park, "Leak detection and location of water pipes using vibration sensors and modified ML prefilter," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 9, pp. 1–17, 2017, doi: 10.3390/s17092104.
- [23] A. Martini, A. Rivola, and M. Troncossi, "Autocorrelation analysis of vibro-acoustic signals measured in a test field for water leak detection," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, Dec. 2018, doi: 10.3390/app8122450.
- [24] "INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY."
- [25] J. Yang, Y. Wen, P. L.-J. of sound and vibration, and undefined 2008, "Leak location using blind system identification in water distribution pipelines," *Elsevier*, Accessed: Oct. 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X07006475>
- [26] Y. Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude-Modulation Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 679–682, 1975, doi: 10.1109/TCOM.1975.1092854.
- [27] R. S. Pudar and J. A. Liggett, "Leaks in Pipe Networks," *J. Hydraul. Eng.*, vol. 118, no. 7, pp. 1031–1046, jul. 1992, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:7(1031).
- [28] J. Mashford, D. De Silva, D. Marney, and S. Burn, "An approach to leak detection in pipe networks using analysis of monitored pressure values by support vector machine," *NSS 2009 - Netw. Syst. Secur.*, no. Figure 1, pp. 534–539, 2009, doi: 10.1109/NSS.2009.38.
- [29] D. Covas and H. Ramos, "Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems," *4th Intl. Conf. Water Pipeline Syst.*, no. May, pp. 227–241, 2001, [Online]. Available: https://www.civil.ist.utl.pt/~hr/BHR01-03-28_DC-HR_.pdf



- [30] J. Ragot and D. Maquin, "Fault measurement detection in an urban water supply network," *J. Process Control*, vol. 16, no. 9, pp. 887–902, 2006, doi: 10.1016/j.jprocont.2006.06.005.
- [31] R. Pérez, V. Puig, J. Pascual, J. Quevedo, E. Landeros, and A. Peralta, "Leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks: Application to the Barcelona case study," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 9, no. PART 1, pp. 578–584, 2010, doi: 10.3182/20100712-3-fr-2020.00094.
- [32] J. Gertler, J. Romera, V. Puig, and J. Quevedo, "Leak detection and isolation in water distribution networks using principal component analysis and structured residuals," *Conf. Control Fault-Tolerant Syst. SysTol'10 - Final Progr. B. Abstr.*, pp. 191–196, 2010, doi: 10.1109/SYSTOL.2010.5676043.
- [33] J. Zhang, "Designing a cost-effective and reliable pipeline leak-detection system," *Pipes Pipelines Int.*, vol. 42, no. 1, pp. 20–26, 1997.
- [34] J. Gómez, J. García, and C. Nolasco, "Numeric leak detection model for pipe system," *AIBI-Revista Investig. Adm. e Ing.*, vol. 8, no. 2, pp. 113–120, 2020.
- [35] G. Cembrano, J. Quevedo, V. Puig, J. Figueras, and R. Pérez, "Mejoras en la gestión del agua con técnicas de modelado y control," *Tecnol. del Agua*, vol. 26, no. 274, pp. 28–32, 2006.
- [36] I. Tecnológico, D. E. T. Gutiérrez, F. Ronay, and L. Estrada, "Departamento de Eléctrica y Electrónica Índice general," 2018.
- [37] G. White, "Introducción al Análisis de Vibraciones," *Int. Comput. Music Conf.*, pp. 18–30, 2010.
- [38] "Análisis Espectral basado en," pp. 57–74.
- [39] N. I. USB, "6008/6009 User Guide and Specifications," no. Di, pp. 1–20, 2004.
- [40] "CU_CDAQ_CHASSIS.pdf."
- [41] "Capítulo 3 descripción del controlador y los sensores," pp. 21–40.
- [42] P. C. B. Piezotronics, "Model 119B11 Charge Output Pressure Sensor Installation and Operating Manual For assistance with the operation of this product,".
- [43] R. A. Nadialista Kurniawan, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title," *Ind. High. Educ.*, vol. 3, no. 1, pp. 1689–1699, 2021, [Online]. Available: <http://journal.unilak.ac.id/index.php/JIEB/article/view/3845%0Ahttp://dspace.uc.ac.id/handle/123456789/1288>
- [44] T. Gutierrez *et al.*, "Tecnológico Nacional de México instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez INGENIERIA ELECTRONICA RESIDENCIA PROFESIONAL."
- [45] K. Marmarokopos, D. Doukakis, G. Frantziskonis, and M. Avlonitis, "Leak detection in plastic water supply pipes with a high signal-to-noise ratio accelerometer," *Meas. Control (United Kingdom)*, vol. 51, no. 1–2, pp. 27–37, 2018, doi: 10.1177/0020294018758526.
- [46] A. Lucía, "FFT: Transformada Rápida de Fourier," pp. 2–4, 2013.
- [47] J. Martí Roca, "FFT como herramienta de análisis en fonética," *Estud. fonética Exp.*, pp. 233–



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



251, 1988.

[48] J. Benítez and J. Hueso, "Introducción a matlab," *Univ. Politécnica Val.*, 2016, [Online]. Available: <http://personales.upv.es/jbenitez/data/matlab.pdf>

[49] *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*

[50] <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/reynolds/reynolds.html>

[51] *Desarrollo de una metodología para el análisis de la actividad neuronal de fondo en señales provenientes de microelectrodos de registro utilizando métodos no lineales/Sebastián Agrado Castaño*

[52] <https://chat.openai.com/c/21a12351-dd82-436a-98bc-c84300ec3a05>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



ANEXOS

Anexo 1- Figuras correspondientes con el sensor 1.

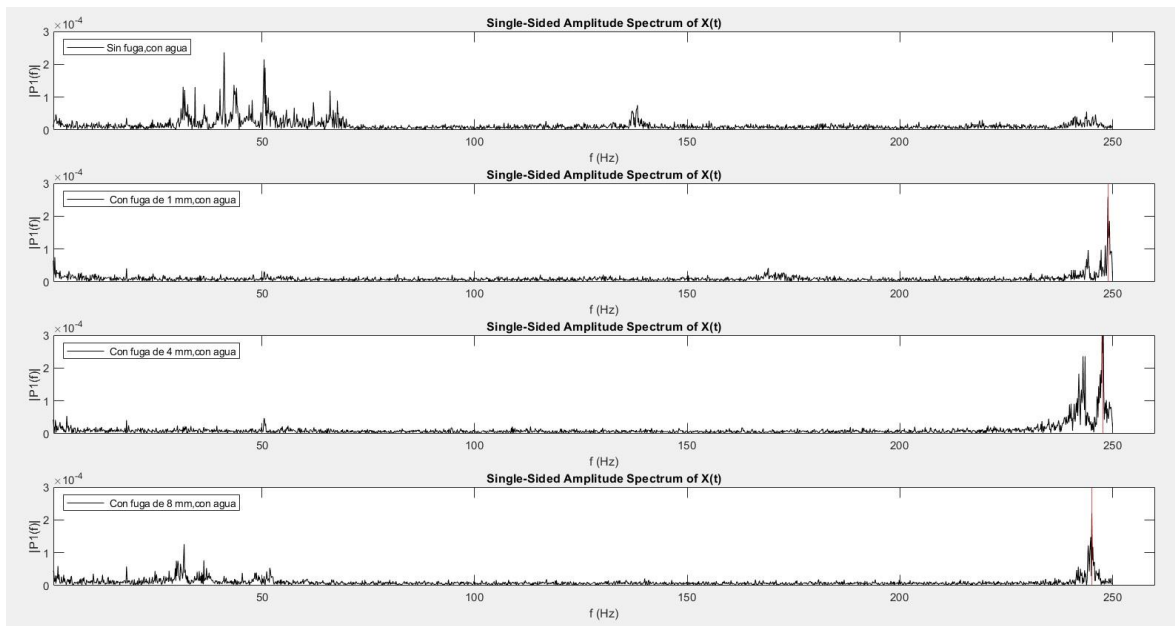


Figura A1: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 1.

Esta gráfica arroja un resultado similar con la gráfica A1, con la única diferencia es la posición del sensor. Para la primera subgráfica se nota espectro de frecuencias bajos y corresponde cuando no hay fugas. Para las restantes subgráfica los espectros de frecuencias aumenta y corresponde cuando si hay fugas.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

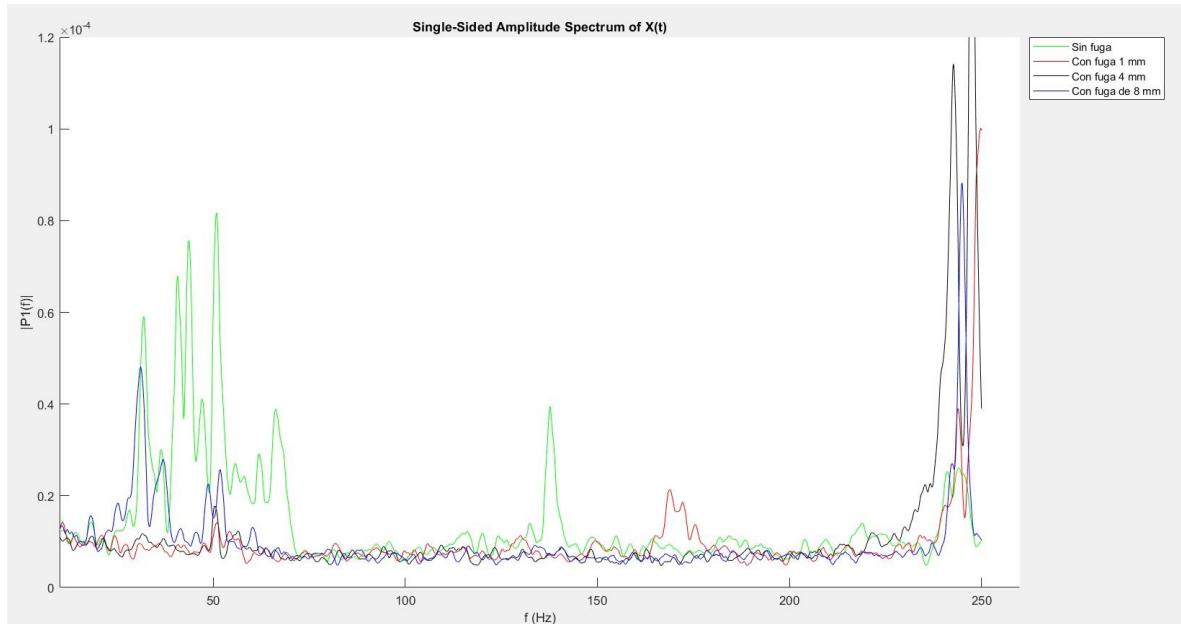


Figura A2: Muestra la unión de las señales que le corresponde a la tabla 3.4.1, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.

