Electrónica-UNMSM, 20(1): e28545 (Junio 2024)
DOI: https://doi.org/10.15381/electron.v20i1.28545
ISSN-L: 1561-0853; eISSN: 1609-9087
Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Implementación de la FFT para la detección de fugas de agua

Implementation of the FFT for the detection of water leaks

Rafael Bustamante Alvarez[1,a], Wilbert Chávez Irazábal[1,b], Rossina Isabel Gonzales Calienes[1,c]

***Resumen*— En el presente artículo se presenta una aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para procesar señales de audio proveniente de los ruidos de fugas de agua de las diferentes secciones de las tuberías de suministro de agua. La señal captada es enviada a una computadora portátil, Tablet o Smartphone donde es procesada mediante la Transformada Rápida de Fourier, para ser visualizada el espectro de frecuencia y observar los valores de la amplitud de frecuencia medida en W/Hertz y detectar las fugas de agua no visibles y se marca la sección del suministro. Actualmente el proceso se realiza oyendo el sonido del flujo de agua mediante auriculares y requiere de un entrenamiento especial para la escucha de sonidos que corresponden a fuga de agua.**

***Abstract*— *This article presents an application of the Fast Fourier Transform (FFT) to process audio signals from the noises of water leaks from the different sections of the water supply pipes. The captured signal is sent to a laptop where it is processed by the Fast Fourier Transform, to be visualized the frequency spectrum and observe the values of the frequency amplitude measured in W/Hertz and detect non-visible water leaks and mark the supply section. Currently the process is done by listening to the sound of the water flow through headphones and requires special training for listening*.**

Palabras Claves— fft, filtro, espectro, agua, fuga, simulink

***Key Words— fft, filter, spectrum, water, leak, simulink*.**

Presentado: 20/07/2023
Aceptado: 12/02/2024
Publicado: 22/07/2024

[1] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú
[a] Autor de correspondencia: rbustamantea@unmsm.edu.pe
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3208-9356
[b] Email: wchavezi@unmsm.edu.pe
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7976-7031
[c] Email: rgonzalesc1@unmsm.edu.pe
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6353-2712

I. INTRODUCCIÓN

Con el avance de la tecnología de los sistemas digitales basados en el Procesamiento Digital de Señales, es posible desarrollar nuevas soluciones en diversos campos, como es el caso de los equipos de detección de fugas de agua, el cual se realiza mediante la audición de los sonidos provenientes de las tuberías en revisión. La solución que se plantea en este caso es captar el sonido y procesarlo mediante la Transformada Rápida de Fourier para lo cual se realizaron captaciones de los sonidos de las tuberías las cuales fueron procesadas mediante la FFT la que tuvo que implementarse para la presente aplicación con el programa Matlab que permite la aplicación de la FFT y graficar la señal para realizar un análisis más objetivo de la señal, que la que se realiza mediante la audición de la señal como es el caso actual. También se presenta una simulación del sistema de procesamiento digital de señales que permita el análisis de la señal de audio de ruido de fuga de agua utilizando para tal fin el simulador Simulink de Matlab.II.

Liu [1] expone un trabajo acerca de analizador de espectro en tiempo real es un instrumento excelente para el análisis de señales y el monitoreo del espectro. Tiene amplias aplicaciones en comunicación inalámbrica alto potencial para lectura inteligente. Sin embargo, se caracteriza por un alto costo. Por lo tanto, una versión ligera diseñada basada en los instrumentos de laboratorio ya disponibles está construidos para su uso en el laboratorio escolar. Un osciloscopio y una computadora fueron utilizados para el análisis de la señal. Ambos instrumentos comunicados a través del cable GPIB y el software MATLAB se utilizó para las tareas de procesamiento. Para probar el diseñado, se utilizó un generador de señal simple. La señal fue analizada en ambos tiempos. Dominio y dominio de frecuencia. Luego, las mediciones de la señal a lo largo del tiempo se actualizaron a una matriz de la FFT y se trazaron en 3D, mostrando la variación del espectro en el tiempo.

En este proyecto se desarrolló una aplicación para el análisis de radiofrecuencia.

Palestina [2], el objetivo de este trabajo fue desarrollar un software analizador de espectros para una señal de audio adquirida en tiempo real que otorgue capacidad de almacenamiento y visualización de los resultados de las pruebas realizadas y que cumpla con las especificaciones realizadas.

Xiangyu&Chungguang [3], en esta tesis, se expone el diseñó de un analizador de espectros de frecuencia digital simple de bajo costo basado en la FFT. El autor discute el diseño de cada componente del sistema en forma cualitativa y cuantitativa. El informe presenta todo el diseño del sistema en detalle, el que contiene lo siguiente: el diseño del filtro de entrada, diseño del microcontrolador, diseño de la etapa de transmisión mediante el Universal Asyncronus Receiver Transmitter (UART) y el diseño de GUI MATLAB. Se presenta el resultado de medición

© Los autores. Este artículo es publicado por la revista Electrónica-UNMSM de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es) que permite Compartir (copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato), Adaptar (remezclar, transformar y construir a partir del material) para cualquier propósito, incluso comercialmente.

satisfactorio del sistema desarrollado. El sistema puede Proporcionar mediciones rápidas con buena precisión. Pero el resultado medido tiene un rango limitado y la resolución de la pantalla no es muy alta.