Esta gráfica es muy parecida a la gráfica A1, pues la gran diferencia es que se agruparon todas las subgráficas y se señalaron con un color. Además, se le aplicó un comando en MatLab para suavizar las señales. El objetivo de este comando (smooth) es para que se pueda apreciar mejor y elimina el ruido. Con este comando se distingue la trayectoria de cada señal y no se aglomera una encima de la otra impidiendo definir los valores de frecuencias y amplitudes.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

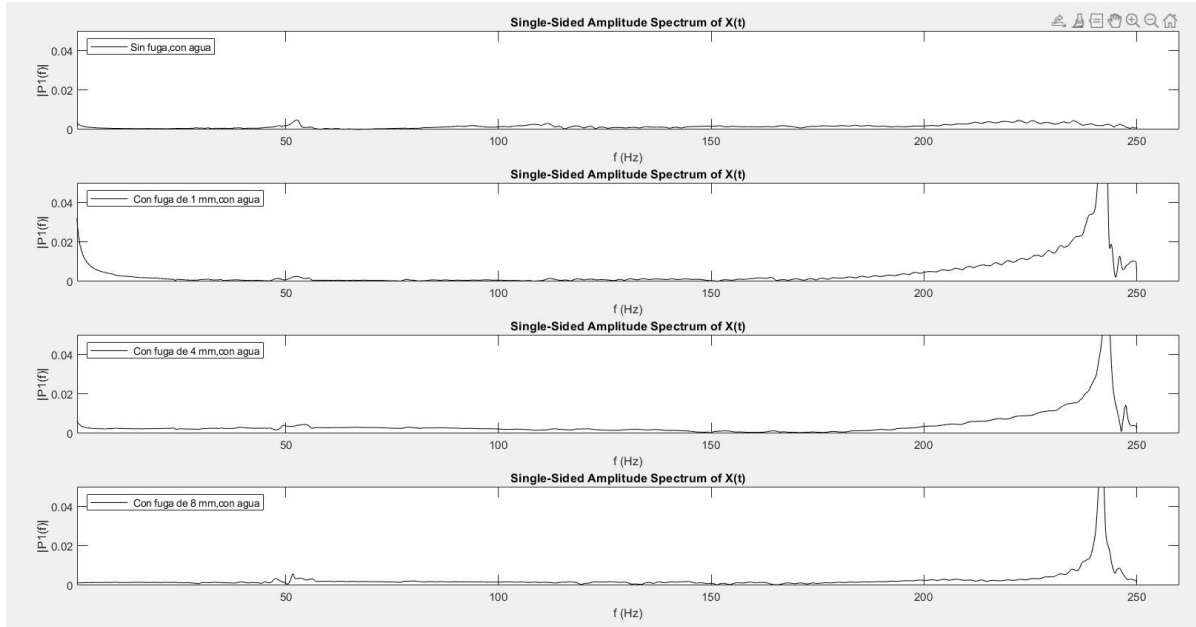


Figura A3: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 1.

Esta gráfica arroja un resultado similar con el experimento 2, con la única diferencia es la posición del sensor. Para la primera subgráfica se nota espectro de frecuencias bajos y corresponde cuando no hay fugas. Para las restantes subgráfica los espectros de frecuencias aumenta y corresponde cuando si hay fugas. Otra diferencia que se debe notar es que en este experimento se utilizó el MCL o sea se generó un impacto a la tubería.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

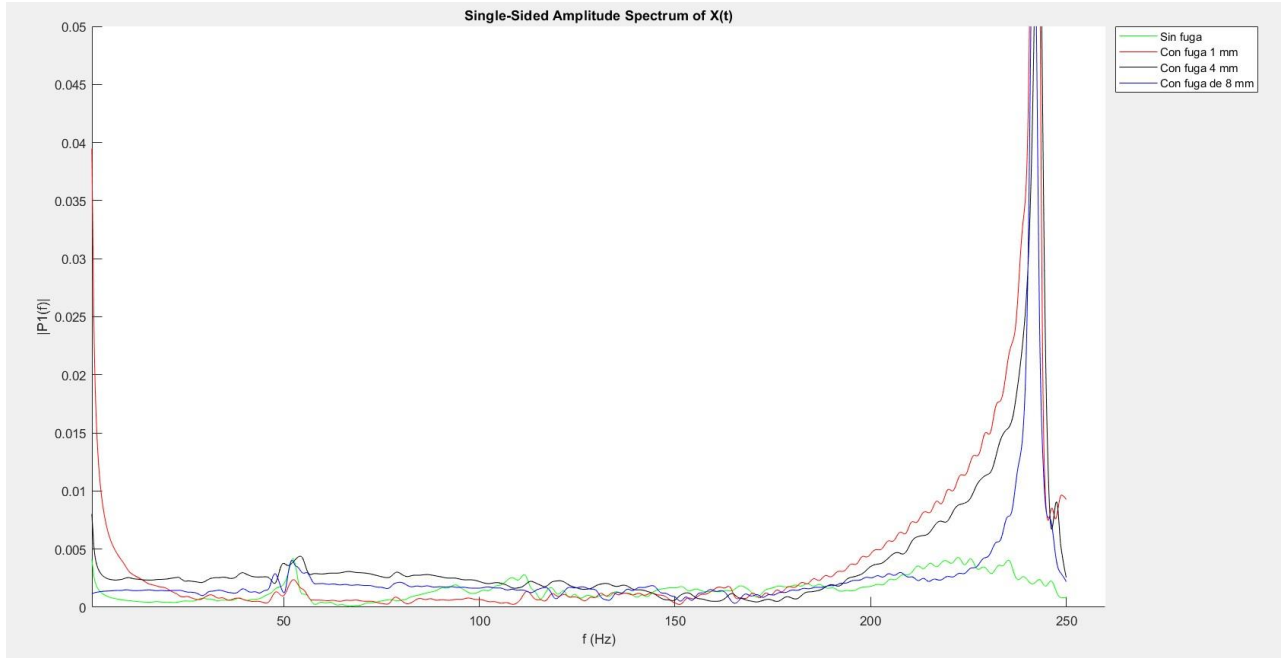


Figura A4: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.2, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.

Este caso es una gráfica similar al experimento 2, o sea se adjuntó todas las subgráficas y se les coloco un código de colores para su diferenciación. También se le realizo un impacto a la tubería y se le aplico un filtro para minimizar los ruidos.

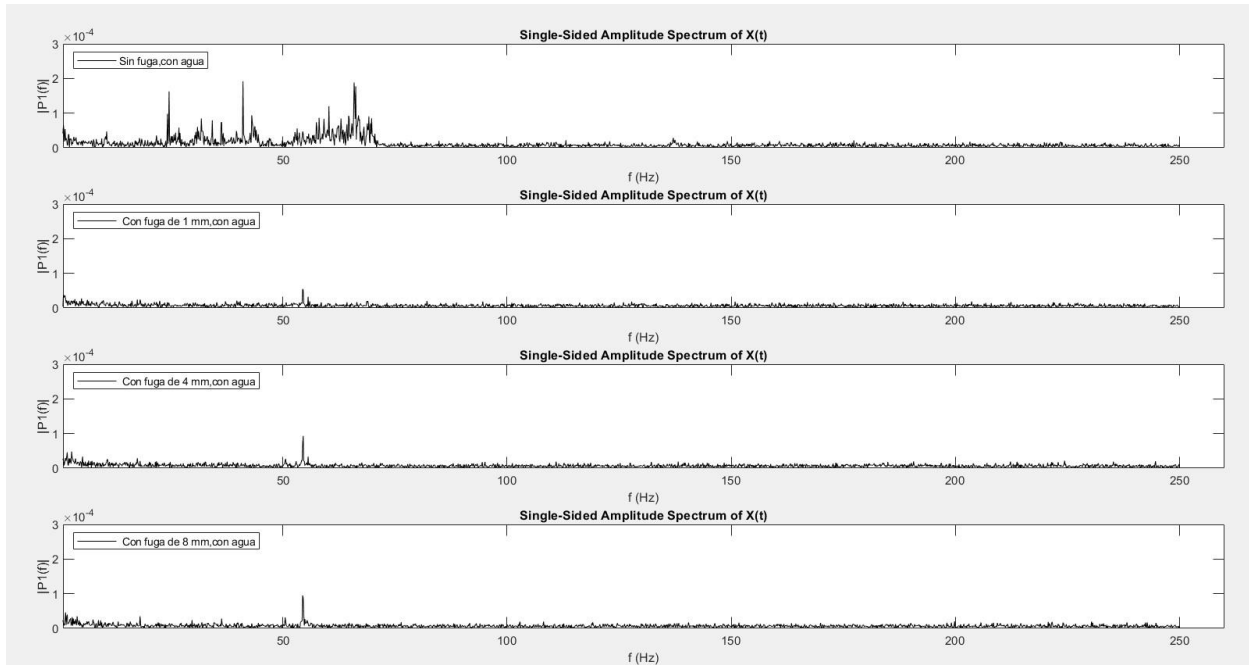


Figura A5: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.3, pero solo para el sensor 1.

Como sucede en el experimento 3, este caso muestra resultados similares, lo único diferente es la posición de los sensores. Mostrando la importancia del flujo de agua para la detección de fugas.

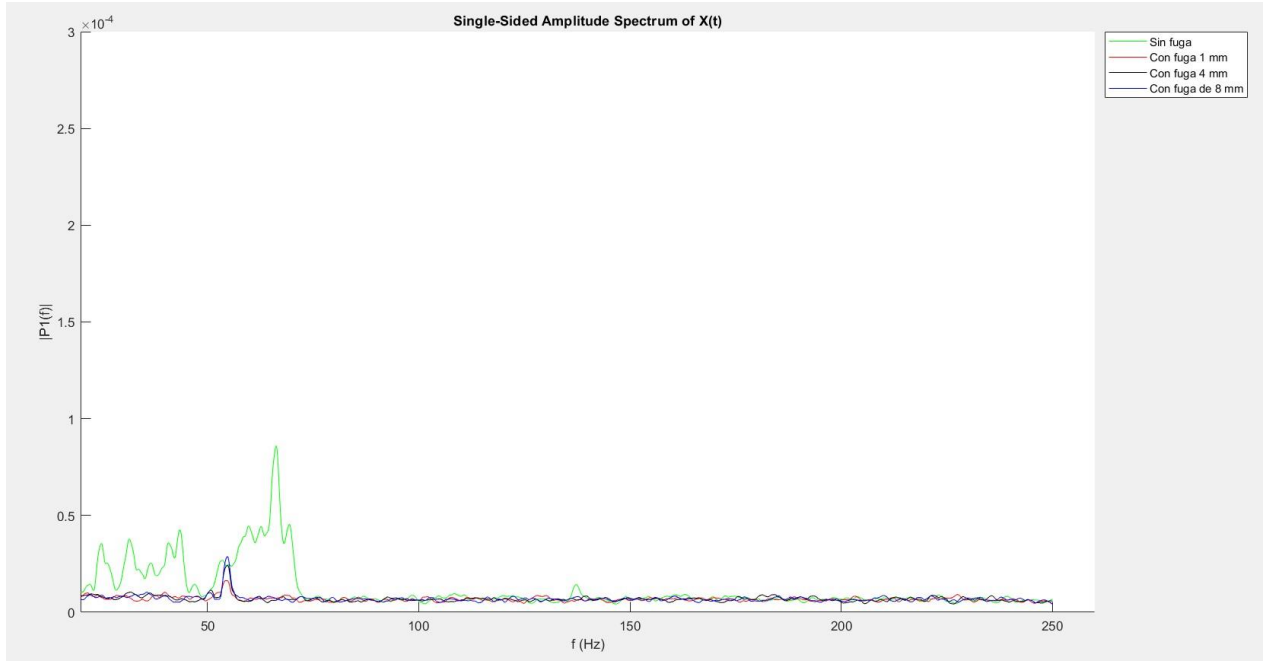


Figura A6: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.3, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.
Acá se muestra la unificación de la subgráficas con un código de colores y agregando un filtro para atenuar el ruido y mejorar la compresión.

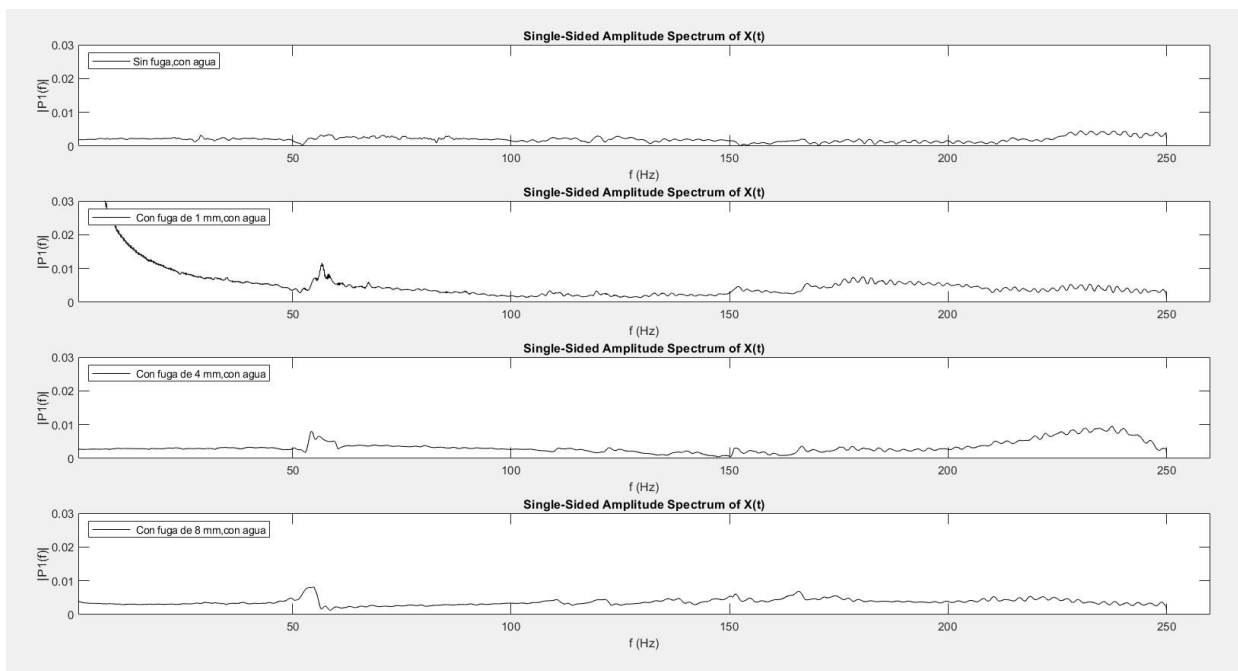


Figura A7: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 1.

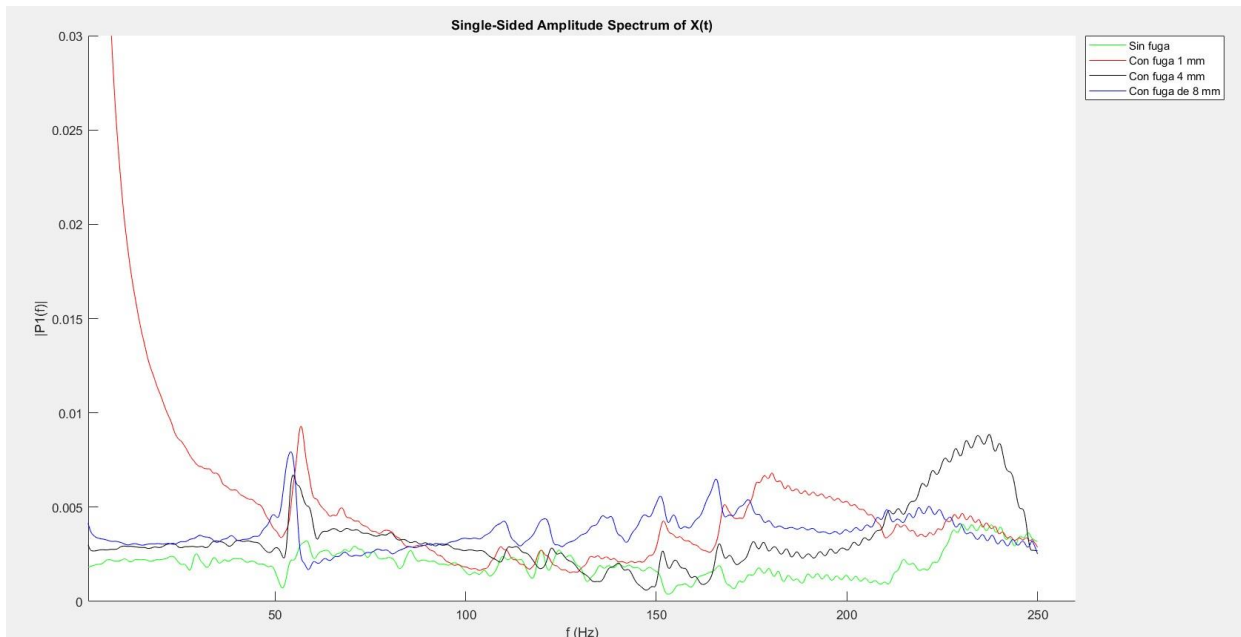


Figura A8: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.4, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.

Para estas gráficas A7 y A8, que corresponde al experimento 4, tiene resultados similares, pero con variación en la posición del sensor. Aquí se nota la importancia del flujo de agua y que el impacto solo acentúa los espectros de frecuencias.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

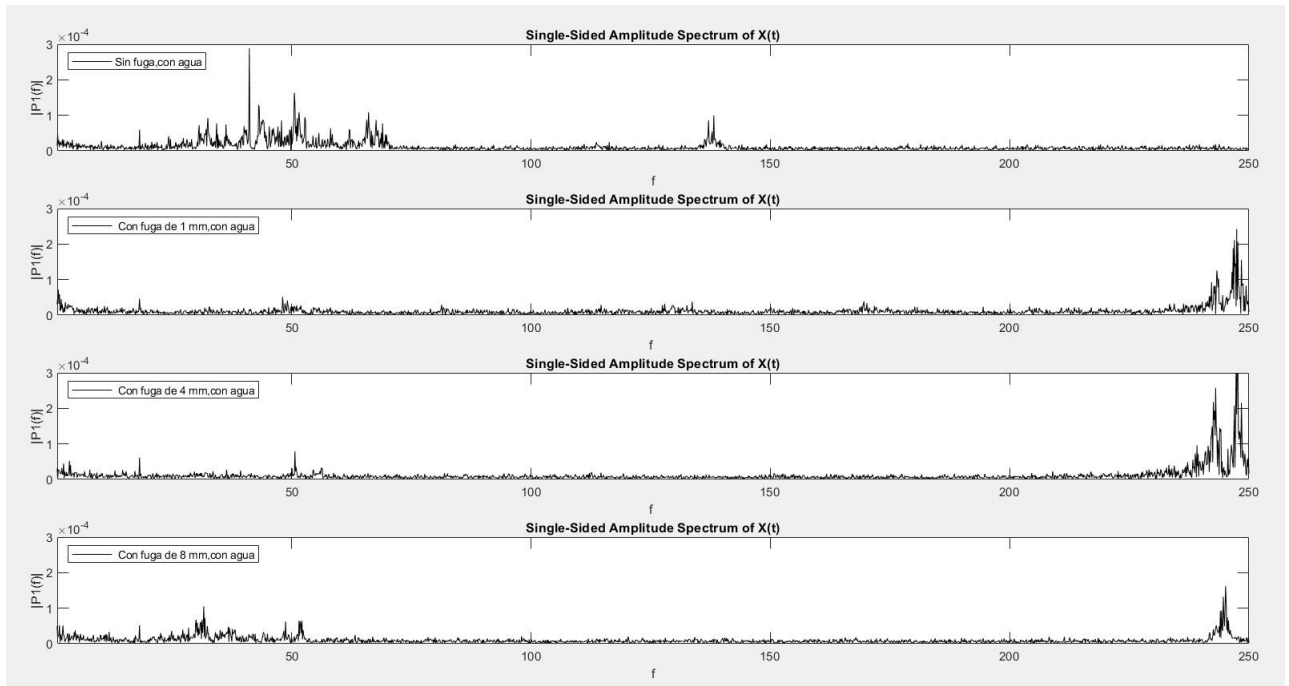


Figura A9: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.5, pero solo para el sensor 1.