II. Bases teóricas

A. Señal de audio

Es la representación en forma eléctrica de una señal sonora, como una señal analógica, cuya frecuencia se encuentra entre 20 Hz y 20000 Hz [4]. La señal sonora se capta mediante un micrófono que convierte en forma eléctrica o señal de audio y luego se amplifica mediante un amplificador de audio para ser utilizada o reproducida. La señal de audio se convierte en señal sonora mediante un parlante o varios parlantes, es decir el parlante convierte la señal de audio en ondas sonoras audibles, tal como se muestra en la Fig.1.

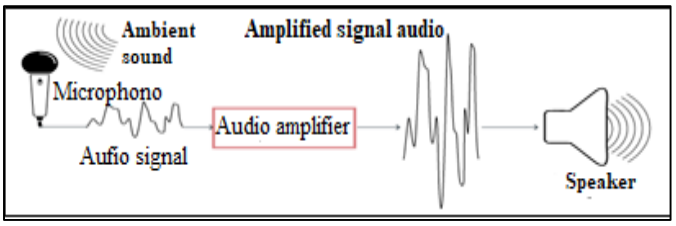

Fig. 1. Señal de audio amplificada.

B. Sistema de Procesamiento Digital de Señales

La señal de audio para ser analizada en el tiempo, frecuencia y auditivamente, debe ser captada, procesada y reproducida. Para realizar los procesos mencionados la señal debe ingresar a un sistema de procesamiento digital de señales para analizar la señal de audio. Un sistema de procesamiento digital de señales está constituido por las siguientes etapas: filtro entrada, conversión análoga digital, procesador de señales, conversión digital análoga y filtro de salida [5], tal como se muestra en la Fig. 2.

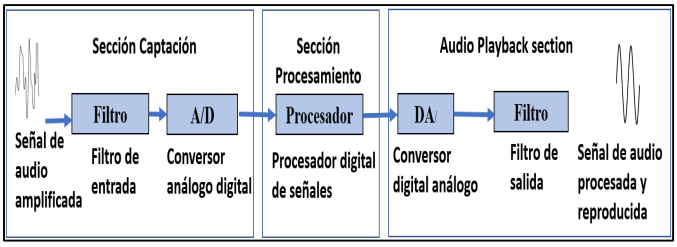

Fig. 2. Sistema de procesamiento digital de señales.

El procesamiento digital de señales es un proceso que permite el análisis de la seña o su transformación dependiendo de su aplicación, en este caso se trata del análisis de la señal de audio, para lo cual necesita de un hardware que es el sistema de procesamiento digital de señales, compuesto por:

a) *Filtro de entrada*: Se trata de un filtro pasa bajo cuya frecuencia de corte es la mitad de la frecuencia de muestreo (fs) del conversor análogo digital de la siguiente etapa, que asegura que no se produzca el aliasing de la señal procesada [6]. Es decir, que se cumpla con el teorema de muestreo que indica que la frecuencia de muestreo debe ser mayor o igual que la componente de frecuencia máxima de la señal que se está digitalizando, en este caso la señal de audio.

b) *Conversor análogo digital*: está constituida por un conversor análogo digital que tiene como función digitalizar en este caso la señal de audio. Es decir, convertir la señal analógica en señal digital, para ello se lleva a cabo tres procesos: el muestro, la cuantificación y la codificación [7].

Mediante el muestreo se captura las muestras de amplitud de la señal cada cierto tiempo T denominado tiempo de muestreo. Uno de los dos parámetros más importantes del conversor análogo digital es la frecuencia de muestreo fs que está relacionado con la velocidad de muestreo coincidiendo solo numéricamente mas no en unidades [8].

La cuantificación se produce luego del muestreo, asignándole al valor de amplitud de la muestra ya mencionada, un nivel de cuantificación predeterminado en cada conversor análogo digital.

La codificación consiste en asignar a cada nivel de cuantificación un valor binario que tiene una longitud de **b**, que es el número de bits por muestra. Así, entonces cada nivel de amplitud de la muestra capturada por el conversor análogo digital se convierte en un valor binario, este proceso se repite sucesivamente con cada muestra. Es decir, la señal se convierte en un conjunto de datos, los que son enviados a la siguiente etapa [5].

c) *Procesador de señales*: Consiste en un procesador, puede ser una computadora personal, una tarjeta especializada para procesar señales, es decir en esta etapa se ejecuta el programa que permita analizar o transformar la señal digitalizada proveniente del conversor análogo digital. Este programa implementa un algoritmo como la Transformada Rápida de Fourier para el caso del procesamiento de la señal de audio. La señal procesada y representada mediante datos (muestras), es enviada a la etapa de conversión Digital análoga.

d) *Conversor digital análogo*: La señal procesada representada mediante un conjunto de datos, es decir la señal digital es convertida a señal analógica [6]. Este proceso consiste en que cada muestra enviada al conversor digital análogo es convertida a un nivel de amplitud y así sucesivamente todas las muestras de manera continua. El resultado es que se forma una señal escalonada que tiene el patrón de forma de onda de la señal procesada y que tiene que ser enviada a la siguiente etapa o filtro de salida.