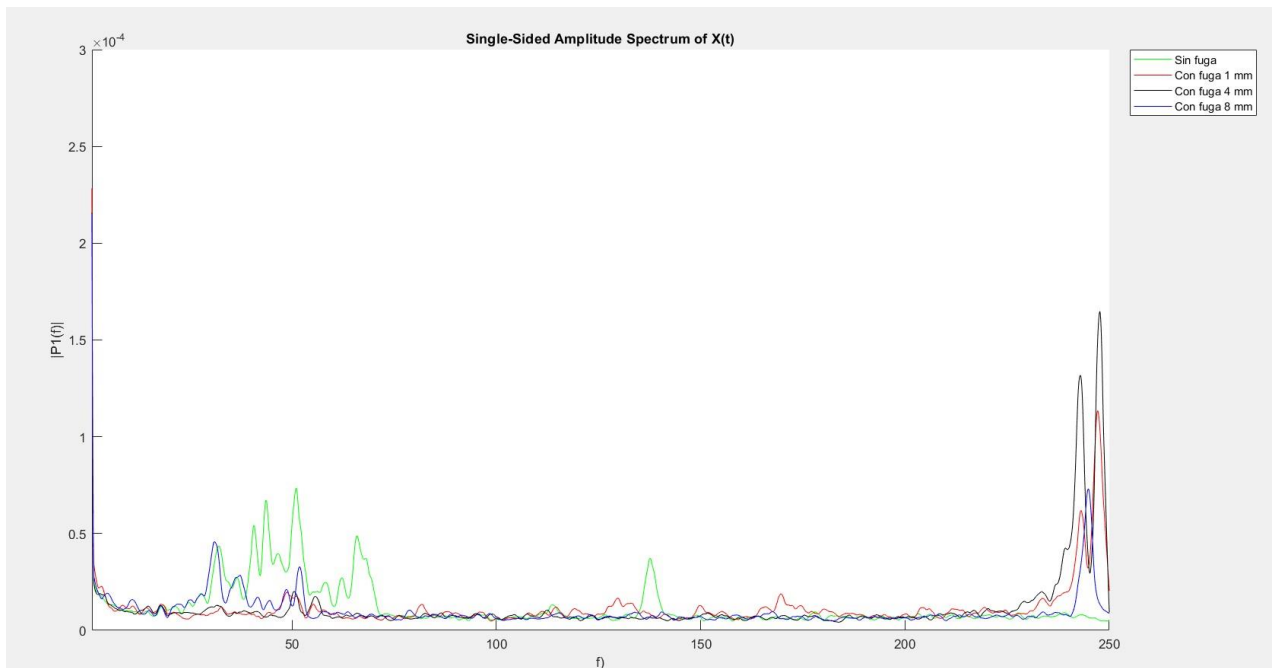


Figura A10: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.5, pero solo para el

sensor 1, Figura complementario.

Para estas gráficas A9 y A10, que corresponde al experimento 5, tiene resultados similares, pero con variación en la posición del sensor. Aquí se nota la importancia del fujo de agua. Y que el resultado es similar, aunque aumente la FM a 1000 Hz.

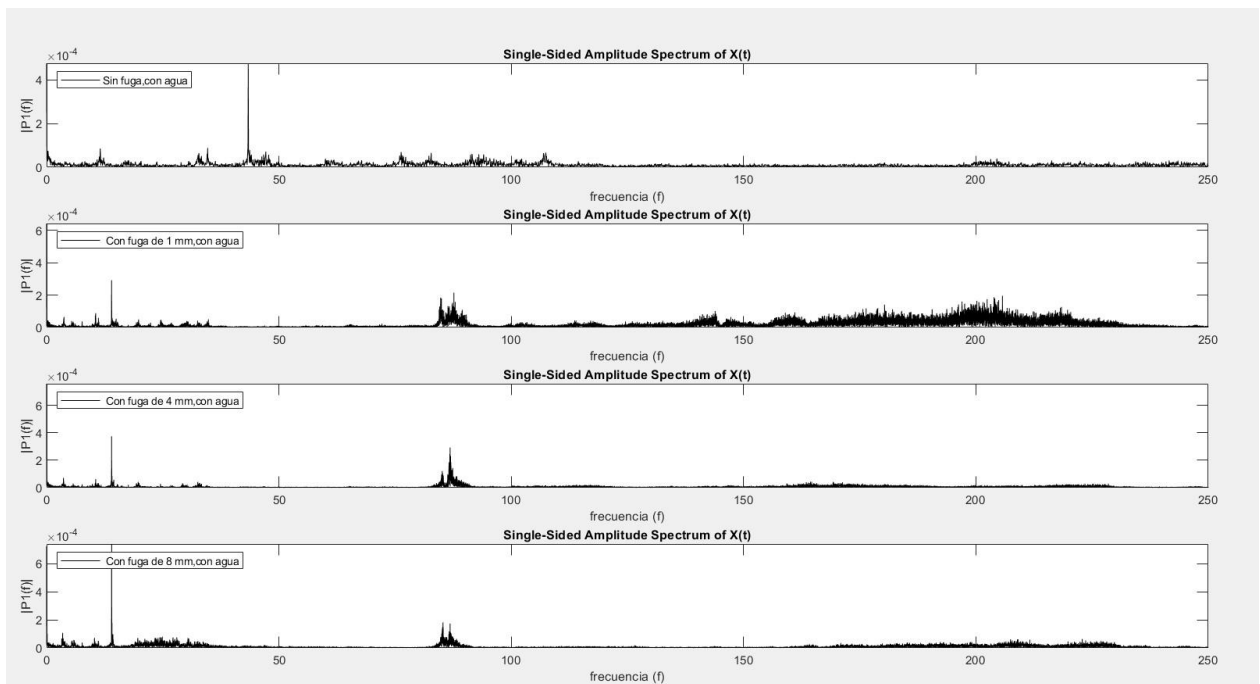


Figura A11: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.6, pero solo para el sensor 1.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

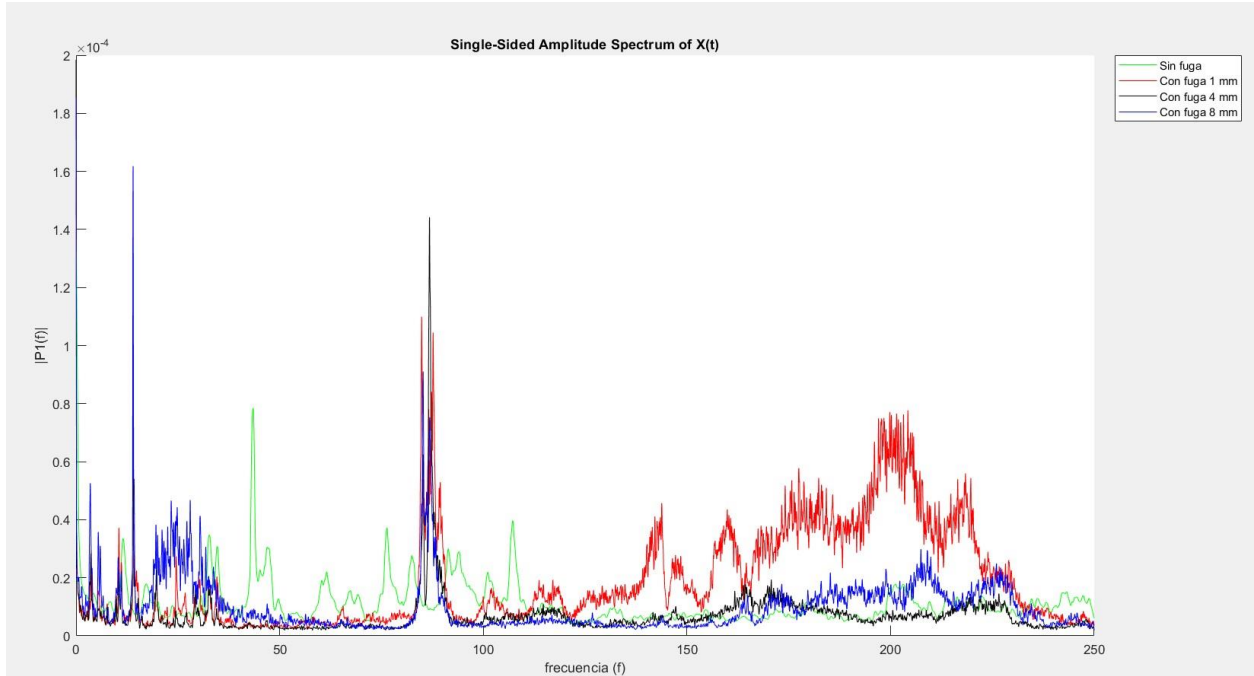


Figura A12: Muestra las señales correspondientes a la tabla 3.4.6, pero solo para el sensor 1, Figura complementario.

Para estas gráficas A11 y A12, que corresponde al experimento 6, tiene resultados similares, pero con variación en la posición del sensor. Aquí se nota la importancia del flujo de agua. Y que el resultado al aumente la FM a 5000 Hz, puede mostrar una mayor cantidad de información. Pero para no afectar la eficiencia computacional y ya mostrando que con menos FM se puede lograr un resultado satisfactorio.

ANEXO 2 EMD

En el epígrafe 4.3 abordamos sobre la EMD para el experimento 1, para el caso de no fuga de la tubería. En este anexo 2 se continuará realizando esta prueba para los siguientes casos del mismo experimento o sea para los que si tienen fugas.

Como ya mencioné solo se representará una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición o sea IMF1 y la señal original. Además, ya habiendo le realizado la FFT. Esto con el objetivo de no extender la tesis y no se torne aburrida y monótona. Cabe enfatizar que esta prueba es solo para ratificar los resultados anteriores.

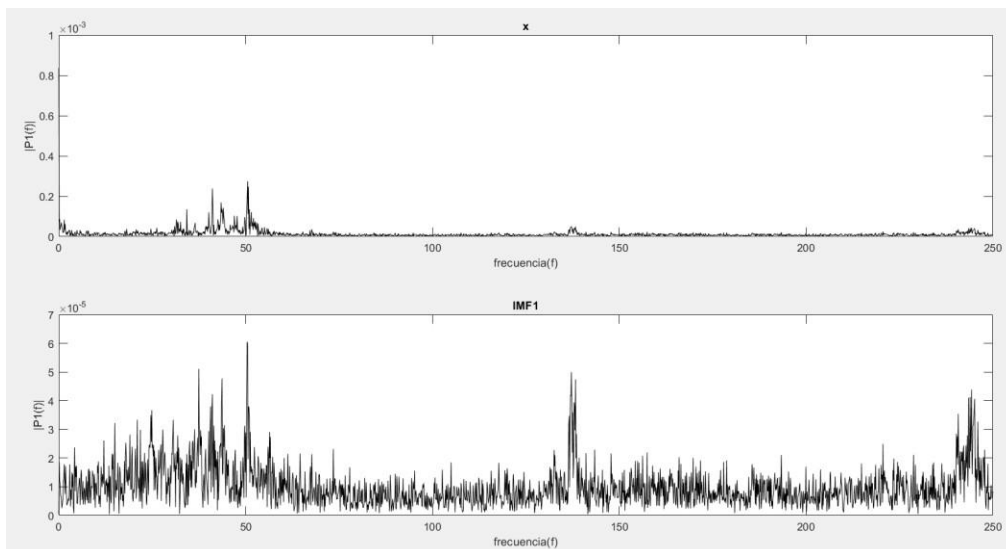


Figura A13: Muestra la FFT de una señal sin fuga, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.