e) *Filtro de salida:* Este filtro se encarga de suavizar la señal procesada, es decir le quita el efecto escalonado. Este proceso es el resultado de aplicar un filtro pasa bajo a la señal escalonada ya mencionada, el cual elimina una serie de armónicos del espectro de frecuencia de la señal escalonada [5]. Este proceso de eliminar estos componentes indeseados, se le denomina smoothing o suavizamiento

C. Secciones del sistema de procesamiento digital de señales

El sistema debe estar constituido por las siguientes secciones:

- Sección de captación
- Sección de procesado
- Sección de reproducción

a) *Sección de captación:* Antes de ingresar al sistema de procesamiento digital, la señal de audio, debe de ser amplificada debido a que la amplitud de la señal de audio proveniente del micrófono es de amplitud muy pequeña. La amplificación debe ser de acuerdo con el requerimiento del Rango dinámico del conversor Análogo digital y además su frecuencia máxima debe ser la mitad de la frecuencia de muestreo del conversor análogo digital. Para el caso de la señal de audio le corresponde una frecuencia de muestreo de 44.1Khz, y de acuerdo con el Teorema del Muestreo la frecuencia máxima de la señal que ingresa al sistema es de 22.05Khz, se considera esta frecuencia porque es compatible con los diversos sistemas de audio. La etapa de captación está constituida por un filtro antialiasing y un conversor análogo digital con una frecuencia de muestreo de 44.1Khz. En esta etapa la señal de audio se convierte en datos denominadas muestras, las cuales serán empleadas en la etapa de procesamiento [9].

b) *Sección de procesamiento*: La señal de audio una vez convertida en datos, esta puede ser procesada mediante un programa computacional que implemente los algoritmos necesarios para su análisis graficándola en el tiempo y en frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), filtros digitales, compresión de audio entre otros. El procesamiento implica el uso de un procesador de señales, una computadora u otro equipo que permita que se ejecute el programa necesario para el procesamiento de la señal.

c) *Sección de reproducción:* Luego de ser procesada la señal de audio como un conjunto de datos que la representan, esta es reproducida mediante un conversor digital análogo y un filtro reconstructor o smoothing. Luego, la señal es amplificada para ser enviada a un parlante o audífono. El conversor digital análogo convierte la señal representada en datos a señal analógica. La señal que sale del conversor tiene un tiempo de establecimiento que tiene la misma duración que el periodo de muestreo, y presenta un circuito interno de muestreo y retención de orden zero que evita el glitch en el cambio de nivel de salida del conversor. Luego una vez que la señal sale del conversor es ingresada a un filtro de reconstructor que elimina los armónicos que le dan el efecto escalonado a la señal a la salida del conversor digital análogo.

D. La Transformada Rápida de Fourier

Este algoritmo permite representar en frecuencia una señal digitalizada constituida por un conjunto de datos que representan a la señal original [10]. La Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo que realiza lo mismo que la Transformada Discreta de Fourier, pero con menor cantidad de operaciones, por tanto, su cálculo se realiza en menor tiempo [11]. Para graficar el espectro de frecuencias de la señal de ruido se calcula el módulo de la transformada rápida de la señal elevada al cuadrado y divida entre el número de muestras de la señal procesada, medida en Watts/Hertz que es la unidad de la densidad de potencia espectral [6]. A continuación, se presenta un ejemplo de la aplicación de la FFT para una señal N=4 en la Fig. 3.

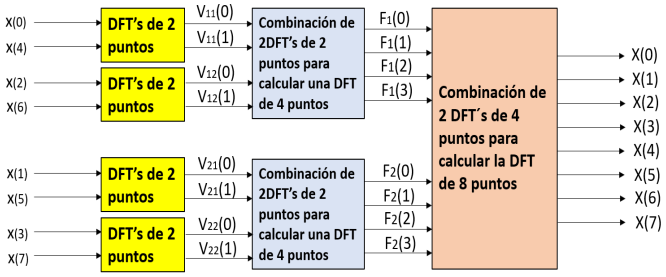

Fig. 3. Esquema de la FFT para bloques de N=4

TABLA I

Bit reversa

Order of signal samples before Reverse Bit	Order of FFT inputs with Reverse Bit
00 (0)	00 (0)
01 (1)	10 (2)
10 (2)	01 (1)
11 (3)	11 (3)

Las entradas obtenidas en la Tabla I son ubicadas en el diagrama de la Fig. 4

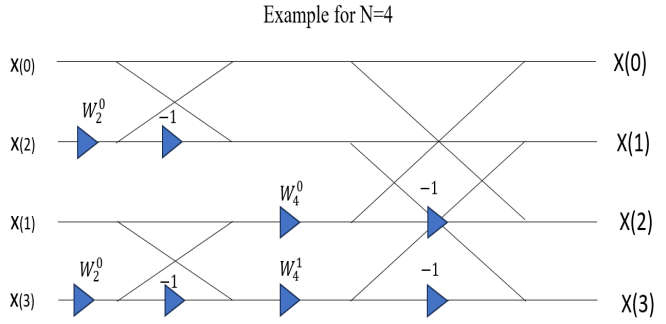

Fig. 4. Diagrama de Butterfly

Performing the respective development if: $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$