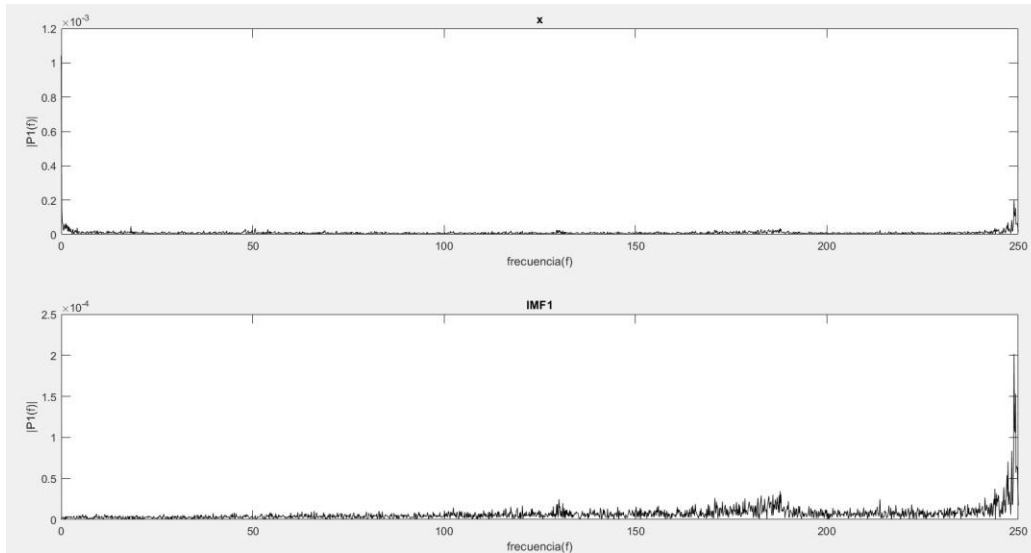


Figura A14: Muestra la FFT de una señal con fuga de 1 mm de diámetro, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.

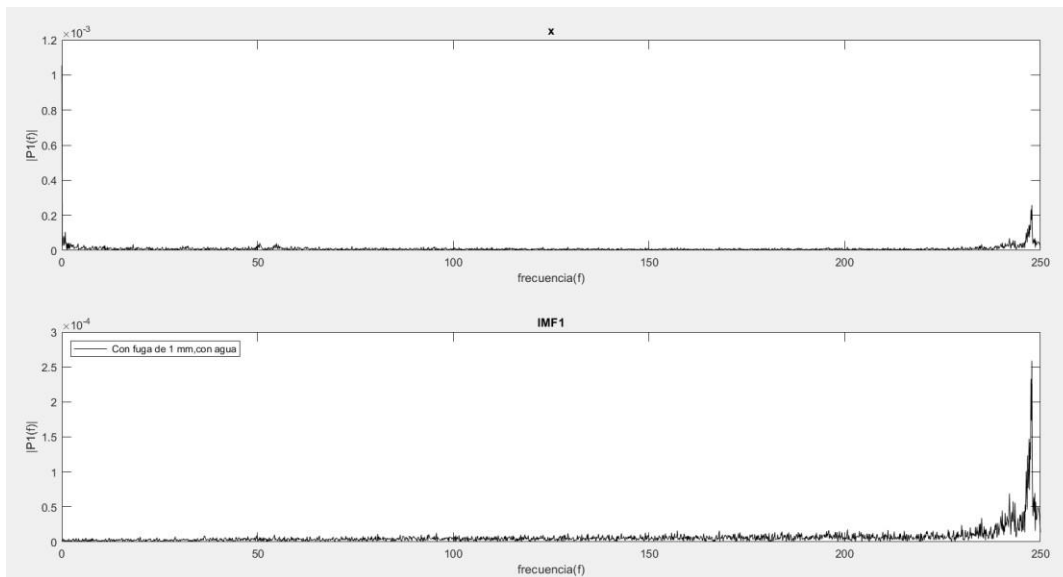


Figura A15: Muestra la FFT de una señal con fuga de 4 mm de diámetro, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

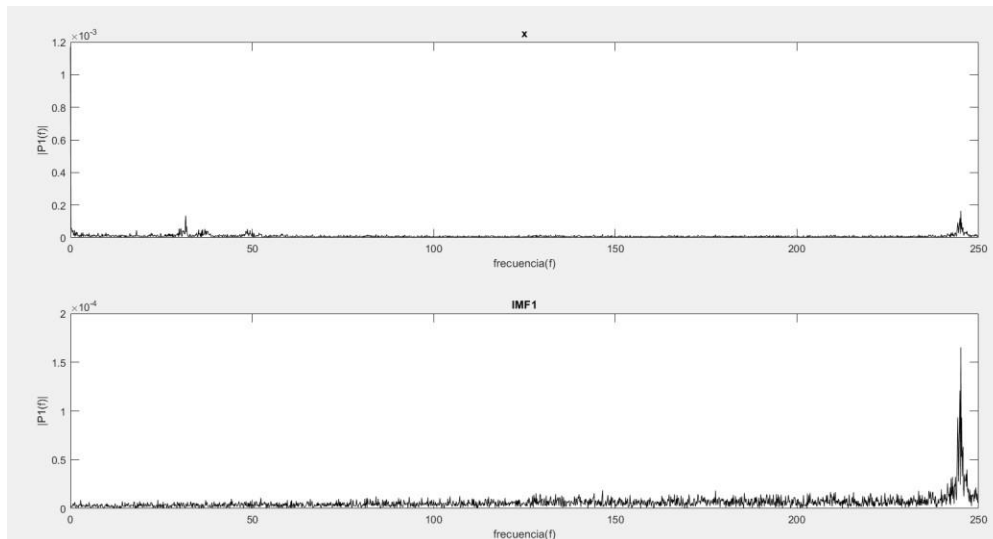


Figura A16: Muestra la FFT de una señal con fuga de 8 mm de diámetro, la primera es la señal original y la segunda es la señal IMF1, representando una descomposición adaptativa de la señal en modos intrínsecos en su primera descomposición.

Puedo interpretar con la ayuda de las gráficas de la A13 a la A15 que con la descomposición adaptativa de las señales se puede obtener un resultado similar a lo planteado anteriormente en el capítulo 4.

Mostrándose una translación de los espectros de frecuencias hacia las altas frecuencia en ocurrencia de fugas y siendo diferente para el caso de no aparición de fugas

Se mostrará a continuación un conjunto de Figuras que se puede apreciar todas las descomposiciones de las señales, son simplemente informativo, pues no es necesario realizar la IMF más de una vez para obtener el resultado deseado y no afectar la eficiencia computacional.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

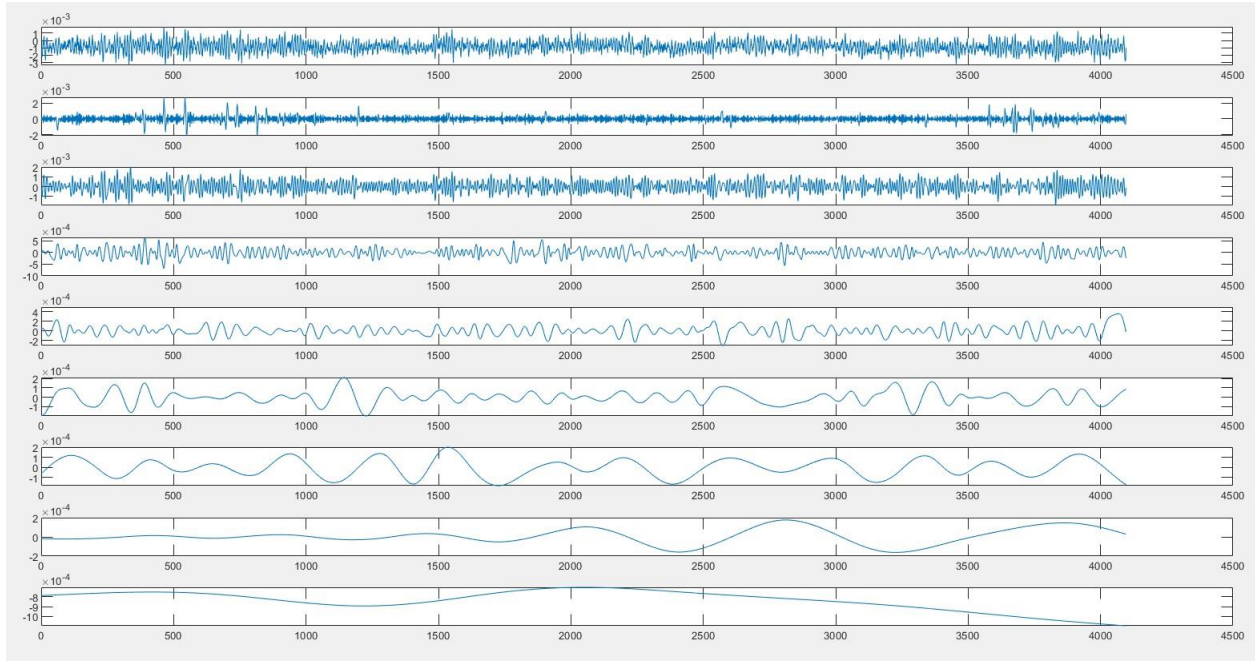


Figura A17: Muestra las 8 descomposiciones de una señal sin fuga de agua en el dominio del tiempo.