$X(0) = x(0) + W_2^0 x(2) + W_4^0 x(1) + W_2^0 W_4^0 x(3)$

$X(1) = x(0) - W_2^0 x(2) + W_4^0 x(1) - W_2^0 W_4^0 x(3)$

$X(0) = x(0) + W_2^0 x(2) - W_4^0 x(1) + W_2^0 W_4^0 x(3)$

$X(0) = x(0) + W_2^0 x(2) - W_4^0 x(1) - W_2^0 W_4^0 x(3)$

Where: N is the number of samples multiplied by 2^n

Fig. 5. Obtención de las salidas del diagrama de Butterfly.

III. METODOLOGÍA

Antes de presentar el experimento, se debe indicar que las mediciones de los niveles de ruido de fuga de agua se realizan en la parte de provisión de agua que corresponde al lado de la empresa de servicio de agua como se presenta en la Fig. 6. El lado de la empresa de servicio se divide en tres secciones: caja, línea y corporación. La sección de caja donde se encuentra el medidor donde las fugas de agua se detectan rápidamente y se reparan. La sección de línea es en donde se produce el 85% de las fugas de agua tal; esta sección tiene una longitud de 12m y profundidad de 2m y el tubo de PVC es de ½ pulgada y la medición de la señal se realiza tal como presenta en la Figura 3. Luego, la sección de corporación está constituido por la tubería matriz de agua de la cual se deriva un tubo de ½ pulgada para la conexión domiciliaria, en este punto se realiza la medición del sonido de fuga de agua que corresponde a esta sección tal como se presenta en la Fig. 6.

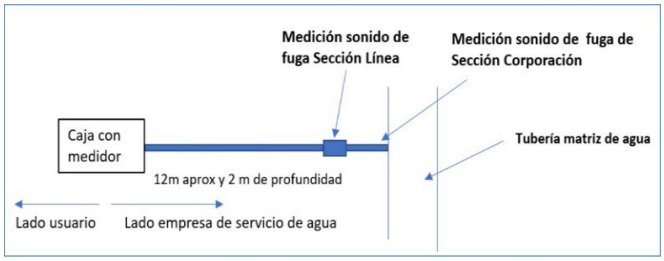

Fig. 6. Puntos de las mediciones de las secciones del servicio de agua potable.

Para obtener los audios analizados se emplean unas sondas que contienen un micrófono, las que se conectan al auricular del operario, pero que en lugar de conectarlo al auricular se conecta a un smartphone que graban con una frecuencia de 44.1Khz, que es la frecuencia que se considera para fines del procesamiento de la señal. La grabación de la señal se puede realizar con una Tablet, laptop u otro dispositivo móvil con el aplicativo que tenga a disposición para grabar la señal.

Se emplea la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que permite analizar el espectro de frecuencia de la señal de audio (ruido proveniente de la fuga de agua), analizando los niveles de amplitud que alcanza en su espectro de frecuencia. La energía presente en la señal no tiene energía finita [6] por ser caracterizada como proceso aleatorio estacionario. Esta señal tiene potencia promedio finita y por tanto es caracterizada mediante su Densidad Espectral de Potencia.

$$P\left(\frac{k}{L}\right) = \frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-i2\pi nk/L}\right|^2 = \frac{1}{L}|X(f)|^2 \qquad (1)$$

Se emplea la fórmula anterior para calcular la densidad espectral de potencia y L=N para mejorar la resolución de la representación en frecuencia. Las unidades de la densidad de potencia espectral Watts/Hertz.

El experimento se realiza primero ejecutando la simulación del sistema de procesamiento digital de señales para el proceso de captación y procesado de la señal de audio proveniente de los ruidos de fuga de agua, mediante Simulink de Matlab.

Luego se implementa los programas en Matlab que permita realizar el proceso de análisis de la señal y luego se implementó una interfaz de usuario con Matlab, para posteriormente realizar los análisis respectivos para detectar la fuga de agua.

IV. RESULTADOS

En la Figura 7 se presenta el sistema de procesamiento digital de señales que permita captar y procesar la señales para analizarlas mediante un dispositivo que permita observar el espectro de la señal de audio del ruido de fuga de agua.

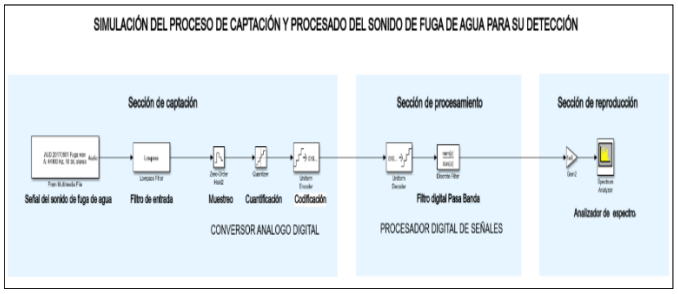

Fig. 7. Simulación del proceso de captación y procesado del sonido de fuga de agua para su detección.

El primer bloque simula la señal de ruido mediante la reproducción de la señal grabada del ruido que ha sido grabada a fs=44100Hz y resolución de16bits.

El segundo bloque es el filtro de entrada que es un filtro pasa bajo que tiene una fc=fs/2, en este caso fs=44100Hertz de octavo orden tipo elíptico, que representa al CI MAX293 con fc=2.05Khz., Rp=-0.15Db Y Rs=-78Db con un transition ratio de 1.5, es decir una frecuencia de stop band de 33.075Khz. La respuesta en frecuencia se observa en la Fig. 8.

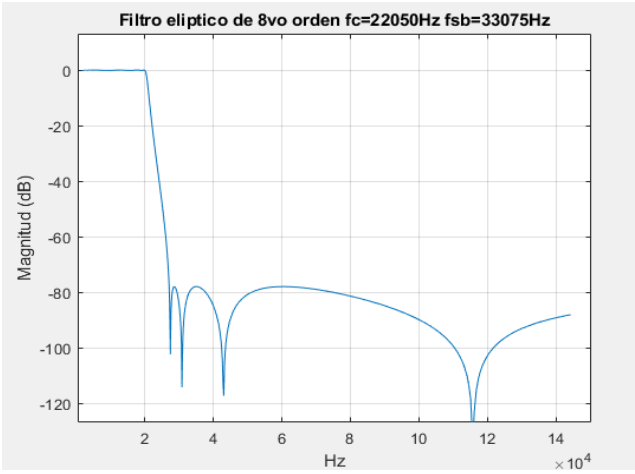

Fig. 8. Representación de la respuesta en frecuencia del filtro pasa bajo de entrada.

El tercer, cuarto y quinto bloque forman parte de la etapa del conversor análogo que tiene una fs=44100Hz y resolución de 16 bits; en esta etapa se realizan los procesos de muestreo (sample time=1/44100), cuantificación (Quantization interval=2/2^16) y codificación. El sexto y séptimo bloque, forman parte de la sección de procesamiento; donde el sexto bloque denominado uniform decoder (peak=1 y Bits=16) y luego el séptimo bloque es un filtro digital pasa banda IIR (Infinite Impulse Response) que filtra la

señal de ruido de fuga de agua entre 1000Hz y 5000Hz, el tipo de filtro es Chebyshev tipo 2 con numero de coeficientes 13, rizado (rs=0.1), frecuencia normalizadas (1000/22050,5000/22050) generándose los siguientes coeficientes:

B= [0.0121161086062078 -0.101461993193931
0.401993302731308 -1.009658435910870
1.8193655436139800 -2.522055941681730
2.799402836759840 -2.522055941681730
1.8193655436139800 -1.009658435910880
0.401993302731312 -0.101461993193932
0.0121161086062079]

A= [1.0000000000000000 -9.72988697302345
0 43.88438196474550 121.33481769298700
229.05859530977300 -311.056164690885
0 311.5713319533170 -231.94749063978300
127.37108638607800 -50.31998715289270
13.57735140031390 -2.2469270077359400
0.1725276520565270]

En este bloque de filtro, el numerator y denominator solo se coloca los valores de A y B respectivamente, pero solo los valores entre corchetes. Luego en la sección de reproducción, el bloque octavo que es gain2 (k=1e5) y finalmente el bloque noveno denominado Spectrum Analyzer cuyos parámetros están en la Fig. 9.

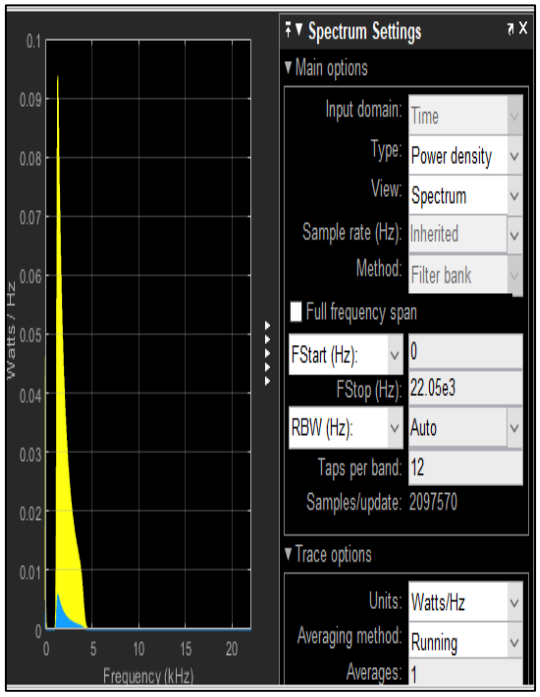

Fig. 9. Gráfica y parámetros del analizador de espectros.

Por tanto, el presente estudio implica recopilar la información necesaria para la representación en frecuencia de los sonidos de fuga de agua en los puntos de las tuberías de agua con fuga y sin fuga de agua, luego, demostrar la hipótesis y lograr los objetivos propuestos en la presente investigación.