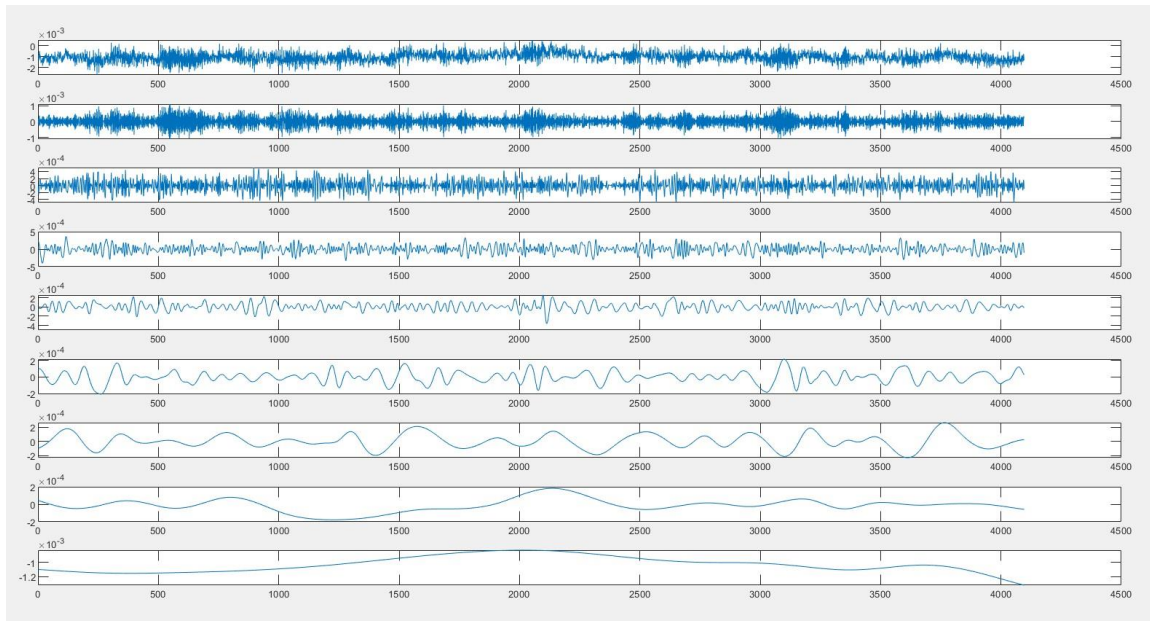


Figura A18: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 1 mm en el dominio del tiempo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

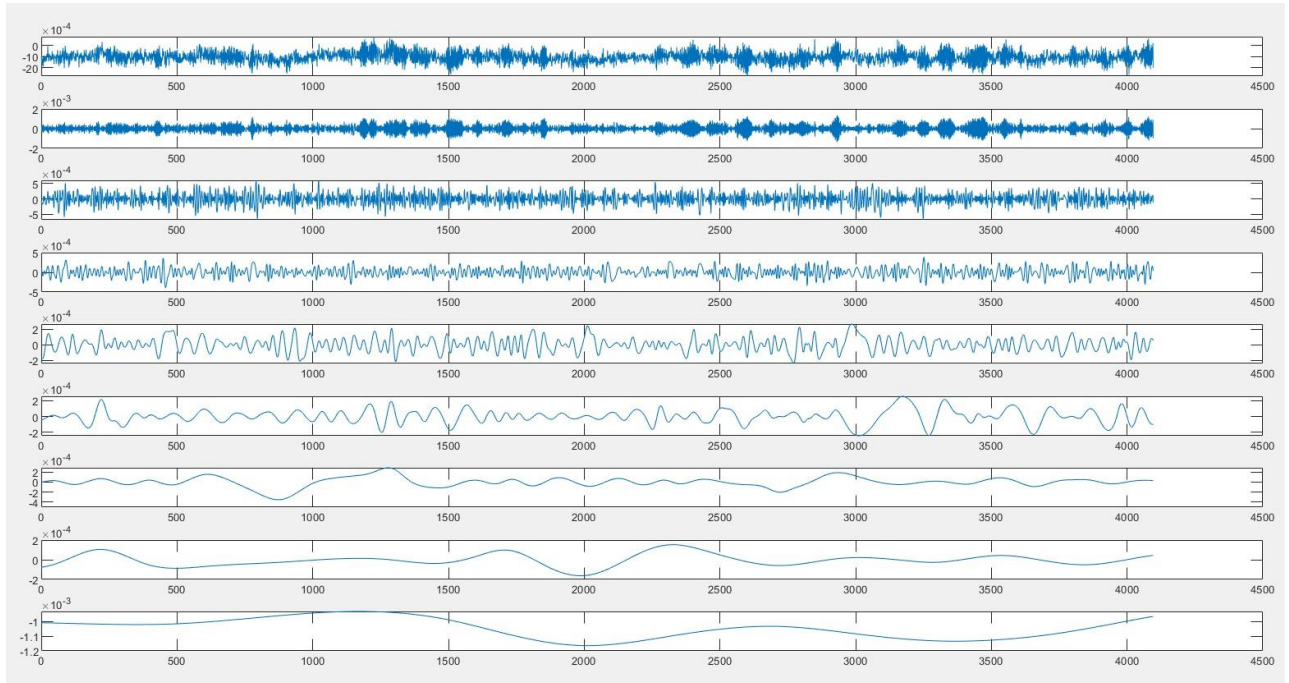
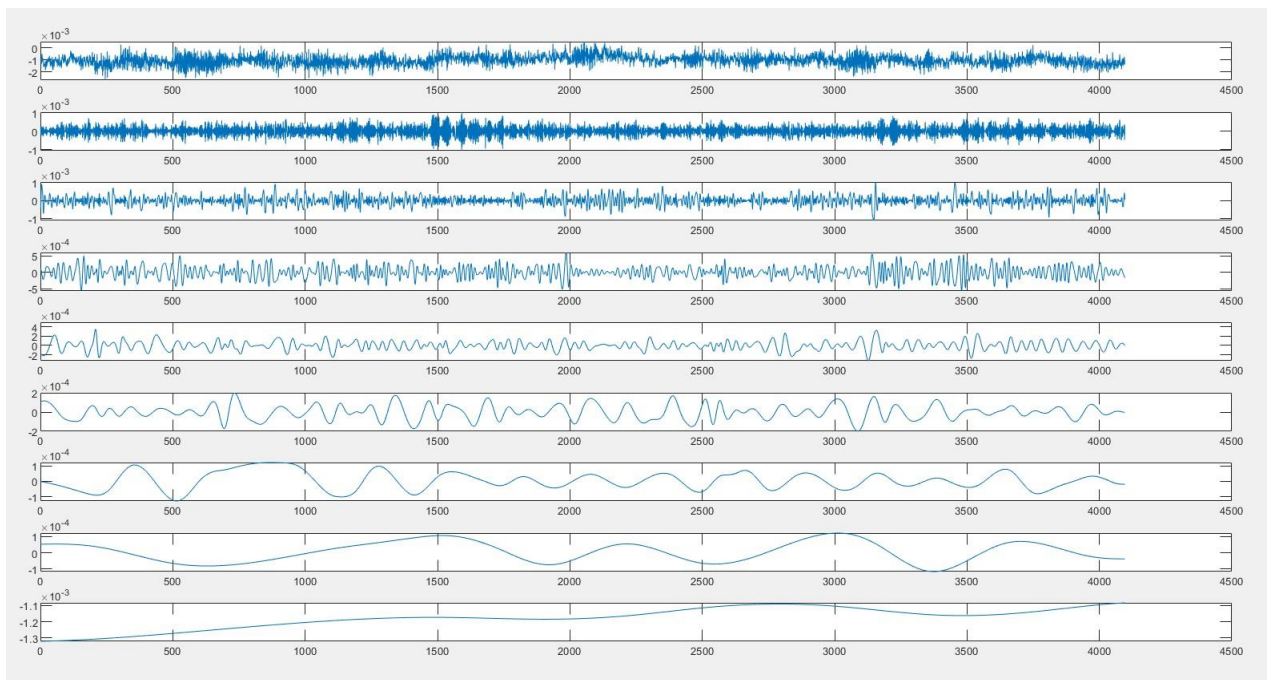


Figura A19: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 4 mm en el dominio del tiempo.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Figura A20: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 8 mm en el dominio del tiempo.

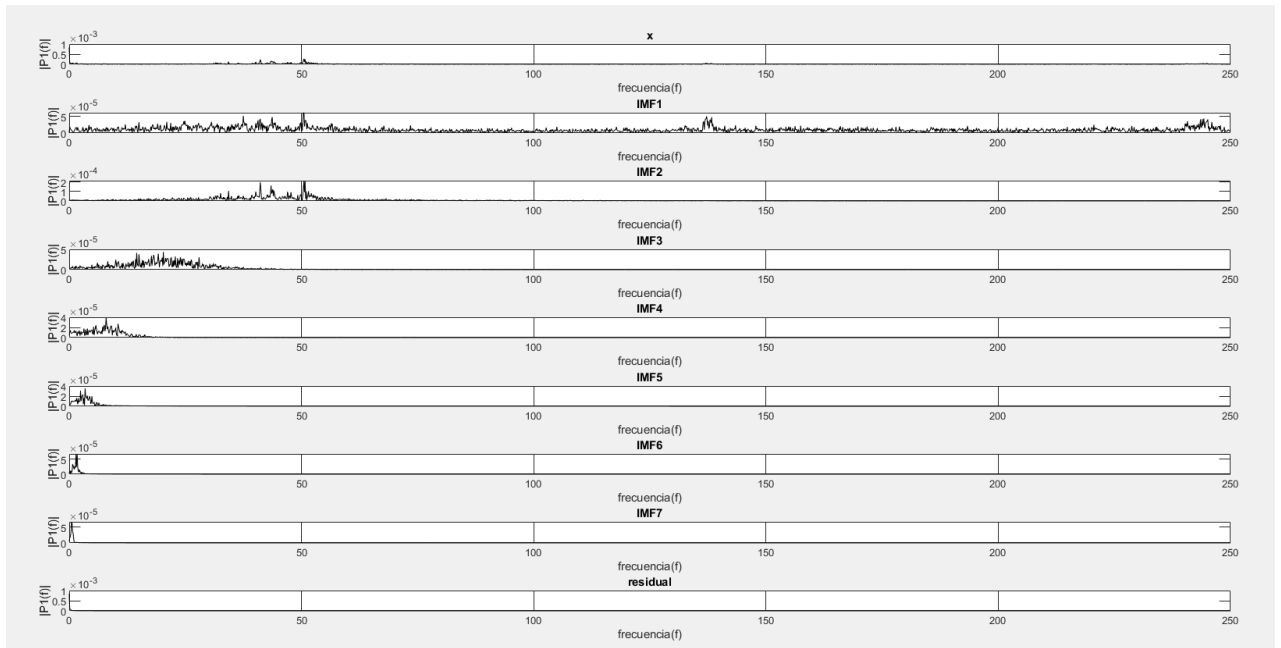


Figura A21: Muestra las 8 descomposiciones de una señal sin fuga de agua en el dominio de la frecuencia o sea se aplicó la FFT a las señales correspondiente de la gráfica A16.