Mediante la elaboración de un programa en Matlab se pudo procesar las señales de audio obtenidas de las secciones de Línea y Corporación. Los sonidos grabados fueron captados con una frecuencia de muestreo de 44.1Khz y 16 bits de resolución mediante una sonda. Para la elaboración del programa se tuvo que considerar que la señal tiene que ser filtrada mediante un filtro digital IIR Chebyshev 2 para filtrar la señal mediante un filtro pasa banda entre 1000Hz y 5000Hz, que es la banda de frecuencia donde se presenta los sonidos de fuga de agua, sobre las características adicionales del filtro. En la Fig. 10 y Fig. 11 se observa la respuesta gráfica de las señales de audio de las fugas de agua.

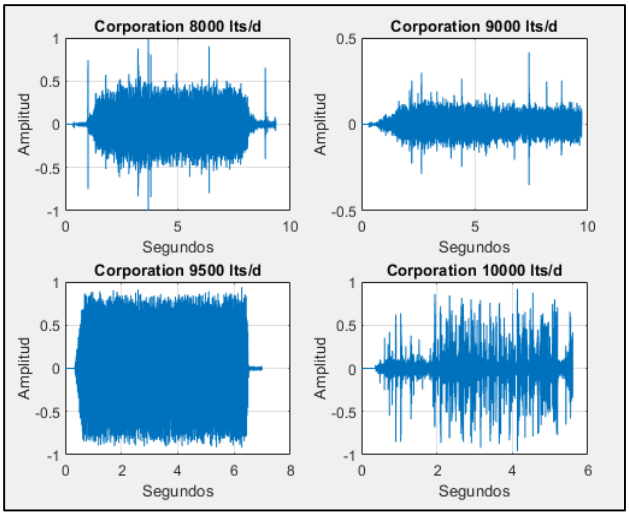

Fig.10. Señal de audio Sección Corporación

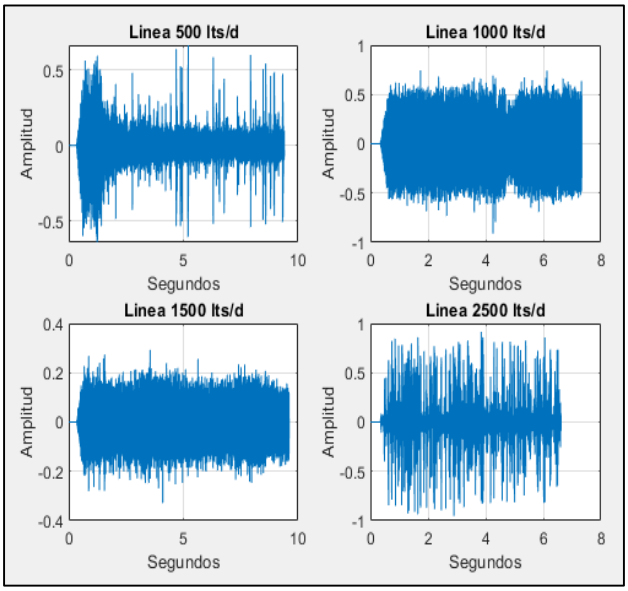

Fig.11. Señal de audio Sección de Línea

Luego se aplica a la señal filtrada la función de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), como resultado de ello se obtiene la gráfica de la señal de Densidad Espectral de Potencia (w/Hz) versus la frecuencia (Hertz). Para detectar la presencia del ruido se ha fijado un umbral de 0.2W/Hz en la banda de frecuencias entre 1000Hz y 5000Hz.

En la Fig. 12 se observa los espectros de frecuencia de las señales de audio de fuga de agua de la Sección de Corporación a diferentes caudales del punto de captación.

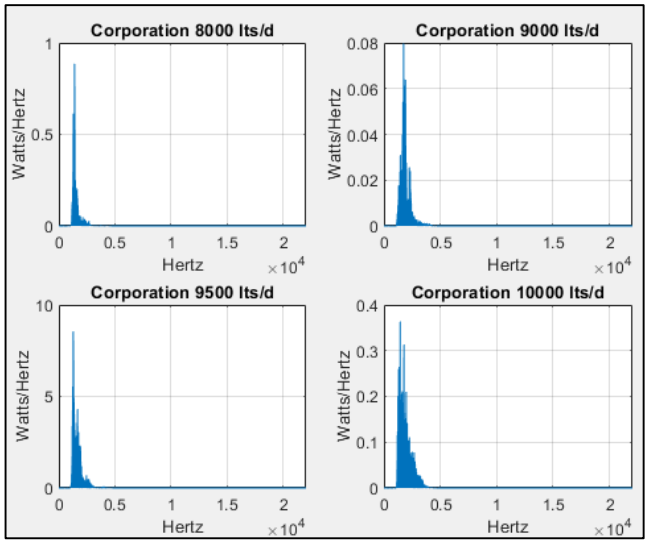

Fig. 12. Gráficos de los espectros de frecuencia de la sección corporación.

En la Figura 13 se observa los espectros de frecuencia de las señales de audio de fuga de agua de la Sección de Línea a diferentes caudales del punto de captación.

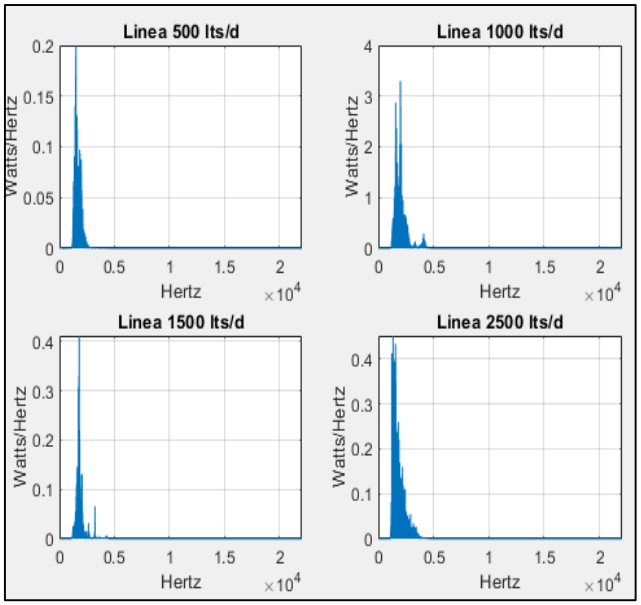

Fig. 13. Gráficas del espectro de frecuencia de la Sección de Línea.

Por otro lado, en el gráfico de la izquierda de la Fig. 10, se observa una señal de audio de fuga de agua de la sección corporación antes de ser reparada y observamos que el nivel de densidad espectral de potencia supera largamente el umbral de 0.02 W/Hertz confirmándose la presencia de fuga de agua; además está en la banda de 1000Hz y 5000Hz que corresponde a las señales de audio de fuga de agua.

En el gráfico de la derecha de la Fig. 14, se observa el espectro de la señal de audio con ruido luego de ser reparada la fuga de agua de la sección corporación y se constató que no había fuga en dicha sección cuya densidad espectral no alcanza el umbral de 0.02 W/Hertz.

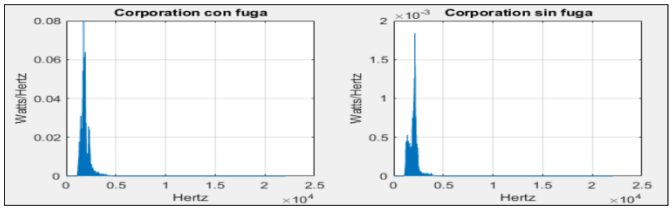

Fig. 14. Gráficas de los espectros de frecuencia sin fuga y con fuga de agua.

A partir del programa desarrollado para el análisis de la señal de audio de fuga de agua, se implementó una interfaz gráfica para el usuario, la que se presenta en la Fig. 15.

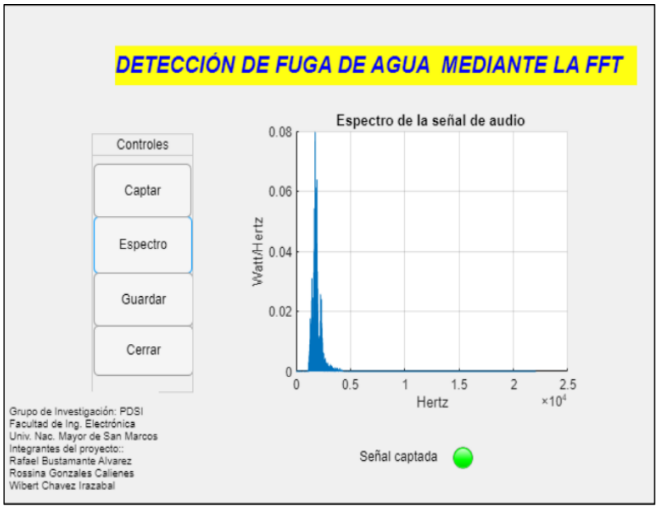

Fig. 15. Interfaz gráfica del Proyecto.

La interfaz tiene por finalidad facilitar al usuario no tener que entrenar el oído para poder detectar una fuga de agua, sino simplemente observar que el ruido sobrepase los 0.02W/Hertz en la gráfica. Luego adjuntamos el código fuente elaborado en lenguaje de Matlab para graficar la señal de audio y poder analizarla.

```
% GRAFICA DEL ESPECTRO DE LA SEÑAL DE AUDIO DE FUGA DE AGUA
% AUTOR: RAFAEL BUSTAMANTE ALVAREZ
%------------------------------
clear all;
close all;
[x1,Fs1] =audioread('AUD 20170601 sin Fuga.wav');
r1=size(x1);
N=r1(1);
k=0:N-1;% Asignación de los números a cada muestra
hertz=k*(Fs1/N);% Valor de omega intervalo por cada muestra
%=======================================
%Uso del filtro digital chebyshev tipo 2 pasa banda
%para limitar la señal de audio entre 1000Hz y 5000Hz
%se generan 13 coeficientes =2x6+1
[B A]=cheby2(6,-20*log10(0.1),[1000/22050,5000/22050]);
```

```
y1=filter(B,A,x1);
%============================
% Se calcula la Densidad Espectral de Potencia
% y se grafica el espectro de frecuencias
y=(abs(fft(y1)).^2)/N;% Calculo de la densidad espectral de potencia
plot(hertz(1:N/2),y(1:N/2));
title('Corporation sin fuga');
xlabel('Hertz');
ylabel('Watts/Hertz');
grid;
```