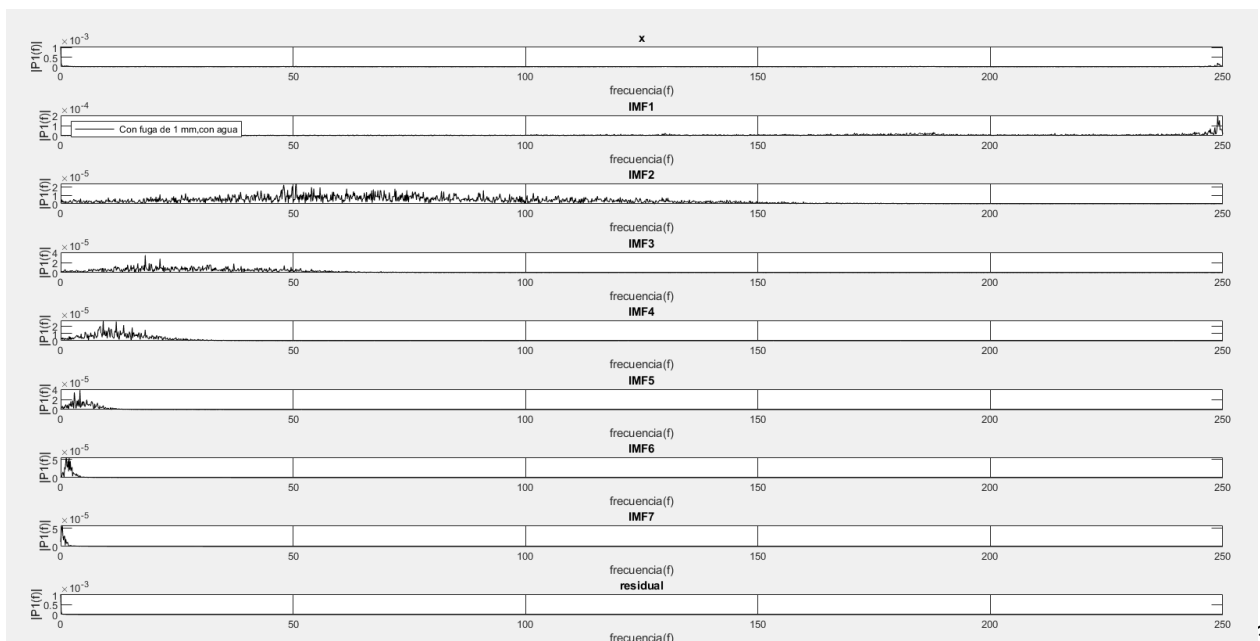


Figura A22: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 1 mm en el dominio de la frecuencia o sea se aplicó la FFT a las señales correspondiente de la gráfica A17.

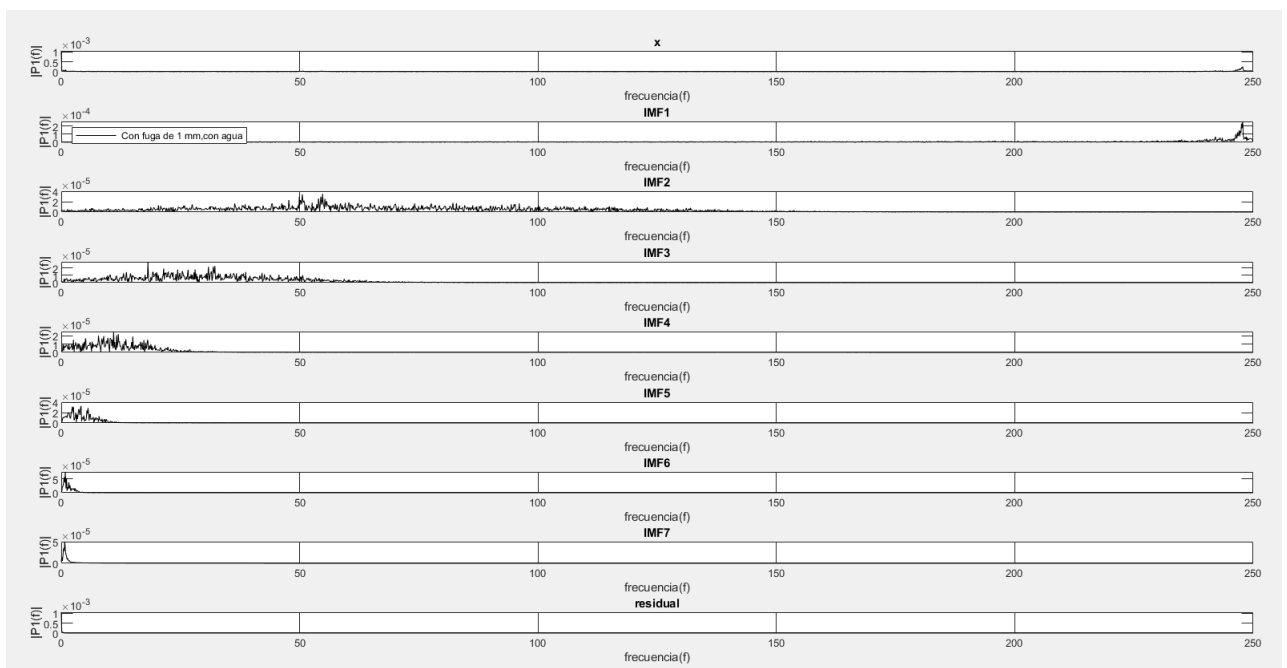


Figura A23: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 4 mm en el dominio de la frecuencia o sea se aplicó la FFT a las señales correspondiente de la gráfica A18.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

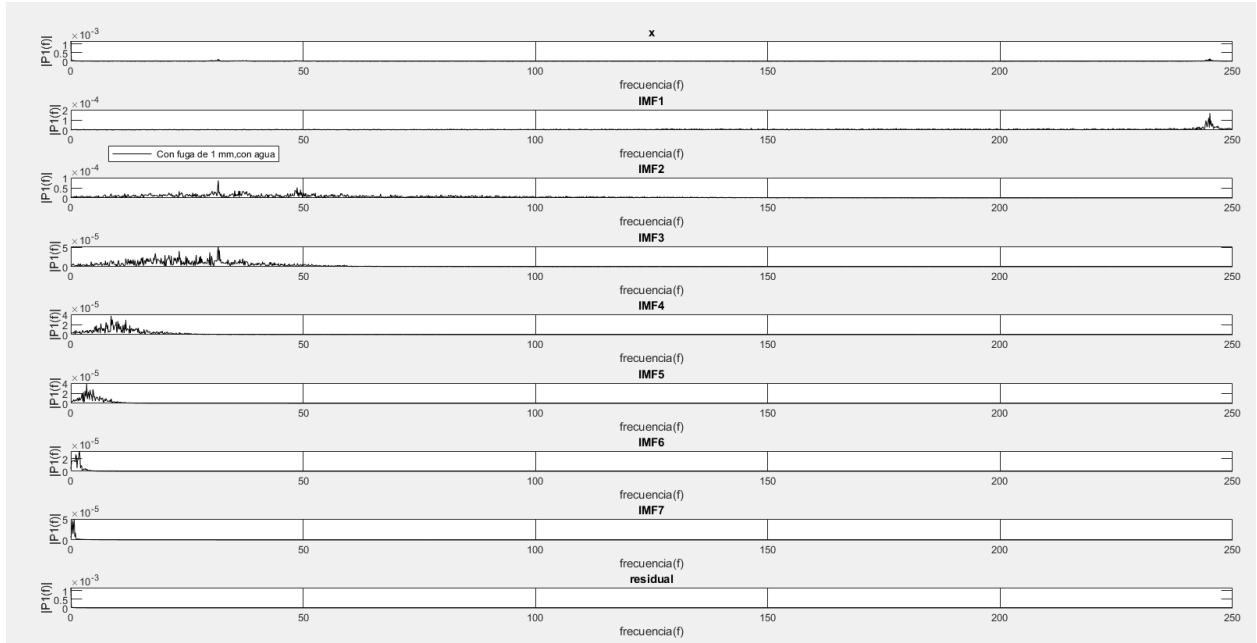


Figura A24: Muestra las 8 descomposiciones de una señal con fuga de 8 mm en el dominio de la frecuencia o sea se aplicó la FFT a las señales correspondiente de la gráfica A19.




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



ANEXO 3

Participé en el primer Congreso de Matemática Aplicada a la Ingeniería, realizado en el CIICAp.



1er Congreso de Matemática Aplicada a la Ingeniería

Cuernavaca, Morelos a 29 de Junio de 2023

Asunto: Constancia de participación.

El Comité Organizador certifica que **Julio César Herrera Díaz** participó en el 1er Congreso de Matemática Aplicada a la Ingeniería, realizado el 27 de junio de 2023 en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Su contribución consistió en la presentación de un póster titulado " **Ahorro de energía en sistemas de distribución de agua mediante la detección de fugas** ".

ATENTAMENTE

Dr. Diego Seuret Jiménez

Coordinador del Taller MAI. CIICAp

Av. Universidad 1001 Col. Chertiza, Cuernavaca Morelos, México, 62009. Tel: (777) 338 7630, Ext. 6212 - Cel: +52 96 2619-4817 / e-mail: coordinador@matematicaaplicada.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Participé en la jornada de la Sustentabilidad en la PrepaTec con los experimentos realizados para mi tesis.





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Participé en el Taller sobre el Cambio climático y energía renovables. Fue realizado en el CIICAp.



The certificate features the logos of the Universidad Autónoma del Estado de Morelos and the Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas (IICBA) at the top. The main text reads: "CERTIFICATE OF PARTICIPATION. This certificate is presented to **Julio César Herrera Díaz** for attending and actively participating in the following workshop **“Cambio climático y energías renovables”** on September 27, 2023, in Cuernavaca, Morelos (Mexico)."

Two signatures are present: M.S.E. Guadalupe Diocelina Toledo Vázquez, a student in the Master's program in Engineering and Applied Sciences (IICBA), and M.I.E. Margarita Figueroa Bustos, Executive Secretary of the IICBA. A row of icons representing various renewable energy and sustainability concepts (bicycle, factory, solar panel, recycling, lightbulb, car, gas pump, wind turbine, plant, house with solar panel) is located below the signatures.