Mediante la simulación realizada, se observa el funcionamiento del sistema de procesamiento digital de señales para la captación de la señal a una frecuencia de muestreo de 44100Hz y verificando el conversor análogo Digital, este responde a la frecuencia de muestreo, y se verifica en el bloque Zero Order Hold tsample time = 1/44100 que es el periodo de muestreo. Luego, 16bits por muestra esto se verifica en el proceso de cuantificación en el que se indica 16 bits en el en el parámetro del cuantificador que es 2/(2^16) donde el exponente indica el número de bits por muestra, este parámetro se denomina escalón de cuantificación. El siguiente bloque simula la codificación a 16 bits por muestra.

A la entrada del filtro digital pasa bajo, la señal se convierte en datos a los que se el filtro Chebyshev tipo 2 pasa banda que limita la señal entre 1000Hz y 5000Hz, lo cual finalmente se verificó a la salida del sistema en el Analizador de Espectros, donde se refleja claramente la limitación de la frecuencia entre 1000Hz y 5000Hz, lo cual se observa en la figura 5, y los niveles de la señal alcanzados que para el caso del experimento de una señal que indica fuga de agua, ésta sobrepasa el umbral de 0.02W/Hz de densidad espectral de potencia.

Al analizar las gráficas de las señales de la Fig. 12 correspondiente a la sección de corporación, medido en el mismo punto, pero variando el caudal del agua, se observa que el nivel de densidad espectral de potencia del ruido de fuga de agua varía y en todos los casos supera el umbral de 0.02W/Hertz. También se observa en los gráficos de la Fig. 13 de la sección de Línea, que a medida que se incrementa el caudal, el nivel de densidad espectral de potencia varía y el ruido tiene ligeras variaciones, siempre dentro de la banda de 1000Hz a 5000Hz, y en cuanto al umbral de 0.02W/Hz, en todos los gráficos se sobrepasa este valor. Con relación a la Figura 8, el gráfico de la izquierda que representa el sonido sin fuga de agua presenta un nivel de densidad espectral de potencia menor a 0.02W/Hz (fuga de agua reparada), mientras que el gráfico de la derecha representa el espectro de sonido con fuga de agua, gráfico que supera el nivel de umbral de 0.02W/Hz. En esta situación los trabajadores del servicio realizan su labor usando sondas conectadas a un equipo con audífono para escuchar el ruido de fuga de agua, para lo cual el operario debe tener un oído entrenado, pero con la interfaz presentada en la Fig. 15, no será necesario entrenar el oído para detectar una fuga agua en la sección corporación o en la sección de Línea.

V. Conclusiones

Usando la FFT es posible detectar fugas de agua analizando el espectro de frecuencia del sonido que producen las fugas de agua no visibles en las tuberías. Los sonidos de las fugas de agua varían con el caudal de agua en las tuberías y por tanto la interfaz gráfica es de gran utilidad.

Referencias

[1] L. Zijia y G. Min, «Real - Time Spectrum Analyzer Light,» Kungsbäcksvägen - Suecia, 2011.

[2] D. Palestina, «Interfaz gráfica para el anáilsis en el dominio temporal y frecuencia de señales de audio en tiempo real,» Culhuacan-Mexico, 2013.

[3] L. Xiangyu y J. Chunguang, «Building a simple spectrum analyzer with dspic30F4013,» Kungsbäcksvägen - Suecia, 2011.

[4] UNED, «Cursos libres de UNED,» 2023. [En línea]. Available: http://ocw.innova.uned.es/mmm3/audio_digital/contenidos/pdf/La_senal_de_audio.pdf.

[5] S. Mitra, Signals processing, McGraw-Hill, 2010.

[6] J. Proakis y D. Manolakis, Tratamiento digital de señales, Madrid: Prentice Hall, 1998.

[7] R. Bustamante, Diseño de una interfaz para análisis espectral, monitoreo, adquisición, grabación y reproduccion de señales por computadosa, Lima - Peru: Universida Nacional Mayor de San Marcos, 1998.

[8] A. Oppenheim, Señales y Sistemas, España: Prentice Hall, 2014.

[9] S. Soliman, Señales y Sistemas, Prentice Hall, 1999.

[10] J. Briceño, Principio de las Comunicaciones, Merida: Universidad de los Andes, 2012.

[11] C. Dorcey, «FFT-Based Spectrum Analysis using a digital signal processor,» California, 2001.

Conflicto de intereses / Competing interests:
Los autores no incurren en conflictos de intereses.
Rol de los autores / Authors Roles:
Rafael Bustamante Alvarez: Conceptualización, investigación, escritura-preparación del borrador original,
Wilbert Chávez Irazábal: Redacción-revisión y edición.
Rossina Isabel Gonzales Calienes: Programación en Matlab, pruebas y resultados
Fuentes de financiamiento / Funding:
Esta investigación se realizó con el financiamiento de los autores.
Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:
Los autores declaran no haber violado u omitido normas éticas o legales al realizar la investigación.