At the bottom, a note states: "UAEMOR-CA100 organizes the workshop using materials from the Italy-IRENA Action for Climate Toolkit (I ACT). The I ACT initiative is supported by IRENA, the Italian Ministry of Foreign Affairs and International Cooperation; SDG 7 Youth Constituency and UNICEF. (Note that these organisations are not directly involved in the delivery of this workshop)." Logos for IRENA, UNICEF, and SDG 7 Youth are also displayed.

FOLIO: 0427



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



CORROSIÓN Y PROTECCIÓN

ASUNTO: Constancia de estancia de investigación

Ciudad: Xochitepec, Morelos Fecha: 17 de julio del 2023

Por medio del presente se hace constar que el(a) **C. Julio César Herrera Díaz**, se encuentra realizando una estancia de investigación en la empresa Corrosión y protección ingeniería S.C., dicha estancia abarca desde el mes de febrero al mes de julio del presente, reportando al director ejecutivo, Dr. Jorge J. Cantó Ibáñez.

Por la atención que se sirva prestar a la presente, reciba Usted nuestro agradecimiento anticipado.

ATENTAMENTE

Dr. Jorge Cantó Ibáñez

Gerente del proyecto

c.c.p.- Coordinación de Carrera.

c.c.p.- Interesado.

SELLO



www.corrosionyproteccion.com

Avión 44, piso 3, 02010, BARRIO ALZARÁN, D.F., MÉXICO TELÉFONO: 55 53 44 11 11
FAX: 55 53 44 11 20



Participé en la creación del artículo que presento a continuación. Mi función principal fue el trabajo en el laboratorio.



Article

Detection of Background Water Leaks Using a High-Resolution Dyadic Transform

Eduardo Trutié-Carrero ¹, Diego Seuret-Jiménez ^{1,*}, José M. Nieto-Jalil ^{2,*}, Julio C. Herrera-Díaz ¹, Jorge Cantó ³ and J. Jesús Escobedo-Alatorre ¹

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Ave. Universidad 1001, Cuernavaca 62209, México

² Tecnológico de Monterrey, School of Engineering and Sciences, Reserva Territorial Atlxácatl, Puebla 72453, México

³ Corrosión y Protección (CyP), Buffon 46, Mexico City 11590, Mexico

* Correspondence: dseuret@uaem.mx (D.S.-J.); jnieto@tec.mx (J.M.N.-J.)

Abstract: This article solves the problem of detecting water leaks with a minimum size of down to 1 mm in diameter. Two new mathematical tools are used to solve this problem: the first one is the T_c cross-spectral density and the second is T_c coherence. These mathematical tools provide the possibility of discriminating spurious frequency components, making use of the property of multi-sensitivity. This advantage makes it possible to maximize the sensitivity of the frequency spectrum. The wavelet function used was Daubechies 45, because it provides an attenuation of 150 dB in the rejection band. The tools were validated with two scenarios. For the first scenario, a synthetic signal was analyzed. In the second scenario, two types of background leakage were analyzed: the first one has a diameter of 1 mm with a signal-to-noise ratio of 2.82 dB and flow rate of 33.7 mL/s, and the second one has a diameter of 4 mm with a signal-to-noise ratio of 9.73 dB with a flow rate of 125.0 mL/s. The results reported in this paper show that both the T_c cross-spectral density and T_c coherence are higher than those reported in scientific literature.

Keywords: cross-correlation; frequency dyadic spectrum; T_c coherence; T_c cross-spectral density; T_c transform



Citation: Trutié-Carrero, E.; Seuret-Jiménez, D.; Nieto-Jalil, J.M.; Herrera-Díaz, J.C.; Cantó, J.; Escobedo-Alatorre, J.J. Detection of Background Water Leaks Using a High-Resolution Dyadic Transform. *Water* **2023**, *15*, 736. <https://doi.org/10.3390/w15040736>

Academic Editor: Francesco De Paola

Received: 12 January 2023

Revised: 9 February 2023

Accepted: 9 February 2023

Published: 13 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

This paper shows a feature extraction study of water leaks with a diameter of 1 mm and 4 mm, in a controlled laboratory environment. This study makes use of the T_c transform [1] and its properties in the frequency domain.

Nowadays, one of the most widely used approaches in pipeline fault feature extraction is performed in the domain of frequency [2–4]. This is because the frequency domain reveals characteristics of the signal to be analyzed that are not visible in the time domain. For this reason, this article shows two new mathematical tools for extracting the characteristics of a signal in the frequency domain:

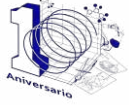
1. The first is the T_c cross-spectral density.
2. The second is T_c coherence.

These mathematical tools are based on the T_c transform [1] and in the cross-correlation function [5–8]. The main objective of this new approach increases sensitivity in the frequency spectrum. This makes it possible to detect water leaks of a small size. These contributions were validated by the behavior of a pipeline with two types of background leakage, the first with a diameter of 1 mm and the second with a diameter of 4 mm.

There is currently great interest in detecting non-catastrophic background leaks with a flow rate below the limit commonly known as Unavoidable Annual Real Losses [9,10]. There is interest in background leaks with these characteristics since they are precursors to catastrophic water leaks.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Maestría en Sustentabilidad Energética.

Cuernavaca, Morelos, a 25 de abril de 2024.

DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
COORDINADOR DEL POSGRADO EN SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: Ahorro de energía en sistemas de distribución de agua mediante la detección de fugas, que presenta el alumno **Julio César Herrera Díaz**, para obtener el título de la **Maestría en Sustentabilidad Energética**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**:

Atentamente

Por una humanidad culta

NOMBRE
DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE
DR. MIGUEL ÁNGEL BASURTO PENSADO
DR. JUAN CARLOS GARCÍA CASTREJÓN
DR. JOSÉ ANTONIO MARBÁN SALGADO
DR. DIEGO SEURET JIMÉNEZ

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

JAMS*MLGE/nmc.



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Edificio 65.
Tel. (777) 329 70 00, Ext. 612 / mse_ciicap@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

J JESUS ESCOBEDO ALATORRE | Fecha:2024-04-25 12:42:21 | FIRMANTE

CNhgDSYsZNFa7otULgUKARqH98cmCcDmQqR4BWI7CX3dcOWqe0aQLJ8O2bioHZJgyEBb5oPtXjvmzxMXGfzUDZPJ00dBpokUPPhXt5nhAICfQz8fZR293dt9193hu+T+C5ix3WUL8eDjr12YAa1T/RS2pn4rkCCwMI1auMEcQMK89jhi2s8/gELYWzN6kqhH32OeeO6m5KGazT748+BsVUD1zkDHhtJR0xl6qECzWqMTcOKVz3HNF+Sci+jVQkg+3quVayTjF5CqrdPHI/Tvtg9kRPiqcybg1VdDW39NW8UIMMSaHTIVIfArMHnzV5e5qRTkq0HtsrXyfJqpyw==

MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO | Fecha:2024-04-26 09:57:18 | FIRMANTE

pvsep0P9Yw/aRp+ph9Sj5H4KFZqNA+ztiqkxJlam7yMC8Xg007qhZWfg+ITum27li7c8s2IDGrYBSwndMJEgogq97CJaGlaY55N5Esf2/pL76O1w/ltOaCMmt3k6ibtZyCvx5UGBka1wD0YX5ZwX6a3GmLOv1/Aq1gtaTEFCZYUfyhcZtF2NKFmimITx9DMGyoiAOJ7n1E6dO0p78TJgIb+Us4GqjVrksN0L6o0XPv0NXdlzQqacP2b6izV/w3InGDFUELqyYXHVE/Bxv3cdSSI72GFS4IjJrateu65lQA2F2ahskVURgRAMdElcIOSem6zUWPKZwpg1bM15HzMmWg==

DIEGO SEURET JIMENEZ | Fecha:2024-04-26 19:35:39 | FIRMANTE

otHe045iuuiaJkKJTBAjPvZ+wxCWchT+T7fzS/mdUvaaQhpPkKHArOOOpirYwHSCXtz3RGrLeJBkKZ4ZNeQAGn7B+KCQwBJSJPBG8goCE1zlo8V1GijO7cmfgztAoG9EZJrMs eAQvVKtp7WxlWAZm0c3SmHQO+7RfW5YJgKuOyuoigntWn1d+rXPPQq8IS0U60Ji1pwfv7uY4RjQO6CKJryXawT3WshMYXbt5CVtw5ijY7Xofeni7TBRerZp+FAEyq1HkuLqUw848egRkZuVp4NnDfcWXKEDhHN8aKm+MaX0Wn6+wOT2nNwmo0eOBf5ZVL0m9vkmZbBYj943IM0Ew==

JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON | Fecha:2024-05-20 14:39:03 | FIRMANTE

WCX+tlmwuG9Eaz+GgktHI9qyouPisOZbKJ041op5eCHiXy1byvaUVHbsJclKjm3SNMOz1oCFar5eY9XiqeVkuThLr7Y/xCRDn1DHzw5ntYIYXsxy+ZFMK8FL9DOS00J12p0jUfp8qjR7Peg81Y6IWiksWxlF1b9gdmFt9gYCy60myeyY2UySkyNS9NCobE47/xqHmrQCBMbpYQqWu+X0cKvRh2ratUM3laIL1ZjcfmERyECKxXc0eGMdoy57aylNYudHIWoqK7alD/X95GBSsh24IzJwkBgVWDPqVbSomsFa2ICB5T95gCHEZEA9rcCyarctmcP93dl3GMjORbw==

JOSE ANTONIO MARBAN SALGADO | Fecha:2024-05-20 17:00:46 | FIRMANTE

fKWVjscNkMtgWzj6pBkyH81KfP2r8eYBYpDf2rxaFw50fy8xmKrIOGeAfrVmNsjo5BcZnnMrBsxYcm3p4lyX2qm7rW4Z2XdNB1ZvkPU8d+fSytaHn5zhctf9xiLQZDSTrJeawwU8VX3QTv4Gbnm8r4G4NmOQ2bn4mPXVsJzWaF8lcknJiE95SoYKgquGPI6ejN9GAI5ByBDyIQR76Vf62FqhPe1yLJTWXl09khYszCtqYiuZt5DH3wp26L8HrJk8guMcMvSBIUougnina1N0hwJEV+1KyyFQhtWh+iszap6E85Ty8Mid7mh0YWLpFololrK7gg+uDXQBDX6b2fg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



uon1wkVvX

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/ik56CR5f132xWXL8kJHAUoqx6UyH0m>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029